

THÈSE

présentée à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Noël MALVACHE

Ingénieur E.S.E.O.



Titre de la thèse :

**ANALYSE CORRÉLATIVE DES SYSTÈMES
VISUEL ET MANUEL
ET IDENTIFICATION DE L'OPÉRATEUR HUMAIN**

Soutenue le 22 Avril 1970, devant la Commission d'examen :

Messieurs : M. MORIAMEZ, Président
P. VIDAL, Rapporteur
F. LAURENT, Examineur

J. LAGASSE, Examineur
G. MILBLED, Examineur
J.C. RAOULT, Examineur

A la mémoire de mon Père

A ma femme

A ma mère

A mes parents *et* beaux parents

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué aux laboratoires de physiologie de la Faculté de Médecine et d'Automatique de la Faculté des Sciences.

Avant tout, nous tenons particulièrement à remercier Monsieur le Professeur J. LAGASSE, Directeur du laboratoire d'Automatique et de ses applications spatiales du C.H.R.S, d'avoir bien voulu accepter d'être au sein de ce jury, et nous voudrions qu'il trouve ici, l'expression de notre profonde considération.

Nous sommes honorés également de la présence de Monsieur le Professeur MORIAMEZ qui a accepté de présider notre jury et nous lui exprimons notre profonde gratitude pour l'intérêt qu'il nous a toujours témoigné.

Notre plus grande reconnaissance s'adresse à Monsieur le Professeur VIDAL qui nous a formés, aidés et dirigés dans l'élaboration de ce travail. Ses nombreux conseils ont été à la source de bien des orientations de ce mémoire, et l'admiration que lui portent ses chercheurs, l'ampleur et le dynamisme de ses conceptions ont fait de la Bionique une nouvelle science. Qu'il trouve ici l'expression de nos plus grands remerciements et de notre plus vive gratitude.

Monsieur le Professeur G. MILBLED nous a grandement honorés en acceptant tout au long de ce travail de donner ses précieux conseils et en nous permettant d'effectuer nos recherches dans son laboratoire. Sa sympathie envers les hommes de Sciences, ses qualités humaines, sa rigueur scientifique et son souci constant de perfection ont toujours été pour nous un sujet d'admiration.

Nous adressons à Monsieur F. LAURENT, Maître de Conférence, notre reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour sa présence dans notre jury.

Nous sommes également très honorés de la présence, dans ce jury de thèse, de Monsieur J.C. RAOULT, Docteur ès-Sciences, dont l'expérience et la compétence en matière de bionique sont bien connues. Qu'il trouve ici l'expression de notre respectueux attachement.

Nous remercions tout particulièrement Monsieur le Professeur VANLERENBERGHE et Monsieur le Professeur FRANCOIS pour l'intérêt constant et l'aide très précieuse qu'ils nous ont apportés dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à rendre hommage à Monsieur G. DHEDIN, Docteur en Médecine, qui, par sa formation et ses connaissances médicales, a fortement contribué à notre travail.

Qu'il nous soit encore permis de remercier Monsieur P. Menu pour ses réalisations mécaniques remarquables et toutes les personnes qui se sont aimablement prêtées à nos tests.

Enfin, nous ne saurions terminer cet avant-propos, sans exprimer notre reconnaissance à tout le personnel des deux laboratoires de physiologie et d'automatique, en particulier à ceux qui nous ont prêté leur concours, ainsi qu'à tous les collègues chercheurs.

Introduction

L'étude du comportement de l'opérateur humain lors de certaines tâches - conduite de véhicule, poste de surveillance, adaptation de l'homme au travail - conduit à envisager le rôle de diverses fonctions physiologiques - fonction du regard, équilibration, régulation du mouvement. De telles recherches ont été entreprises depuis plusieurs dizaines d'années principalement aux Etats-Unis par Mc RUER, TUSTIN, KRENDEL...

Ces travaux motivés bien souvent par des objectifs non désintéressés - amélioration des performances d'un tireur de char, conduite de missiles - se sont orientés ces dernières années vers une étude approfondie et la mise au point de modèles analytiques de l'opérateur humain réalisant certaines fonctions.

Dans cet esprit, nous allons présenter tout d'abord les résultats les plus intéressants à notre sens qui caractérisent le comportement de l'opérateur.

Mc RUER¹, étudiant un opérateur lors de tests en "compensation" c'est-à-dire ne connaissant que l'erreur entre la position du signal d'entrée (cible) et la réponse du système commandé, propose un modèle où le comportement de l'opérateur est fonction des caractéristiques du signal d'entrée. Cet asservissement apparaît donc comme non-linéaire mais il convient de signaler que, pour un signal donné, l'opérateur est un système linéaire de transmittance :

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

τ = temps de réaction variant de 0,2 à 0,5 seconde

T_3 = constante de temps musculaire

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

Le modèle proposé est schématisé figure 0.1

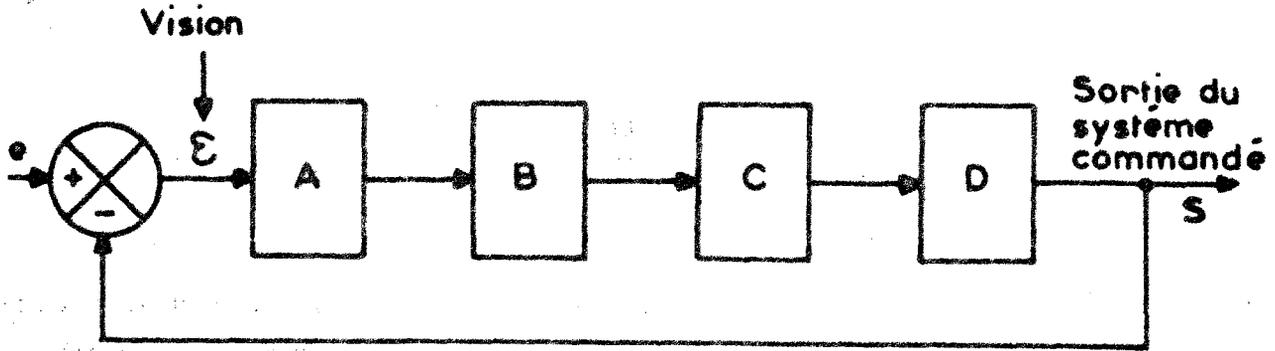


Figure 0.1 : Modèle de Mc RUER

Les signaux d'entrée sont des échelons, des sinusoïdes ou des signaux aléatoires.

- ϵ = erreur entre l'entrée et la sortie du système, visualisée sur un écran.
- A = Estimation et échantillonnage de l'observation
- B = perception et décision : ensemble prédicteur, sélecteur, quantifieur et mémoire.
- C = action motrice : reconstitution des ordres et cinématique du bras.
- D = cinématique du système commandé.

Les travaux de RAOULT² révèlent la faculté d'adaptation du sujet au système commandé (Engin) et montrent la différence des comportements en régime adapté et en régime transitoire. Tout opérateur adapté est assimilable à un système linéaire possédant un retard pur.

La transmittance $H(p)$ de l'opérateur se modifie en fonction de la dynamique du système commandé $S(p)$ et RAOULT propose, lorsque les signaux d'entrée sont harmoniques, pour fonction de transfert :

$$H(p) = K \frac{e^{-0,1p}}{p} R(p)$$

L'adaptation est parfaite lorsque $R(p) = \frac{1}{S(p)}$.

De plus, il vérifie que le comportement de l'opérateur est optimal lorsque $S(p)$ est une constante. RAOULT² a présenté le modèle de la figure 0.2.

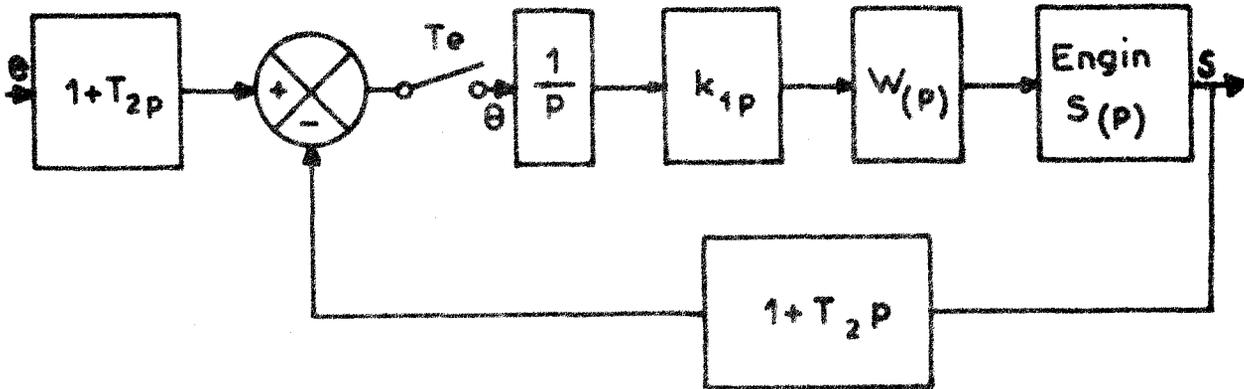


Figure 02 : modèle de RAULT

Engin : objet effectuant une opération de proportionnalité ou d'intégration simple, associé à l'homme.

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

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

$$\alpha = 1,9 \quad \text{et} \quad h = \frac{1}{23}$$

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

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

T_e, θ : échantillonneur de période $T_e = 0,4$ seconde et de durée de prise d'information $\theta = \frac{1}{5}$

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

Les travaux de SOUKHODOLSKI³ concernant l'utilisation de l'homme comme système de surveillance sont particulièrement intéressants et montrent une amélioration progressive de ses réactions. Il range le système de surveillance

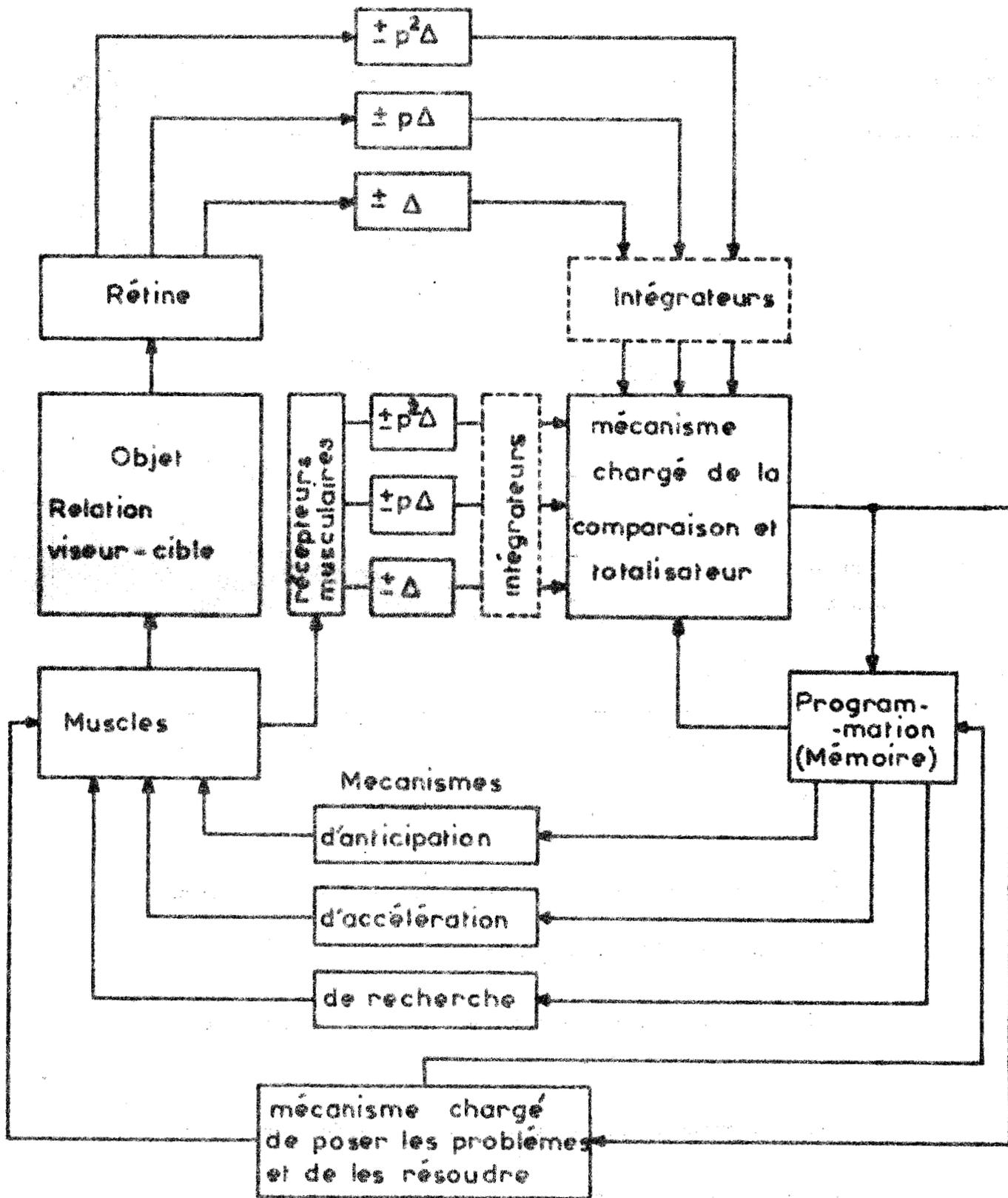


Figure 0.3. Modèle de SOUKHODOLSKI

de l'opérateur humain parmi les asservissements oscillatoires à structure variable pouvant contenir des mécanismes d'anticipation et d'accélération. En outre, cette boucle peut comporter des mécanismes de recherche et d'intégration ainsi que des chaînes correctrices agissant en fonction de l'amplitude de l'erreur et tenant compte des dérivées première et seconde de celle-ci.

SOUKHODOLSKI³ suppose les circuits afférents séparés mais ayant une sortie commune, et son modèle est schématisé figure 0.3. (Δ erreur entre la position de la cible et celle du viseur).

Ce modèle est issu d'une étude expérimentale des actions de l'homme chargé de suivre, à l'aide d'un viseur, une cible mobile dont la vitesse varie de 2,5 à 50 mm/sec.

Il convient encore de signaler les travaux de WILDE⁴ et WESTCOTT⁵ qui proposent le modèle suivant, (figure 0.4).

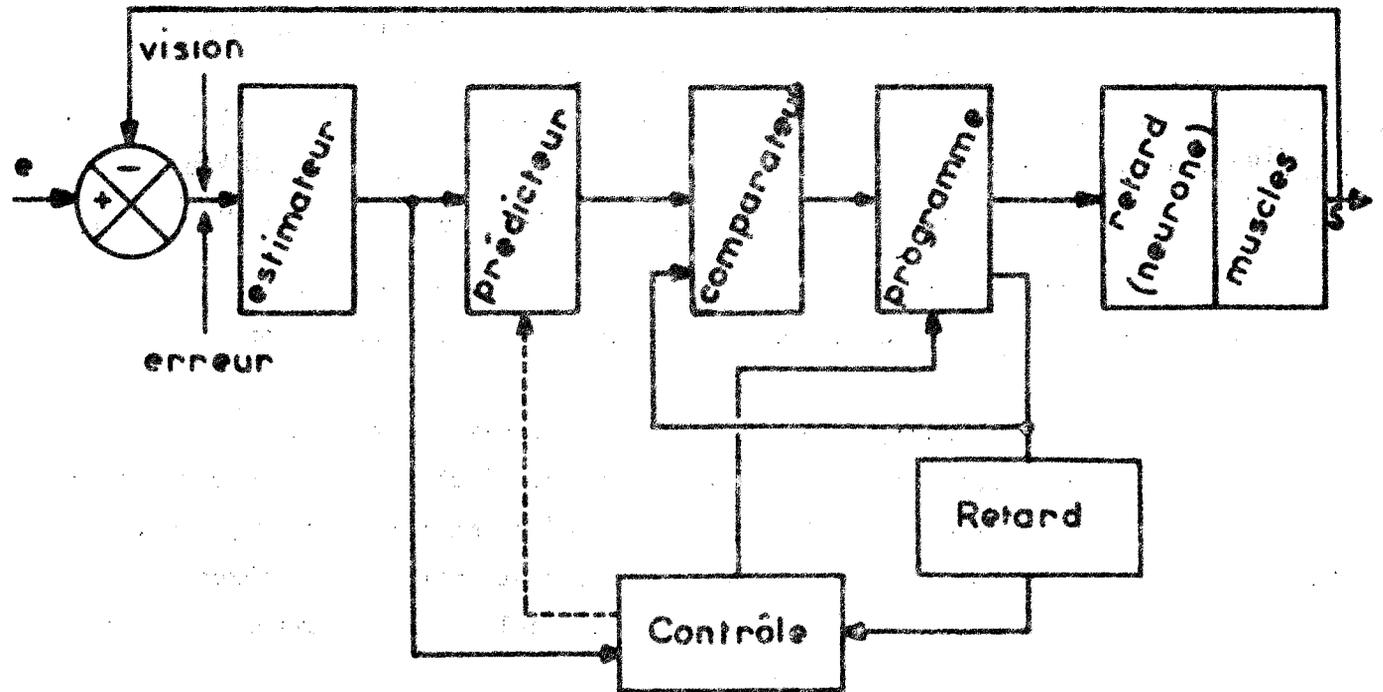


Figure 0.4. modèle de WILDE et de WESTCOTT

Mentionnons que ce dernier présente certains aspects du modèle précédent et qu'il est basé sur l'étude de l'opérateur humain dans une tâche de tracking en compensation, c'est-à-dire quand l'homme ne voit que l'erreur existant entre la position de la cible et la position de la commande manuelle. WILDE⁴ et WESTCOTT⁵ mettent en évidence le phénomène de prévision du sujet.

Plus récemment, notons les travaux de LEVISON⁶ et ELKIND⁷ qui, à partir du contrôle manuel à deux variables, ont proposé l'approximation suivante de la transmittance de l'opérateur :

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

K = gain statique

τ = retard pur, 0,15 à 0,2 seconde

T_1 = 0,1 à 0,125 et T_2 = 0,25 seconde

L'opérateur doit contrôler deux variables par l'intermédiaire de leviers commandés l'un par la main droite, l'autre par la main gauche. Les deux erreurs correspondantes sont présentées au sujet sur les deux voies d'un écran d'oscilloscope. Durant l'expérience, le mouvement de l'oeil est déterminé par l'enregistrement des potentiels biologiques produits par les muscles oculaires.

Ces quelques exemples, relevés parmi les nombreux résultats des recherches récemment effectuées, permettent d'élaborer les remarques suivantes :

- le système visuel, ou la rétine en particulier, est toujours mentionné mais une étude systématique et simultanée des mouvements de l'oeil et de la main, enregistrés d'une manière directe, n'est pas approfondie. Les corrélations existant entre les systèmes visuel et manuel n'ont pas encore été exploitées au maximum.
- Certains éléments des modèles basés sur des considérations physiologiques ne sont pas prouvés expérimentalement

- les modèles proposés sont en général issus de l'étude d'un petit nombre de sujets (quatre pour le modèle de RAOULT ², six pour le modèle de SOUKHODOLSKI ³)
- on rencontre des modèles qui résultent bien souvent d'une étude fondée sur une forme bien précise du stimulus, entraînant un comportement linéaire du système.
- L'analyse globale du système manuel répondant aux tests de forme aléatoire et de forme identique est rarement entreprise d'une manière simultanée
- L'étude du comportement de l'opérateur considéré comme autodidactique est souvent mal définie
- Les mouvements de l'opérateur sont souvent unidirectionnels.

A partir des remarques énoncées ci-dessus, on conçoit l'intérêt d'une étude simultanée et corrélative des systèmes visuel et manuel en considérant différentes formes de stimulus afin d'aboutir à un modèle unique. Le champ de recherche reste ainsi largement ouvert à des études complémentaires et nous nous proposons d'exposer notre contribution.

La fonction visuelle ayant une importance assez grande dans notre exposé, signalons qu'à partir des travaux de RASHBASS ⁸; YOUNG ⁹, STARK ¹⁰ et JOHNSON ¹¹ proposent deux modèles échantillonnés dans lesquels les deux types de mouvements continu et saccadé de l'oeil sont engendrés par un asservissement comportant dans sa chaîne directe deux mécanismes différents représentatifs de ces modes de fonctionnement et ne possédant pratiquement aucune interaction. Cependant une différence essentielle caractérise le modèle de JOHNSON présenté figure 05 : il possède une période d'échantillonnage variable en fonction de l'état du système. Dans celui de YOUNG et STARK, cet échantillonnage se fait à période constante.

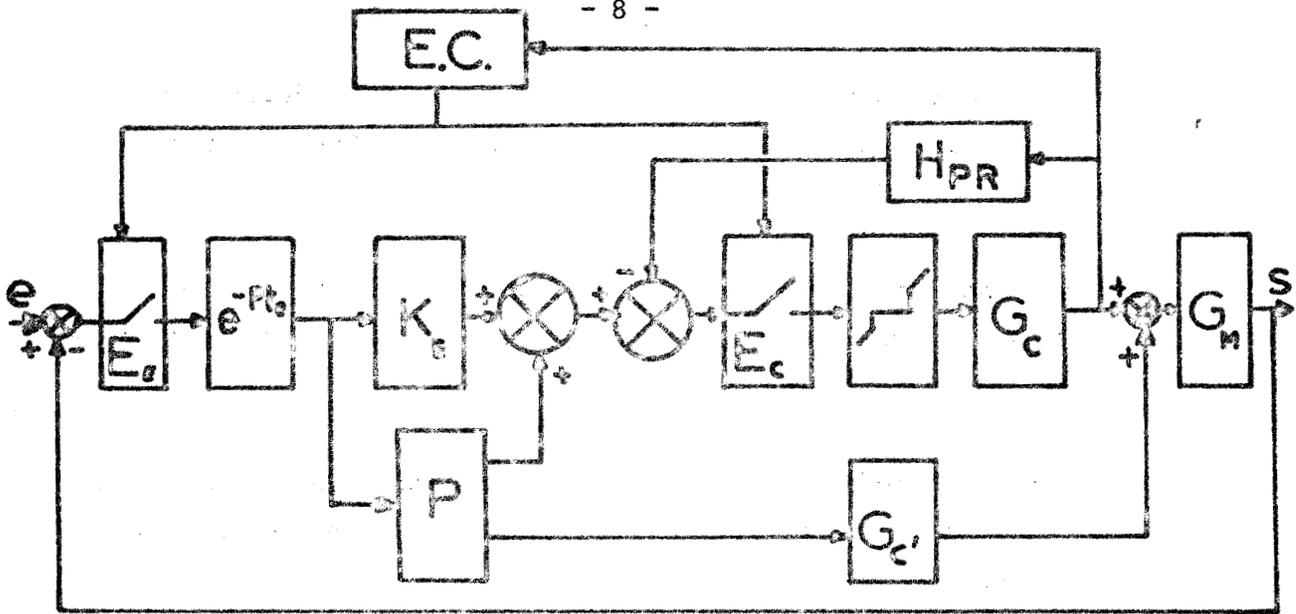


Figure 05 : modèle de JOHNSON

- E.C. Elément de contrôle des échantillonneurs, fonction de l'état du système
- E_E . Echantillonneur de l'erreur
- E_c . Echantillonneur de commande
- H_{PR} . Elément de retour proprioceptif
- P. Elément de prévision
- G'_c . Fonction de commande du même type que G_c mais possédant un limiteur de vitesse.
- E_c et G_c . Convient aux mouvements saccadés
- P et G'_c . Convient aux mouvements continus.

Il convient de noter que ce modèle est uniquement symbolique et que H_{PR} et P notamment ne sont pas mathématiquement précisés.

Ajoutons que DALLOS ¹² indique que le retard pur s'introduisant dans la fonction de transfert du système oculo-moteur, est fonction de la fréquence du signal d'entrée et que les résultats enregistrés pour des entrées aléatoires ou sinusoïdales sont différents. Les fonctions trouvées dans l'un et l'autre cas font intervenir un élément de prévision et un élément de mémoire.

Conclusions :

Notre contribution à l'analyse de l'opérateur humain consiste en l'élaboration d'un modèle unique à structure variable, basé sur une étude simultanée des systèmes visuel et manuel et dans lequel nous introduisons les notions d'apprentissage et de prédiction de l'opérateur.

Nous allons dans ce qui suit proposer un protocole expérimental permettant de mettre en évidence certaines propriétés essentielles qui caractérisent le comportement du sujet.

Chapitre I

Dispositif de mesure et protocole expérimental

Dans ce premier chapitre, nous décrirons l'ensemble de la cabine expérimentale et du dispositif de mesure dont nous disposons, ainsi que les différentes tâches effectuées par l'opérateur.

I.1. Dispositif de mesure permettant l'étude simultanée des mouvements visuels et manuels -

La méthode d'enregistrement des mouvements oculaires [13] présentée antérieurement permet l'étude du système visuel soit en poursuite, soit en compensation, soit l'une et l'autre simultanément.

Si on associe à celle-ci la poursuite manuelle, il devient difficile pour l'opérateur de distinguer sur un même écran le point cible du point suiveur. La tâche du sujet est facilitée par l'emploi de plaques semi-réfléchissantes permettant la superposition de points de formes identiques ou différentes ou de couleurs diverses.

C'est cet ensemble de détection que nous allons examiner succinctement :

1.1.1. Schéma-bloc de l'ensemble expérimental

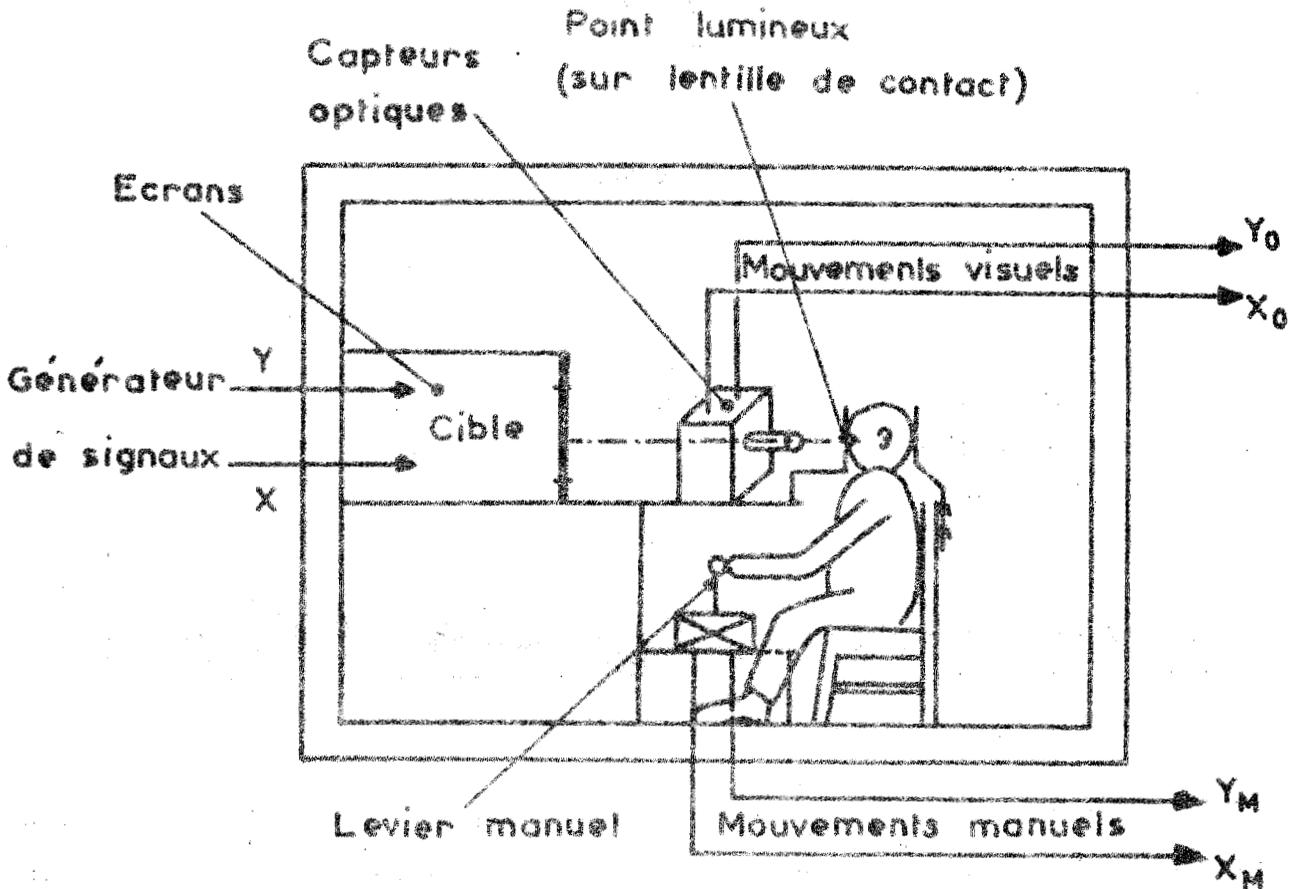


Figure 1.1. Schéma-bloc de l'ensemble expérimental

1.1.2. Dispositif visuel

La description du dispositif permettant l'enregistrement des mouvements oculaires a été effectuée dans les mémoires de Messieurs M. LECLERCQ¹³ et de G. DREDIN¹⁴.

Rappelons rapidement quelques méthodes d'études des mouvements de l'oeil et le principe du dispositif employé.

I.1.2.1. Méthodes d'études des mouvements oculaires

On peut classer les principes d'étude des mouvements oculaires en trois catégories :

- l'enregistrement des potentiels biologiques produits par les muscles oculaires lors de leurs contractions : (A. JAMPOLSKI ¹⁵, E. MARG ¹⁶, E. TAMLER ¹⁷).
- les méthodes optiques de réflexion sur la cornée en recueillant l'image d'une source lumineuse ; (L. STARK ¹⁰, L.E. JOHNSON ¹¹, P.J. DALLOS ¹²)
- l'utilisation des verres de contact, placés sur la cornée, sur lesquels une petite source lumineuse est solidaire du mouvement de l'oeil (G. DOHLMAN ¹⁸).

I.1.2.2. Méthode employée

Dans les recherches envisagées il est indispensable d'obtenir l'enregistrement simultanément des mouvements oculaires dans les deux directions du plan. Par ailleurs, l'utilisation clinique de l'appareil implique la possibilité d'enregistrer aussi bien de très faibles mouvements (nystagmus) que des mouvements d'amplitude normale.

A cet effet, le dispositif mis au point se compose de trois parties :

- une source lumineuse fixée sur le verre de contact
- un système optique permettant de transformer les mouvements de la source oculaire en variations d'intensité lumineuse dans les deux directions du plan
- un ensemble de détection photo-électronique transformant ces variations d'intensité lumineuse en variations d'intensité électrique.

Ce dispositif de détection (19.20) est schématisé figure 1.2.

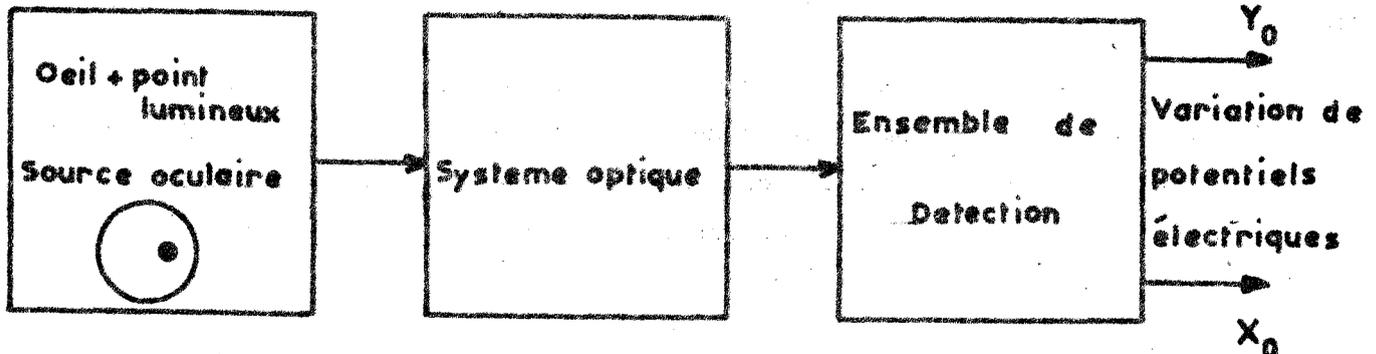


Figure 1.2. Schéma du capteur optique

La source oculaire est constituée par une lentille cornéenne de 8,5 mm de diamètre qui adhère sur l'oeil par effet ventouse ; celui-ci est suffisant pour assurer l'immobilité de la lentille par rapport à la cornée à condition de choisir un rayon de courbure interne légèrement inférieur à celui de la cornée. Les paupières sont maintenues ouvertes lors de l'expérience au moyen d'un écarteur. Sur ce verre de contact est placé un point de matière luminescente de 1 mm², protégé par une mince pellicule plastique. Une source de rayons ultra-violet, alimentée en courant continu, éclaire la source oculaire. Par ailleurs, afin de supprimer le niveau continu trop important dû aux rayons ultra-violet eux-mêmes, on interpose entre le système optique et la source lumineuse un filtre sélectif de longueur d'onde du rayonnement de la matière luminescente (4.700 Å).

Le système optique a pour but de transformer les déplacements de la source oculaire en variation d'intensité lumineuse dans les deux directions du plan. Dans ce but nous avons utilisé des atténuateurs ; "coins de Goldberg" dont le principe est basé sur une variation linéaire de l'intensité lumineuse qui les traverse en fonction de la distance du faisceau lumineux à la base du coin. L'image de la source oculaire est dédoublée par un ensemble de deux prismes accolés, à réflexion totale. Ces images se déplaçant sur les coins de Goldberg, placés à angle droit, transmettant des intensités lumineuses proportionnelles aux composantes verticale et horizontale du mouvement de la source oculaire.

Les flux lumineux correspondants sont ensuite détectés par des capteurs photo-électriques.

Cette méthode nécessite d'une part que l'appareil optique soit placé dans l'obscurité totale, en raison des risques de surintensités encourus par les photo-multiplieurs dont la sensibilité est très grande, d'autre part une fixation très rigoureuse de la tête du sujet obtenue par un appui buccal et un appui frontal.

En combinant les poursuites manuelle et visuelle, il convient en outre d'éviter au maximum non seulement les mouvements conjugués de la tête et des yeux mais encore les mouvements conjugués de la main et de la tête qui deviennent importants lors d'un stimulus se déroulant à grande vitesse. Aussi avons-nous été amenés à ajouter un appui occipital.

Ce procédé s'est avéré parfois insuffisant quand la poursuite manuelle dépassait une vitesse de 300 mm/seconde. Toutefois pour ce dernier test le mouvement de l'oeil est inexistant, et cette objection n'a pas à être maintenue. (photographie 1)



Photographie 1 - Opérateur en expérimentation

Afin d'analyser l'oeil droit ou l'oeil gauche nous avons ajouté un système mécanique permettant de faire pivoter l'ensemble du capteur optique autour d'un axe fixe. Figure 1.3.

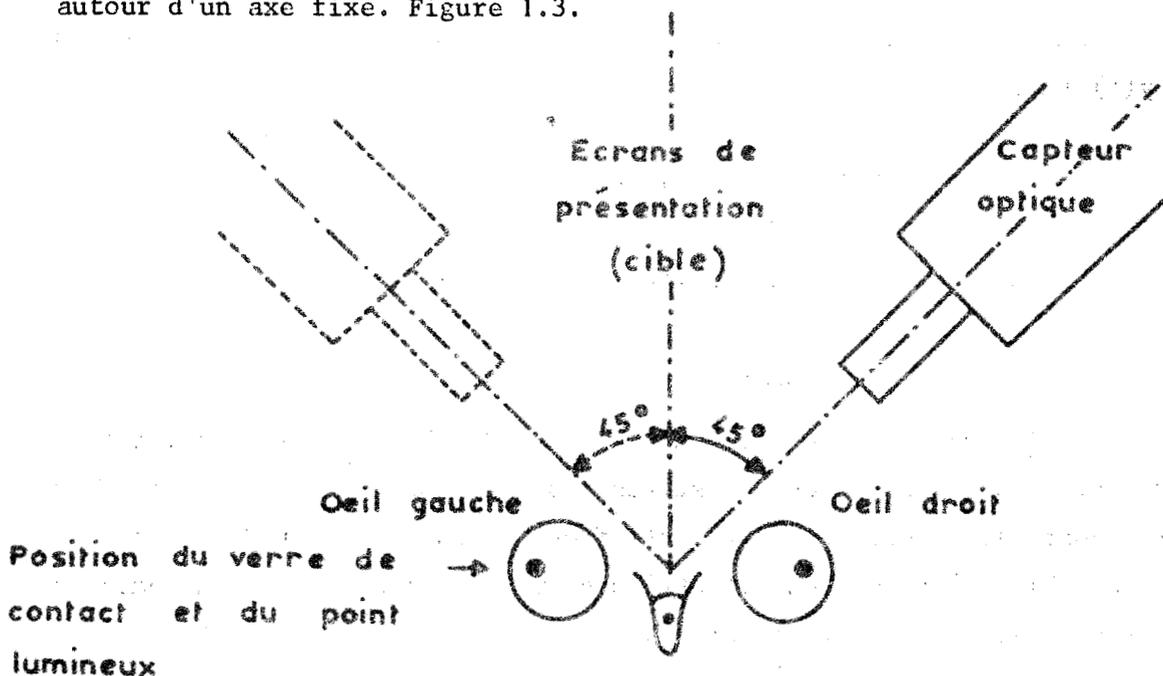


Figure 1.3. Analyse de l'oeil droit ou gauche

I.1.3. Dispositif manuel

I.1.3.1. Enregistrement des mouvements de la main

L'enregistrement des mouvements manuels nécessite un transducteur capable d'engendrer à partir du mouvement de la main une grandeur mesurable qui lui soit proportionnelle - Figure 1.4. - Les travaux de RAOULT² montrent l'importance pour le comportement de l'opérateur des caractéristiques mécaniques de la commande manuelle. Il est donc nécessaire de préciser cette détection :

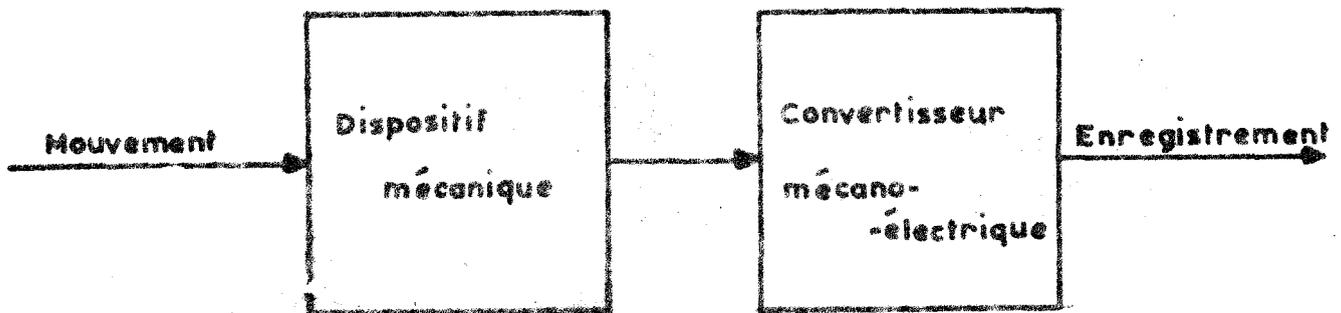


Figure 1.4. Capteur manuel

La décomposition d'un mouvement quelconque $M(t)$ en deux grandeurs $x(t)$ et $y(t)$ telles que :

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

\vec{i} et \vec{j} : vecteurs unités perpendiculaires

peut être résolue de diverses manières.

a) Un procédé basé sur l'utilisation d'une table traçante, est réalisé à partir de deux barres résistives disposées perpendiculairement, sur lesquelles sont placés des frotteurs entraînés par le mouvement de la main. Ceux-ci recueillent des tensions électriques proportionnelles à la décomposition dans le plan du mouvement $M(t)$ figure 1.5.

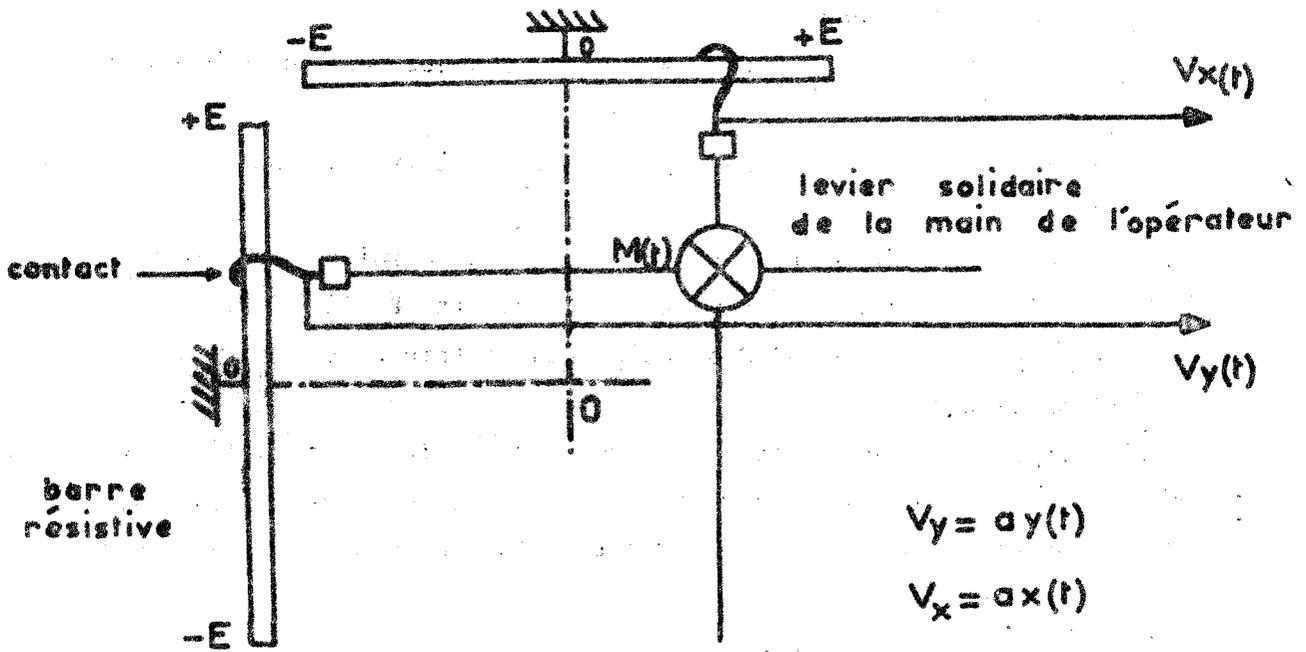


Figure 1.5. Principe basé sur l'utilisation d'une table traçante

Bien que ce système soit parfaitement linéaire, il possède une inertie et un frottement non négligeables.

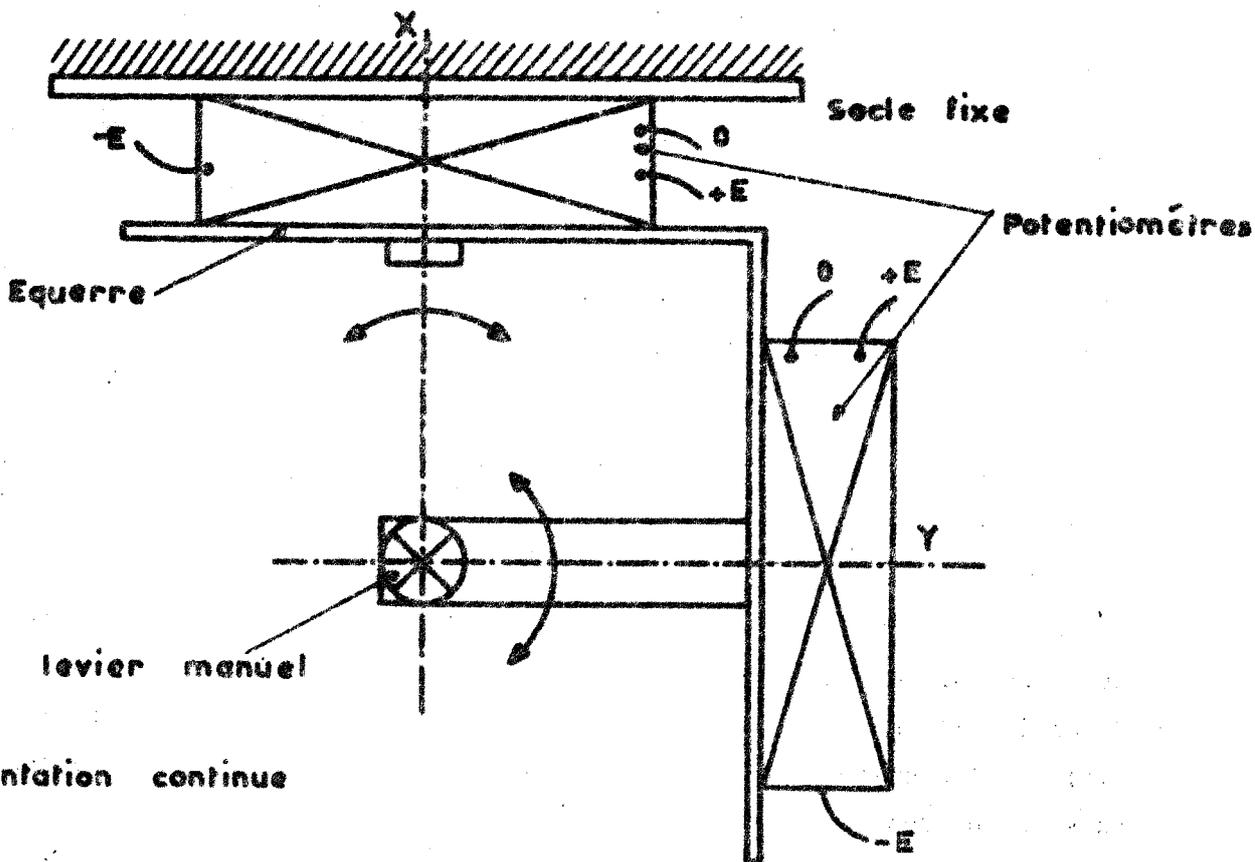
b) Mentionnons également les transducteurs fondés sur l'utilisation d'un système mécanique ayant la forme d'un parallélogramme, tel le pantographe, et transformant un mouvement $M(t)$ en deux composantes $x(t)$ et $y(t)$ par l'intermédiaire de barres de cuivre, ou de condensateurs ou d'une cuve rhéographique...

c) Un autre système plus petit, ayant moins de frottement et d'inertie est basé sur le principe du levier d'un pilote d'avion, appelé souvent "manche à balai". Il est constitué d'un levier par lequel la main transmet le mouvement $M(t)$ et d'un système mécanique permettant la décomposition de $M(t)$ suivant deux axes de coordonnées $x(t)$ et $y(t)$.

Il est facile d'incorporer dans cette mécanique deux petits potentiomètres à point référentiel, alimentés par une tension continue et placés perpendiculairement entre-eux. On peut alors transformer les coordonnées du mouvement manuel en tensions V_x et V_y proportionnelles à celles-ci, elles servent alors à commander les coordonnées du point suiveur sur l'écran - figure 1.6. -

Nous avons choisi ce dernier principe pour les raisons suivantes :

- souplesse de commande
- facilité d'intercaler dans cette mécanique des potentiomètres miniatures
- étude aisée de la sensibilité du dispositif par allongement du bras de levier
- commodité d'une étude pour différentes positions du levier
- faible inertie, frottements et élasticité négligeables
- possibilité d'étude des mouvements de faibles et de grandes amplitudes
- facilité d'augmenter le nombre de variables de commande au moyen d'un seul levier ; par exemple les mouvements droite-gauche, avant-arrière, bas-haut, rotation (étude de l'opérateur humain en système multivariable).



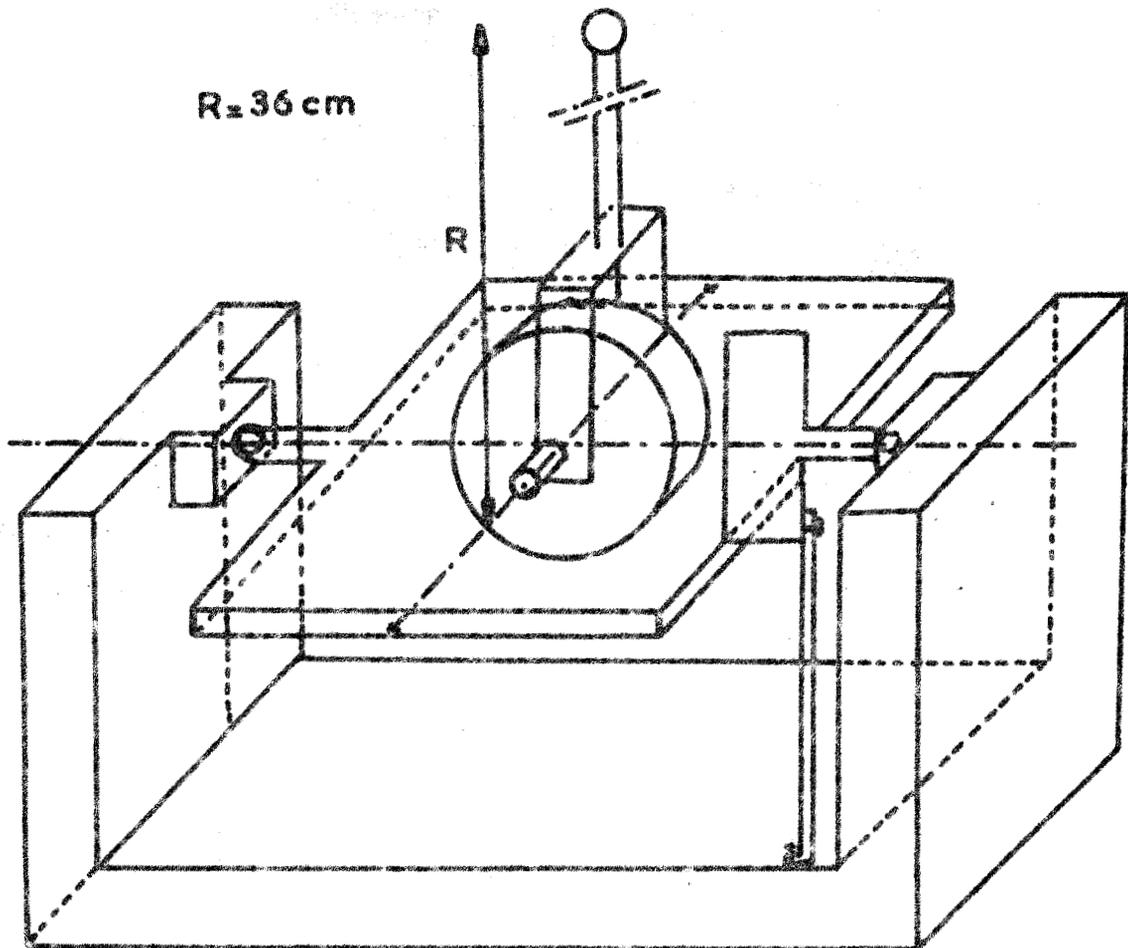
E = alimentation continue

Figure 1.6. Principe basé sur le levier d'un pilote
L'équerre est solidaire du corps du potentiomètre Y et de l'axe mobile (curseur) du potentiomètre X.

I.1.3.2. Système utilisé

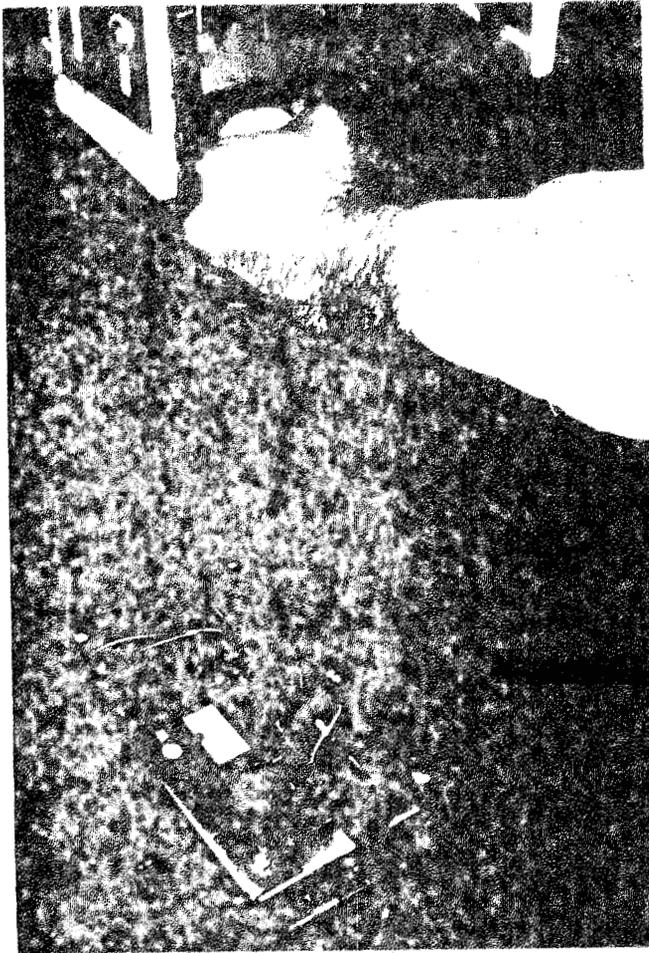
Le principe de la réalisation mentionnée précédemment peut être amélioré par un système pivotant sur des billes légèrement encastrées dans un socle fixe.

On peut alors estimer que le système mécanique possède une inertie et des frottements très négligeables et aucune élasticité. Nous présentons (figure 1.7. et photographie 2), le dispositif réalisé. Nous avons prévu la possibilité de mettre le levier soit dans la position verticale, soit dans la position horizontale, à l'aide d'un dispositif mécanique très simple.



R : longueur totale du levier

Figure 1.7. Dispositif mécanique pour l'enregistrement des mouvements manuels.



Photographie 2 : Dispositif réalisé

I.1.3.3. Etude du dispositif d'enregistrement manuel

Le dispositif précédent a néanmoins un inconvénient qu'il convient de signaler : la main de l'opérateur se déplace sur une calotte sphérique de centre O alors que la cible se déplace sur un plan (celui de l'écran) (Figure 1.8.)

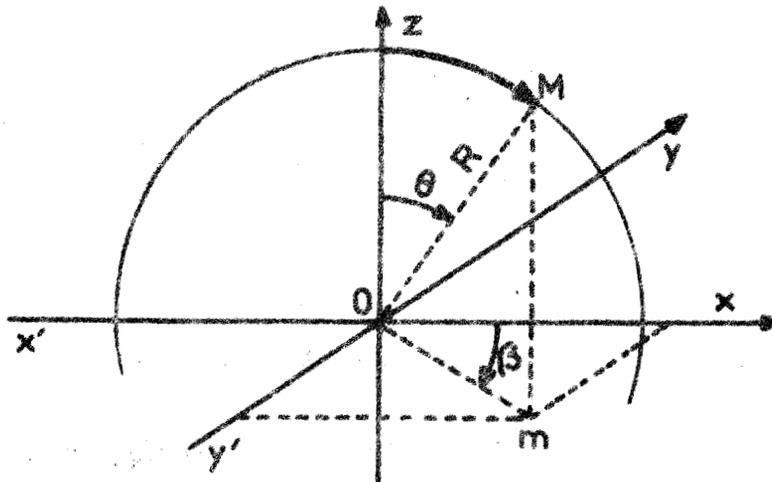


Figure 1.8. Etude du déplacement de la main

Pour un angle θ du manche à balai par rapport à l'axe vertical correspond un mouvement de la main égal à $R\theta$.

Ce mouvement dirigé suivant la direction β par rapport à l'axe $x'x$ est décomposé par le système mécanique en deux mouvements résultants sur les axes $x'x$ et $y'y'$, qui ne sont autres que les composantes du mouvement M_x et M_y

$$M_x = R\theta \cos \beta$$

$$M_y = R\theta \sin \beta$$

On a aisément :

$$x = R \sin \theta \cos \beta = R \sin \theta_x$$

$$y = R \sin \theta \sin \beta = R \sin \theta_y$$

D'où :

$$\sin \theta_x = \sin \theta \cos \beta$$

$$\sin \theta_y = \sin \theta \sin \beta$$

Cette relation est non linéaire sauf si :

$$\beta = 0 \text{ soit } \theta_x = \theta$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} \text{ soit } \theta_y = \theta$$

Nous présentons figure 1.9. le mouvement de composante verticale M_y en fonction de θ

$$M_y = R \theta \sin \beta = R \sin \beta \left[\sin \theta \right]$$

(allure des courbes identique pour M_x).

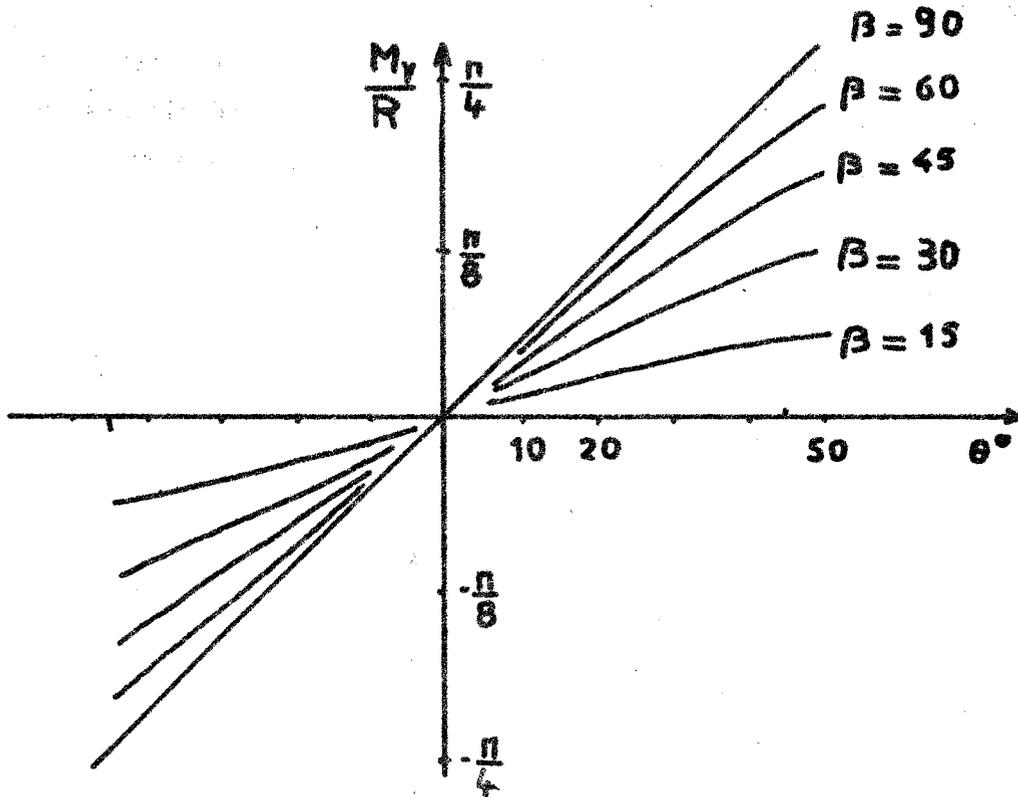


Figure 1.9. Variation de la composante verticale en fonction de l'angle θ

La linéarité du système dépend de la direction du déplacement β . Dans nos conditions expérimentales l'angle θ ne dépasse jamais $\pm 15^\circ$, et l'on peut supposer le transducteur linéaire à 1,5 % près.

Les potentiomètres utilisés ont les caractéristiques suivantes :

- résistance totale : 10 K Ω et de 2.220 spires
- linéarité 0,2 %
- couple de rotation 5 cm.g.
- masse : 80 g.

Relation entre les déplacements du point suiveur sur l'écran et les mouvements manuels

A un déplacement $M(t)$ du levier correspond une tension $V(t)$ commandant le point suiveur de l'écran. (figure 1.10), qui se décompose selon les axes en :

$$V_x = E \frac{\theta_x}{\pi}$$

$$V_y = E \frac{\theta_y}{\pi}$$

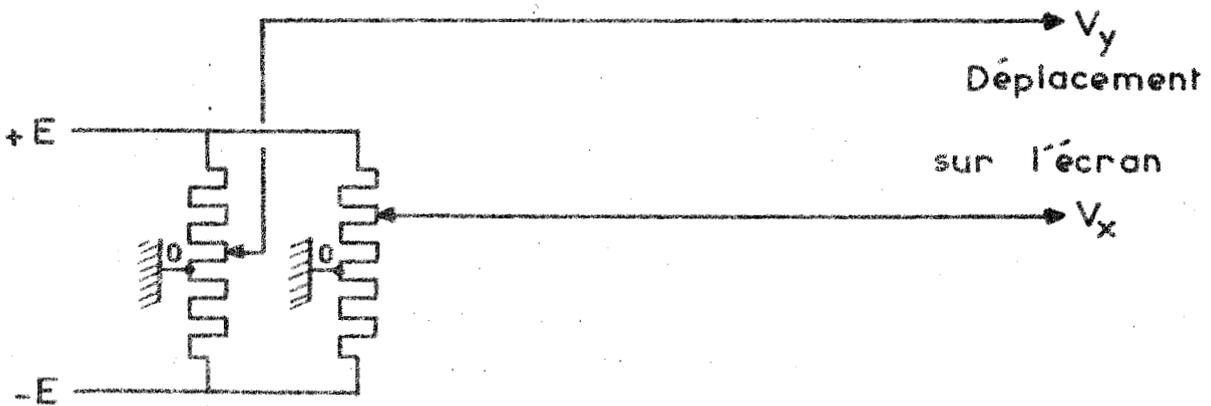


Figure 1.10. Relation mouvement-tension

Il est indispensable d'avoir une même sensibilité sur les voies horizontale et verticale de l'oscilloscope et le déplacement du point suiveur est régi par :

$$D_x = \frac{V_x}{S_x}$$

$$D_y = \frac{V_y}{S_y}$$

$S_x = S_y = S$: Sensibilité en volt/cm.

On peut donc écrire :

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \end{pmatrix} = \frac{1}{S} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \frac{E}{S\pi} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \frac{E}{S\pi R} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} = \frac{E}{S\pi r} \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix}$$

r = rayon du curseur du potentiomètre

C = déplacement du curseur

1.1.4. Ecrans de présentation des points cible et suiveur

La présentation de la cible et du point suiveur est réalisée par l'intermédiaire d'écrans d'oscilloscopes cathodiques placés à un mètre de l'opérateur.

On appelle "spot cible" le point commandé par des signaux électriques extérieurs, indépendants de l'opérateur, appliqués aux plaques de déviation de l'oscilloscope. On appelle "spot suiveur" le point commandé par l'intermédiaire de tensions proportionnelles aux composantes verticales et horizontales du déplacement du levier manuel engendré par l'opérateur. Ces tensions appliquées aux plaques horizontales et verticales de l'oscilloscope donnent à l'opérateur la possibilité de connaître à tout instant l'erreur existant entre le spot cible et le spot suiveur.

La tâche de l'opérateur consiste à faire coïncider le plus parfaitement possible les spots cible et suiveur.

L'oscilloscope bi-canon possède deux bases de temps afin que les déplacements horizontaux des spots soient indépendants. Pour que l'opérateur puisse mieux distinguer les spots, le spot cible est un point, le spot suiveur un petit cercle.

Nous indiquons figure 1.11. le schéma électrique de l'ensemble.

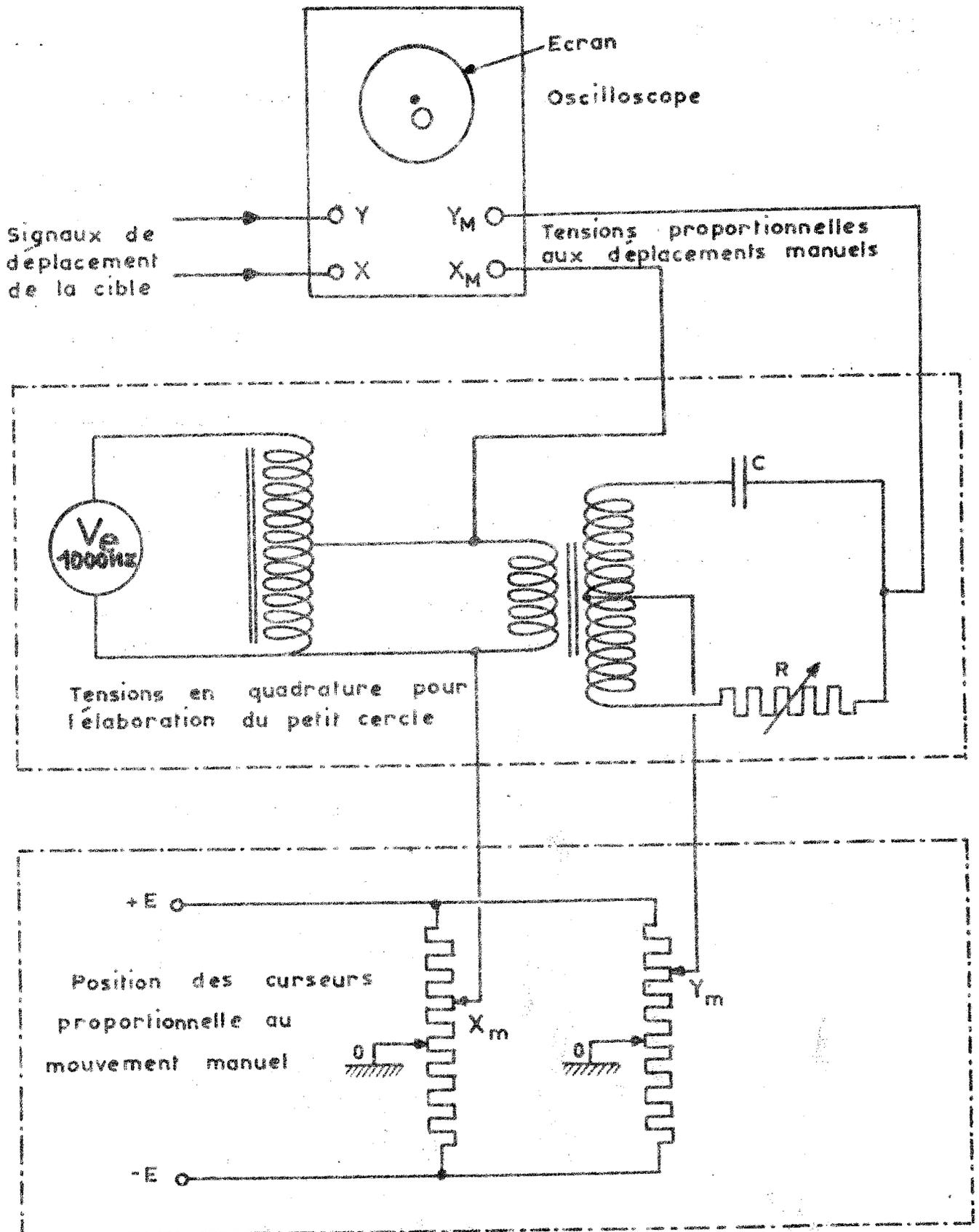


Figure 1.11. Schéma électrique réalisé

Amélioration du montage

La plupart des oscilloscopes utilisés présentent néanmoins plusieurs inconvénients :

- la hauteur de l'écran disponible est faible (voisine de 6 cm) et les deux systèmes de déviation ne se juxtaposent pas sur toute la hauteur de l'écran.

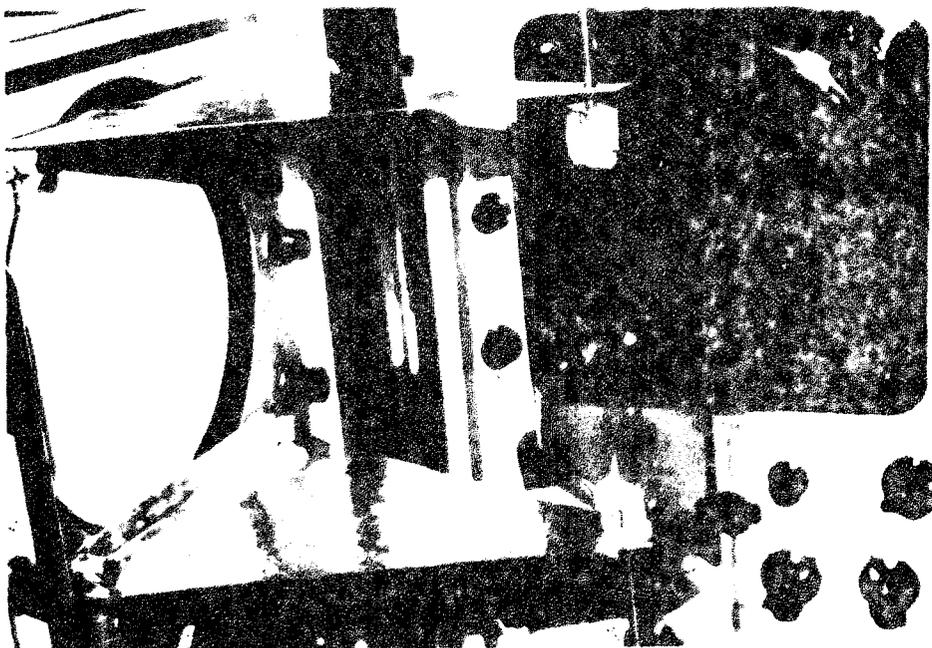
- lorsque la cible se déplace rapidement, à partir de 200 mm/sec, le déplacement du petit cercle présente l'aspect d'un "ressort" sur l'écran (rémance).

Afin d'obtenir une meilleure performance de l'opérateur en même temps qu'une diminution de sa fatigue, nous avons été amenés à utiliser deux oscilloscopes mono-canon (écran de diamètre, 15 cm) perpendiculaires placés à 45 degrés par rapport à une plaque semi-réfléchissante. Ce procédé permet la superposition des spots cible et suiveur.

Le spot cible est dans nos expériences un point de couleur verte un peu plus lumineux que le spot suiveur constitué par un point de couleur bleue.

On observe alors une nette amélioration de la fonction-poursuite du spot cible de l'opérateur pour les vitesses élevées.

Nous présentons - Photographie 3 - le dispositif d'élaboration des signaux



Photographie 3 : Présentation des signaux

Dans le but de faciliter le protocole expérimental permettant d'une part de faire pivoter le capteur optique de $\pm 45^\circ$ pour l'analyse de l'oeil droit ou gauche, d'autre part d'effectuer une étude du "tracking" manuel lorsque la cible se trouve placée dans le champs nasal ou temporal de la rétine, nous avons réalisé un dispositif mécanique déplaçant l'ensemble des oscilloscopes devant le sujet.

1.1.5. Matériel complémentaire

Outre l'appareillage déjà signalé, nous disposons pour notre étude du matériel suivant :

- un oscilloscope de contrôle afin de vérifier en permanence le déroulement de l'expérience
- un enregistreur magnétique à huit pistes utilisé pour envoyer des tests identiques à tous les sujets en vue d'une analyse statistique et pour enregistrer les réponses de l'opérateur et du modèle
- une calculatrice analogique produisant des signaux particuliers et réalisant des fonctions nécessaires à l'expérience. Cette calculatrice a été en outre utilisée pour l'élaboration du modèle.
- un compteur électronique pour mesurer le temps de réaction manuel à un stimulus lumineux
- un générateur d'échelons d'amplitude et de durée variables
- des générateurs basse fréquence.

1.2. Protocole expérimental

Tous les sujets ont été soumis aux tests suivants :

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

- insensibilisation de l'oeil à l'aide de quelques gouttes d'un anesthésique de contact.

- un court temps d'accoutumance à l'expérience afin d'éviter des effets de surprise et pour être certain que le sujet reconnaît le spot cible du spot suiveur.

- pose de l'écarteur de paupières, puis du verre de contact sur la cornée

- réglages des capteurs et positionnement du sujet c'est-à-dire : réglage du point lumineux (source oculaire) dans l'axe optique (facilité par le support de la tête, mobile dans les trois directions de l'espace) ; réglage de la position de la hauteur du fauteuil pour que l'opérateur ait le plus d'aisance possible à manoeuvrer le levier ; réglage définitif des points de fixation de la tête.

- présentation des signaux ; le temps de l'expérience étant toujours inférieur à dix minutes afin d'éviter la fatigue et une éventuelle détérioration de la cornée.

- dépose de l'écarteur de paupières et du verre de contact et instillation d'un collyre aseptisant destiné à prévenir tout risque d'infection de l'oeil.

I.2.1. Choix du protocole expérimental

Notre dispositif permet les expériences suivantes :

- Une utilisation du levier de commande manuelle en position verticale ou horizontale. Nous verrons dans le prochain chapitre que ce choix n'a pas d'importance "fonctionnelle" sur le comportement de l'opérateur mais se différencie pendant le temps d'adaptation. C'est pourquoi nous avons utilisé dans la majorité des cas, la position verticale du levier. Ce levier était placé entre les jambes du sujet.

- Choisir la combinaison oeil-main désirée. Nous verrons par la suite que le choix de l'oeil à analyser s'est révélé sans importance pour les sujets normaux considérés. Par contre le choix de la main montre des différences de comportement surtout en ce qui concerne la précision du mouvement.

- Faire varier la sensibilité de la commande manuelle, test qui s'est révélé important lors de la période d'adaptation.

- Analyser le comportement de l'opérateur en poursuite ou en compensation : cette étude servant de "définition" d'un sujet "normal" au sens "clinique". Certains opérateurs ayant beaucoup plus de difficulté à manoeuvrer en compensation (le sujet dispose d'une quantité d'informations moins grande) et les signaux recueillis en poursuite étant tout autant exploitables pour l'élaboration d'un modèle nous avons choisi pour l'étude statistique du chapitre suivant l'analyse du comportement du sujet en régime de poursuite.

1.2.2. Choix, succession et durée des stimulus

L'objet principal de nos recherches consistait en l'élaboration d'un modèle d'opérateur, et en vue de cette identification nous devions choisir des stimulus tests soit de forme simple, facilement exploitable, soit de forme plus complexe mais appropriée à une caractéristique donnée de l'opérateur. Notre choix s'est porté sur des signaux en échelons, en sinusoides, et en dents de scie répartis géométriquement suivant des trajectoires verticales, horizontales, obliques circulaires ou aléatoires.

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

- faire un nombre de tests suffisants pour s'assurer que le comportement de l'opérateur n'est plus en régime "transitoire".

- éviter (quand il ne fait pas l'objet de l'expérience) l'effet de la mémoire de l'opérateur. Il faut souligner que la présentation des signaux dans le plan offre la possibilité d'une succession de trajectoires quelconques évitant cet inconvénient car un même stimulus peut avoir des directions différentes. Rappelons que l'opérateur se trouve dans l'obscurité totale et que le temps d'expérimentation ne dure jamais plus de dix minutes. Le sujet ne distingue pas le contour de l'écran de présentation de la cible et ne voit que le spot lumineux sans références géométriques du dispositif expérimental placé devant lui. De plus la pose de l'écarteur de paupières et de la lentille de contact sur la cornée n'est pas particulièrement "agréable". Ces remarques importantes permettent de supposer que l'effet mémoire et d'anticipation du signal est fortement diminué.

Après des essais préalables nous nous sommes fixé un nombre maximal de stimulus identiques dans une direction fixe égal à deux ou trois.

1.2.3. Population étudiée

Notre étude a été effectuée sur des sujets jeunes et sains dont la moyenne d'âge est 26 ans. Les expériences ont porté sur vingt sujets féminins et quarante sujets masculins.

Conclusions :

La cabine expérimentale présentée ci-dessus permet l'étude simultanée des systèmes visuel et manuel et offre la possibilité d'explorer d'une façon fonctionnelle le comportement de l'opérateur humain soumis à des tests particuliers.

Dans le chapitre suivant nous allons exposer les résultats de nos expériences sur soixante sujets.

Chapitre II

Analyse corrélative des réponses visuelles et manuelles

Dans ce chapitre nous insisterons plus particulièrement sur les aspects fonctionnel et corrélatif existant entre les fonctions du regard et de la main ; puis au cours de tests de poursuite "oeil-main" (cherchant à réaliser une coïncidence dans le temps et dans l'espace entre leur position relative et celle de la cible) nous dégagerons quelques caractéristiques propres du mouvement. Une analyse générale des mouvements de l'oeil et de la main (sans distinguer la direction du déplacement de la cible et l'une des quatre combinaisons possibles de l'oeil droit ou gauche avec la main droite ou gauche) précèdera une étude plus particulière en fonction d'une modification du protocole expérimental (main droite ou gauche, position du levier, direction de la cible.).

II.1. Analyse des réponses visuelles et manuelles à un stimulus en "échelon"

II.1.1. Résultats expérimentaux

Dans tout ce qui suit X et Y représentent les composantes horizontale et verticale du stimulus cible, l'indice O les composantes de la réponse visuelle, l'indice M les composantes de la réponse manuelle. Sur les tracés présentés nous avons regroupé les différentes réponses en fonction de leurs composantes. De plus, les indices G et D sont réservés pour mentionner le comportement de la main ou de l'oeil gauche et de la main ou de l'oeil droit (par exemple Y. OD. MD : composantes verticales de l'oeil droit et de la main droite). En outre le temps écoulé est représenté sur les enregistrements par des "tops" toutes les secondes.

Sur les photographies n° 50. XY. OD. MD, 25. X. OD. MD, 29. Y. OD. MD, 25. Y. OD. MD, 43. XY. OG. MD et 24. Y. OD. MD on peut noter que les différentes réponses de l'opérateur sont caractérisées, en particulier par les temps de latence, de montée, d'ajustement, et que les paramètres principaux des systèmes visuel ou manuel ne sont pas indépendants (enregistrements n° 29. Y. OD. MD et 25. Y. OD. MD).

De plus, il est intéressant de constater que l'amplitude du stimulus est un élément important de la réponse du système (enregistrements n° 50. XY. OD. MD et 43. XY. OG. MD). Afin de caractériser la simultanéité entre les états d'équilibre des deux systèmes il convient en outre de déterminer l'intervalle de temps au bout duquel il y a coïncidence stable entre la main et l'oeil (figure 2.0.). Remarquons également la variation de la différence entre les temps de latence visuel et manuel (enregistrements n° 29. Y. OD. MD et 24. Y. OD. MD).

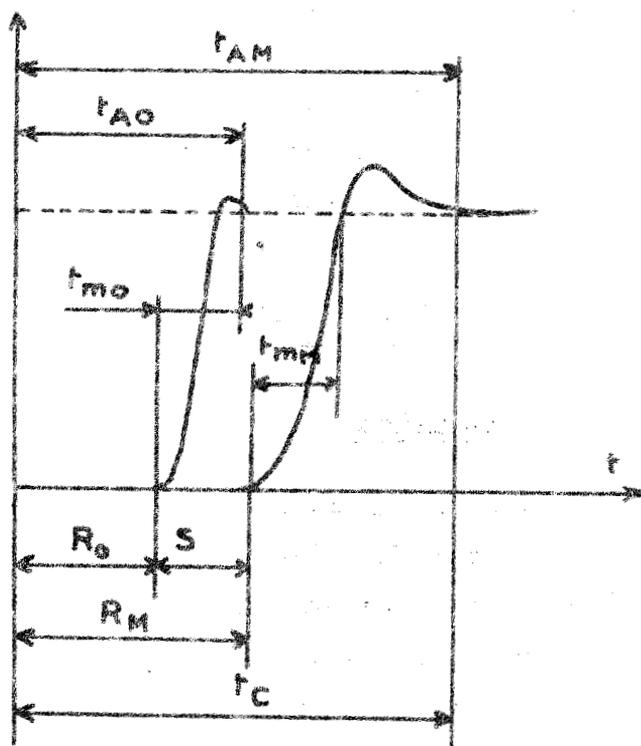
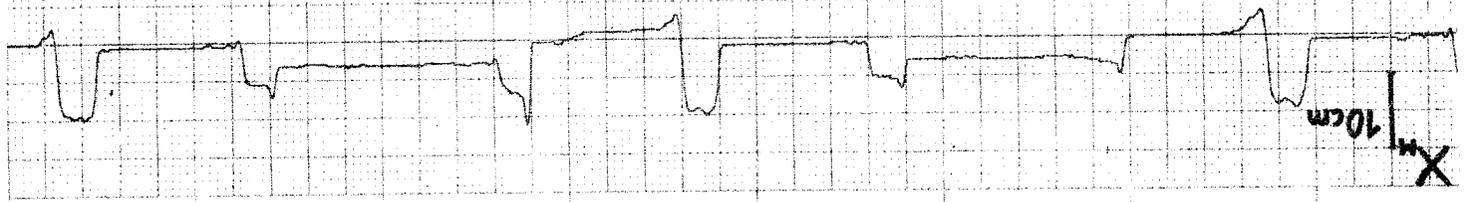
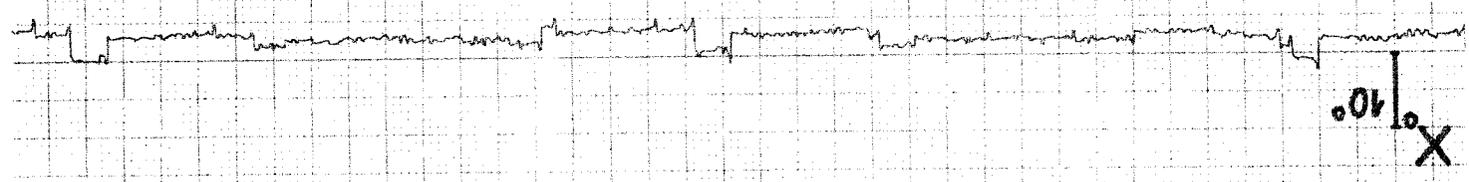


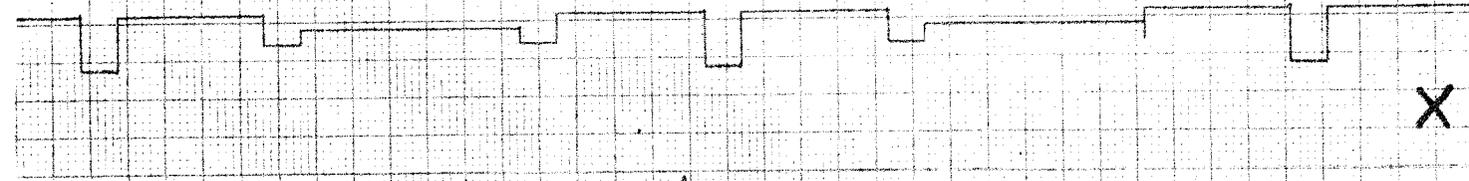
Figure 2.0. Caractéristiques des réponses à un échelon.



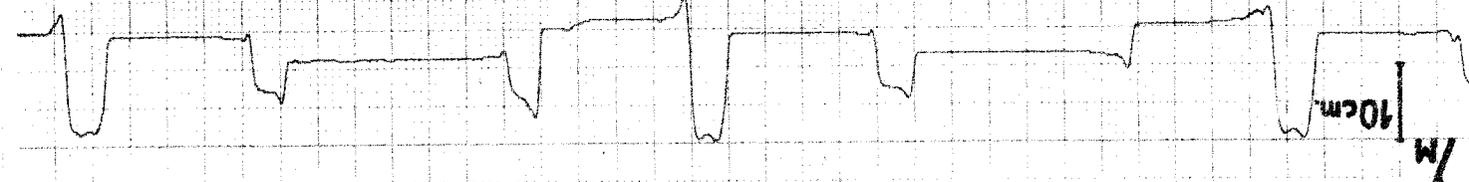
X_M 10cm



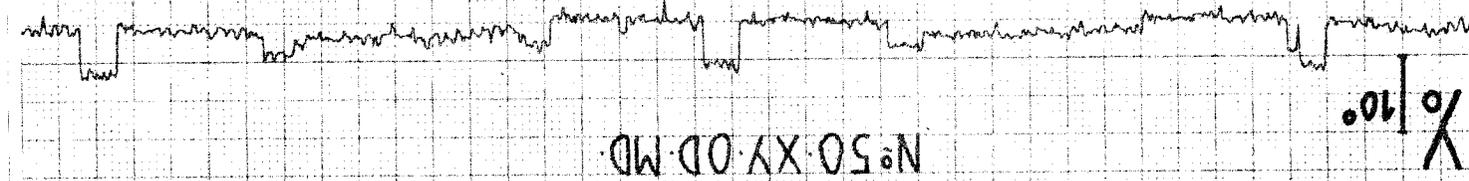
X₀ 10°



X

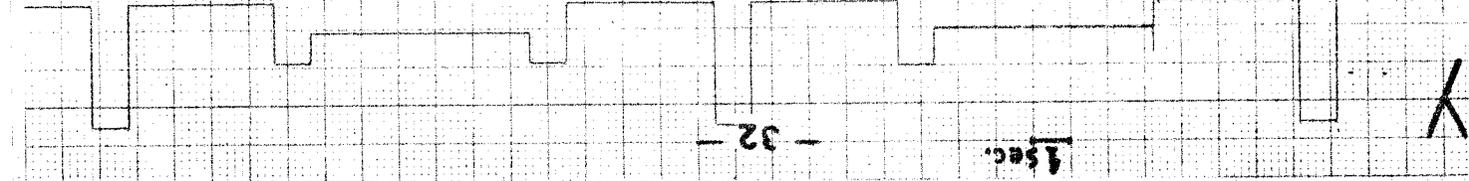


X_M 10cm



X₀ 10°

N° 50.XY.O.D.M.D.

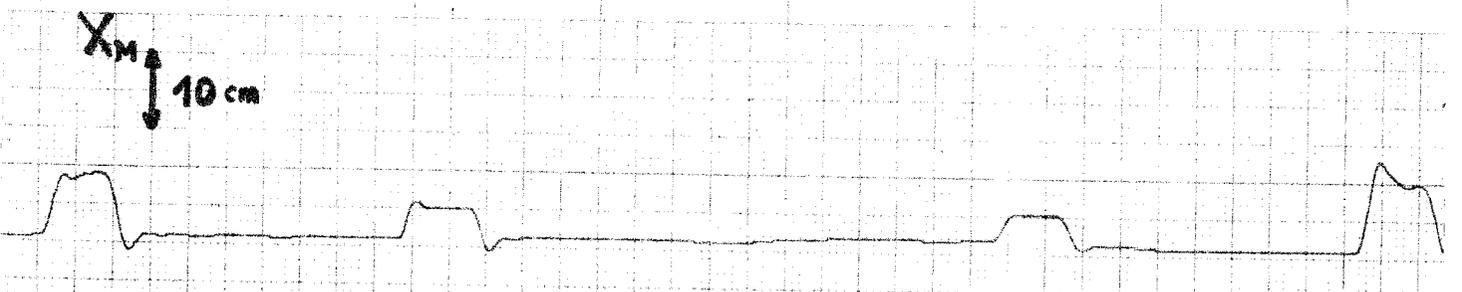
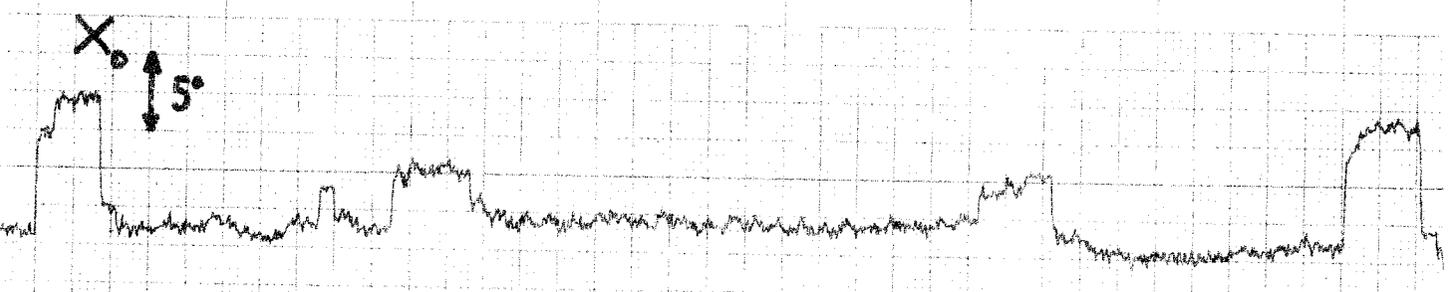
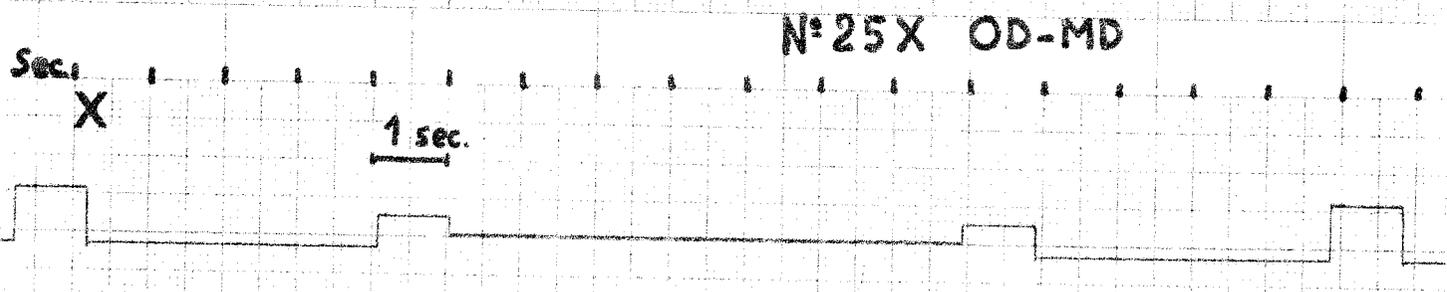
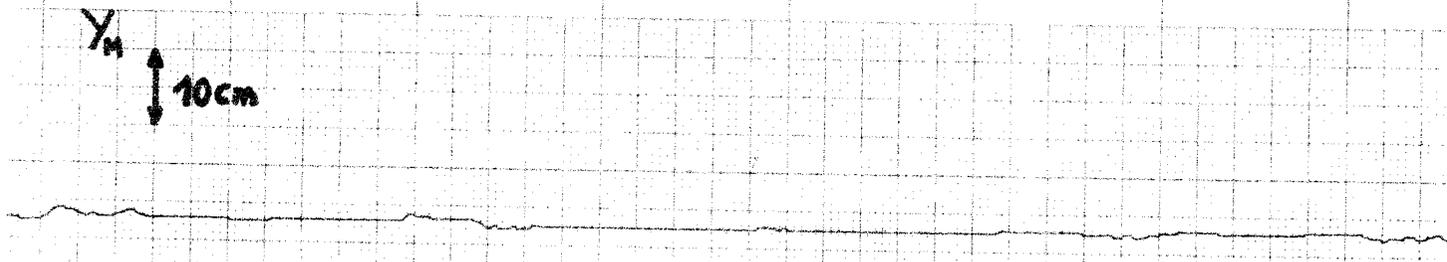
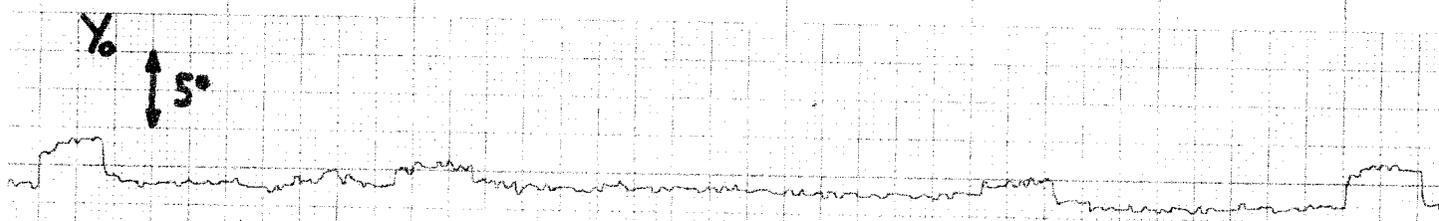


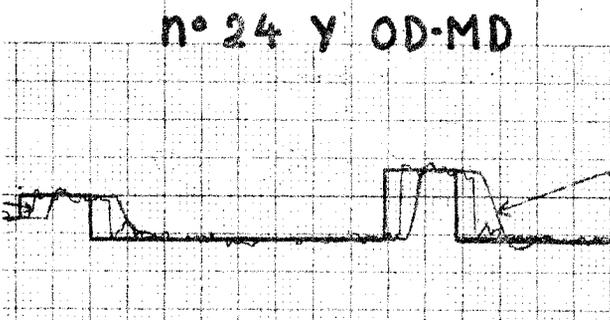
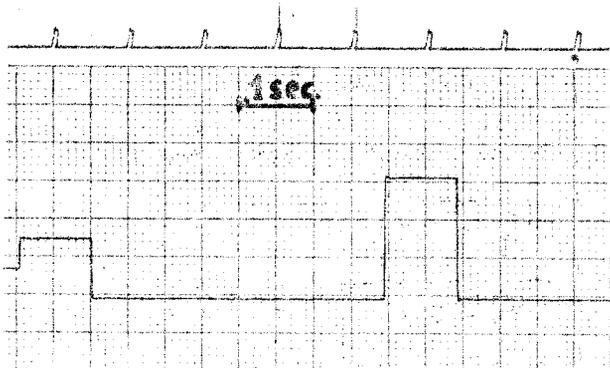
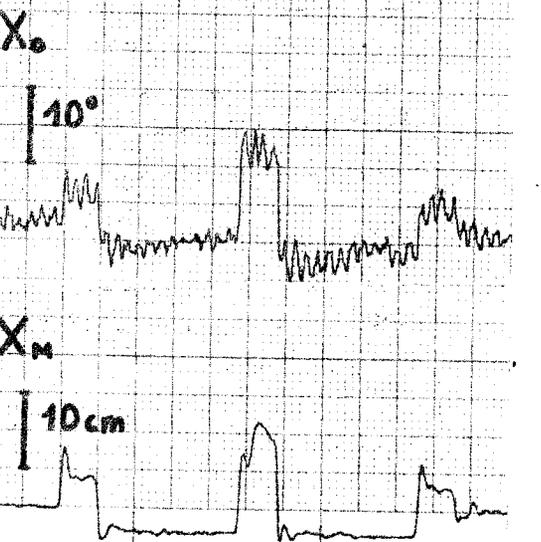
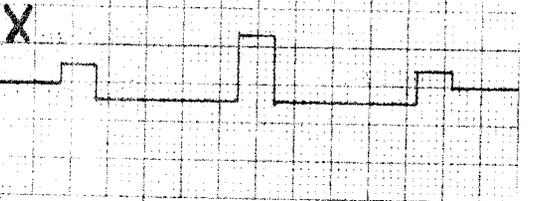
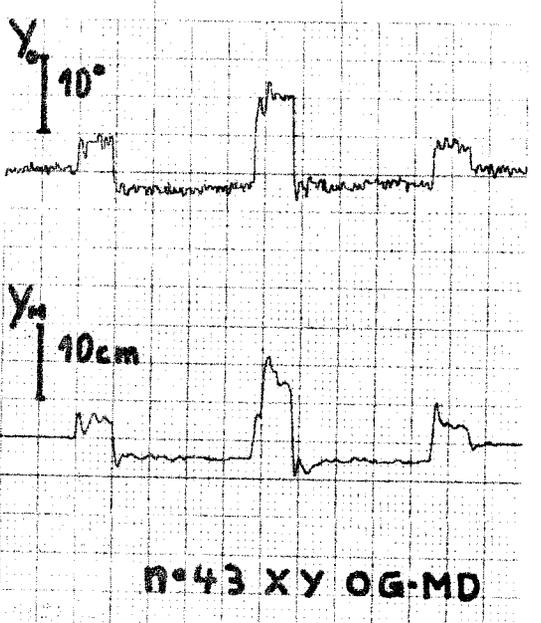
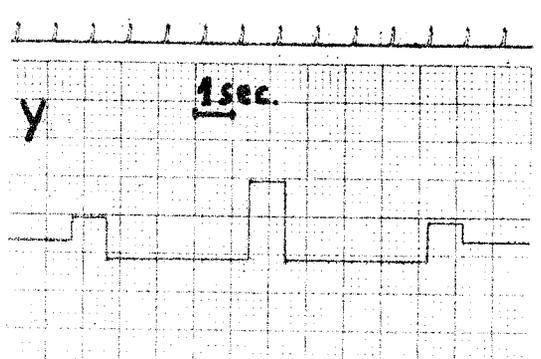
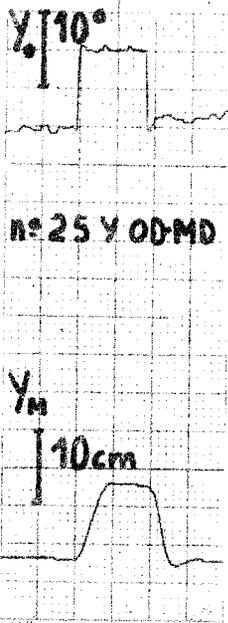
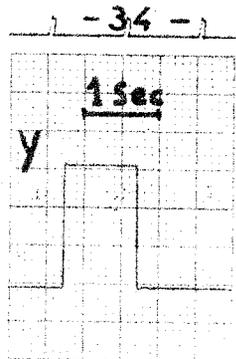
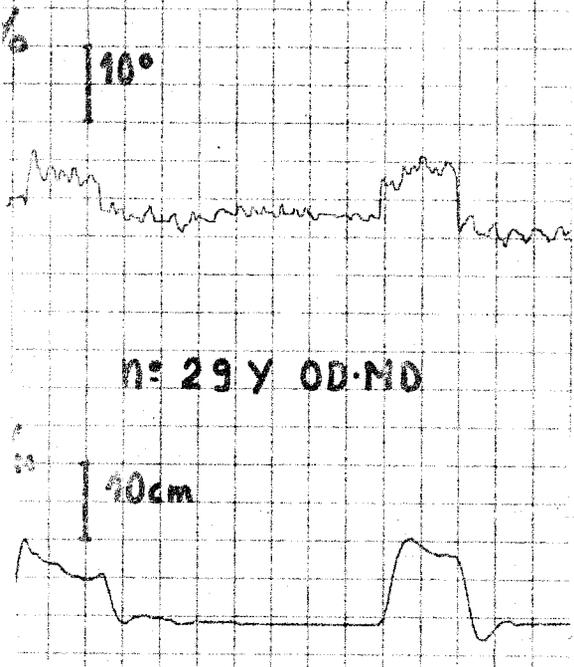
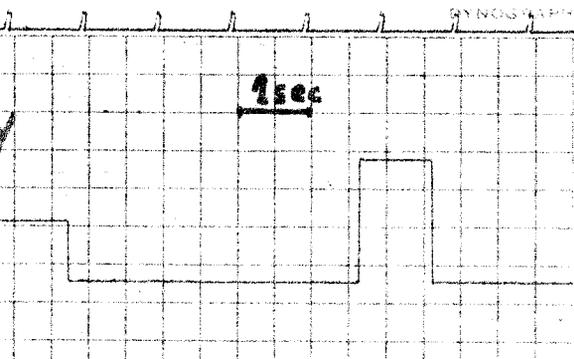
X

1 sec.

32

tops seconds





Notons :

- R_0 = temps de latence visuel
- R_M = temps de latence manuel
- t_{m0} = temps de montée visuel
- t_{mM} = temps de montée manuel
- t_{A0} = temps d'ajustement visuel
- t_{AM} = temps d'ajustement manuel
- t_c = temps de coïncidence stable entre les réponses de la main et de l'oeil
- T_R = temps de réaction
- S = $R_m - R_c$, différence des temps de latence

On constatera par la suite que t_c est souvent égal à t_{AM} .

II.1.2. Courbe de probabilité des temps de latence visuel R_0 et manuel R_M

L'étude statistique des enregistrements effectués peut être résumée par le tableau suivant, où nous avons noté : n , le nombre de sujets ; \bar{M} la moyenne arithmétique, Δ la variation autour de la moyenne arithmétique.

	Temps de latence visuel	Temps de latence manuel	Temps de réaction manuel
Temps moyen en seconde	$\bar{R}_0 = 0,27$	$\bar{R}_M = 0,35$	$\bar{T}_R = 0,23$
Ecart maximum en seconde	$\Delta R_0 = 0,10$	$\Delta R_M = 0,17$	$\Delta T_R = 0,09$
Variance $\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta)^2}{n}}$	$\sigma_0 = 0,049$	$\sigma_M = 0,06$	$\sigma_{TR} = 0,04$
Coefficient de variation $V = \frac{\sigma}{\bar{M}}$	$V_0 = 0,18$	$V_M = 0,17$	$V_{TR} = 0,17$

Le coefficient de corrélation entre les temps de latence manuel et visuel est $\rho = 0,51$ et les variations ΔR_M en fonction de ΔR_0 peuvent s'exprimer par la relation $\Delta R_M = 0,66 \Delta R_0$.

Le temps de réaction T_R est en moyenne inférieur aux temps de latence visuel et manuel, car il fait davantage appel au système "réflexe" par rapport aux temps de latence visuel et manuel qui comprennent un temps de décision inclus dans le temps "mort" de l'opérateur.

Nous présentons figure 2.1. la probabilité des temps de latence visuel et manuel

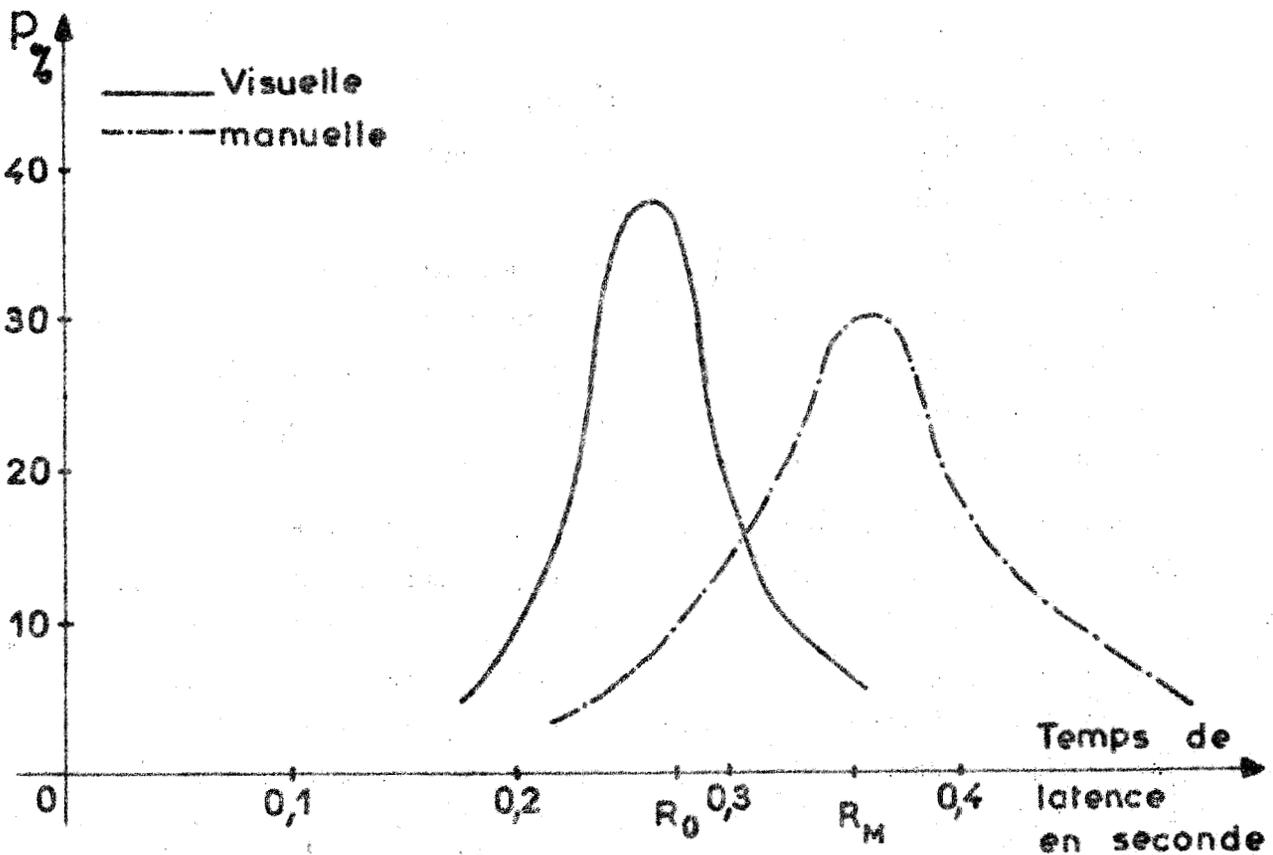


Figure 2.1. Probabilité de R_0 et R_M en fonction du temps de latence.

La courbe représentant la probabilité de R_M est beaucoup moins sélective que celle de R_0 car le retard manuel est fortement influencé par l'âge de l'opérateur, par sa collaboration, par son attention ainsi que par son niveau d'intelligence. L'écart S entre les temps de latence visuel et manuel, si l'on se réfère à l'étude statistique, est d'environ 0,08 seconde.

Remarque :

Nous avons rencontré dans nos expériences cinq cas où le temps de latence manuel était inférieur ou égal au temps de latence visuel R_0 . Cette remarque sera à la base de quelques conclusions qui se révéleront importantes au cours de l'étude de la réponse manuelle.

II.1.3. Etude du temps de coïncidence main-œil t_c et de la vitesse de déplacement de la main en fonction de l'écart S entre les temps de latence R_M et R_0 .

Les travaux concernant la poursuite visuelle ou manuelle mettent en évidence diverses réponses de l'opérateur et il convient d'utiliser celles-ci pour caractériser l'opérateur.

La simultanéité des enregistrements visuel et manuel offre la possibilité de préciser le comportement de l'opérateur à l'aide de l'écart S entre les temps de latence R_M et R_0 . Cette remarque justifiée par nos résultats complète ceux déjà acquis par L. STARK²¹, G. COOK²², J.D. Mc. DONNELL²³.

Nous présentons sur le tableau ci-dessous l'étude statistique des différents relevés des valeurs du temps de coïncidence t_c , de la vitesse moyenne du déplacement de la main (lors du temps de montée) et de l'écart S entre les temps de latence. La vitesse moyenne est calculée pour une amplitude de l'échelon correspondant à un déplacement manuel de 50 mm. Elle est définie par le rapport de ce déplacement au temps de montée manuel. (se référer à la figure 2.0.).

	Temps de coïncidence main-oeil t_c en seconde.	Vitesse de montée manuelle en mm/seconde.	Ecart des temps de latence $S=R_M-R_0$ en seconde.
Valeur moyenne \bar{M}	$\bar{t}_c = 0,73$	$\bar{V}_M = 237$	$\delta = 0,08$
Ecart maximum	$\Delta t_c = 0,28$	$\Delta V_M = 263$	$\Delta \delta = 0,10$
Variance $\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta)^2}{n}}$	$\sigma = 0,154$	95	0,04
Coefficient de Variation $V = \frac{\sigma}{\bar{M}}$	0,21	0,40	0,55

Notons que le temps de montée manuel est en moyenne de 0,21 seconde alors que pour un déplacement visuel de 4°, nous avons relevé un temps de montée visuel moyen de 0,04 seconde.

Le tableau ci-dessus met en évidence la grande dispersion entre les vitesses moyennes de montée manuelle ; et les différences entre les temps de latence visuel et manuel. Notons aussi que la valeur du coefficient de corrélation entre l'écart des temps de latence S et du temps de coïncidence t_c n'est que de 0,18. Il est par conséquent nécessaire de différencier les réponses de l'opérateur, en fonction soit de la vitesse, c'est-à-dire de l'allure de la montée, soit de l'écart entre les temps de latence. L'observation des différents modes de réponse de l'opérateur humain présentés figure 2.2, montre l'importance de l'écart entre les temps de latence.

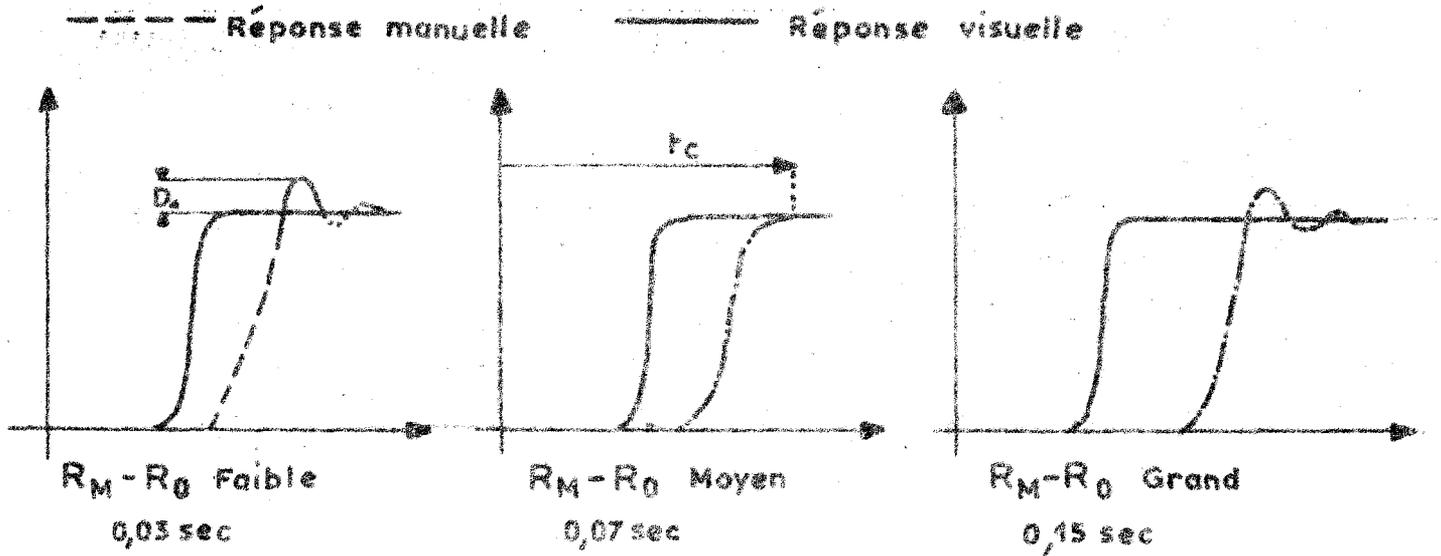


Figure 2.2. Différents modes de réponses

Pour une différence S faible, nulle ou parfois négative, l'opérateur ne contrôle pas suffisamment sa trajectoire manuelle et oscille autour de sa position d'équilibre pendant un certain temps.

Par ailleurs, plus la main est en retard par rapport à l'oeil, plus elle a tendance à rattraper son retard ; de ce fait, la vitesse du déplacement manuel est plus rapide, ce qui amène de nouvelles oscillations augmentant le temps au bout duquel il y a coïncidence stable.

Entre ces deux modes de réponse se trouve un comportement que l'on peut appeler optimal par rapport au temps de coïncidence t_c ; il a lieu lorsque l'écart $S = R_M - R_0$ est de l'ordre de 0,07 seconde.

Notons que dans la plupart des cas, les réponses oscillatoires se font avec un seul dépassement D_1 . La figure 2.3. visualise les variations du temps de coïncidence et de la vitesse moyenne de montée manuelle en fonction de l'écart entre les temps de latence. Les coordonnées du minimum de la courbe de $t_c (R_M - R_0)$ correspondent à $t_c = 0,57$ seconde avec un temps de montée $t_{mf} = 0,22$ sec et un écart $S = 0,07$ sec, d'où $R_M = 0,35$ sec et $R_0 = 0,28$ sec.

Dans la plupart des cas t_c est tel que :

$$t_c = R_M + t_{mf} + t_0 = t_{A.M} = \text{temps d'ajustement manuel}$$

$$t_0 = \text{temps des oscillations.}$$

Autrement dit, le retard et le temps de montée manuels sont plus grands que le retard et le temps de montée visuels.

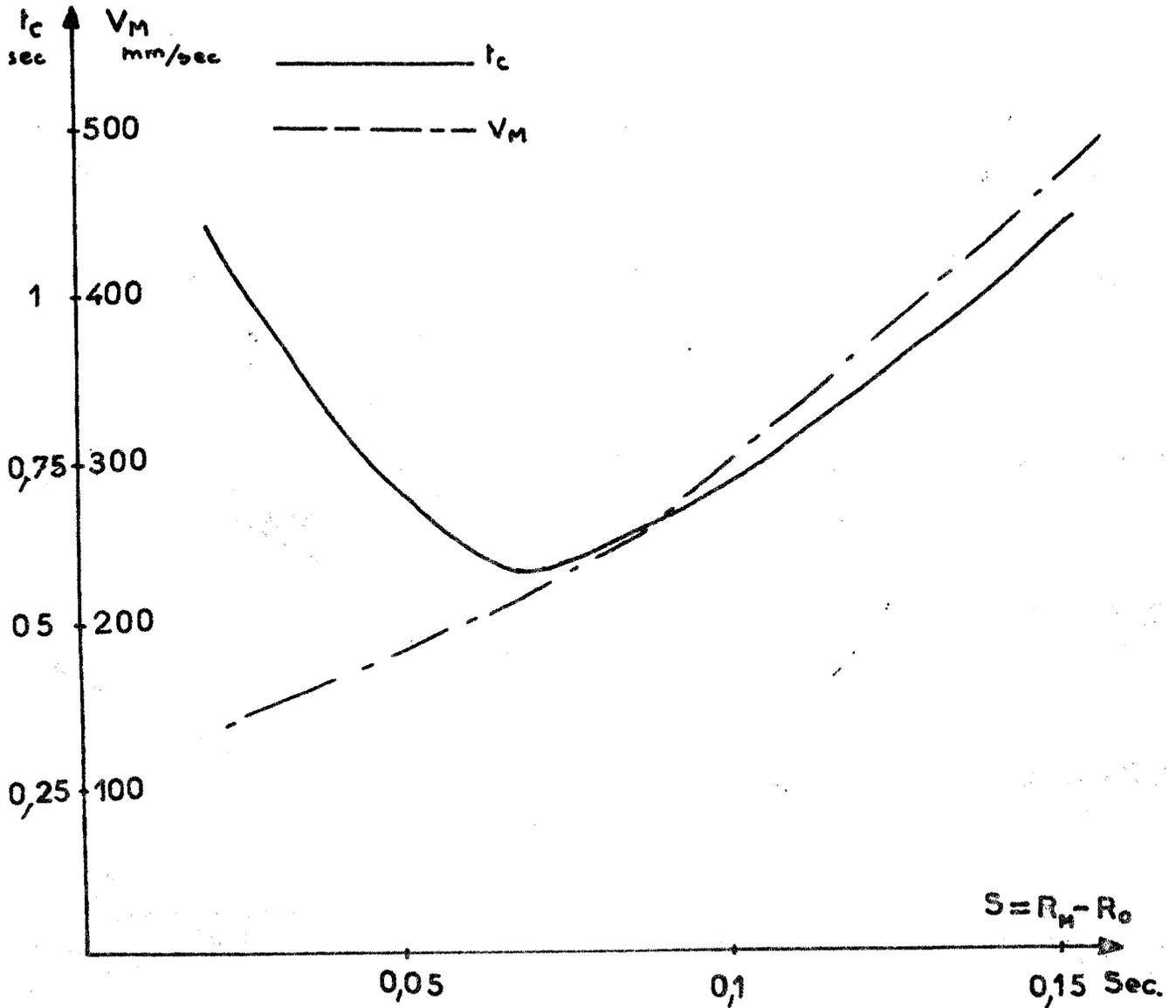


Figure 2.3. Variations de la vitesse manuelle et du temps de coïncidence en fonction de la différence S entre les retards manuels et visuels.

II.1.4. Courbes de variations du retard manuel R_M et de l'écart entre les temps de latence S en fonction du retard visuel R_0

Afin d'expliciter davantage les observations précédentes nous présentons figure 2.4. la courbe de variation de R_M en fonction de R_0 .

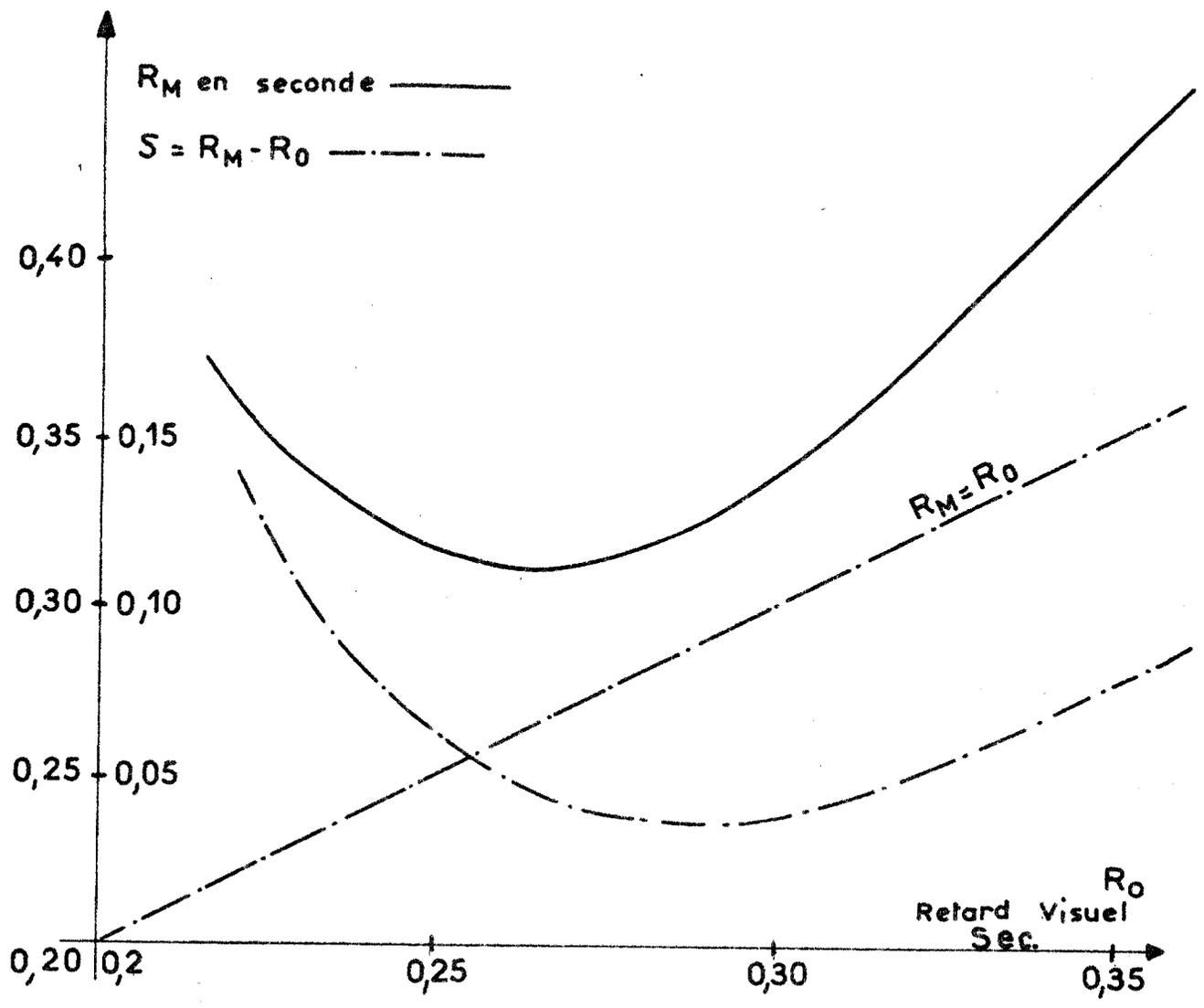


Figure 2.4. Variation du retard manuel en fonction du retard visuel

Si nous considérons la région voisine du minimum de la courbe $R_M(R_0)$ nous constatons que l'opérateur a tendance à actionner en priorité le mouvement manuel. C'est dans cette région que se situent les 5 cas signalés précédemment (R_M égal ou même inférieur à R_0).

Comme nous le verrons plus loin, pour des stimulus sinusoïdaux ou en dents de scie, certains sujets suivent par moments le spot suiveur tout en étant asservis à la trajectoire du spot cible. Ces sujets reçoivent l'information visuelle en conservant l'oeil immobile avant toute réaction manuelle. L'oeil ne se déplace qu'après le début du mouvement du spot suiveur, c'est-à-dire de la réaction manuelle. Ceci peut expliquer le comportement des cinq sujets rencontrés lors de nos expériences. On peut encore trouver une explication dans le fait que l'écran de présentation des signaux se trouve dans le champ visuel de l'opérateur.

II.1.5. Variation du temps de coïncidence t_c en fonction du retard manuel R_M

Pour compléter l'étude précédente du comportement du sujet nous présentons figure 2.5. la variation du temps de coïncidence $t_c = t_{AM}$ en fonction du retard manuel R_M . Cette courbe met en évidence un minimum du temps de coïncidence d'ajustement vérifiant les résultats précédents (t_c à peu près égal à 0,6 seconde pour R_M , voisin de 0,35 seconde).

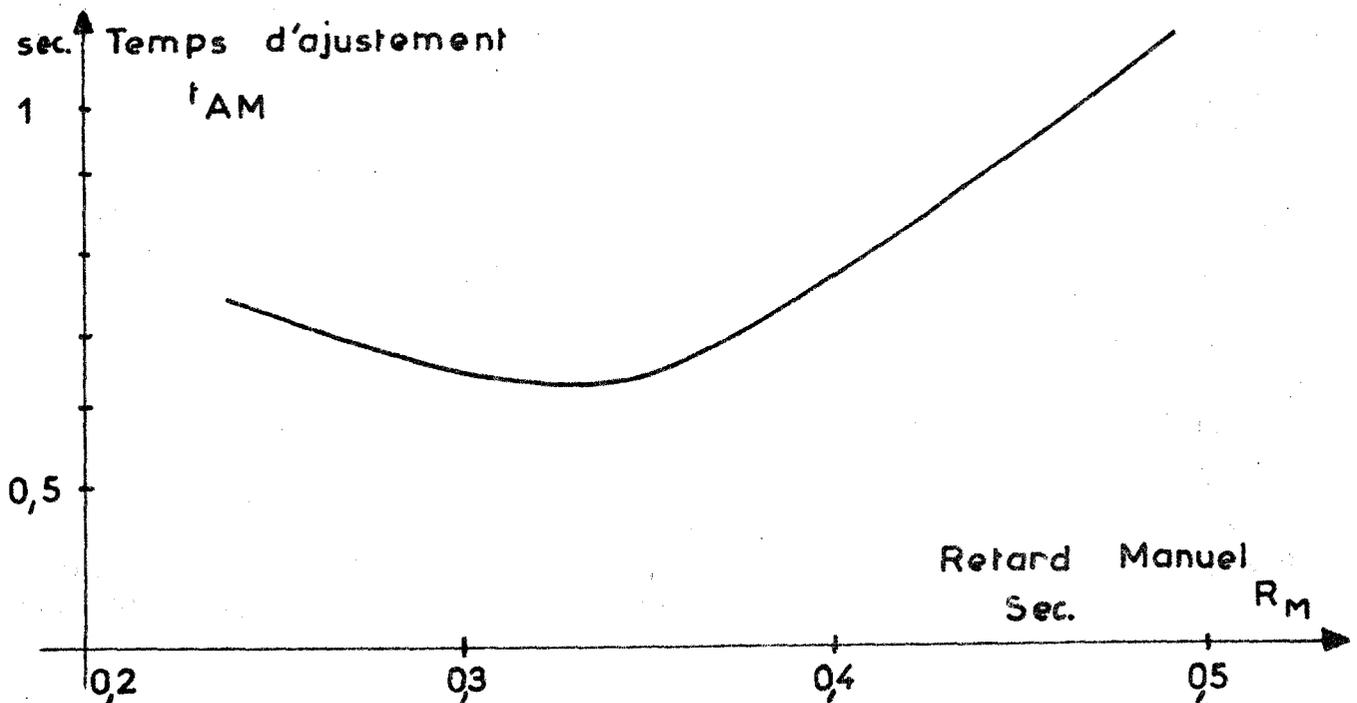


Figure 2.5. Variation du temps d'ajustement en fonction du retard manuel.

II.1.6. Relation entre le temps de latence et la vitesse manuelle en fonction de l'amplitude du stimulus

Dans tout ce qui précède nous n'avons pas modifié le paramètre correspondant à l'amplitude du stimulus échelon présenté à l'opérateur. Une étude statistique fait apparaître une croissance des temps de latence visuel et manuel et de la vitesse moyenne du déplacement manuel (pendant le temps de montée) en fonction de l'amplitude du stimulus (figure 2.6.).

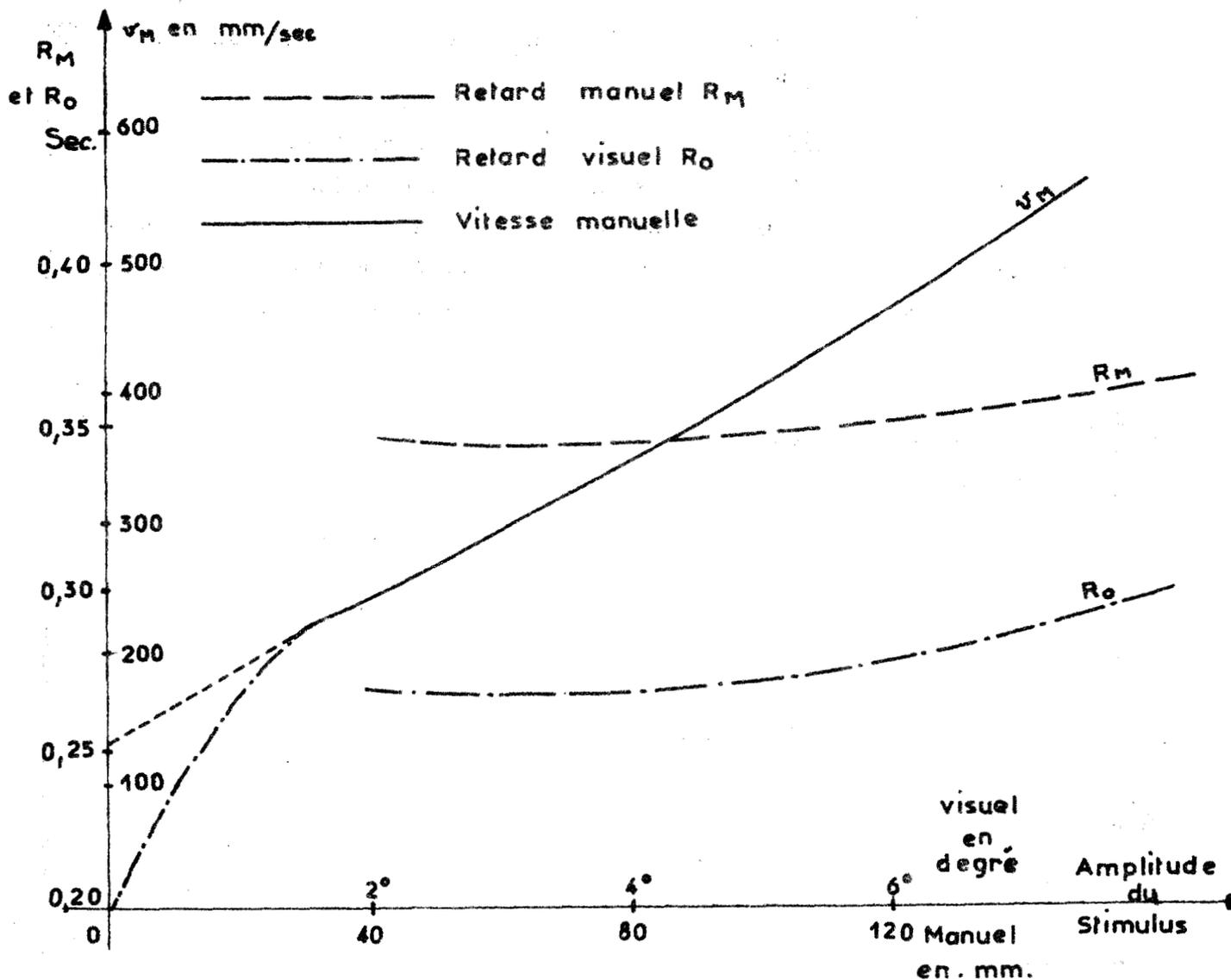
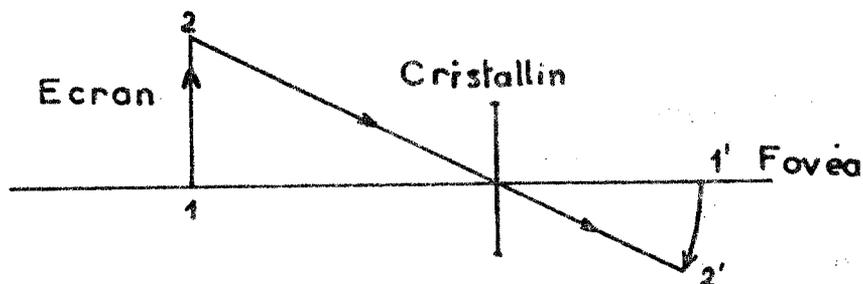


Figure 2.6. Variations de R_0 , R_M et V_M en fonction de l'amplitude du stimulus.

La croissance du temps de latence visuel R_0 en fonction de l'amplitude peut s'expliquer par le fait que l'image du point stimulus considéré est d'autant plus éloignée de la fovéa, à l'instant initial du déplacement, que l'amplitude du stimulus est grande, (le point image se trouve alors dans une région moins sensible).



L'étude statistique des différentes valeurs du retard manuel R_M ne nous permet pas de déceler une variation sensible de celui-ci en fonction de l'amplitude du stimulus échelon.

Nous allons à présent déduire de la figure 2.6. l'équation approximative $A(t_{mM})$ du déplacement manuel pendant le temps de montée t_{mM} (à partir de la variation de la vitesse manuelle moyenne v_M en fonction de l'amplitude du stimulus échelon).

Il convient tout d'abord de remarquer que : la vitesse du mouvement de l'opérateur ne peut croître indéfiniment, (elle tend vers une saturation non représentée, figure 2.6.), et la mise en action de la main, juste après le temps de latence R_M , se fait avec une vitesse nulle (la tangente de la courbe de déplacement manuel est horizontale (2)).

Il en découle que la courbe de variation de v_M en fonction de l'amplitude A du stimulus (figure 2.6.) peut être (dans le domaine d'amplitude considérée), identifiée à l'expression (courbe en pointillés figure 2.6.)

$$v_M = a \sqrt{A}$$

v_M : définie par le rapport : Amplitude manuelle à l'instant $t = R_M + t_{mM}$ (c'est-à-dire premier passage du spot-suiveur sur le spot-cible, avant dépassement et stabilisation de la main) divisée par le temps de montée t_{mM} (figure 2.6. a).

A = amplitude du stimulus

a = constante relevée sur la courbe en pointillés (figure 2.6.), voisine de 1,2.

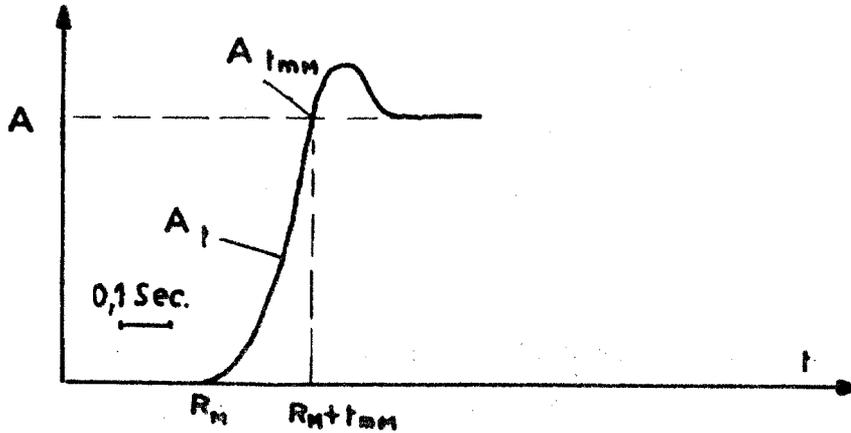


Figure 2.6. a : mouvement manuel à un stimulus échelon.

Posons : $A(t) =$ amplitude manuelle fonction du temps t

$R_M = 0$ changement d'origine

$$v_M = \frac{A(t_{mM})}{t_{mM}} = a \sqrt{A} = a \sqrt{A(t_{mM})}$$

d'où :

$$A(t_{mM}) = a^2 t_{mM}^2$$

soit :

$$A(t) = a^2 t^2 \quad \text{pour } R_M < t < R_M + t_{mM}$$

L'observation des enregistrements présentés au paragraphe II.1.1. peut justifier cette loi de variation du type t^n , avec n supérieur ou égal à deux selon les sujets. Nous reviendrons sur cette remarque importante lors du chapitre suivant, (paragraphe III.3.5.).

II.2. Analyse des réponses visuelles et manuelles à un stimulus sinusoïdal

II.2.1. Résultats expérimentaux

L'analyse des réponses manuelles à un stimulus de forme sinusoïdale a été étudiée par beaucoup de chercheurs : D.T. Mc RUER¹, T.B. SHERIDAN²⁴, A. SKOLNICK²⁵. Notre contribution est de caractériser le comportement du sujet par l'analyse corrélative des réponses visuelle et manuelle. L'observation des photographies de tracés présentés ci-après n° 43.XY.OG.MD, 19 Y. OD. MD, 28 Y. OD. MD, et 25. X. OD. MD, met en évidence quelques unes des relations fonctionnelles existant entre les systèmes visuel et manuel.

Représentons toujours par X et Y les composantes horizontales et verticales de la cible, de la réponse visuelle (indice 0) et de la réponse manuelle (indice M), et par G et D les réponses obtenues lors de l'étude de la main ou de l'oeil gauche ou droit.

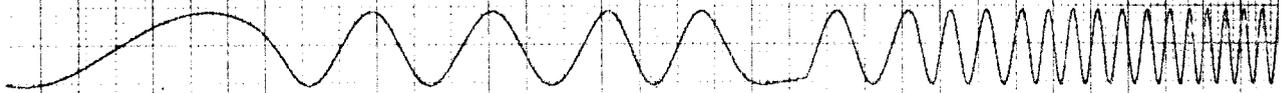
Lorsque la fréquence du stimulus est faible, l'oeil se comporte de façon linéaire tandis que la réponse manuelle se fait par petites saccades destinées à augmenter la précision de l'asservissement, en oscillant légèrement autour de la trajectoire (enregistrement n° 19.Y.OD.MD). La valeur de la fréquence d'oscillation, se superposant à la réponse manuelle "parfaite", est souvent celle du mouvement manuel quand celui-ci devient parfaitement harmonique, sans petites oscillations vis-à-vis du stimulus. A partir d'une certaine vitesse de la trajectoire la réponse visuelle devient non-linéaire, plus ou moins saccadée et tend vers une forme carrée ; par contre la réponse manuelle reste parfaitement sinusoïdale (enregistrement n° 43.XY.OG.MD).

Notons par f_{co} la fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient saccadée et par f_{aM} la fréquence pour laquelle la réponse manuelle se fait sans oscillations (Enregistrement n° 43.XY.OG.MD et n° 28.Y.OD.MD).

Sec.

Y

$\frac{-47}{1 \text{ sec}}$



Fca

Fcb

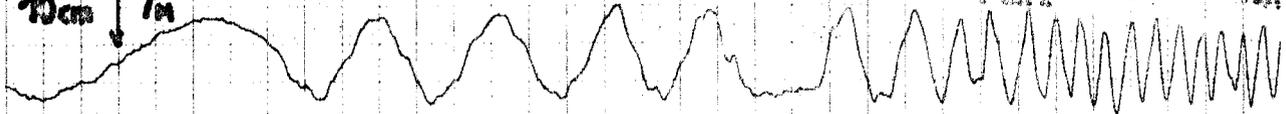
$10^\circ \updownarrow Y_c$



Fca

Fcb

$10 \text{ cm} \updownarrow Y_M$



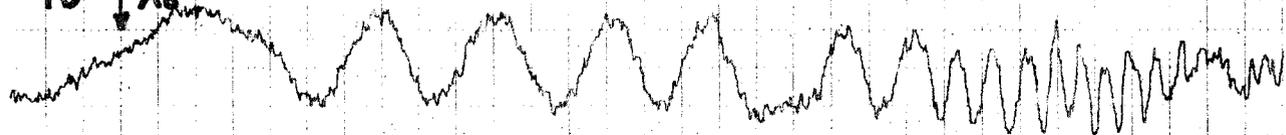
Nº 43XY06-14D.

X

Fca

Fcb

$10^\circ \updownarrow X_c$

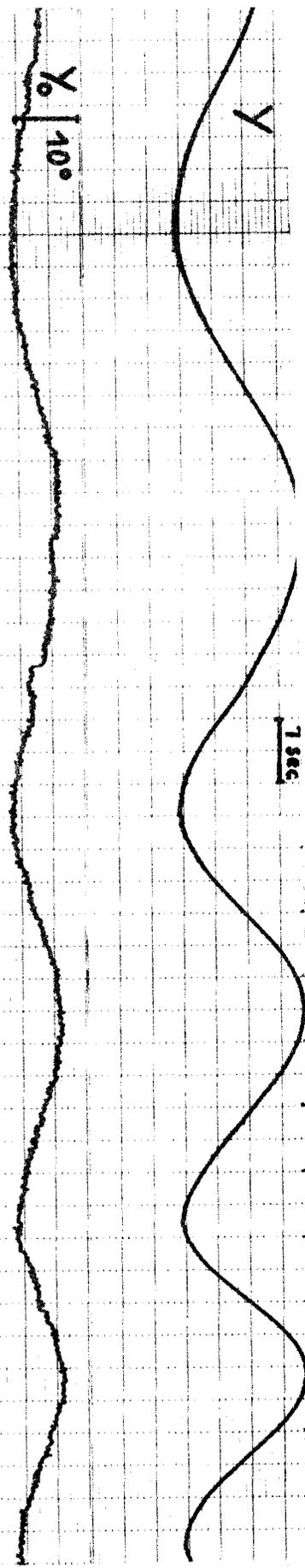


Fca

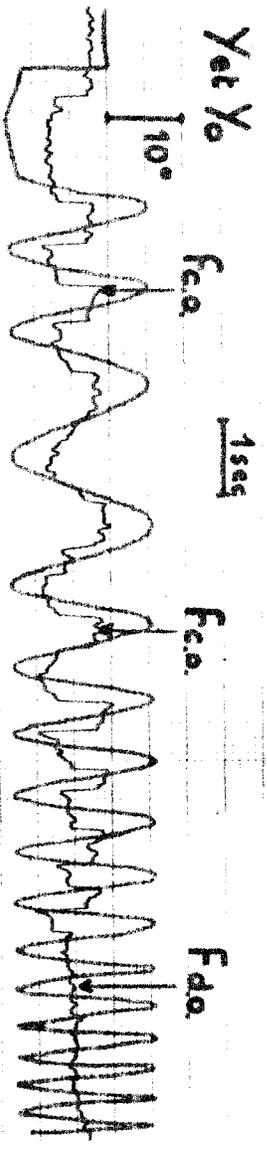
Fcb

$10 \text{ cm} \updownarrow X_M$

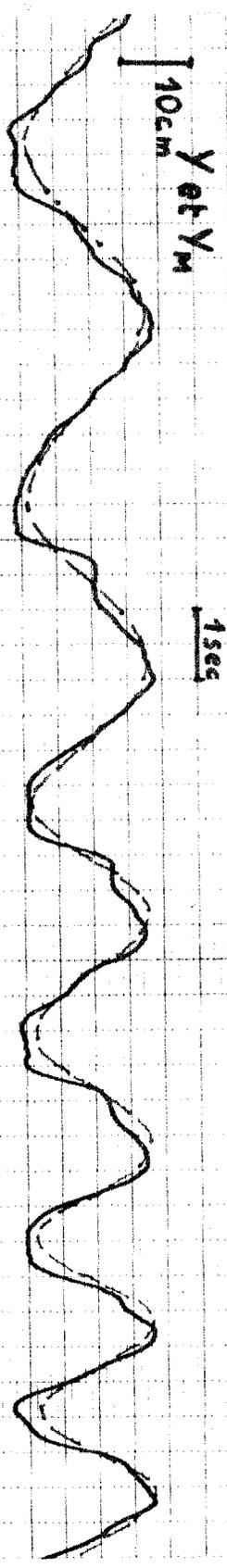




№ 19. Y. OD. MD.



№ 28. Y. OD. MD.



Y

- 49 -

Y₀

5°

Y_M

40cm

N° 25-X-OD-MD.

Sec.

1sec

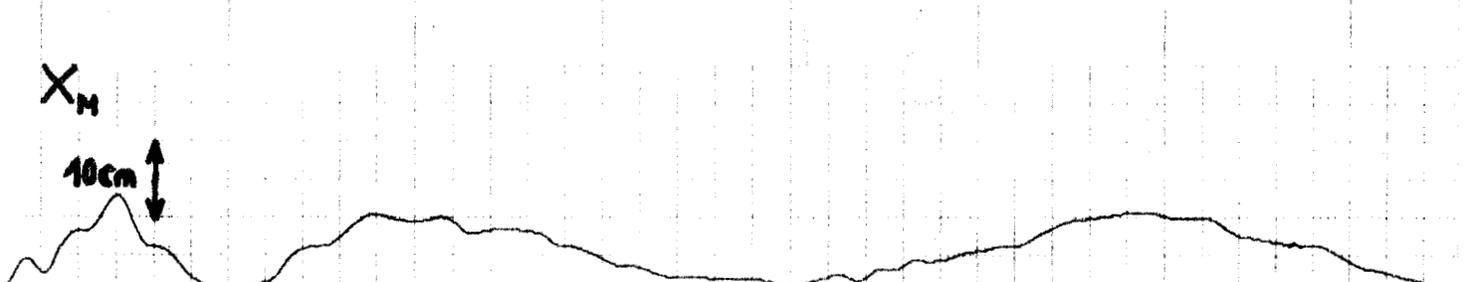
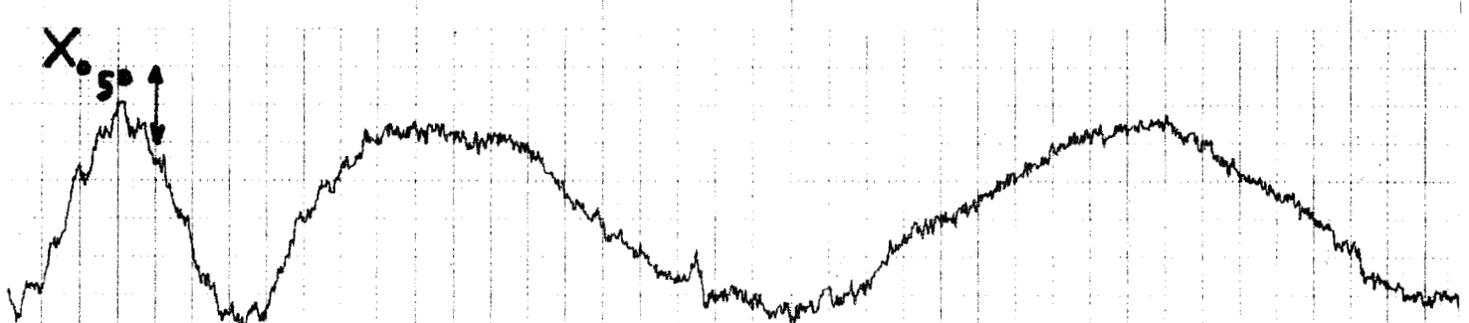
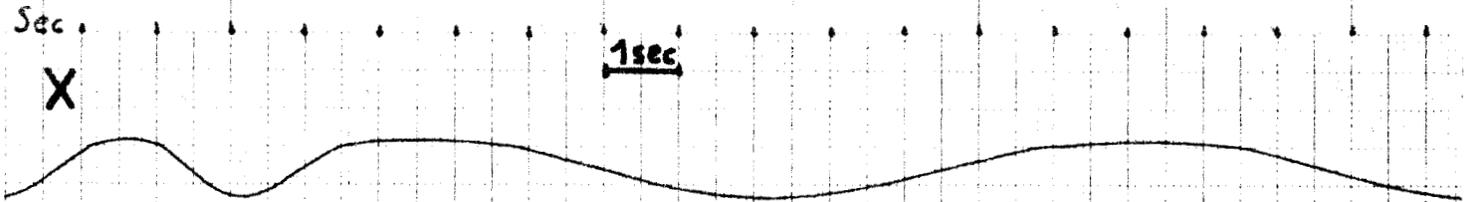
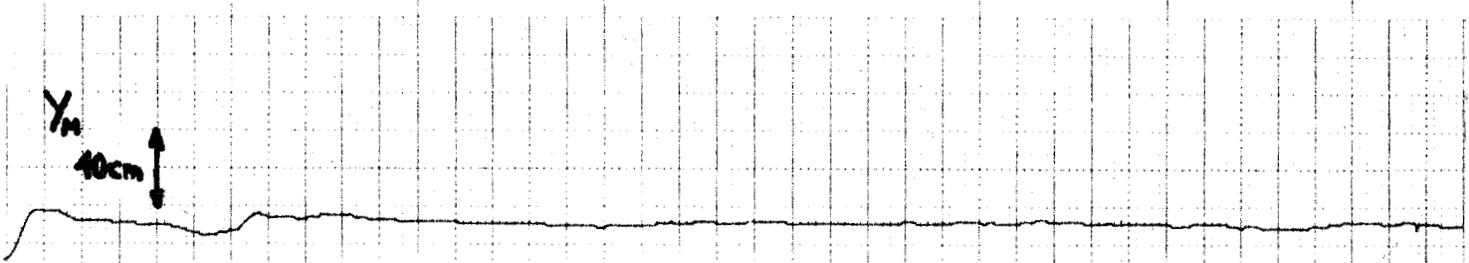
X

X₀

5°

X_M

10cm



Désignons par $f_{d.o}$ la fréquence pour laquelle le mouvement de l'oeil devient inexistant ($f_{d.o}$ désigne la fréquence de décrochage du système visuel). A partir de cette fréquence $f_{d.o}$, la réponse manuelle se poursuit jusqu'à la fréquence limite $f_{L.M}$ du système manuel. En effet, contrairement au système visuel la main ne "décroche" pas (ou rarement) mais oscille avec une fréquence limite pratiquement constante et une amplitude à peu près fixe. (Enregistrement n° 43.XY.OG.MD). On peut schématiser ces différentes caractéristiques par le schéma 2.7:

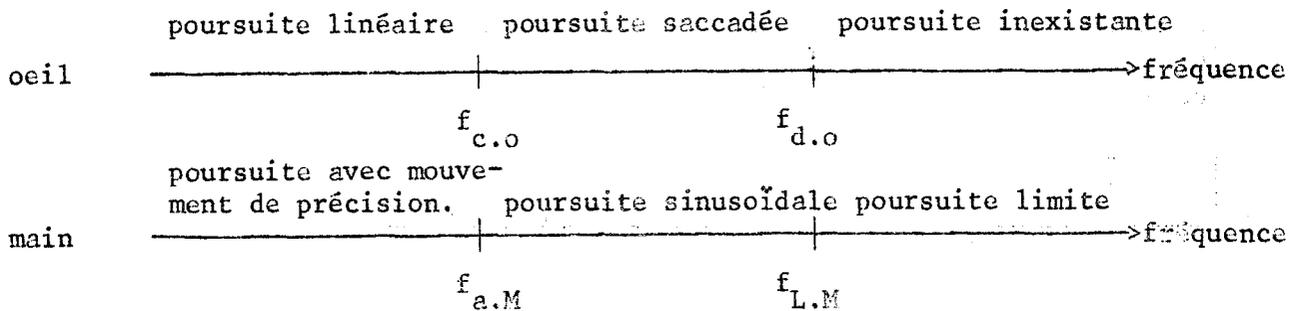


Figure 2.7.

II.2.2. Probabilité des fréquences caractéristiques des systèmes visuel et manuel

L'analyse statistique des valeurs observées peut être résumée par le tableau suivant :

	Fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient saccadée	Fréquence de décrochage visuel	Fréquence pour laquelle la réponse manuelle n'est plus saccadée	Fréquence limite de la main
Valeur moyenne en Hertz	$\bar{f}_{co} = 0,88$	$\bar{f}_{do} = 1,82$	$\bar{f}_{a.M} = 0,85$	$\bar{f}_{L.M} = 2,4$
Ecart maximum en Hertz	0,92	1,2	1,15	1,6
Variance σ	0,27	0,46	0,37	0,71
Coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{M}}$	0,3	0,25	0,43	0,29

Le paramètre "sujet" étant prépondérant, il est naturel d'obtenir des valeurs du coefficient de variation relativement élevées et il faut interpréter ces résultats avec circonspection.

Sur la figure 2.8, nous présentons la probabilité des différentes fréquences caractéristiques du système visuel et du système manuel.

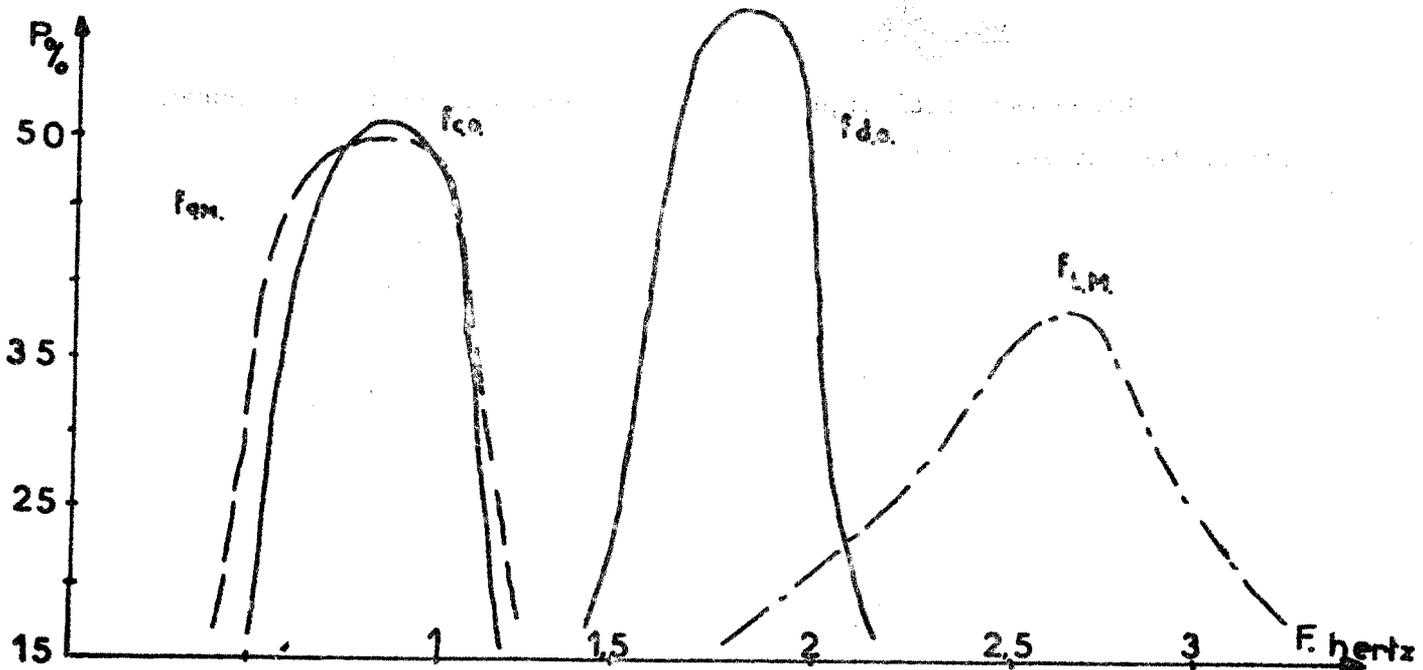


Figure 2.8. Probabilités des fréquences caractéristiques

Les courbes de probabilité des fréquences $f_{c.o}$ et $f_{a.M}$ (pratiquement identiques) montrent l'importance du système oculo-moteur sur le comportement de l'opérateur humain. Il existe deux modes de poursuite dans le système visuel, les modes réflexe et volontaire et il est probable qu'au dessous de f_{co} la commande réflexe est prédominante alors qu'au dessus de f_{co} , la commande volontaire est prépondérante.

En régime linéaire, la musculature oculaire assure la coordination bilatérale des mouvements des yeux pour permettre la réception et la stabilisation automatique des images rétiniennes dans les régions fovéales. Quand la vitesse du stimulus augmente cet asservissement devient volontaire et de plus en plus difficile à contrôler ; il est inexistant pour une vitesse correspondant à la fréquence de décrochage $f_{d.o}$.

Il résulte de ceci que les deux modes de poursuite du système oculo-moteur entraînent deux modes principaux de comportement de l'opérateur : l'un avec ajustement successif à l'aide de petites saccades de précision ; l'autre avec ajustement automatique de la fovéa lui permettant d'estimer le mieux possible l'évolution de la trajectoire ; l'autre avec une erreur croissante ; la vitesse de la cible entraînant des saccades dans le mouvement visuel.

On peut distinguer un troisième comportement à partir de la fréquence $f_{d.o}$; la fréquence du mouvement manuel tend vers une fréquence limite $f_{L.M}$ et devient indépendante de la fréquence du stimulus.

II.2.3. Variation de la fréquence limite manuelle en fonction de la fréquence de décrochage visuel

La corrélation entre les fréquences $f_{d.o}$ et $f_{L.M}$ conduit à un coefficient de corrélation $\rho = 0,53$ et à une relation entre les écarts $\Delta f_{d.o}$ et $\Delta f_{L.M}$ autour de leur valeur moyenne égale à :

$$\Delta f_{d.o} = 0,8 \Delta f_{L.M} \quad (\text{figure 2.9.})$$

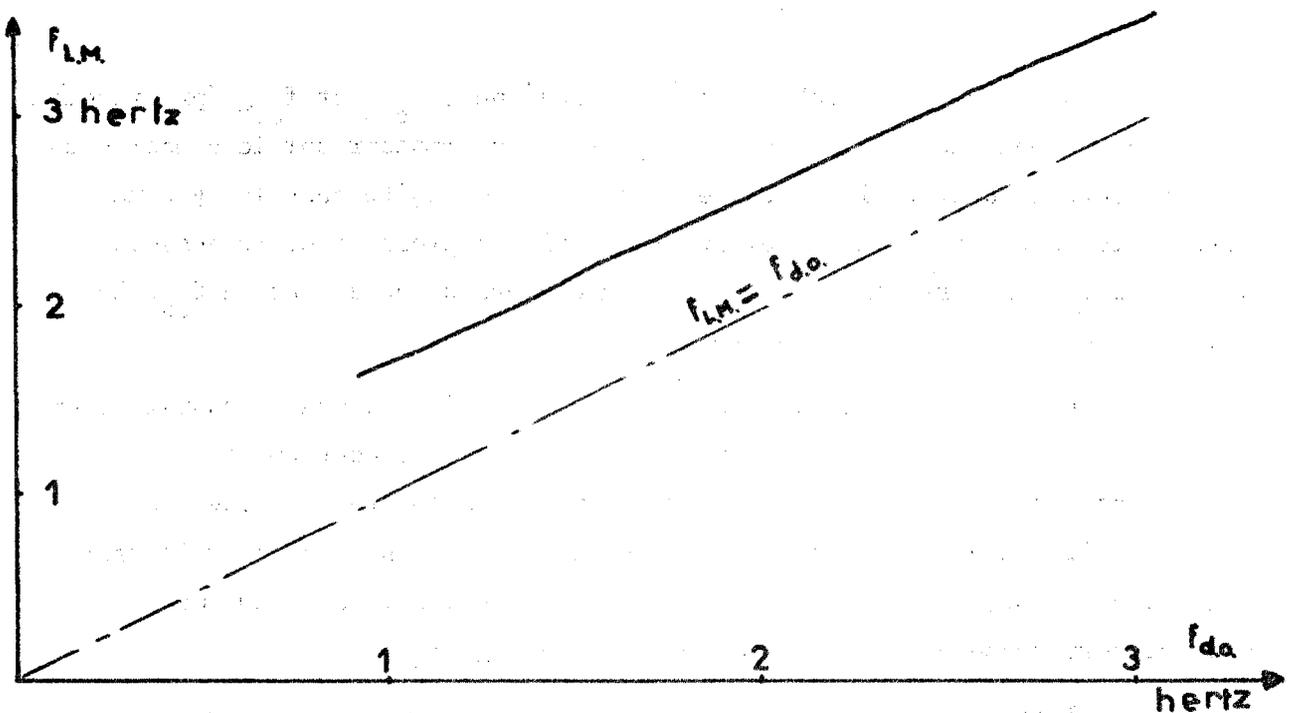


Figure 2.9. Variation de la fréquence limite manuelle en fonction de la fréquence de décrochage visuel.

La fréquence limite manuelle est toujours supérieure à la fréquence de décrochage visuel ; l'écart entre ces deux fréquences f_{LM} et f_{do} étant de l'ordre de 0,6 Hertz.

Lorsque l'oeil "décroche", il convient de mentionner une brusque perte de précision de la réponse manuelle, consécutive d'une part au fait que la vitesse de la cible est importante, d'autre part au fait que le mouvement de l'oeil est inexistant ; le système manuel ne reçoit pas assez d'informations du système visuel.

II.2.4. Influence des fréquences caractéristiques des systèmes visuel et manuel sur les courbes de BODE de la réponse manuelle

Nous présentons figure 2.10, les variations de l'amplitude et du déphasage de la réponse manuelle en fonction de la fréquence du mouvement de la cible.

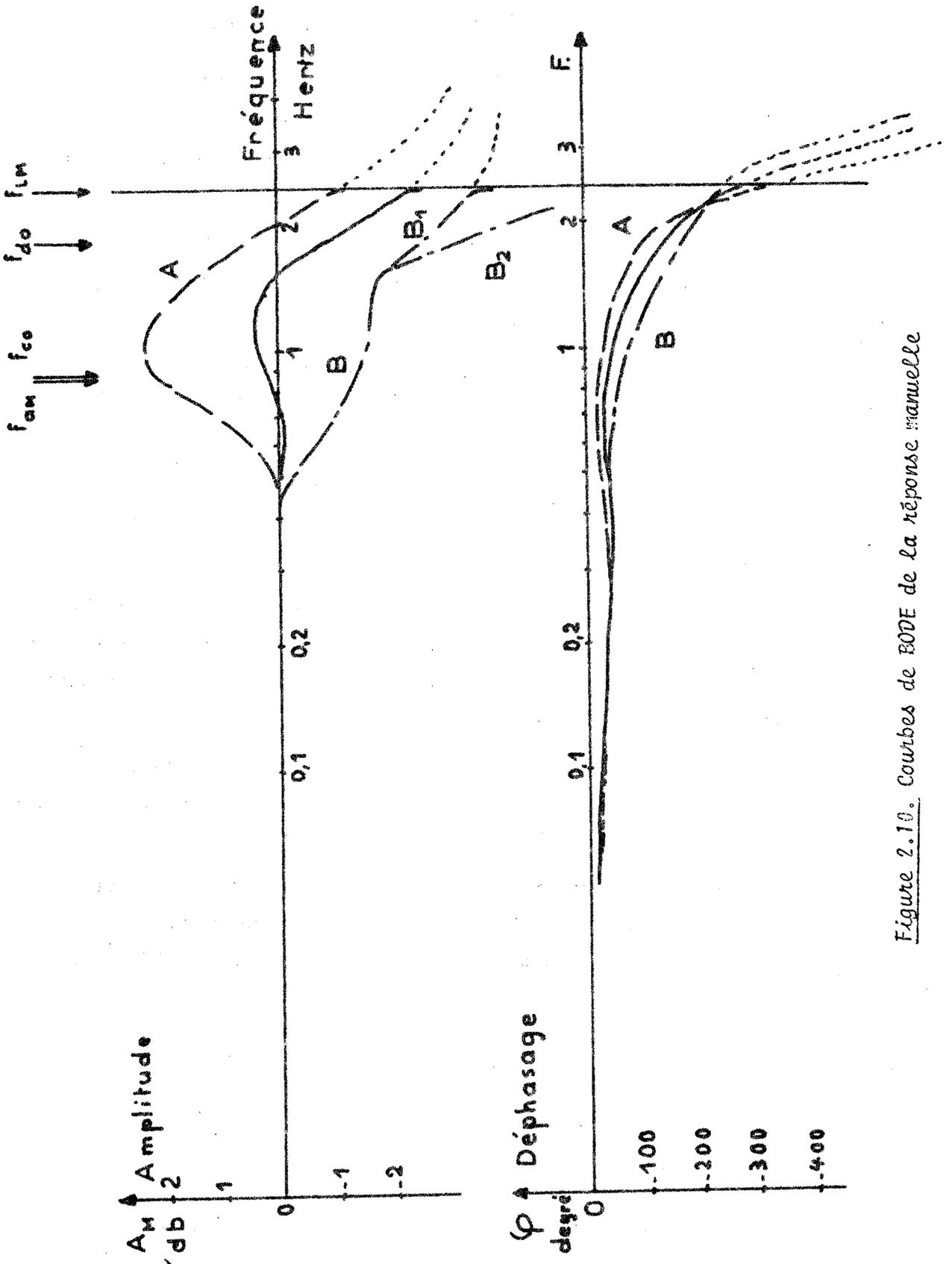


Figure 2.10. Courbes de BODE de la réponse manuelle

Les caractéristiques en amplitude et en phase sont jusqu'à 0,5 Hertz indépendantes des diverses sortes de réponses rencontrées.

A partir de cette fréquence, suivant l'attention ou la volonté de poursuite du sujet, on se trouve en présence des modes de réponse : A et B.

Le mode A se rencontre chez les sujets très coopérants (le plus souvent chez les sujets jeunes).

Quand on augmente la fréquence du mouvement de la cible, les saccades de précision disparaissent, en même temps que la main acquiert une énergie cinétique non négligeable.

Il en résulte pour le type A un léger dépassement de la réponse manuelle, par contre pour le type B, (sujets âgés ou non coopérants), l'amplitude du mouvement manuel décroît.

De toute façon, à partir d'une fréquence, variable avec le sujet, l'amplitude manuelle décroît et le déphasage prend de plus en plus d'importance (allure exponentielle).

En outre, excepté le type B₂ relativement rare, cette amplitude ne tend pas vers zéro. La réponse manuelle oscille à amplitude et fréquence pratiquement constantes. Dans ce comportement le déphasage peut atteindre et même être supérieur à 360°.

Observons encore, un minimum de la courbe de déphasage de la réponse manuelle caractéristique de tous les types rencontrés (juste avant la décroissance pour le type B et la croissance pour le type A).

Signalons que les transmittances données par certains auteurs peuvent être déterminées, à partir des différentes courbes mentionnées ci-dessus. En particulier, la transmittance proposée par LEVISON⁶ et ELKIND⁷ :

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

$$\tau = 0,15 \text{ à } 0,2 \text{ sec}$$

$$T_1 = 0,1 \text{ à } 0,125 \text{ et } T_2 = 0,25 \text{ seconde.}$$

est représentative du type B signalé précédemment.

La réponse du type A confirme par ailleurs le résultat de Mc RUER ¹

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

L'analyse de ces fonctions de transfert est basée sur l'étude des courbes de BODE et suppose à la fois une transmission continue de l'information et une linéarité du système manuel. Toutefois les différents comportements mentionnés, ne peuvent pas être tous caractérisés et il convient à ce stade de notre mémoire d'effectuer d'autres expériences pour définir plus précisément notre modèle.

Signalons que nous avons rencontré un troisième mode de réponse se rapprochant de la moyenne des sujets A et B (courbes en traits pleins de la figure 2.10). L'amplitude de la réponse manuelle est pratiquement constante jusqu'à la limite des deux comportements du système oculo-moteur ($f_{c.o} = 0,88$ Hertz) et décroît rapidement à partir du décrochage visuel ($f_{d.o} = 1,82$ Hertz).

Remarques :

Il est important de remarquer que les courbes de Bode (figure 2.10.) ne sont plus valables à partir de la fréquence limite manuelle ($f_{L.M} = 2,4$ Hertz). En effet, dans ce comportement, la poursuite manuelle ne s'effectue plus à la fréquence du stimulus. Il y a un décrochage brutal du gain ($K =$ Amplitude manuelle sur amplitude du stimulus) à la fréquence $f_{L.M}$.

En considérant le système manuel linéaire et continu on peut trouver à l'aide de ces courbes une transmittance de l'opérateur humain contenant un terme proportionnel à :

$$\frac{K}{(1+T_1 p)^n}$$

(décrochage brutal de la main, n très grand, $T_1 \approx 0,07$ seconde). Ceci peut rappeler l'étude du sujet à un stimulus échelon (paragraphe II.1.6.) après le temps de latence R_M (mouvement en t^n avec $n > 2$).

A partir des relevés des courbes de Bode on retrouve une loi identique pour la mise en action du mouvement du sujet (démarrage après R_M) à un stimulus en échelon.

II.3. Analyse des réponses visuelles et manuelles à un stimulus en dent de scie

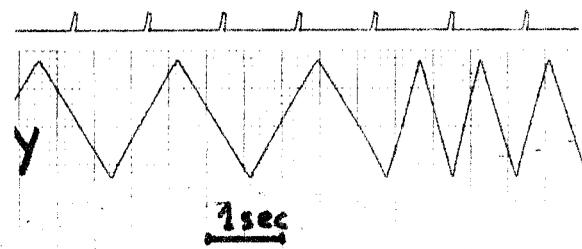
II.3.1. Résultats expérimentaux

L'étude de l'opérateur humain à un stimulus en dent de scie peut contribuer à l'élaboration d'un modèle du sujet. G.W. LANGE²⁶ propose un modèle échantillonné linéaire, basé sur l'étude des réponses manuelles de l'opérateur à des stimulus en échelons et en dents de scie. Il définit les instants d'échantillonnage du sujet à partir des petites oscillations d'ajustement de la poursuite manuelle. D'autres auteurs tels L. STARK²⁷, G. VOSSIUS²⁸, L.R. YOUNG²⁹ introduisent lors de l'étude de ces stimulus un contrôle "prédictif" dans le comportement oculaire.

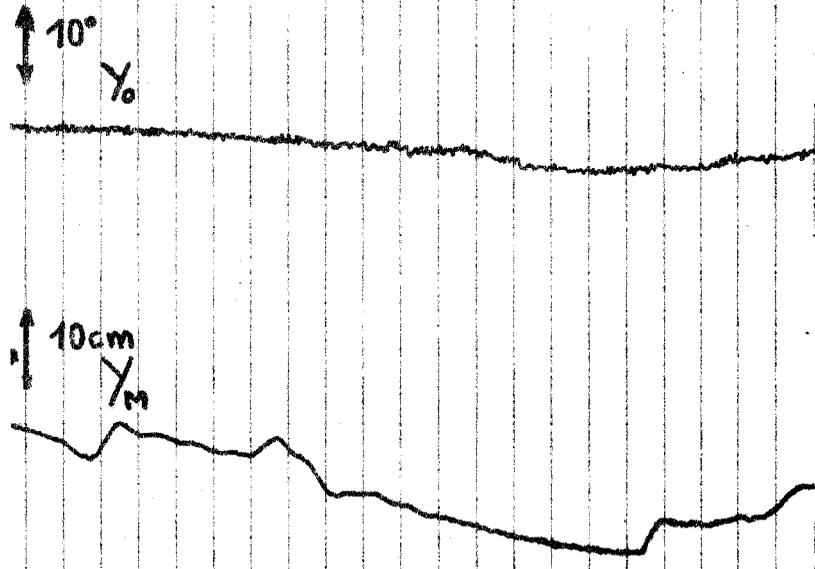
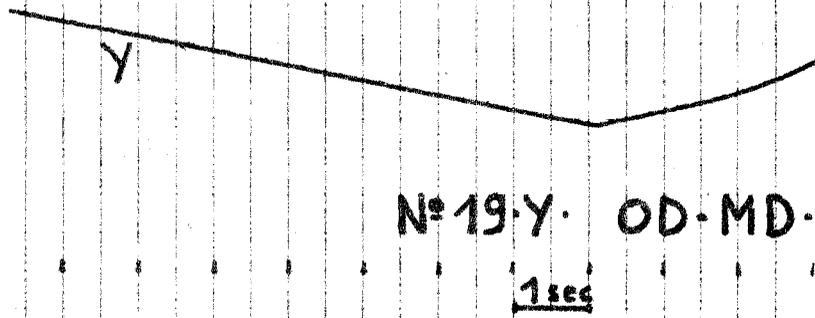
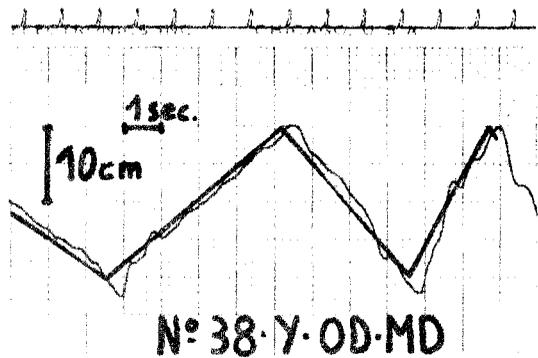
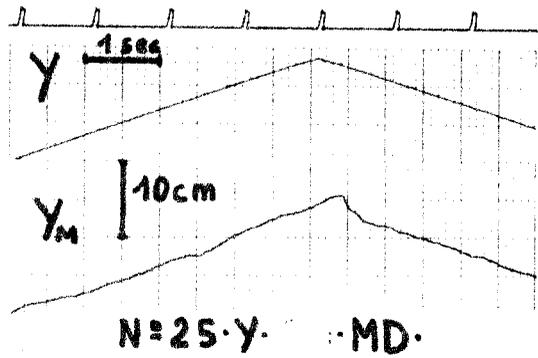
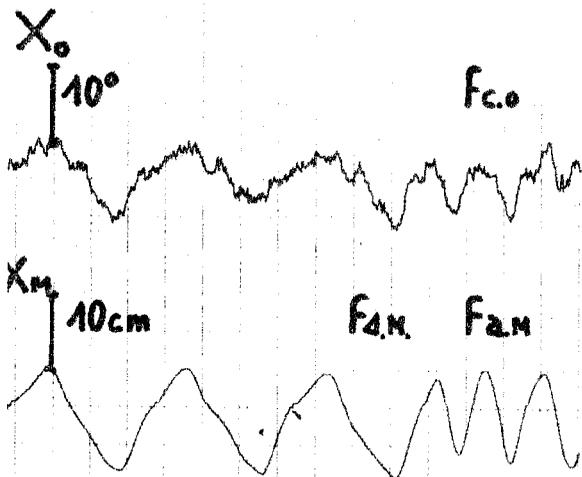
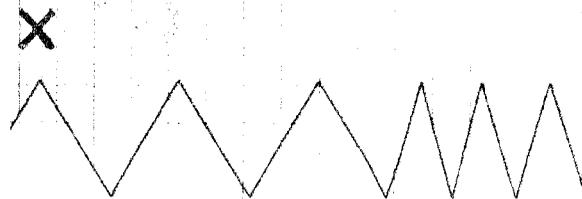
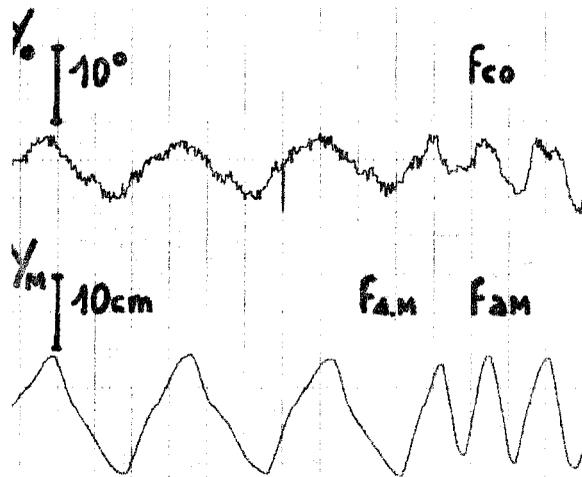
On peut vérifier sur les photographies des enregistrements présentés ci-après n° 25. XY. OD. MD, 25. Y. MD, 38 Y.OD. MD, 19.Y. OD. MD, 26.X.OD.MD, et 38.Y.OD.MD, les principales caractéristiques fonctionnelles des réponses visuelles et manuelles définies précédemment et mentionnées ci-dessus.

Notons plus particulièrement les petites oscillations de précision de la réponse manuelle lorsque la vitesse de la cible est faible (enregistrement 38. Y. OD. MD et 19. Y.OD.MD) ainsi que la linéarité de la réponse visuelle. A partir de la fréquence $f_{c.o}$, la main tend à "arrondir" son mouvement et répond d'une manière sinusoïdale au stimulus en dents de scie à partir de la fréquence $f_{a.M}$ (enregistrement n° 25. XY. OD. MD).

On peut également définir une fréquence caractéristique du comportement de l'opérateur $f_{c.M}$ à partir de laquelle la réponse manuelle n'est plus saccadée (sans petites oscillations de précision). Il arrive parfois que l'oeil suive inconsciemment le spot suiveur tout en restant asservi au spot cible (Enregistrement n° 38. Y. OD. MD). Le mouvement visuel peut également dans certains cas, osciller entre les spots cible et suiveur. Ces comportements se rencontrent lorsque les saccades d'ajustement du spot suiveur (manuel) entraînent une erreur en position non négligeable

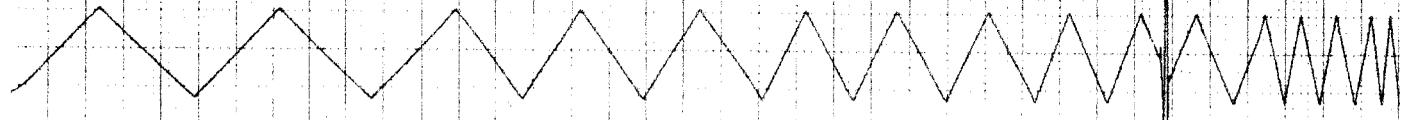


N° 25 · X · Y · OD · MD ·



Y

1 sec.



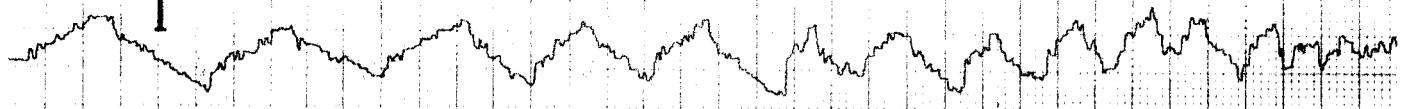
Nº 38 · Y · OD · MD ·

Y_o

10°

F_{c.o}

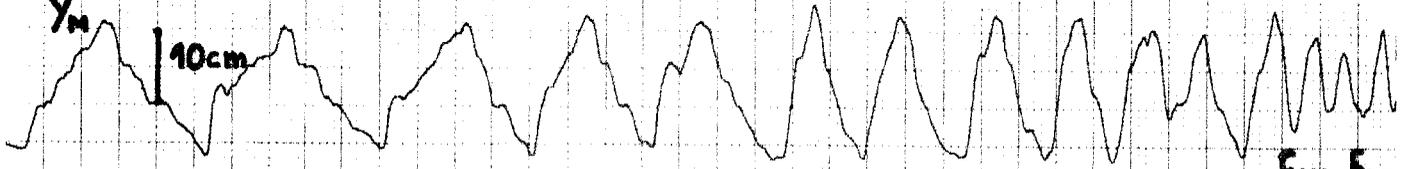
F_{d.o}



Y_M

10cm

F_M F_M



X

1 sec.

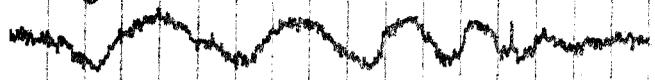
Nº 26 · X · OD · MD ·

X_o

10°

F_{c.o}

F_{d.o}



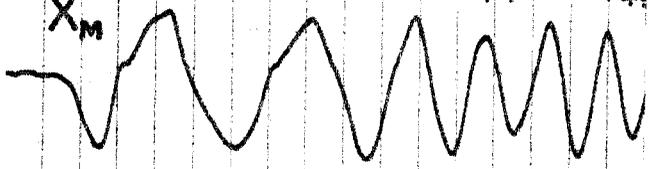
X_M

10cm

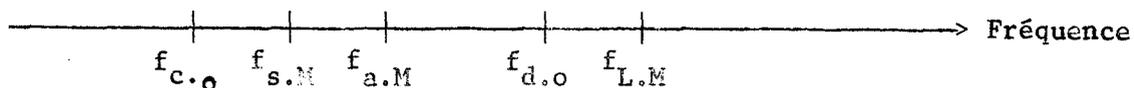
F_M

F_M

F_M



par rapport à la position de la cible. Les positions relatives des fréquences caractéristiques sont schématisées sur le graphique suivant :



II.3.2. Etude statistique

On peut résumer l'étude statistique par le tableau suivant :

	Fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient saccadée $f_{c.o}$	Fréquence de décrochage visuel $f_{d.o}$	Fréquence pour laquelle la réponse manuelle n'est plus saccadée $f_{s.M}$	Fréquence pour laquelle la réponse manuelle est sinusoidale $f_{a.M}$	Fréquence limite manuelle $f_{L.M}$
Valeur moyenne \bar{M} en Hertz	$\bar{f}_{c.o} = 0,675$	$\bar{f}_{d.o} = 1,82$	$\bar{f}_{s.M} = 0,88$	$\bar{f}_{a.M} = 1,05$	$\bar{f}_{L.M} = 1,94$
Ecart maximum en Hertz	0,8	1,1	0,6	0,8	1,06
Variance σ	0,36	0,51	0,38	0,35	0,56
Coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{M}}$	0,53	0,28	0,43	0,33	0,28

Nous présentons figure 2.11. la probabilité de ces grandeurs en fonction de la fréquence du signal de commande.

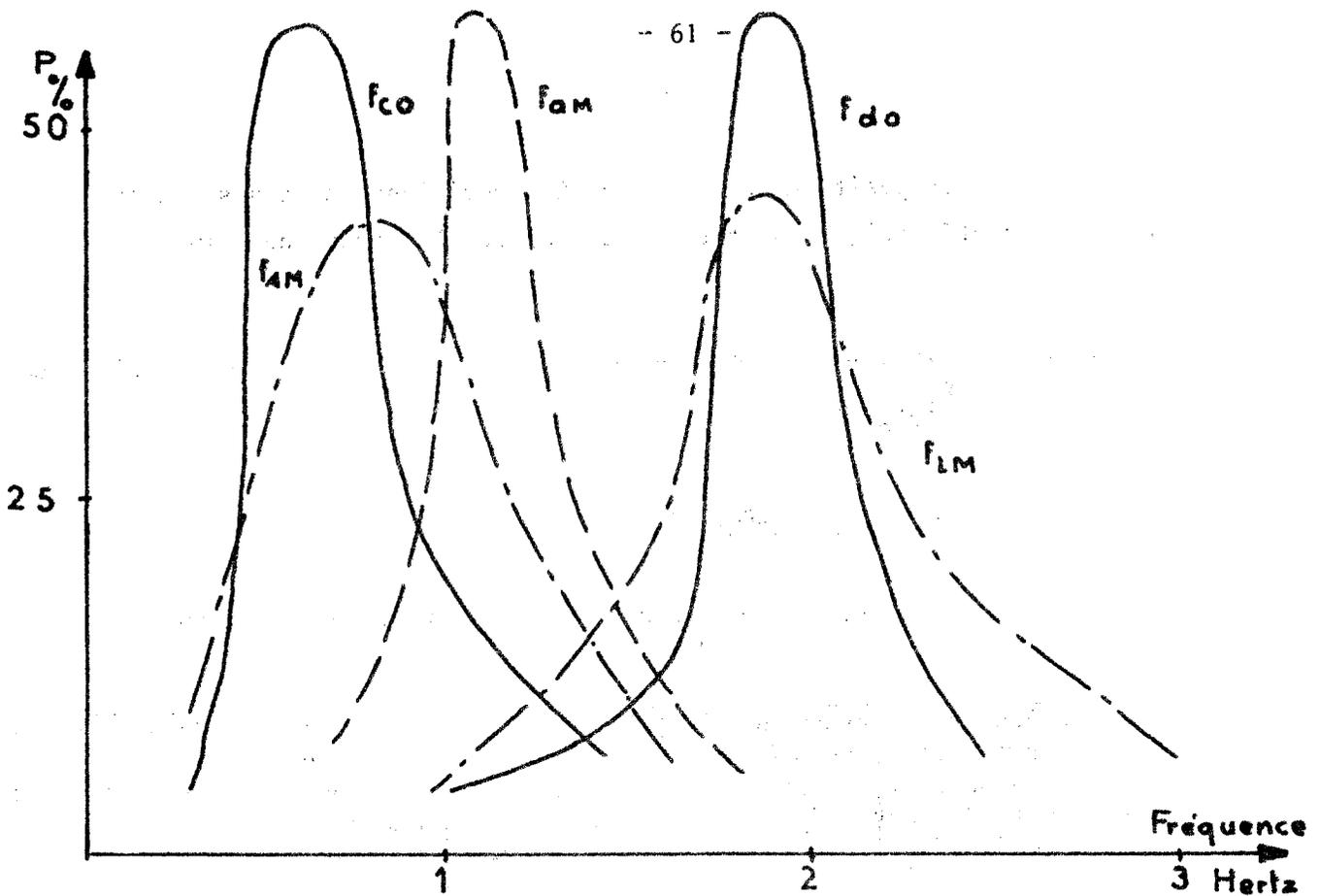


Figure 2.11. Fréquences caractéristiques d'un stimulus en dents de scie.

Les courbes correspondant au système visuel f_{co} et f_{do} sont toujours plus sélectives que celles du système manuel. Notons une diminution de la fréquence limite manuelle $f_{L.M}$ probablement due à la forme plus complexe ou moins naturelle du stimulus par rapport à une sinusoïde, par contre la fréquence $f_{a.M}$ reste pratiquement égale à celle trouvée pour des stimulus sinusoïdaux.

II.3.3. Relations entre la fréquence limite manuelle $f_{L.M}$ et les fréquences caractéristiques visuelles $f_{c.o}$ et $f_{d.o}$

L'étude statistique des fréquences $f_{L.M}$ et $f_{d.o}$ conduit à la valeur du coefficient de corrélation $\rho = 0,52$, et à la relation

$$\Delta f_{L.M} = 0,57 \Delta f_{d.o}$$

Une étude menée pour les fréquences : $f_{L.M}$ et $f_{c.o}$ amène à :
 $\rho = 0,45$ et $\Delta f_{L.M} = 0,72 \Delta f_{c.o}$ et pour les fréquences $f_{s.M}$ et $f_{c.o}$ à $\rho = 0,31$
et $\Delta f_{s.M} = 0,33 \Delta f_{c.o}$

(les valeurs de $f_{s.M}$ sont relativement dispersées).

Nous présentons figure 2.12. les courbes liant $f_{L.M}$ à $f_{c.o}$, $f_{d.o}$.

Elles illustrent l'importance du système visuel sur le comportement de l'opérateur : a une augmentation de la fréquence $f_{c.o}$ correspond une croissance de la fréquence limite manuelle $f_{L.M}$ de l'opérateur.

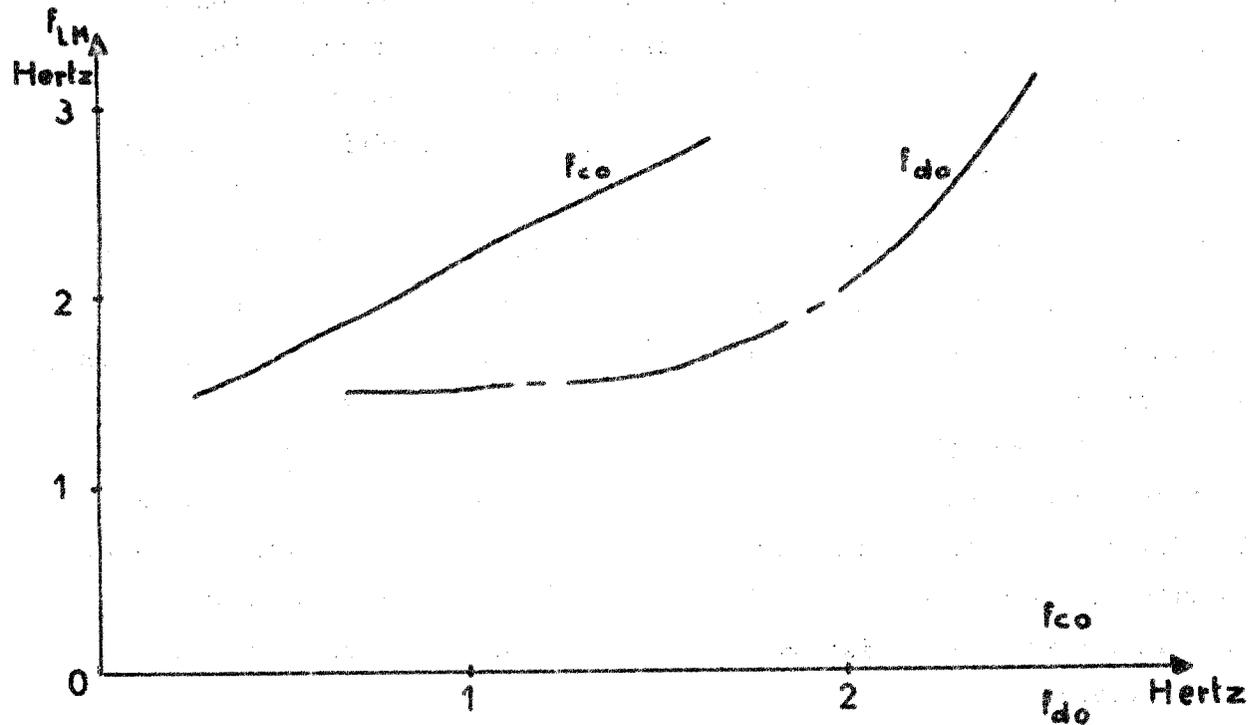


Figure 2.12. Variation de $f_{L.M}$ en fonction de f_{co} et f_{do} .

La variation de $f_{L.M}$ en fonction de $f_{d.o}$ est de part sa non-linéarité moins facile à expliciter.

II.3.4. Conséquences fondamentales

En effectuant simultanément l'étude statistique et l'observation des enregistrements on remarque que les "formes" des réponses visuelles et manuelles tendent à devenir identiques, à partir de la fréquence caractéristique du système visuel $f_{c.o}$, aux réponses observées lors de stimulus sinusoïdaux.

La différence de comportements du système oculo-moteur conduit à la constatation suivante : lorsque la vitesse du stimulus est faible la réponse manuelle contient des mouvements de précision destinés à un meilleur ajustement ; à partir de $f_{c.o}$, la réponse visuelle "tend" vers une forme saccadée de plus en plus "carrée" et la réponse manuelle vers le premier harmonique du stimulus.

Mentionnons qu'il existe une vitesse optimale pour la réponse manuelle, entre les comportements à vitesse lente et à vitesse rapide. Cette vitesse, en accord avec la physiologie, se situe aux environs de 160 mm/seconde, elle correspond dans nos conditions d'expérience à une fréquence du mouvement de la cible de 1 Hertz. En effet, dans ce domaine de vitesse, il n'existe pratiquement pas d'oscillations de la réponse manuelle.

À faible vitesse de la cible (en dessous de $f_{c.o}$), on note à chaque changement de signe de la dérivée du stimulus, l'effet de la prévision de l'opérateur sur la réponse manuelle (Enregistrements n° 25.Y.MD. et 38.Y.OD.MD). Ce caractère est mis en évidence par un dépassement du spot suiveur sans variation de sa vitesse instantanée lorsqu'on change le signe de la dérivée de la trajectoire du spot cible, ce comportement étant fonction de la vitesse (fréquence) de la cible. L'opérateur est par conséquent sensible à la vitesse de variation de l'écart existant entre les spots cible et suiveur.

Le temps écoulé entre le changement de signe de la dérivée du stimulus et la réaction du sujet à la nouvelle direction de la cible est de l'ordre de 0,3 seconde.

En outre, on peut supposer, comme la transmission du message nerveux se fait d'une manière impulsionnelle, que l'opérateur estime la vitesse de l'erreur pendant la séquence d'échantillonnage précédant la mise en action du sujet. La mise en mouvement à la nouvelle direction de la cible ressemblant fortement à la réponse manuelle à un stimulus échelon. Il est fort probable que l'opérateur attende l'instant d'échantillonnage suivant, avant de poursuivre la cible.

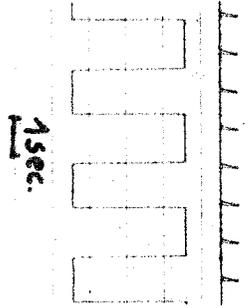
Remarquons que ces différents aspects peuvent également se rencontrer (Enregistrement n° 38. Y. OD. MD) dans la réponse du système visuel.

II.4. Analyse des réponses visuelles et manuelles à des stimulus carrés périodiques.

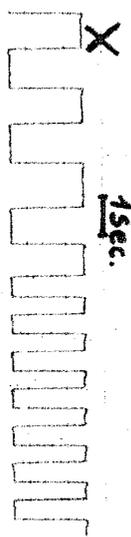
On peut penser à priori que cette analyse est superflue car elle rejoint les études de la réponse de l'opérateur à des stimulus en échelons. Néanmoins nous l'avons effectuée de façon à confirmer les propriétés mises en évidence précédemment, certains aspects de l'opérateur humain étant peu connus.

Comme le montre l'enregistrement ci-après, Photographies n° 60. X. OD. MD et 7. Y. OD. MD, les réponses visuelles et manuelles sont pratiquement identiques, à partir de la fréquence pour laquelle la main répond au premier harmonique du stimulus à celles obtenues lors de stimulus sinusoïdaux et en dents de scie.

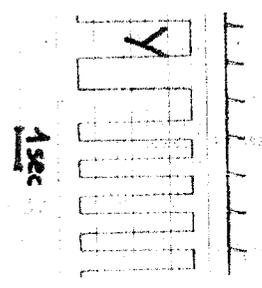
L'étude statistique des différents paramètres : f_{do} , f_{aM} , f_{LM} est résumée par le tableau suivant :



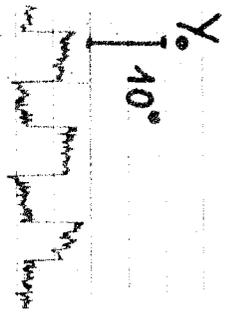
№7.Y.OD.MD.



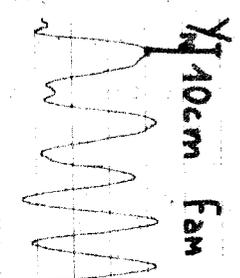
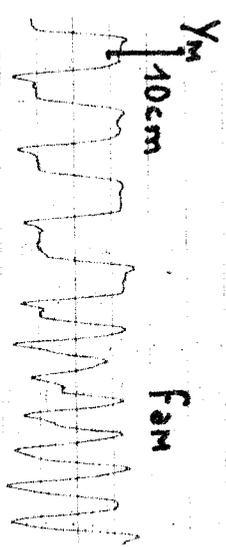
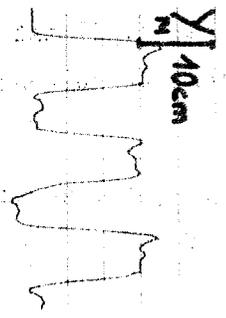
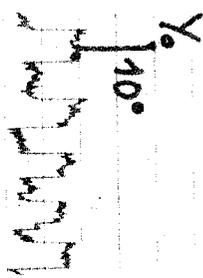
№60.X.OD.MD



№7.Y.OD.MD.



F₀



	Fréquence de décrochage visuel $f_{d.o}$	Fréquence pour laquelle la réponse manuelle est harmonique $f_{a.M}$	Fréquence limite manuelle $f_{L.M}$
Moyenne en Hertz \bar{M}	$\bar{f}_{d.o} = 1,5$	$\bar{f}_{a.M} = 1,1$	$\bar{f}_{L.M} = 1,8$
Ecart maximum en hertz	0,75	0,9	1,7
Variance σ	0,47	0,4	0,7
Coefficient de variation $V = \frac{\sigma}{\bar{M}}$	0,31	0,36	0,38

Les valeurs fortement dispersées de la fréquence limite manuelle sont probablement liées aux variations brusques de la cible, qui exigent de l'opérateur une plus grande attention, et un effort plus soutenu. Les fréquences caractéristiques $f_{d.o}$ et $f_{L.M}$ sont également plus faibles que celles relevées lors de stimulus sinusoidaux ou en dent de scie.

Nous présentons figure 2.13, les courbes de probabilité des fréquences caractéristiques $f_{d.o}$, $f_{a.M}$ et $f_{L.M}$ obtenues par extrapolation des valeurs issues de l'analyse des différents sujets. On ne doit donc pas s'étonner du caractère peu mathématique de ces différentes courbes.

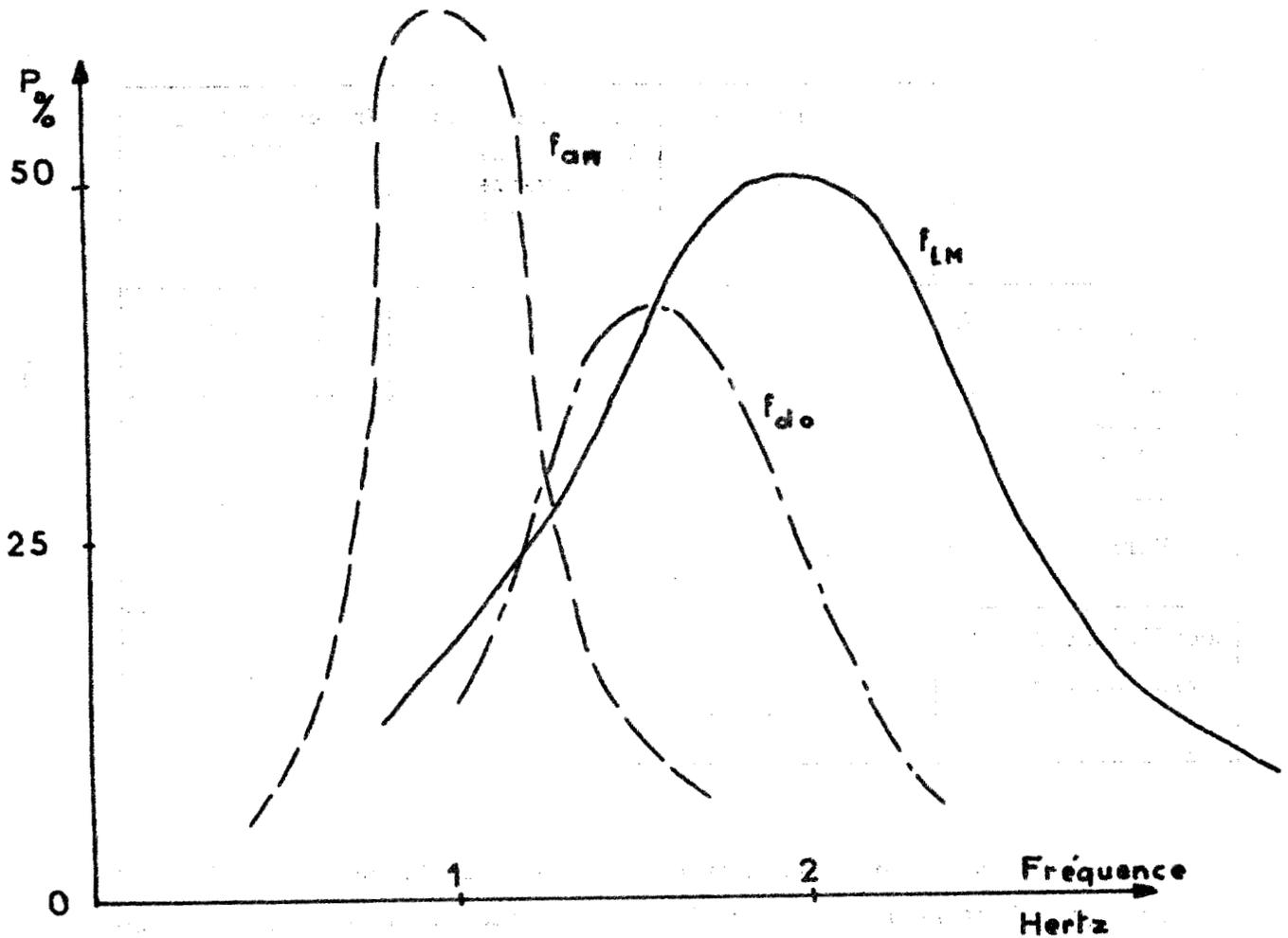


Figure 2.13. Probabilité des fréquences caractéristiques pour des stimulus en crêteaux périodiques.

II.5. Analyse des réponses visuelles et manuelles à des stimulus pseudo-aléatoires

On pourrait envisager une étude aussi complète que les précédentes pour chaque forme de stimulus présenté à l'opérateur. Nous en avons la possibilité à l'aide de nos nombreux enregistrements mais nous préférons limiter ces travaux pour les raisons suivantes :

- les signaux aléatoires sont en grande partie une combinaison dans le temps et dans l'espace de signaux déjà étudiés
- les réponses de l'opérateur, de par la complexité des trajectoires sont de plus en plus fonction du coefficient d'intelligence de l'opérateur et par conséquent davantage dispersées.

- Les résultats que nous pouvons présenter n'amènent que peu d'éléments supplémentaires à notre étude proprement dite et l'on retrouve les différents aspects fonctionnels mentionnés précédemment.

II.5.1. Réponse de l'opérateur à des signaux en échelons, aléatoires dans le temps et dans l'espace

L'examen des enregistrements permet de constater une croissance des temps de latence manuelle relativement importante ; celle-ci s'explique par le fait qu'on exige constamment de l'opérateur une attention accrue et un temps de décision plus grand. Ce délai est inclus dans le temps "mort" R_M de la réponse du sujet.

$$R_M = R_p + t_d$$

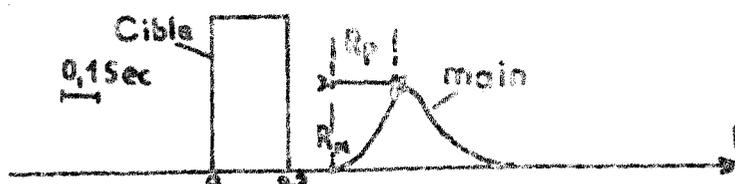
R_p : retard pur et temps de transmission de l'information

t_d : temps de décision variable en fonction du sujet et de la trajectoire.

La variation aléatoire de la position du spot cible est très fatigante pour le sujet et il arrive que l'opérateur ne poursuive plus du tout la cible pendant un certain temps.

Par contre, l'allure de la réponse de l'opérateur est toujours la même, elle possède néanmoins dans ce cas un dépassement assez grand.

Lors de stimulus de forme impulsionnelle de durée égale ou inférieure au temps de latence, le mouvement oculaire est parfois inexistant et la réponse manuelle se fait d'une manière très amortie, après la cessation du stimulus. On pourrait probablement par cette méthode distinguer le retard pur du temps mort de l'opérateur (R_M).



R_p de l'ordre de 0,15 à 0,2 seconde.

1 sec.

Y

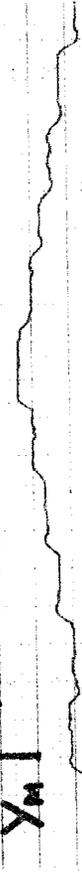


Y 1 sec



Nº 25·XY·MD.

Y_m 10cm



Y₀

10°



1 sec

X



Y_m 10cm



X_m 10cm



En effet après le début de la réaction manuelle pour $t = R_M$ il ne peut y avoir de modification de la trajectoire de l'opérateur qu'après un certain retard dû à la transmission de l'information de correction, on peut alors estimer qu'à partir du moment où il y a modification (par exemple un point d'inflexion) le temps correspondant au retard pur est écoulé.

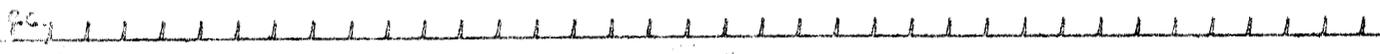
L'un des enregistrements présenté, n° 28. Y. OD. MD, illustre la différence du comportement dynamique des systèmes visuel et manuel (temps de montée et constantes de temps en particulier).

Le tracé, n° 25 XY. MD correspond à la réponse manuelle lors d'un stimulus sinusoïdal échantillonné. Le comportement de l'opérateur rappelle sensiblement celui mis en évidence par les réponses obtenues au paragraphe II.2. (étude de l'opérateur à un stimulus sinusoïdal).

II.5.2. Réponses de l'opérateur à un stimulus de forme circulaire

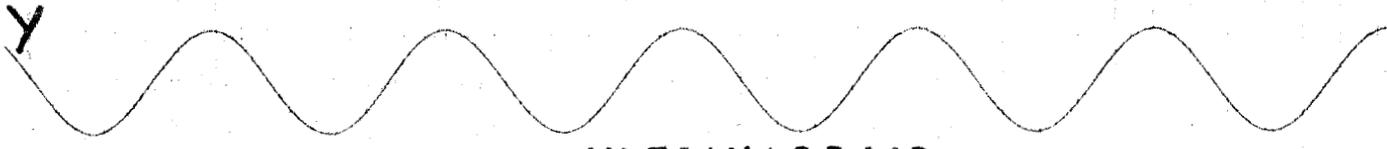
Rappelons que l'écran de présentation des signaux se trouve placé à un mètre de l'opérateur et que sa surface est de $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Nous avons relevé lors de trajectoires de forme circulaire, des réponses oculaires très inattendues. On peut remarquer sur les tracés de la photographie n° 58.XY.OD.MD présentée ci-après, que les composantes verticales et horizontales du mouvement de l'oeil sont pratiquement en phase, ce qui revient à dire que la réponse visuelle du sujet est effectuée dans une direction oblique et non circulaire. Ceci se produit à partir d'une très faible vitesse de déplacement de la cible, correspondant à une fréquence de 0,15 Hertz. Lorsque nous augmentons cette vitesse d'une part l'amplitude manuelle décroît et les petites oscillations de précision disparaissent, d'autre part la réponse visuelle devient de plus en plus saccadée et enfin, l'oeil ne suit plus le stimulus. Les aspects fonctionnels sont donc conservés mis à part le phénomène oblique de l'oeil.

Ce comportement peut s'interpréter par une difficulté du sujet à réaliser des mouvements circulaires compte tenu de sa musculature oculomotrice.

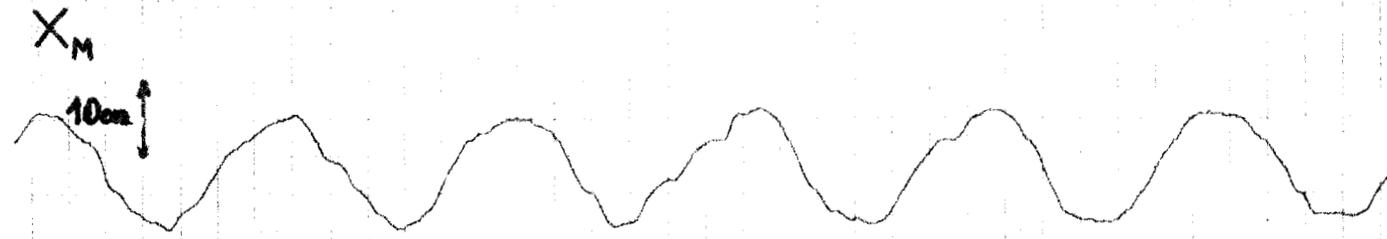
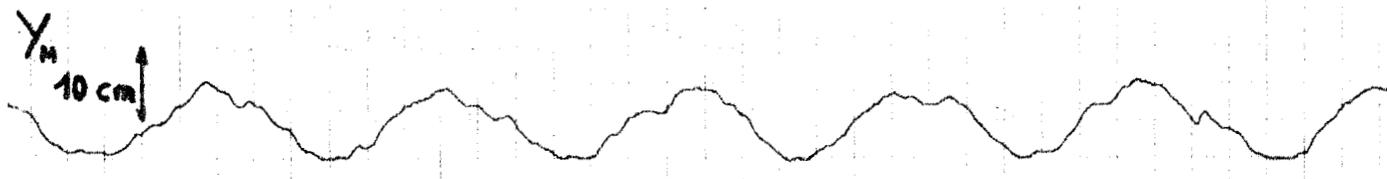
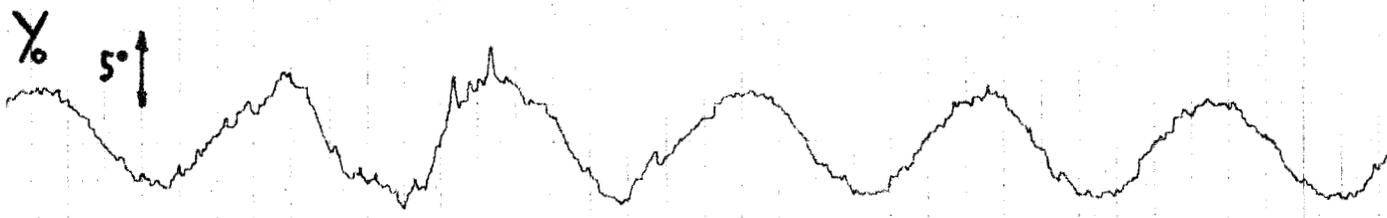


Trajectoire circulaire

- 71 -
1sec.



N° 58 · X · Y · O · D · M · D ·



II.5.3. Superposition pseudo-aléatoire de sinusoides, de dents de scie et de créneaux

On retrouve les caractéristiques définies antérieurement pour chaque composante du stimulus mais l'aspect non-linéaire de la réponse visuelle est très marqué dès que l'une des composantes atteint une fréquence pour laquelle le comportement visuel devient non-linéaire.

Nous présentons sur les photographies suivantes quelques enregistrements obtenus montrant l'effet non-linéaire du mouvement de l'oeil (photographie n° 19.Y.OD.MD) bien que le rapport des amplitudes des deux sinusoides composantes soit élevé.

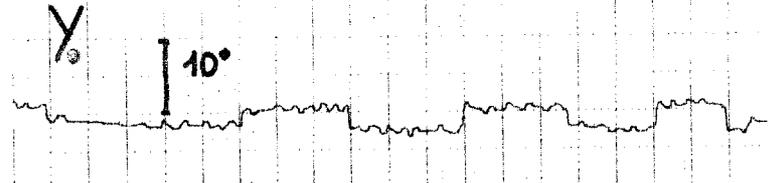
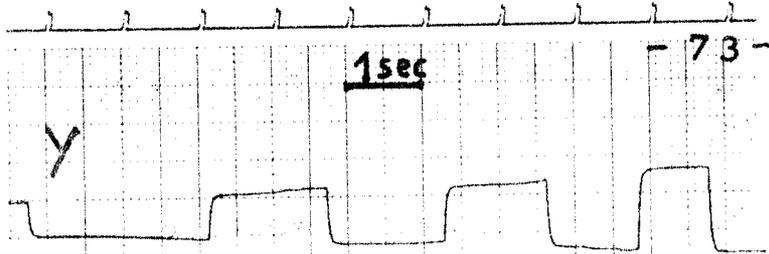
Le mouvement manuel est en accord avec les conclusions précédentes : petites oscillations pour les faibles fréquences et réponse au premier harmonique (fondamental) du stimulus à partir d'une certaine vitesse de la cible correspondante à $f_{a.M}$ (enregistrement n° 22.Y.OD.MD et 29.XY.OD.MD.)

II.6. Principales caractéristiques des réponses suivant le sens de déplacement de la trajectoire de la cible

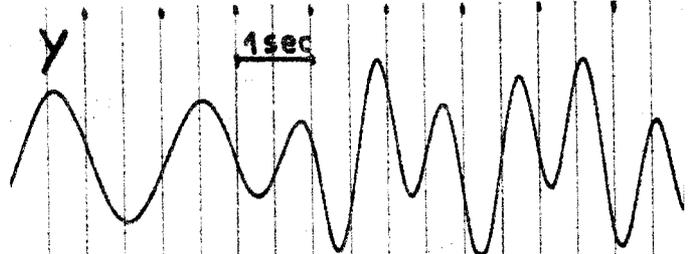
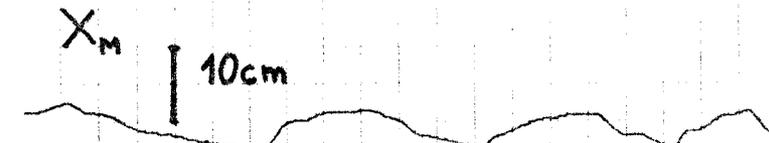
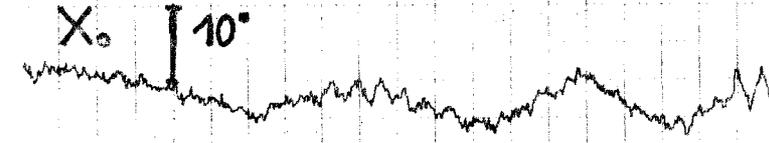
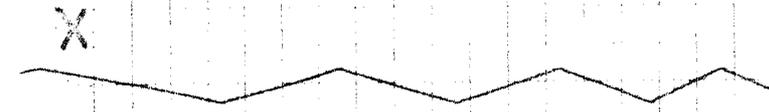
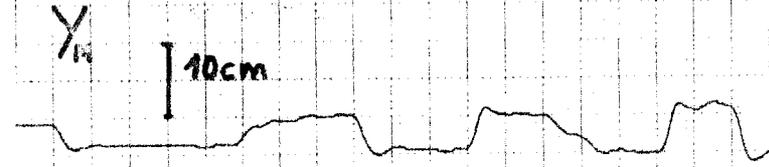
Nous n'avons pas distingué dans l'étude précédente la direction du mouvement dans le plan (mouvements horizontaux, verticaux et obliques).

En ce qui concerne le système visuel LECLERCQ¹³ a montré que les mouvements horizontaux ont un temps de latence plus faible que les mouvements verticaux et que pour les mouvements obliques, il y a égalité des temps de latence des deux composantes.

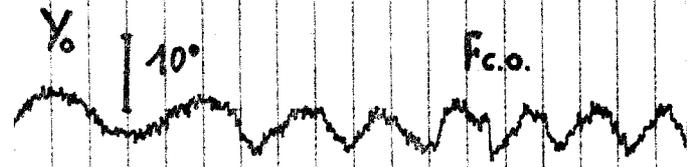
Notons cependant que cette différence s'est révélée faible lors de notre étude - un à trois centièmes de seconde - mais que pour certains sujets cette différence est nette.



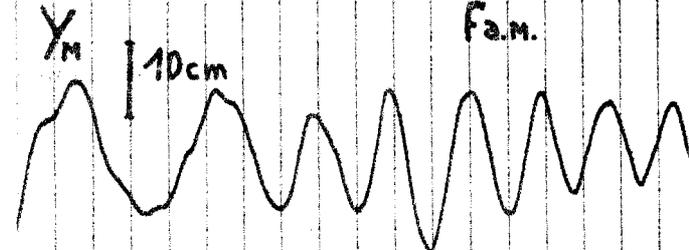
N° 29-X.Y. OD. MD



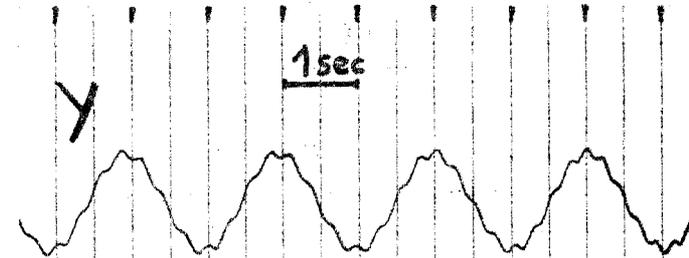
N° 22-Y. OD. MD.



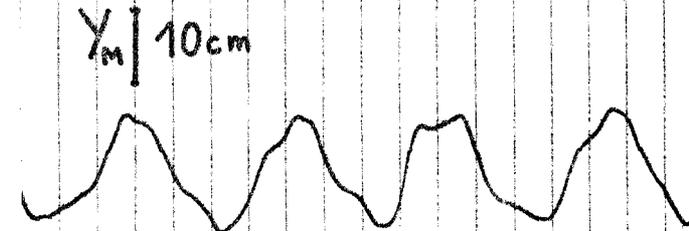
F.c.o.



F.a.m.



N° 19-Y. OD. MD.



En ce qui concerne le système manuel il faut souligner que les mouvements de rétropulsion * après une antépulsion et d'adduction ** après une abduction sont plus rapides et ont un temps de latence inférieur à la moyenne statistique.

La rapidité de ces mouvements (réthropulsion et adduction) entraîne évidemment une erreur plus grande et un dépassement plus important.

II.7. Caractéristiques des réponses suivant la combinaison oeil-main effectuée

Le protocole expérimental offre la possibilité d'analyser le comportement de l'opérateur effectuant les opérations suivantes :

- commande manuelle du levier à l'aide de la main droite et analyse de l'oeil droit ou de l'oeil gauche
- commande manuelle du levier à l'aide de la main gauche et analyse de l'oeil droit ou de l'oeil gauche.

Il était alors intéressant de pouvoir comparer sur un même sujet ces différents comportements.

Les réponses du système oculo-moteur de l'oeil droit ou de l'oeil gauche, bras de levier commandé par la main la plus habile (main droite dans la majorité des cas) sont identiques. En effet notre étude s'est portée sur des sujets sains et normaux, et l'analyse de nos résultats ne nous a pas permis de déceler une variation du temps de latence manuel bien que les "chemins" physiologiques de transmission de l'information soient différents. Ceci tend à montrer que le temps de décision de l'opérateur est beaucoup plus important que le temps de transmission.

* Réthropulsion : mouvement se dirigeant de l'avant vers l'arrière de l'opérateur ; sens opposé à une antépulsion : de l'arrière vers l'avant.

** Adduction : mouvement se dirigeant de la droite vers la gauche de l'opérateur, sens opposé à une abduction : de la gauche vers la droite.

Par contre, nous avons observé un comportement différent suivant que l'opérateur manipulait de la main droite (en général la plus habile) ou de la main gauche, (photographies ci-après). Le comportement visuel est pratiquement identique mais les mouvements de la main gauche sont moins précis. La fréquence limite manuelle est du même ordre de grandeur dans les deux expériences, toutefois on constate une décroissance plus sensible de l'amplitude du mouvement de la main gauche (photographie n° 41.Y.OG.MG) en fonction de la fréquence du stimulus.

A un stimulus en échelon, les réponses manuelles de la main gauche ont par rapport à la main droite un dépassement transitoire plus important, ou un temps de montée plus long. Lors d'un stimulus oblique, on remarque que les composantes verticale et horizontale du mouvement de la main gauche peuvent être très différentes (photographies n° 30.YX.MG et 30. XY. MD).

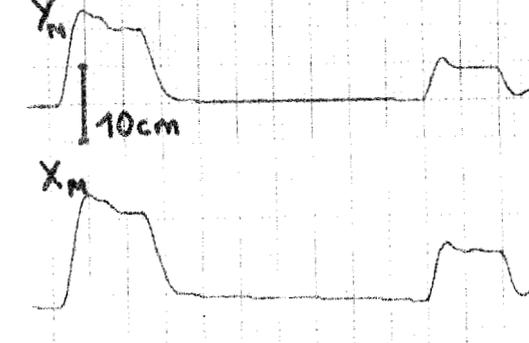
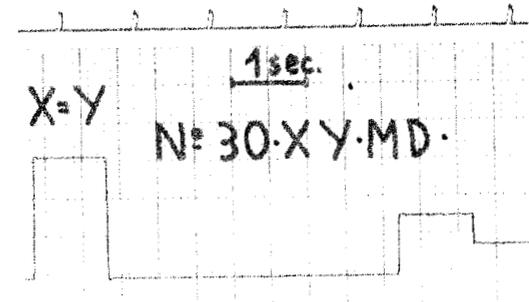
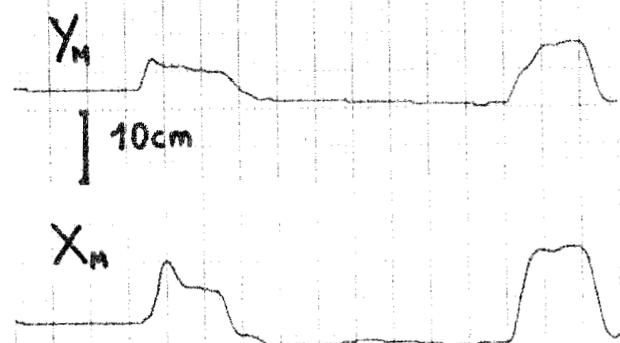
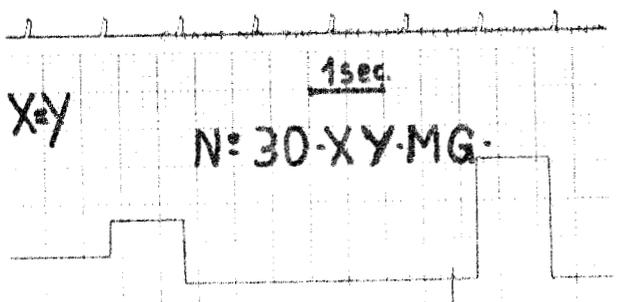
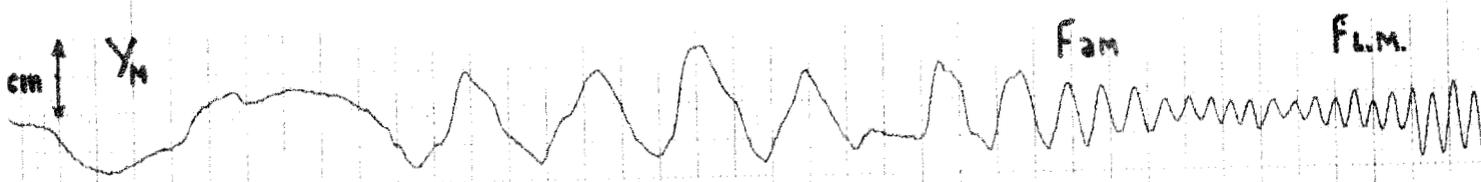
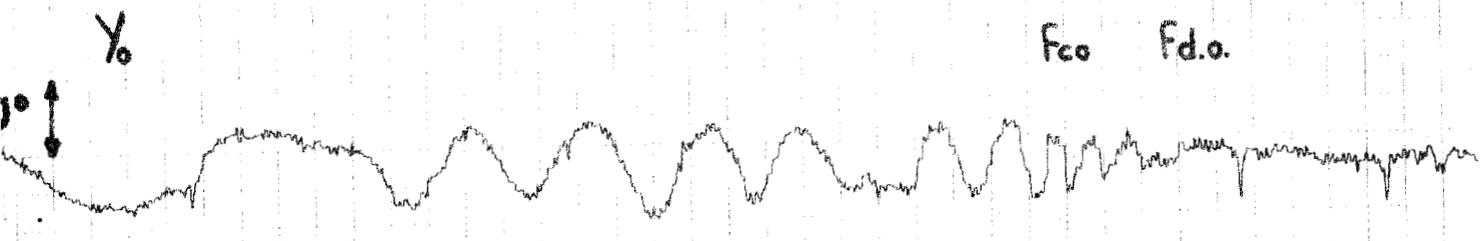
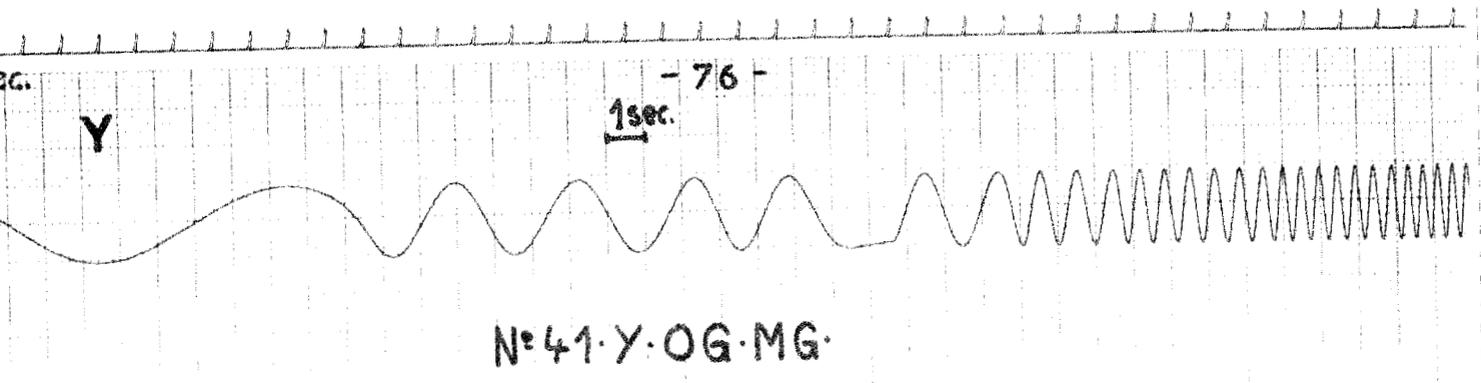
Remarque sur la position du bras de levier manuel

La différence apportée par un changement de position du bras de levier de l'opérateur, vertical (utilisé précédemment), horizontal, oblique est caractérisée par un temps d'adaptation plus ou moins long du sujet. Toutefois on retrouve pour une position horizontale du levier toutes les caractéristiques mentionnées précédemment.

II.8. Conclusions

L'analyse simultanée des mouvements de l'oeil et de la main s'est révélée essentielle lors de l'étude du comportement de l'opérateur. Celui-ci étant étroitement lié à l'écart des temps de latence visuel et manuel, ainsi qu'à l'amplitude du stimulus.

L'étude des enregistrements obtenus à un stimulus de forme périodique (sinusoïdale, dent de scie et créneau) montre que les réponses visuelles et manuelles sont pratiquement indépendantes de la forme des stimulus à partir de la fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient



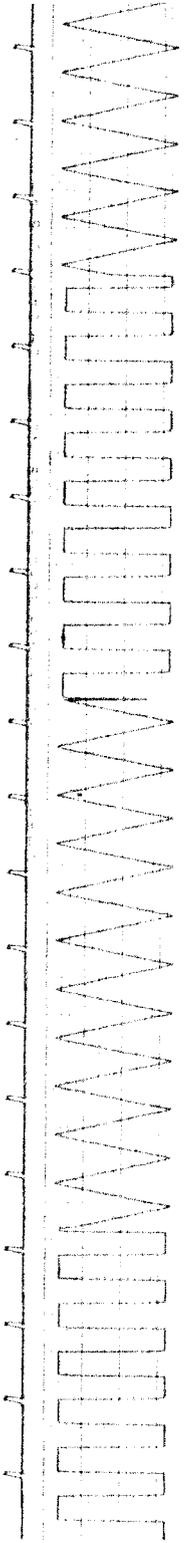
non-linéaire $f_{c.o}$ mais que certains de leurs paramètres dépendent de la forme et de l'amplitude du stimulus. La photographie n° 65.Y.OD.MD met en évidence la différence des paramètres $f_{d.o}$ et $f_{L.M}$ (fréquence de décrochage visuel et fréquence limite manuelle) selon la forme du stimulus bien que la fréquence du mouvement de la cible soit identique. Le tableau ci-dessous représente les valeurs des différentes fréquences caractéristiques en fonction de la géométrie du stimulus.

Forme Fréquence caractéristique en Hertz	Stimulus Sinusoïdaux	Stimulus en dents de scie	Stimulus en créneaux
$f_{c.o}$	0,38	0,67	-
$f_{d.o}$	1,82	1,82	1,5
$f_{s.M}$	0,85	0,88	-
$f_{a.M}$	-	1,05	1,1
$f_{L.M}$	2,4	1,94	1,8

Les coefficients de corrélation entre ces différentes fréquences caractéristiques ont une valeur voisine de $\rho = 0,5$:

- $\rho = 0,55$ entre les fréquences de décrochage visuel $f_{d.o}$ pour les stimulus sinusoïdaux et créneaux périodiques.
- $\rho = 0,52$ entre les fréquences de décrochage visuel $f_{d.o}$ pour les stimulus sinusoïdaux et en dents de scie.
- $\rho = 0,48$ entre les fréquences non-linéaires visuelles $f_{c.o}$ pour les stimulus sinusoïdaux et en dents de scie.

Quelle que soit la forme du stimulus présenté à l'opérateur, on retrouve alors à partir d'une certaine vitesse de la cible la réponse harmonique de la main (elle tend vers une fréquence limite) et la réponse non-linéaire de l'oeil (jusqu'à l'instant où ce dernier "décroche").

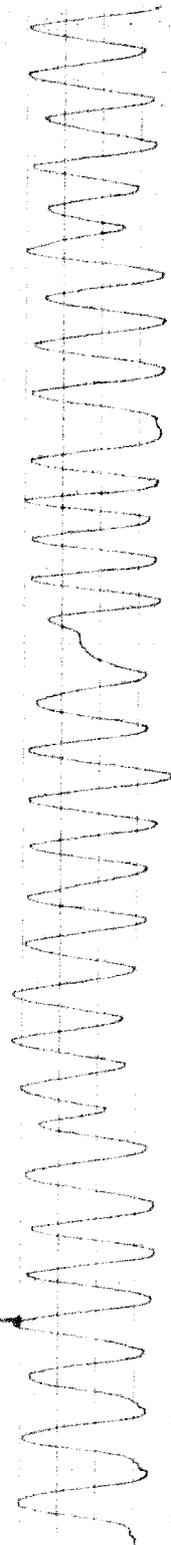


1 sec.

γ_0 | 10°



γ_m | 10 cm



Nº 65 Y · OD · MD

On peut encore concrétiser ces différents résultats par quelques courbes de probabilité, figure 2.14. des fréquences caractéristiques pour différentes formes du stimulus.

Nous avons pu dégager de cette étude générale (sur soixante sujets) les caractéristiques essentielles des différents comportements de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite, elles seront à la base de l'identification présentée au chapitre suivant.

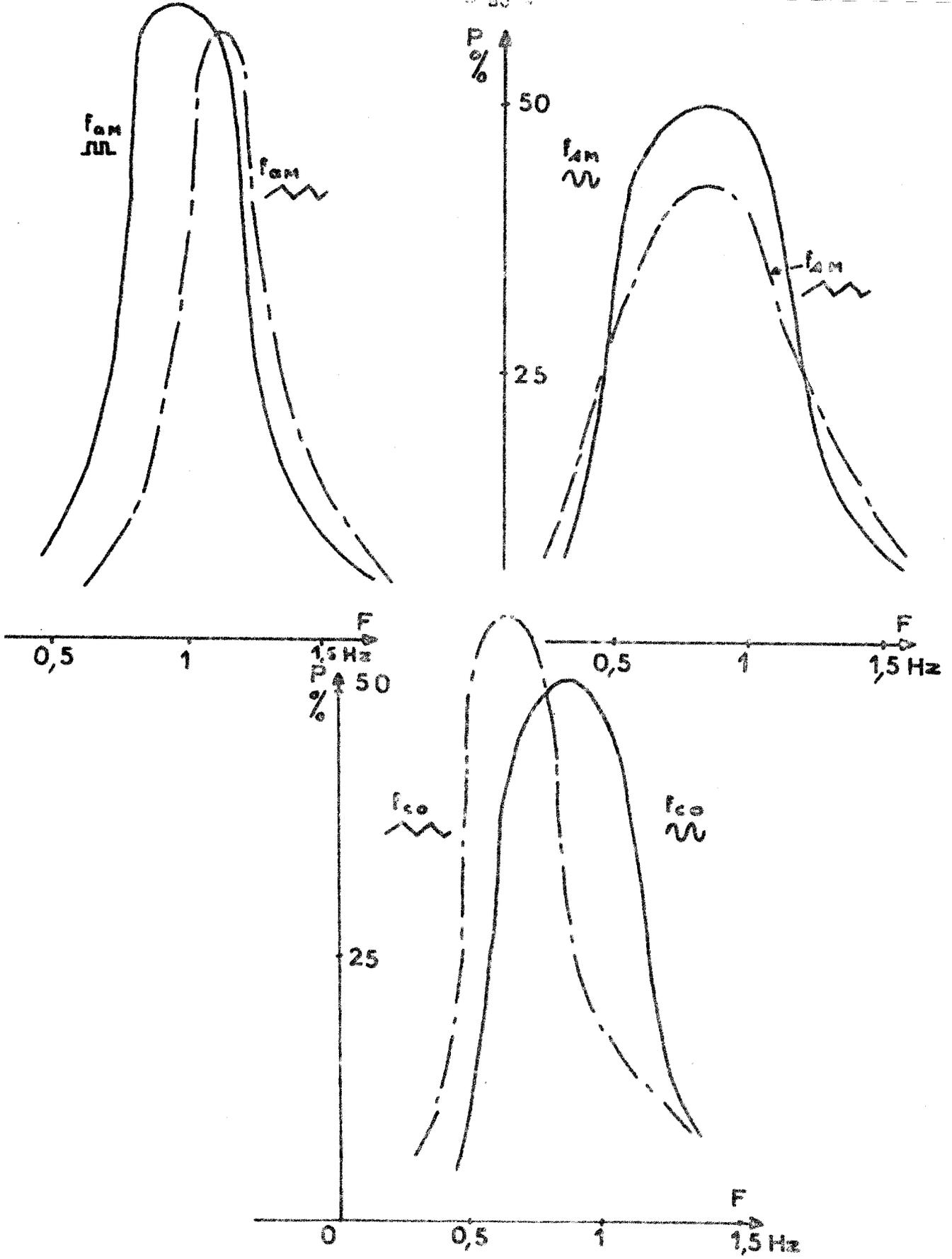


Figure 2.14. Courbes de probabilité pour différents stimulus.

Chapitre III

Identification expérimentale de l'opérateur humain

Dans le chapitre précédent nous avons essayé de montrer les principaux comportements de l'opérateur en fonction des différents paramètres observés.

Nous allons nous efforcer au cours de ce chapitre de dégager des conclusions permettant l'élaboration d'un modèle de l'opérateur, compte tenu des renseignements apportés par l'étude précédente, complétés et vérifiés par une série de tests destinés à mettre en évidence les phénomènes observés.

III.1. Elaboration d'un modèle

D'après certains auteurs, tels *RAOULT*², *TCHINAEV*³⁰, *PENESCU*³¹, le comportement de l'opérateur humain dans l'accomplissement d'une tâche peut être assimilé à un système automatique asservi à différentes fonctions, les unes internes à l'organisme, les autres externes. Parmi celles-ci, se trouvent sa faculté de reconnaissance des structures, sa capacité d'utiliser l'expérience passée pour son perfectionnement, ses possibilités pratiquement illimitées de mémoire analytique... Il existe alors, outre une transmission directe du phénomène, une liaison en retour qui a pour but de vérifier le déroulement de l'action et d'élaborer des fonctions régulatrices afin de se rapprocher du fonctionnement optimal.

La mise en mouvement de l'opérateur à un ordre donné et son autorégulation sont donc nécessairement fonction du capteur d'entrée, de l'organe moteur, du mode de transfert de l'information reçue, ainsi que de l'action de régulation basée sur l'analyse des résultats précédents.

Il résulte de ceci que le modèle, présenté figure 3.1. rend compte d'une part de l'influence de la fonction visuelle et de l'apprentissage sur le mouvement de l'opérateur, d'autre part du comportement des fonctions visuelle et manuelle lorsque l'opérateur suit, soit une cible commandée par des signaux extérieurs, soit une cible commandée par lui-même.

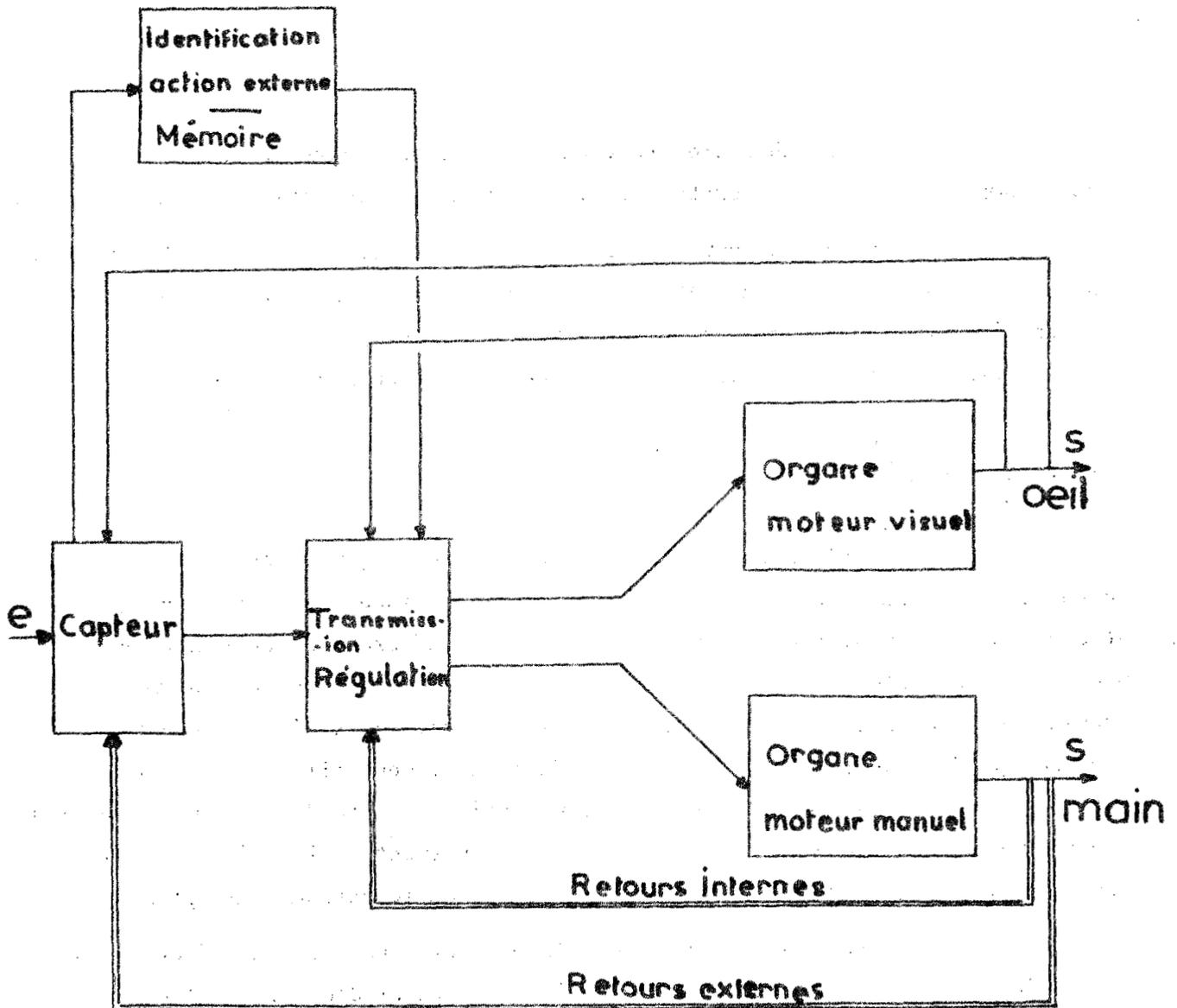


Figure 3.1. Elaboration d'un modèle.

III.2. Méthode expérimentale d'identification

Les équations du comportement de l'opérateur humain étant inconnues, la méthode consiste à identifier, par simulation sur calculatrice, les équations de la réponse du système humain à des relations fonctionnelles qui en réalisent la meilleure approximation. Le problème réside également dans la confrontation de certaines propriétés physiologiques bien définies et connues avec les résultats expérimentaux relevant d'une série de tests.

L'analyse statistique de ces observations donne les premiers éléments de l'identification. Toutefois les aspects évolutif et corrélatif des paramètres d'un sujet se révèlent très importants pour mettre en évidence les notions d'apprentissage et d'auto-adaptation de l'opérateur et la méthode exige d'exploiter au maximum les possibilités de modification du protocole expérimental afin de caractériser le comportement de l'opérateur à un test donné.

On peut distinguer dans la chaîne directe d'un système automatique deux éléments essentiellement différents : l'un, le dispositif à régler qui peut être considéré ici comme l'organe musculaire associé à un engin de commande ; l'autre, le régulateur et le système de transmission qui élaborent les réactions exigées à partir des conditions externes et internes du système. A partir du schéma proposé figure 3.1., posons :

$$\boxed{S} = \boxed{A} \boxed{S_0} + \boxed{B_n} \boxed{g(i)}$$

S = Sortie du système

S₀ = conditions initiales

g(i) = sortie du régulateur

A et B_n = matrices caractérisant le fonctionnement du système avec :

$$\boxed{B_n} \boxed{g(i)} = \boxed{B_1} \boxed{\beta(e)} + \boxed{B_2} \boxed{\alpha(R)} + \boxed{B_3} \boxed{q} + \boxed{B_4} \boxed{k}$$

B₁ β(e) contribution de l'entrée

B₂ α(R) corrections diverses

B₃ q terme mémorisé

B₄ k terme prédictif.

Il est évident dès lors qu'il est difficile d'identifier l'opérateur d'une manière mathématique, aussi nous aurons recours à la méthode expérimentale.

III.3. Influence du système visuel sur la réponse manuelle de l'opérateur et premières conclusions.

III.3.1. Etude du capteur visuel

Lorsque l'opérateur effectue une poursuite manuelle, la rétine de l'oeil capte les informations du stimulus présenté et peut être considérée comme organe de détection de l'opérateur humain.

Ce capteur d'information par sa variation de sensibilité autour de la fovéa, par ses différents seuils : temps minimum d'impression de la rétine, acuité visuelle, est essentiellement non-linéaire. Il est à l'origine d'une perte d'information lorsque la vitesse de la cible devient importante (se référer aux différentes courbes du chapitre précédent, courbes 2-9, 2-10...).

Lorsque l'oeil ne suit plus le signal d'entrée (décrochage à $f_{d.o}$) il n'existe plus d'ajustement automatique de la position de la fovéa pour une réception optimale des images rétiniennes, et il y a une grande perte d'informations.

De plus, les résultats importants mis en évidence à propos des réponses visuelles du chapitre précédent - temps de montée très court à un stimulus en échelon (paragraphe II.1.), réponse linéaire pour les entrées de faible vitesse, puis non linéaire de forme carrée pour les trajectoires plus rapides (paragraphe II.2. et II.3.) et enfin le "décrochage" amènent à envisager une non-linéarité oculo-motrice contenant un seuil Δ variable en fonction de la vitesse du stimulus (figure 3.2.).

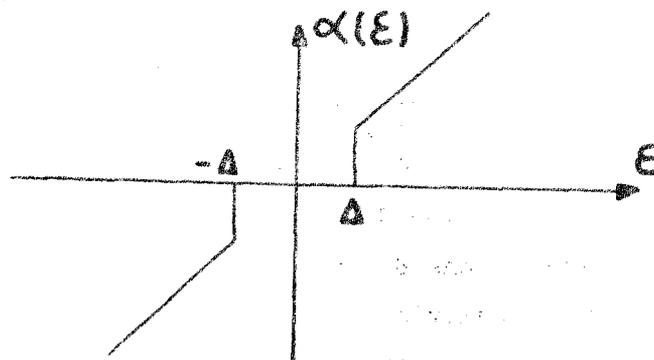


Figure 3.2. Non-linéarité oculo-motrice.

ϵ et α (ϵ) : entrée et sortie de l'élément non linéaire.

III.3.2. Vérification du comportement non-linéaire du système visuel

Les enregistrements obtenus ont montré que l'effet de seuil est prépondérant à partir de la vitesse correspondant à la fréquence $f_{c.o}$ (fréquence pour laquelle la réponse visuelle devient non-linéaire).

L'aspect saccadé du mouvement visuel est illustré par l'expérience suivante :

Si prélevant les tensions électriques représentatives des mouvements de l'oeil, nous les renvoyons sur les plaques verticales et horizontales de l'oscilloscope, l'opérateur se trouve renseigné par un troisième point : le spot suiveur oculaire. Selon la terminologie de l'automatique la boucle cible-rétine - mouvements oculaires se trouve réellement fermée. Cette expérience s'est avérée toutefois difficile d'une part à cause des différents rayons de courbure de la cornée des sujets, d'autre part à cause du champ visuel lui-même (39).

Les enregistrements obtenus révèlent néanmoins l'aspect saccadé du mouvement de l'oeil : temps de pause suivi d'une montée rapide (même à très faible vitesse), illustrent les différents seuils oculaires mentionnés précédemment, et vérifient que le système visuel est excité par son erreur.

III.3.3. Caractéristiques de la réponse manuelle

L'influx nerveux, de nature impulsionnelle, qui a pris naissance dans le détecteur visuel, se propage le long de voies relativement complexes et l'introduction d'un retard dû aux délais de transmission et de liaison sensori-motrice est évidente. En outre il convient de ne pas oublier le temps de décision du sujet ; car à un instant donné, la réponse manuelle est commandée par une séquence impulsionnelle, représentative d'un signal d'entrée antérieur.

Il a été montré précédemment que les deux modes de poursuite du système oculo-moteur entraînent deux comportements différents de l'opérateur : l'un avec ajustement successif, l'autre avec une erreur croissante : le paramètre vitesse de la cible étant prépondérant pour caractériser ces deux fonctionnements. Toutefois, l'opérateur conserve ces caractères spécifiques quelle que soit la forme du stimulus.

L'aspect pratiquement invariable de la réponse visuelle (forme carrée) à partir de la fréquence $f_{c.o}$ du stimulus peut être obtenu par le protocole expérimental suivant :

Présentons à un opérateur non averti deux points sur l'écran de présentation des signaux "cible" dont la distance est croissante. On constate (figure 3.3.) une oscillation du mouvement de l'oeil entre ces deux points à partir d'une certaine valeur de la distance (quelques centimètres sur l'écran, placé toujours à un mètre du sujet).

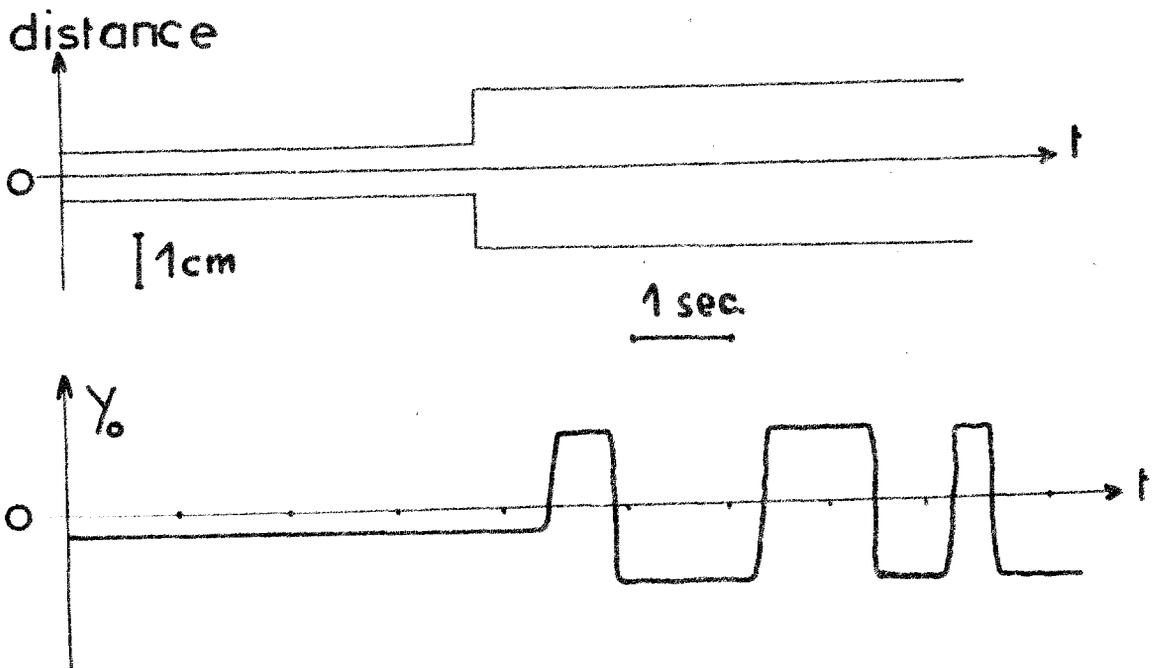


Figure 2.3. Oscillation du mouvement de l'oeil.

L'opérateur fixe l'un des deux points et à partir d'un certain écart (plusieurs centimètres) se met à osciller de l'un à l'autre avec une période variant entre une et deux secondes.

Cette expérience rappelle la notion de seuil et celle de réponse en crêneaux à partir de la fréquence $f_{c.o}$ du stimulus (fréquence correspondant au comportement non linéaire).

Ceci permet de supposer que l'oeil capte uniquement les extrêmes du mouvement de la cible lorsque sa vitesse est trop rapide. Ce comportement est conforme à celui issu de la non-linéarité oculo-motrice de la figure 3.2., lorsque le seuil Δ devient important.

Ce mouvement caractéristique de l'oeil permet d'expliquer la réponse harmonique (premier fondamental) du mouvement manuel quelle que soit la forme du stimulus lorsque le comportement du système visuel devient non-linéaire.

Mentionnons enfin que les systèmes visuels et manuels ne sont pas indépendants en indiquant figure 3.4. les relations liant les fréquences limites manuelles $f_{L.M}$ à un stimulus périodique quelconque et les temps de latence manuel R_M et visuel R_0 à un stimulus en échelon. Elles mettent en évidence qu'à une croissance des retards R_0 et R_M correspond une diminution de $f_{L.M}$.

III.3.4. Introduction d'un échantillonneur dans la fonction mouvement.

Lors de l'étude des réponses à un stimulus en échelon ou périodique nous avons signalé que le mouvement manuel s'accompagnait d'oscillations. Celles-ci donnent au spot suiveur par rapport au spot-cible un mouvement en avance ou en retard. On peut considérer cette succession d'ajustements comme le résultat d'une "séquence" de poursuite manuelle. Lors de cette séquence, l'opérateur se trouve évidemment excité par l'erreur entre spots cible et suiveur, mais sa manière de réagir tient compte de tous les renseignements supplémentaires qu'il peut capter. Ce comportement est vérifié par les enregistrements obtenus et présentés chapitre II, (en particulier : paragraphe II.3 : étude aux stimulus dents de scie), et peut s'expliquer par le fait que l'opérateur recueille, outre le renseignement position, des informations supplémentaires telles que la vitesse et l'accélération du mouvement (déjà signalé par SOUKHODOLSKI³).

Supposons plus simplement que le sujet ne tienne compte que de la différence première de la trajectoire supposée échantillonnée (figure 3.5.).

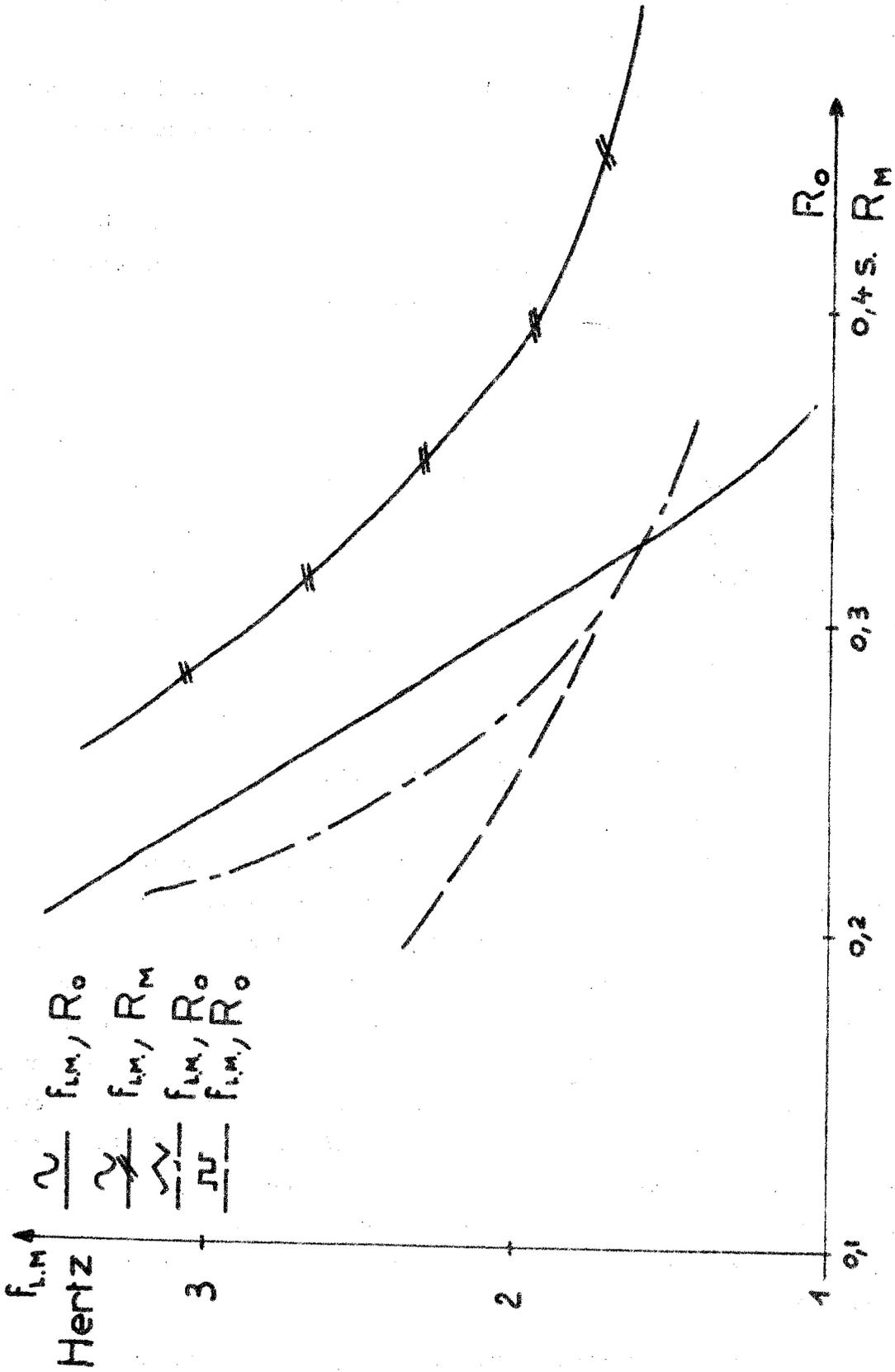


Figure 3.4. Relations entre $f_{l,m}$ et les retards visuel et manuel pour un même sujet.

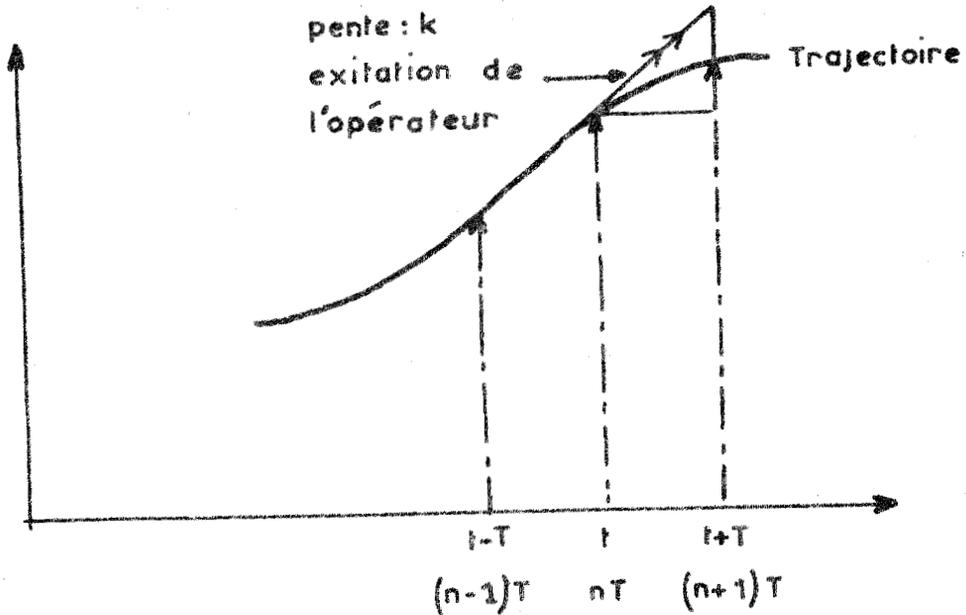


Figure 3.5. Représentation des informations recueillies par l'opérateur.

Le mouvement de l'opérateur, à partir de l'instant nT , s'écrit (sans l'introduction du retard pur) :

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

- $\alpha(G)$: transmittance non-linéaire de l'opérateur
- k : coefficient proportionnel à l'estimation de la vitesse
- t : temps écoulé à partir de l'instant nT
- ϵ_{nT} : erreur commise par l'opérateur.

La fonction introduite proportionnelle à l'intégrale de l'erreur en position entre les instants d'échantillonnage $(n-1)T$ et nT :

$$\frac{k}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} (\epsilon_{nT} - \epsilon_{(n-1)T}) dt.$$

peut améliorer ou perturber le mouvement du sujet suivant le déplacement de la cible. Cette hypothèse sera confirmée dans l'étude de l'apprentissage et dans la simulation.

Afin d'expliciter le comportement mentionné ci-dessus, représentons figure 3.6. la réponse caractéristique du sujet à un stimulus en dents de scie. La forme "simple" du stimulus met en évidence un retard manuel variable en fonction de l'erreur du mouvement. De plus, elle permet, en considérant les instants t_1 , t_2 , t_3 , d'estimer la valeur de la période d'échantillonnage du sujet pour ce stimulus. Avant l'instant t_1 , l'opérateur poursuit la cible avec un retard manuel R_M de faible valeur, voisin de 0,15 seconde. En t_1 , il y a changement de signe de la dérivée du stimulus. Le comportement de l'opérateur en t_2 est représentatif de l'échantillonnage effectué en t_1 .

Supposons que le renseignement "vitesse" exige un second échantillonnage de l'opérateur. On peut alors considérer l'intervalle de temps écoulé entre les instants t_2 et t_3 comme voisine de la période d'échantillonnage de l'opérateur.

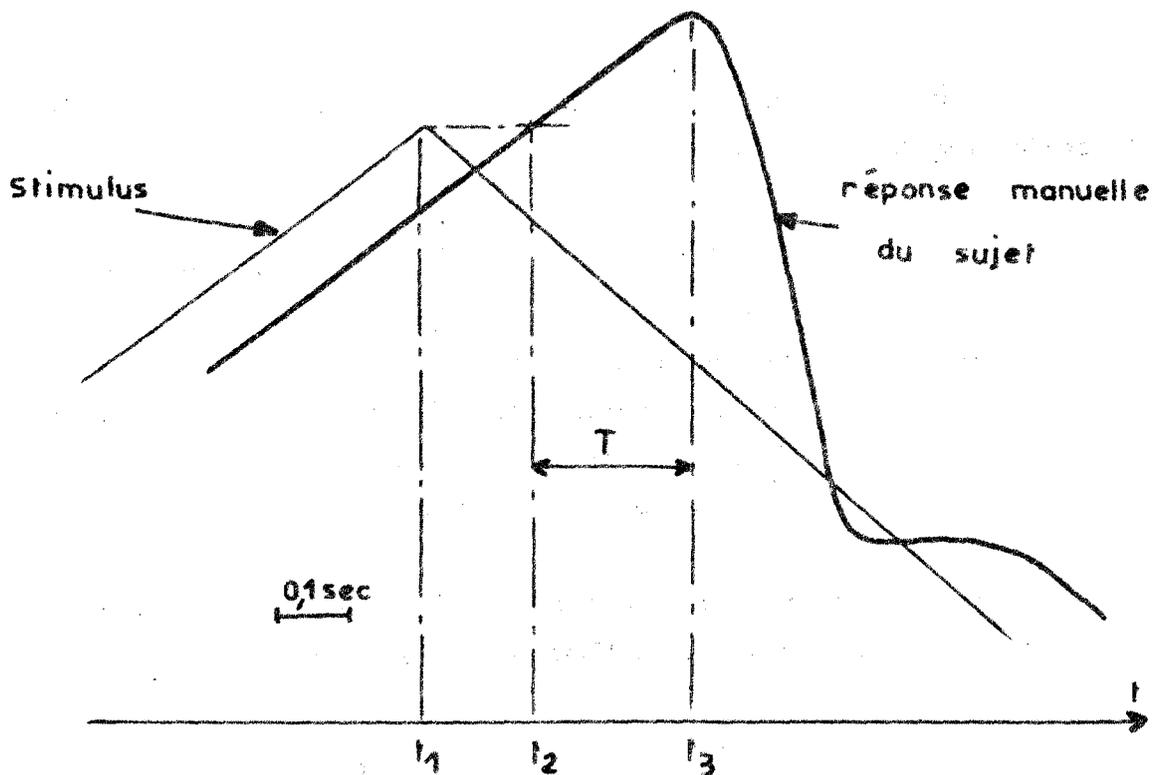


Figure 3.6. Réponse caractéristique de l'opérateur (manuel) à un stimulus en dents de scie.

En t_3 , l'opérateur est renseigné sur la vitesse de la cible à l'instant t_1 et réagit comme à un stimulus en échelon.

Nous relevons figure 3.6. une période d'échantillonnage T voisine de 0,2 seconde.

Cette analyse effectuée sur les enregistrements indique une variation de la période d'échantillonnage T en fonction de la vitesse de la cible, (après changement du signe de la vitesse en t_1) présentée figure 3.7.

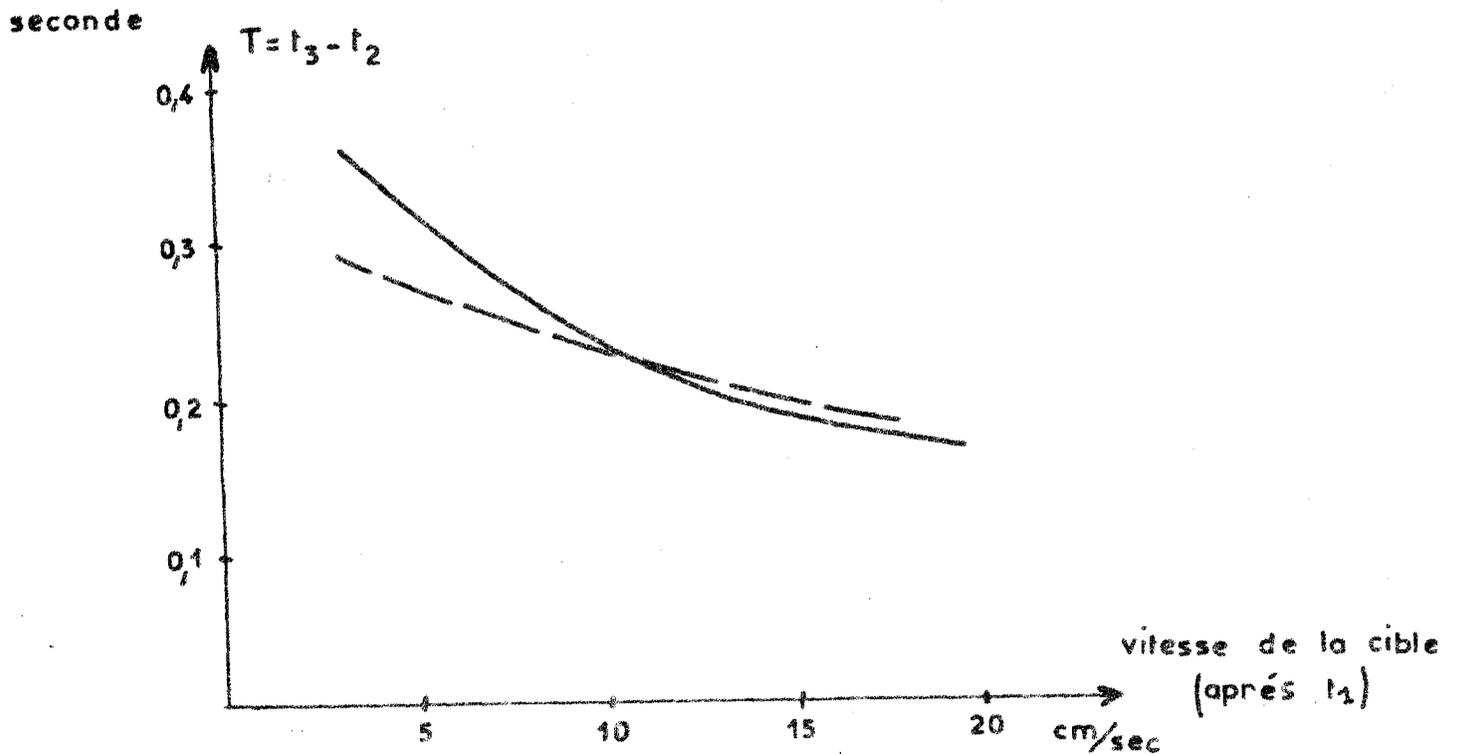


Figure 3.7. Variation de la période d'échantillonnage de l'opérateur

Toutefois cette variation s'est révélée moins sensible (courbe en pointillés) pour les sujets habitués aux tests).

Ce comportement est facilement simulé en réalisant un échantillonnage proportionnel à l'erreur que commet l'opérateur. Dans le chapitre suivant nous insisterons sur cette proposition.

III.3.5. Premières conclusions et modèle de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite manuelle.

Le comportement du système humain peut être schématisé par un modèle non-linéaire (non-linéarité oculo-motrice du capteur visuel) contenant un échantillonneur à période variable.

A l'aide des résultats acquis lors du chapitre II : analyses indicielle (stimulus échelons, paragraphe II.1) et fréquentielle (stimulus sinusoïdaux, paragraphe II.2.) ; il est difficile de proposer directement les valeurs des différents paramètres de la transmittance de l'opérateur humain.

L'approximation linéaire du comportement du sujet à partir des courbes de Bode peut conduire à la transmittance :

$$\frac{k e^{-R_M P}}{(1+T_1 P)^n}$$

avec T_1 voisin de 0,07 seconde et n grand.

Le degré n de cette transmittance déduit de la méthode de V.STREJC ³² (réservée aux systèmes linéaires) est supérieur à 10.

Retenons en particulier l'aspect oscillatoire de la réponse manuelle à partir de la fréquence limite de l'opérateur $f_{L.M}$ et le régime harmonique définis lors de l'analyse des réponses aux stimulus périodiques sinusoïdaux et en dents de scie. Cet aspect non-linéaire exclut les méthodes précitées et se trouve confirmé par l'introduction dans le modèle de l'opérateur humain d'une non-linéarité contenant un seuil Δ variable avec la vitesse du stimulus.

Les relevés expérimentaux du paragraphe II.1.6 : variation de la vitesse manuelle à un stimulus échelon d'amplitude variable, sont particulièrement intéressants. En effet il a été précédemment montré que le début du mouvement manuel $A(t)$ à un stimulus en échelon, juste après le temps de latence R_M , s'effectuait selon la loi (figure 3.8.) :

$$A(t) = y_M(t) = a^2 t^2 \quad (t > R_M)$$

a = constante, (se référer au paragraphe II.1.6).

La courbe de variation de la vitesse manuelle moyenne au cours du temps de montée t_{mM} de la réponse à un stimulus en échelon peut contribuer à l'identification de la transmittance de l'opérateur, sous réserve de quelques approximations.

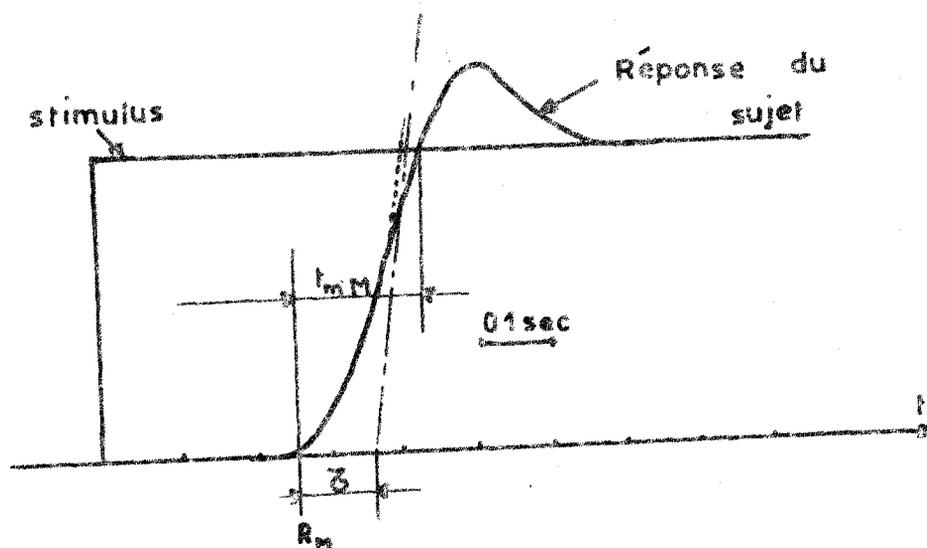


Figure 3.8. Mise en action du mouvement de l'opérateur après le temps de latence R_M à un stimulus échelon.

Le temps de montée manuelle (temps écoulé entre R_H et le premier passage du spot suiveur sur le spot cible, avant le dépassement et la stabilisation) a une valeur très proche du retard pur défini précédemment (au paragraphe II.5.1.) : $R_p = 0,15$ à $0,2$ seconde et t_{mM} légèrement supérieur à $0,2$ seconde.

La petite différence entre R_p et t_{mM} permet, avec approximation, de considérer le début de la réaction manuelle comme la réponse du système humain en "boucle ouverte" c'est-à-dire : la réponse de la chaîne directe de transmission, sans information correctrice due à la boucle de retour.

Compte tenu de l'échantillonneur bloqueur du premier ordre (paragraphe III.3.4.), on peut, en utilisant la transformée de Laplace, écrire si l'on désigne par $G(p)$ la transmittance de l'opérateur humain à un stimulus en échelon d'amplitude unité : (T = période d'échantillonnage).

$$\left[\frac{1}{p} + \frac{1}{T_p^2} \right] \times G(p) = L \left[\frac{a^2}{2} t^2 \right] = a^2 \times \frac{2}{p^3}$$

d'où :

$$G(p) = \frac{2Ta^2}{p(Tp+1)} = \frac{K}{p(1+\tau p)}$$

Ces remarques importantes seront détaillées dans le paragraphe suivant et dans le chapitre IV.

Retenons de ce calcul (basé sur une approximation) l'obtention d'une transmittance du second ordre dont il faut encore déterminer les coefficients K et τ

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

La constante K est difficile à identifier sur nos enregistrements aussi, aurons-nous recours à la simulation du modèle et à des expériences complémentaires (paragraphe III.5.).

La figure 3.8. permet d'estimer la constante de temps τ à 0,1 seconde.

Cette quantité est toutefois variable suivant le sujet considéré (τ allant de 0,05 à 0,15).

Les résultats précédents nous ont conduit à proposer le modèle simplifié de la figure 3.9.

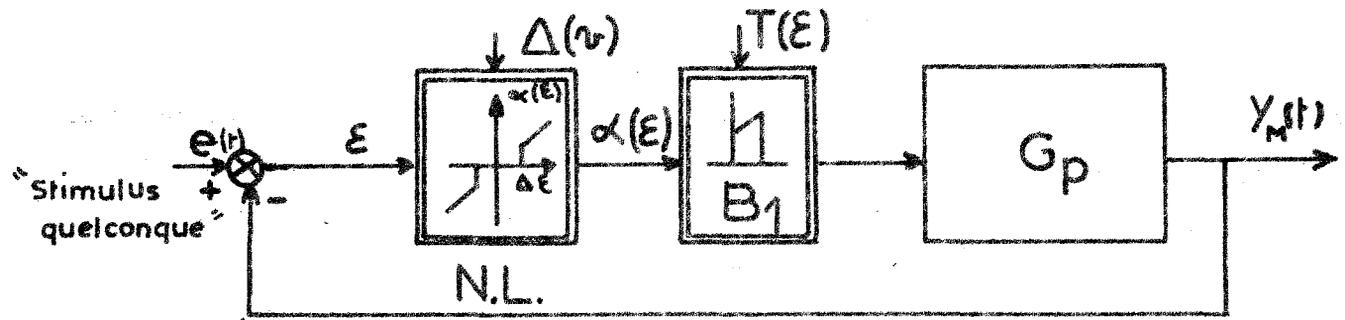


Figure 3.9. Modèle simplifié de l'opérateur humain effectuant une poursuite manuelle.

$y_m(t)$: mouvement de l'opérateur (spot suiveur)

$e(t)$: stimulus présenté (quelconque)

ϵ : erreur du sujet

B_1 : échantillonneur-bloqueur de premier ordre à période d'échantillonnage T variable en fonction de l'erreur et introduction du retard manuel

N.L. : non-linéarité oculo-motrice, seuil Δ fonction de la vitesse v .

$G(p)$: transmittance de l'opérateur = $\frac{K}{p(1+\tau p)}$

III.4. Influence de l'apprentissage sur le comportement de l'opérateur

En utilisant le même protocole expérimental que précédemment (se référer au chapitre I, paragraphe I.2.), l'opérateur est soumis à des tests identiques de forme échelon, sinusoïdale et en dents de scie.

III.4.1. Analyse des mouvements effectués lors des premiers essais

L'analyse des mouvements effectués par un opérateur lors des premiers essais est caractérisée par la recherche d'un état "optimal" : le sujet réalise son auto-apprentissage.

Il est intéressant de remarquer sur l'enregistrement n° 65.Y.MD, présenté ci-après, l'amélioration de la réponse manuelle à un test prolongé de forme sinusoïdale (fréquence 0,2 Hertz, stimulus répété huit fois). Durant les premières sinusoïdes, l'opérateur corrige son mouvement par de nombreuses saccades d'ajustements (petites oscillations de précision). Au bout d'un certain nombre de tests, l'apprentissage est tel que la fréquence d'ajustement du sujet diminue : celui-ci extrapôle ses contrôles successifs et évolue avec des saccades plus "douces", plus précises et moins nombreuses. Le spot suiveur (manuel) tend à conserver un retard constant par rapport au déplacement.

La photographie n° 68.Y.MD met en évidence la recherche pour l'opérateur de l'état dynamique "optimal" : l'apprentissage lui permet de mieux contrôler son "élan" (juste après le temps de latence R_M), améliorant la forme de la réponse manuelle. Ce tracé révèle que le dépassement manuel, le temps d'ajustement $t_{A.M}$ et le temps de latence R_M diminuent fortement en fonction du nombre d'échelons présentés au sujet : au cours de l'entraînement le temps de décision t_d diminue d'une manière considérable.

La modification des principaux paramètres de la réponse indicielle de l'opérateur au cours de l'apprentissage (figure 3.10), illustre la faculté d'adaptation du sujet et son comportement de système à structure variable fonction du nombre de tests présentés.

On reconnaît encore (figure 3.10) la loi de variation entre les temps de montée et d'ajustement manuels. (paragraphe II.1.) : pour un temps de montée très court correspondant à une grande vitesse de déplacement de la main, le temps d'ajustement est plus grand.

Il convient de signaler que les sujets soumis à ces tests possèdent un grand entraînement à l'expérience ; ce qui a pour conséquence, une nette amélioration des performances du sujet à partir du deuxième ou troisième test (les paramètres évoluent de manière à rendre "optimal" le temps d'ajustement t_{AM}). Cette auto-amélioration tend vers une limite et nous relevons (figure 3.10) au cinquième test un temps d'ajustement manuel t_{AM} de 0,4 seconde, un temps de montée t_{mM} de 0,2 seconde et un retard manuel R_M de 0,2 seconde (réponse manuelle sans dépassement - Enregistrement n° 63.Y.MD). Ces performances se détériorent sous l'influence de la fatigue.

Y
1 sec.

Y_M 1 [100mm

Y_M 3

-97-

Y_M 5

Y_M 7

2

4

6

8

Réponse manuelle
à un stimulus répété

Figure:

Sujet n: 65.Y.MD.

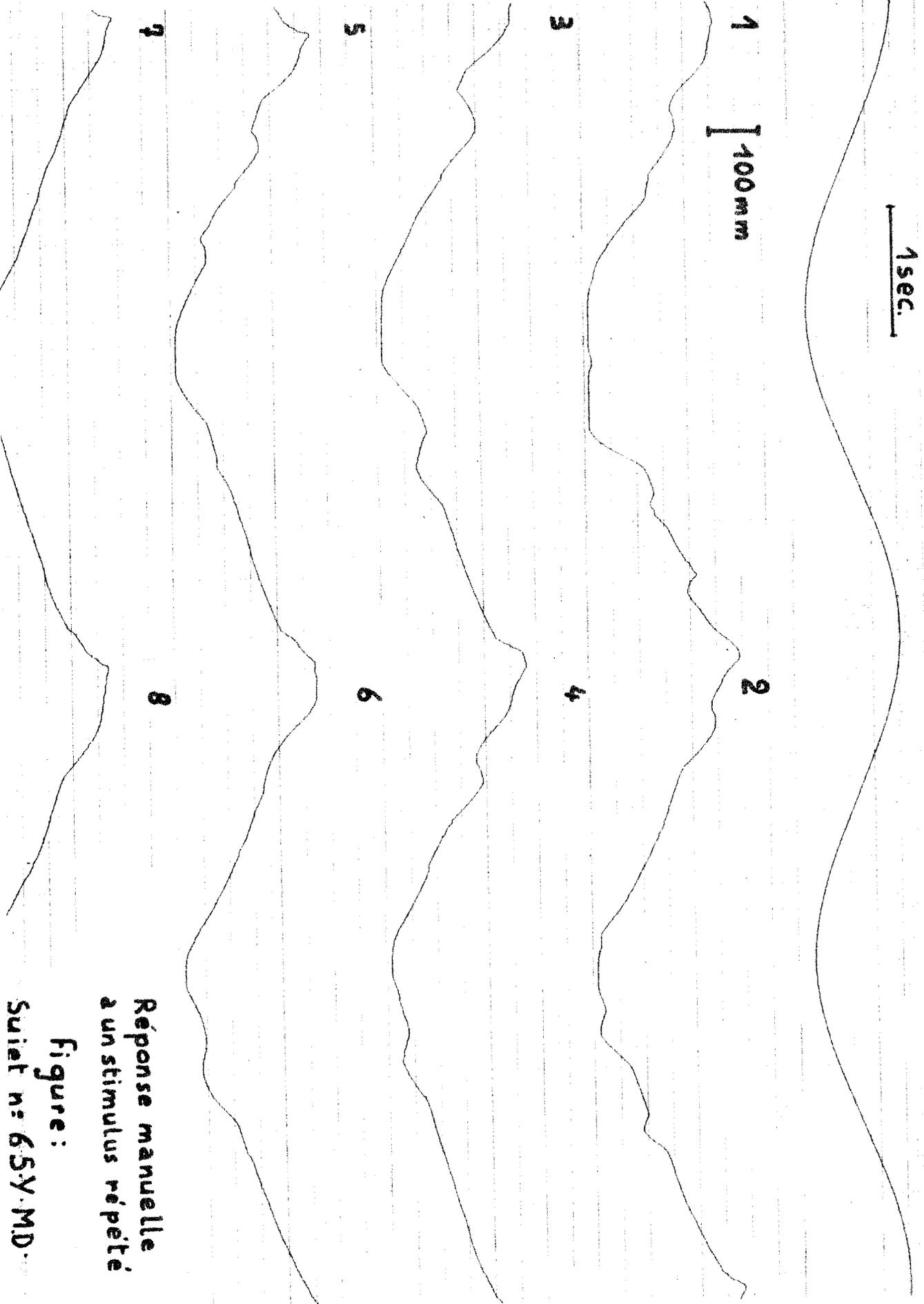
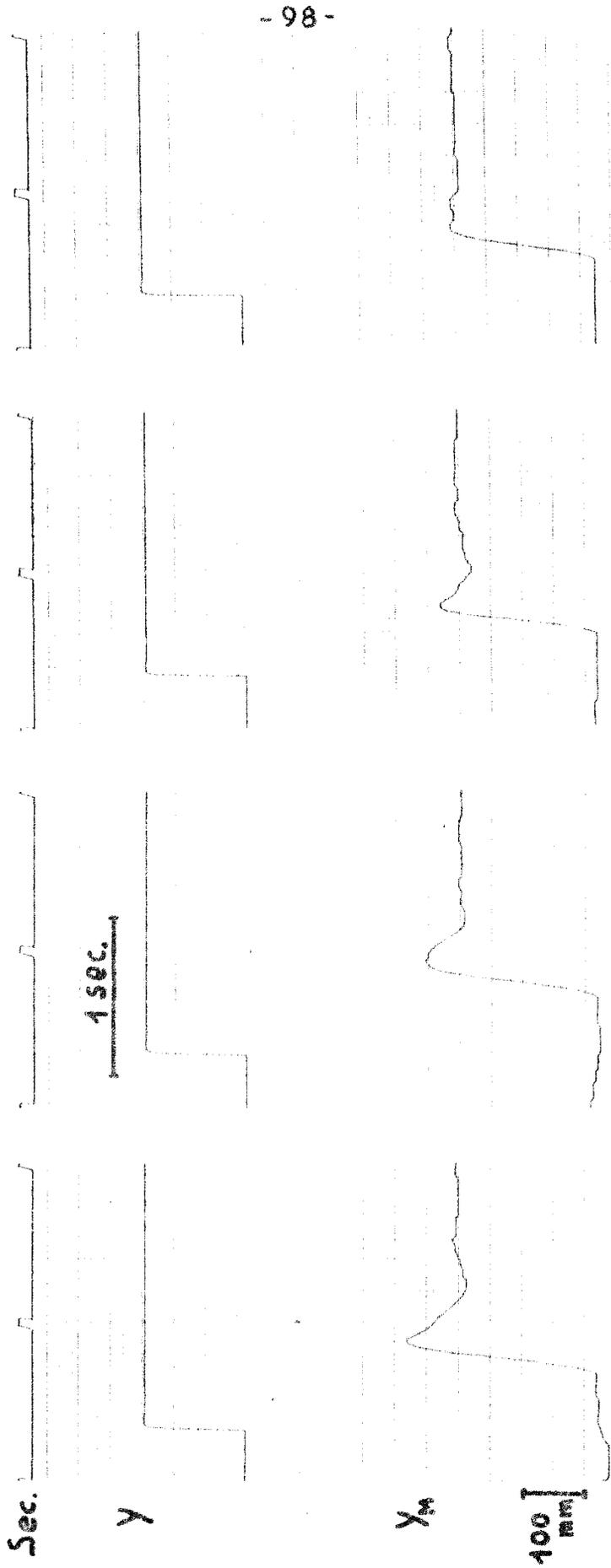


Figure : Tests répétés toutes les 5 secondes

Sujet n: 68 · Y · MD.



- 98 -

D%	40	25	12	0
T _A	0,8	0,8	0,6	0,4
R _M	0,36	0,36	0,28	0,2
				Seconde
				Seconde

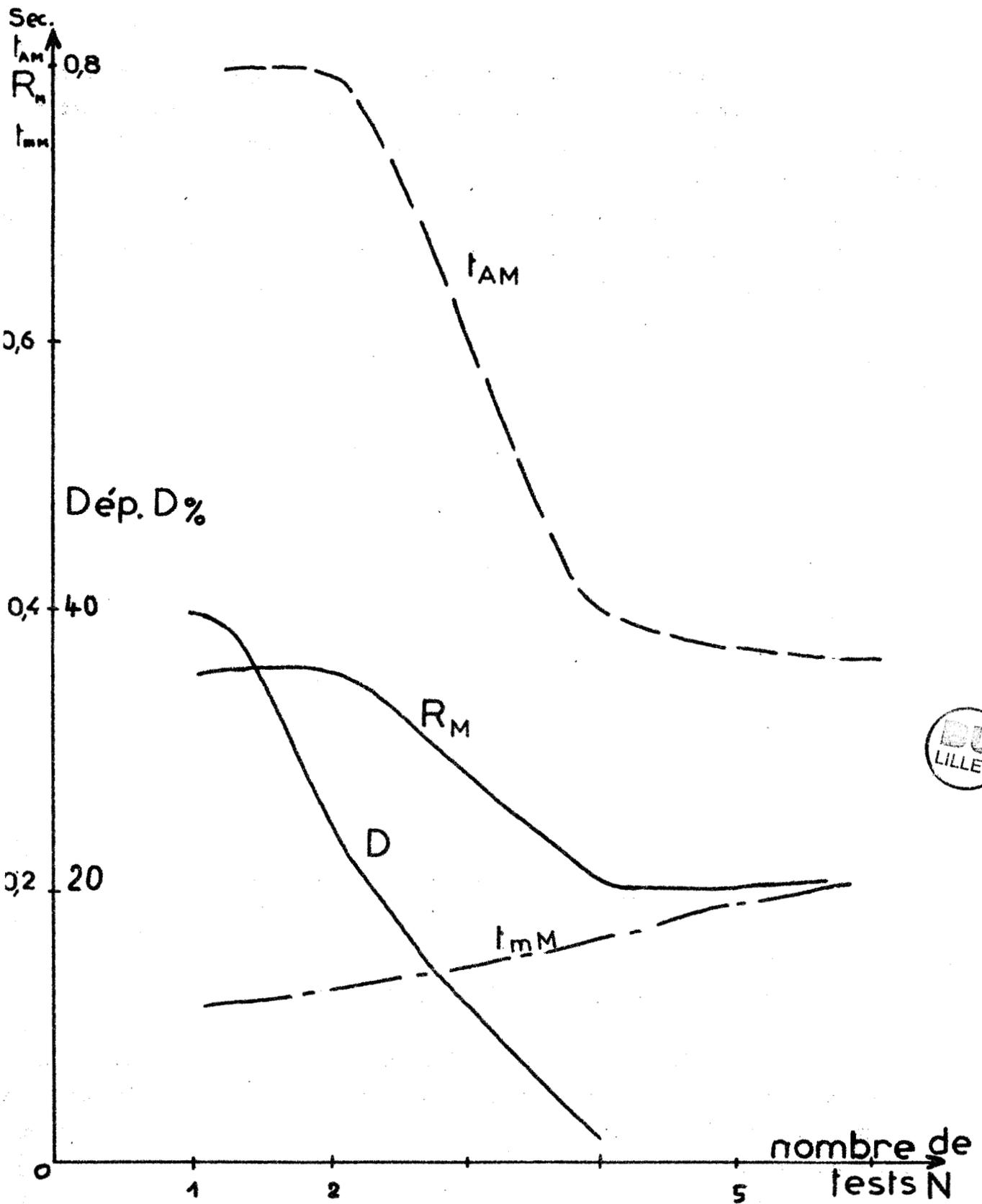


Figure 3.10. Variations des paramètres de la réponse manuelle à un échelon au cours de l'apprentissage.

En ce qui concerne la réponse manuelle à un stimulus en dents de scie, il est important de noter le comportement "prédicatif" du sujet. En effet, la forme simple de ces signaux entraîne très vite l'influence de la mémoire de l'opérateur : au bout d'un certain nombre de tests, (variable avec l'opérateur) les saccades d'ajustements disparaissent totalement lorsque la vitesse du stimulus est constante. Toutefois lors du changement de signe de la dérivée du déplacement de la cible, on remarque le comportement "prédicatif" du sujet (figure 3.11.).

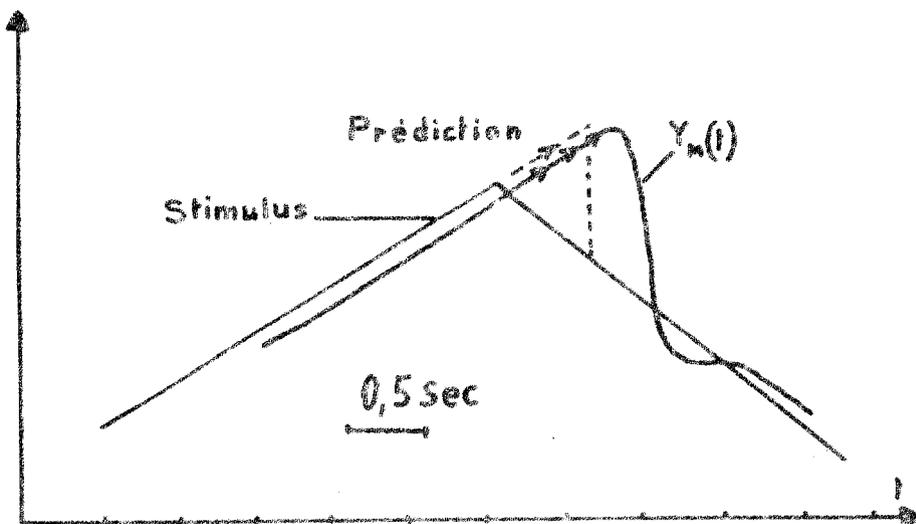


Figure 3.11. Comportement "prédicatif" du sujet.

III.4.2. Nouveau modèle de l'opérateur

L'étude ci-dessus met en évidence le phénomène d'adaptation et de perfectionnement de l'opérateur à un stimulus donné, elle exige une mise en mémoire d'un grand nombre d'informations et un dispositif permettant d'utiliser celle-ci à l'instant désiré.

Ce mode de fonctionnement nécessite également une amélioration automatique des caractéristiques du système et un degré d'auto-apprentissage défini par exemple par le nombre d'actions nécessaires pour aboutir à l'état semi-optimal.

Il est par conséquent souhaitable d'introduire dans le modèle présenté figure 3.1, une non-linéarité dynamique caractérisée par les facultés d'apprentissage et de mémoire de l'opérateur (mouvement de moins en moins perturbé selon le degré d'auto-amélioration du sujet).

Introduisons ces propriétés dans le modèle par l'intermédiaire d'une non-linéarité et d'un échantillonneur-bloqueur dont la période est fonction de l'écart entre l'ordre donné et l'ordre mémorisé figure 3.12. On peut inclure dans la transmission le temps de latence manuel R_M de l'opérateur.

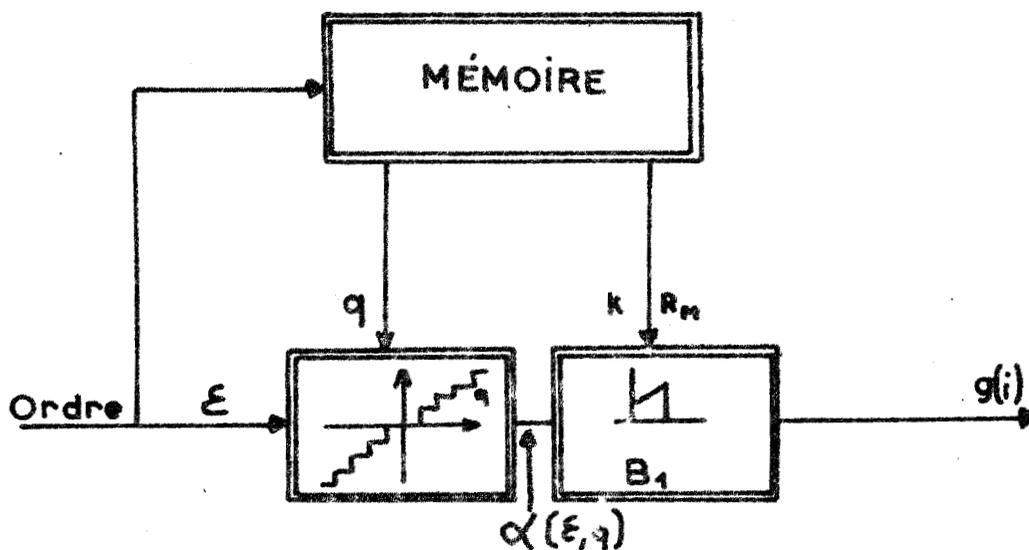


Figure 3.12. Non linéarité dynamique et transmission à "pas" variable.

q définit le pas variable de la non-linéarité dynamique
 k et R_M définissent les paramètres de la transmission.
 k = coefficient d'estimation de la vitesse (prédiction).

Au démarrage de l'entraînement la "fonction mémoire" du sujet est nulle et la transmission est fortement perturbée.

Rappelons que les premières conclusions du paragraphe III.3.5. sont compatibles avec ces suggestions et nous tiendrons compte pour la simulation de la non-linéarité oculo-motrice de la non-linéarité dynamique.

III.4.3. Simulation de la non-linéarité dynamique

Dans les simulations du chapitre suivant nous utiliserons comme non-linéarité dynamique un quantifieur dont le "pas" q varie avec l'apprentissage et la mémoire (figure 3.13.).

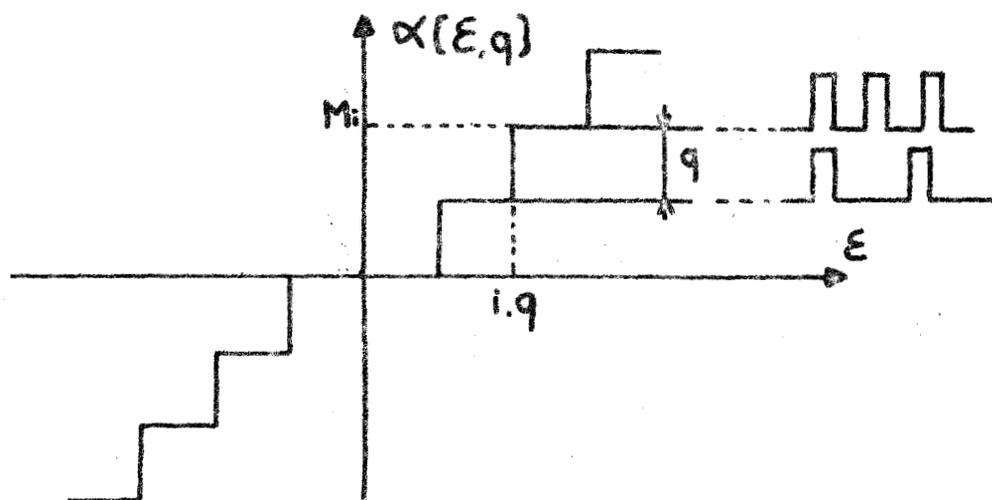


Figure 3.13. Non-linéarité dynamique

L'intérêt de cette représentation est de conserver les notions physiologiques de transmission de l'information dans les neurones. Lorsque l'excitation de ceux-ci dépasse un seuil infra-liminaire, il y a émission d'une impulsion, et plus l'intensité de l'excitation croît, plus la fréquence de ces impulsions augmente pour enfin atteindre une fréquence limite. On peut alors

trouver une relation entre les différents niveaux de sortie du quantifieur et la fréquence des impulsions.

Afin d'interpréter la notion de pondération des synapses il convient d'introduire la notion d'apprentissage au moyen d'une diminution du quantum q : le niveau M_1 correspondant à une fréquence d'excitation est d'autant plus rapidement atteint que la valeur du quantum est petite.

Nous présentons figure 3.14. la sortie de l'échantillonneur bloqueur d'ordre un pour un même stimulus, répétitif. Rappelons que la période d'échantillonnage T est fonction de l'erreur du sujet (paragraphe III.3.4.), nous avons introduit le retard (qui diminue en fonction de l'apprentissage) lors du premier échantillonnage du nouveau stimulus. Dans le chapitre suivant, nous illustrerons au moyen de la simulation la variation instantanée de la période d'échantillonnage.

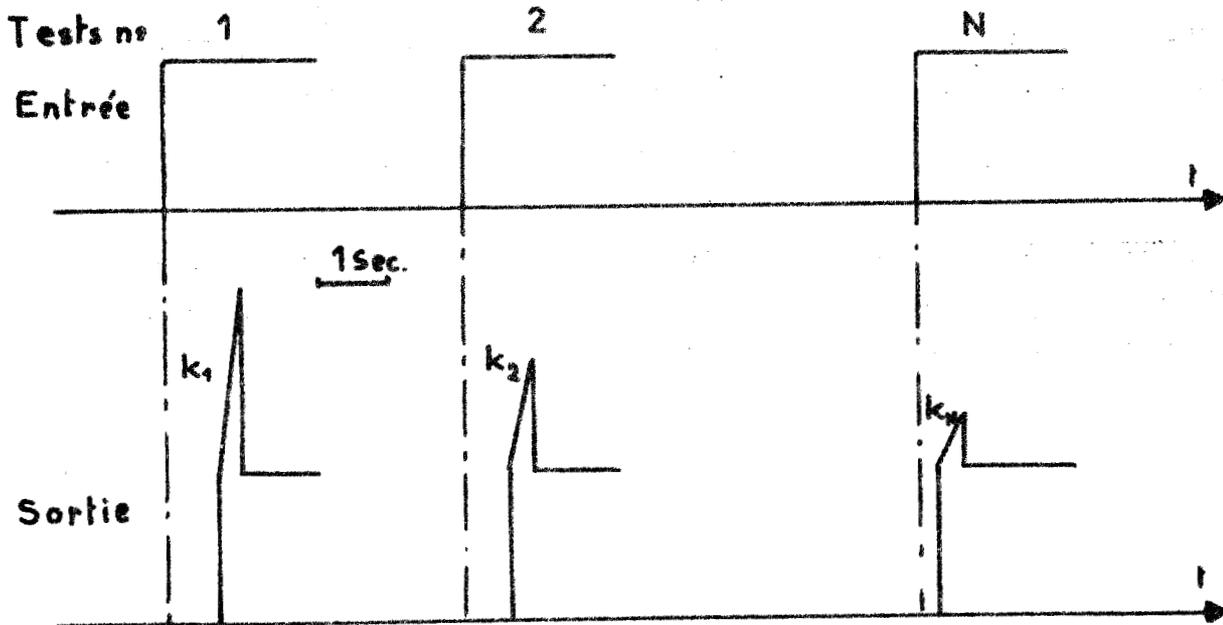


Figure 3.14. Variation de la sortie de l'échantillonneur bloqueur d'ordre un pour un stimulus en échelon répétitif.

L'opérateur dans ses essais successifs recherche la valeur optimale du coefficient k de manière à donner d'abord le meilleur "élan" puis le "freinage" le plus efficace.

On pourrait éventuellement interpréter la non-coopération ou la fatigue par un mauvais contrôle de l'"élan" et du "freinage" du sujet, entraînant un dépassement important.

Par ailleurs, lors de l'élaboration du modèle nous devons prévoir un système adaptatif destiné à rendre compte de la complexité de la transmission des ordres au cerveau. Cette hypothèse est physiologiquement basée d'une part sur les possibilités pratiquement illimitées de mémoire analytique et la faculté de reconnaissance des structures, d'autre part sur des possibilités de combinaisons "optimales" de circuits complexes. Ceci nous conduit à la remarque suivante : l'enregistrement des réponses manuelles à un stimulus en échelon dont les caractéristiques durée et amplitude sont variables dans le temps et dans l'espace (signaux pseudo-aléatoires analogues à ceux des stimulus présentés au paragraphe II.1.1.) d'un sujet entraîné aux tests, révèle un comportement de l'opérateur fonction de l'"expérience" passée. On relève dans la majorité des cas, un dépassement important de la réponse du sujet si l'amplitude de l'échelon présenté est inférieure à celle du stimulus précédent et un arrêt dans l'ajustement manuel si l'amplitude de l'échelon présenté est supérieure à celle du stimulus précédent.

Ce comportement pouvant s'expliquer par la mise en "mémoire" du stimulus par le sujet se retrouve lorsque la sensibilité du levier de commande manuel, pour des tests échelon d'amplitude identique, est variable (paragraphe III.8.). La figure 3.15 représente une réponse manuelle avec un arrêt au cours de l'ajustement entre deux positions d'équilibre.

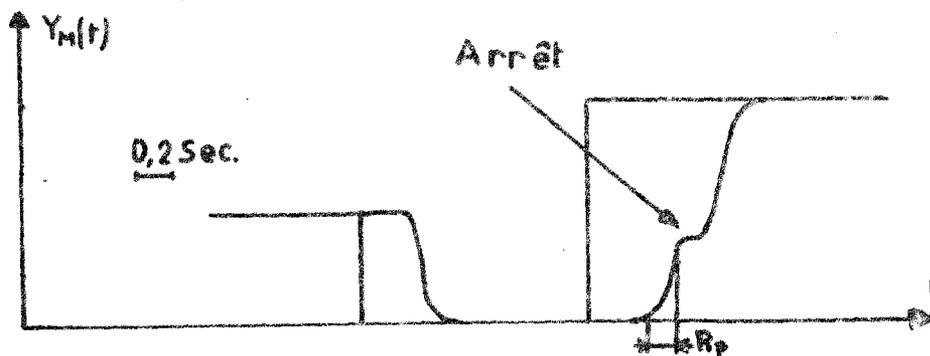


Figure 15. Arrêt dans l'ajustement manuel à un stimulus échelon

Il est intéressant de remarquer que le temps écoulé, entre la mise en action à $t = R_M$ et le premier arrêt, est du même ordre de grandeur que celui défini pour l'estimation du retard pur : $R_p = 0,15$ à $0,2$ seconde (paragraphe II.5.1 et III.3.5.) et que le mouvement manuel pendant cet intervalle de temps est toujours identique à celui défini précédemment (paragraphe II.1.6 et III.3.5.).

III.5. Influence d'une perturbation entraînée par la coupure de la boucle de retour externe (spot suiveur effacé sur l'écran).

Il est intéressant, lors de nos expériences, de voir dans quelle mesure une modification du protocole expérimental permet une identification du modèle proposé figure 3.1.

La modification effectuée est telle que les coordonnées du point représentatif du mouvement manuel, transmises par le levier ne sont plus visibles sur l'écran de l'oscilloscope.

L'opérateur n'est donc plus renseigné visuellement de l'erreur existant entre la position du spot cible et celle du spot suiveur. Il y a un seul point sur l'écran (la cible) (luminosité du spot suiveur supprimée).

Effectuons tout d'abord quelques remarques qui serviront à mieux comprendre l'analyse des tracés :

- non-linéarité du comportement de l'opérateur en fonction de l'amplitude des échelons présentés (paragraphe II.1.1. ; le dépassement manuel diminue en fonction de l'amplitude du stimulus).
- les petites oscillations d'amplitude variable se superposant au mouvement "idéal" du sujet et l'effet de saturation défini par la limite des mouvements manuels, laissent supposer une structure à gain variable.
- fréquence limite de l'excitation de sortie des neurones.

III.5.1. Analyse des tracés observés

Pour les sujets soumis à l'expérience le comportement du système oculo-moteur reste identique à celui observé lors du précédent protocole expérimental (excepté les rares mouvements de "va et vient" de l'oeil entre les spots cible et suiveur).

L'analyse des réponses manuelles à un stimulus en échelon montre : d'une part une diminution du temps de latence ($R_M = 0,25$ sec) expliquée par le fait que le protocole expérimental demande au sujet une réaction ressemblant à celle exigée lors de la mesure du temps de réaction T_R de l'opérateur (présentation d'un stimulus lumineux) ; d'autre part une augmentation du temps de montée t_{MM} malgré une mise en mouvement (au démarrage après R_M), identique à celle observée lors de l'expérience normale (deux spots cibles et suiveur sur l'écran).

Utilisons en deuxième indice les lettres O et F pour indiquer les réponses manuelles obtenues en boucle externe ouverte (un seul point sur l'écran, la cible) et fermée (expérience normale, deux points sur l'écran, la cible et le spot suiveur). Les autres indices conservent leur signification.

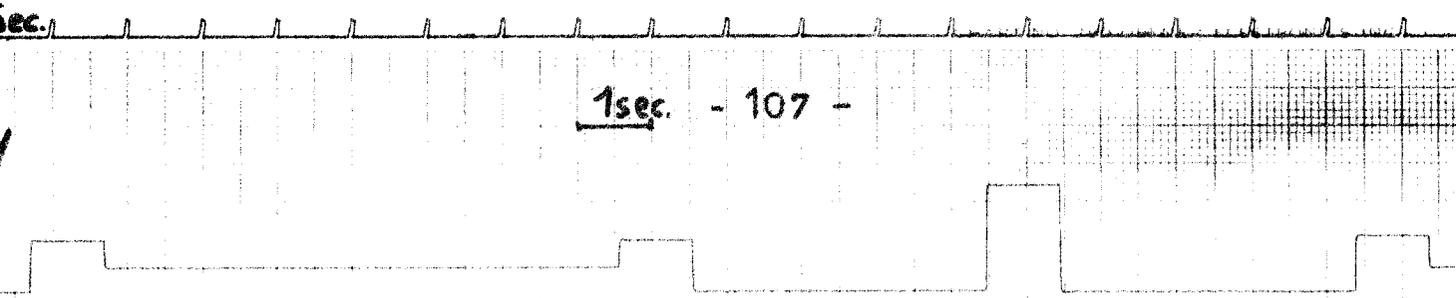
Le tracé de l'enregistrement n° 64.Y.MD, correspond à des réponses d'un même sujet avec et sans coupure de la boucle externe de retour. L'amplitude du mouvement manuel est fortement augmentée (en boucle externe ouverte) et varie en fonction de l'amplitude du stimulus présenté. L'observation des enregistrements n° 66.Y.MD et 70.Y.MD permet de remarquer que les petits mouvements d'ajustement successifs, existant lorsque l'opérateur connaît son erreur, sont très atténués, moins fréquents, moins précis et disparaissent très vite si l'on augmente la vitesse de la cible. On remarque également que la position manuelle est relativement indéfinie.

L'observation du tracé de la photographie n° 70.Y.MD obtenue pour une vitesse de la cible très faible, révèle des effets de seuil et de saturation dans le mouvement manuel. Lors de ce protocole expérimental la fréquence limite manuelle est légèrement inférieure à celle obtenue précédemment : 2,4 Hertz au lieu de 2,6 Hertz pour les sujets considérés.

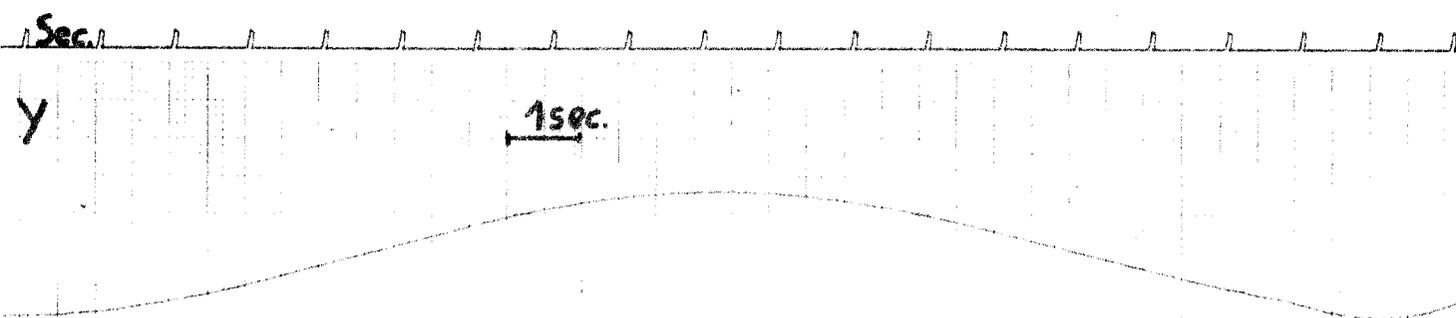
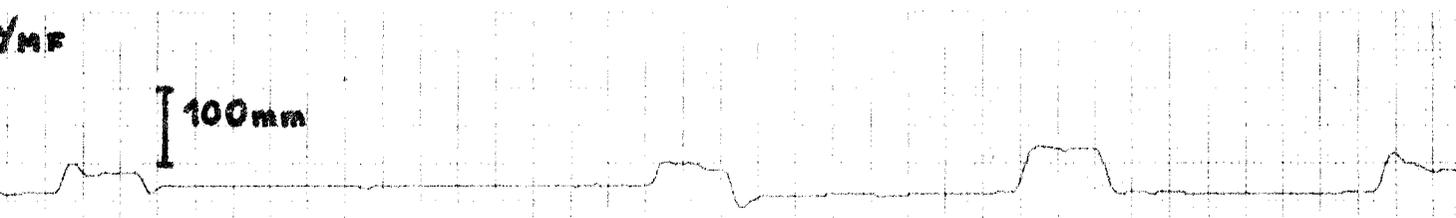
III.5.2. Conséquences de cette analyse

Notons par K le rapport entre l'amplitude du mouvement manuel lorsque la boucle externe est ouverte à l'amplitude du mouvement lorsque la boucle externe est fermée, pour un même stimulus V_e (en régime permanent)

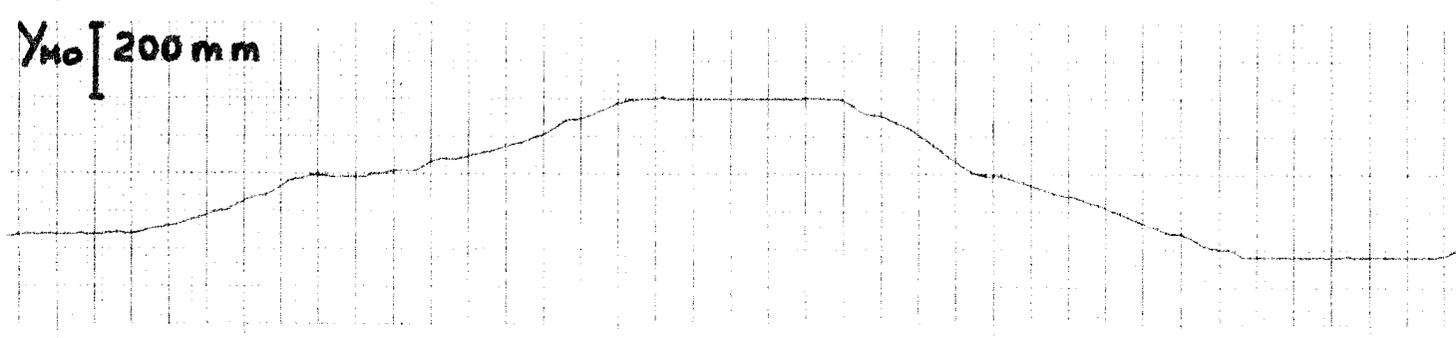
$$K = \frac{Y_{MO}}{Y_{MF}} = \frac{Y_{MO}}{V_e} \times \frac{V_e}{Y_{MF}}$$



N° 64 · Y · MD ·



N° 70 · Y · MD ·



Sec



1 sec.

Y



Nº 66. Y. MD.

200 mm

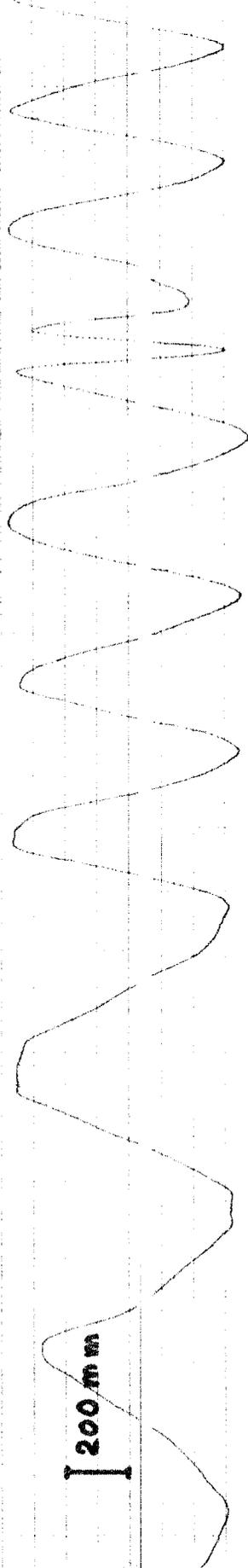
Y_{MF}



100

Y_{MO}

200 mm



Analysons tout d'abord la variation du gain en fonction de l'amplitude du stimulus (le tracé de la photographie n° 64.Y.MD reflète la moyenne des sujets).

Lorsque le stimulus est de faible amplitude le gain de la réponse de l'opérateur est relativement grand, et l'amplitude du mouvement tend vers une limite définie par la saturation des mouvements manuels. Cette observation importante, permet de supposer qu'il existe dans la fonction manuelle un gain variable lors de l'ajustement de la poursuite (figure 3.16.) variant entre 5 et 10 dans le domaine d'amplitude considéré.

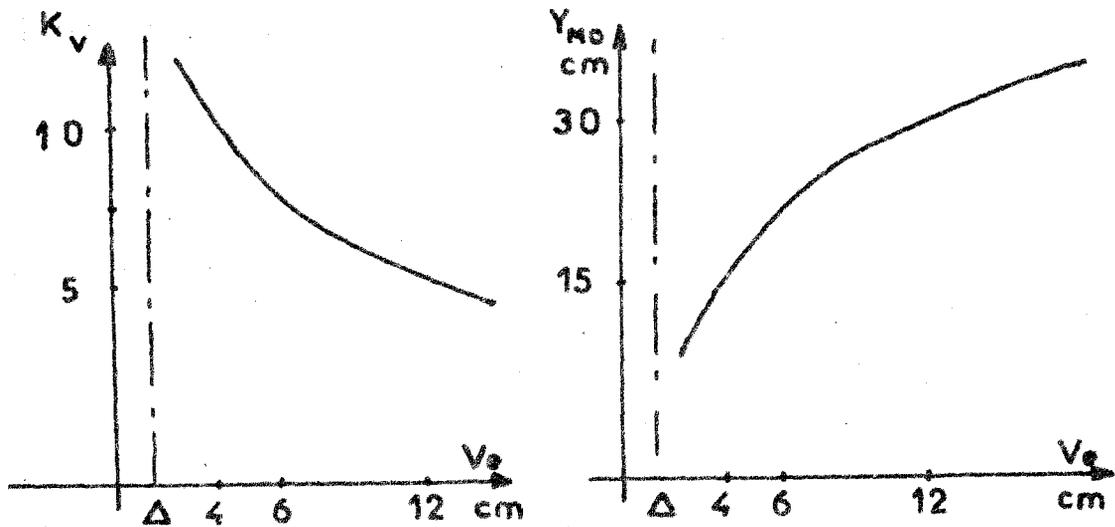


Figure 3.16. Variation du gain de l'opérateur

Il est alors possible de proposer le modèle de l'opérateur humain réalisant une tâche de poursuite manuelle, (figure 3.17.). L'élément noté "E.C." caractérise les parties du modèle déjà connues (paragraphe III.3 et III.4.).

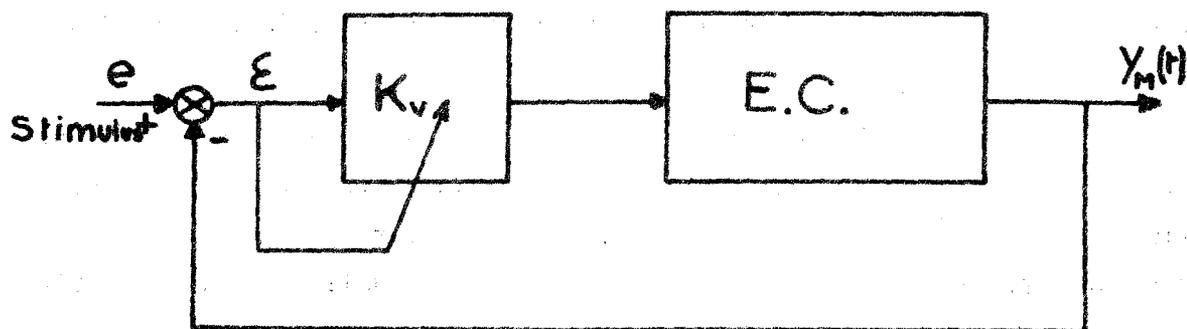


Figure 3.17. Modèle de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite.

Lors de l'expérience normale (deux spots sur l'écran, cible et suiveur), l'opérateur excité par l'erreur (existant entre les positions respectives des points cible et suiveur) essaie constamment d'ajuster "au mieux" sa position. Lorsque l'erreur dépasse un certain seuil., il s'en aperçoit et effectue un mouvement rapide, avec un gain élevé.

Dans les réponses manuelles obtenues sans connaissance visuelle de l'erreur (pas de spot suiveur sur l'écran) on peut remarquer néanmoins un asservissement au signe et à la valeur de la dérivée du déplacement du spot cible. De plus, les retours au sens kinesthésique peuvent donner à l'opérateur des renseignements en position et en vitesse. On peut supposer alors, qu'il existe outre l'asservissement en position, un contrôle en vitesse.

Remarque :

Nous n'affirmons pas la "rigueur" du test effectué qui entraîne vraisemblablement la mise en route de circuits différents de ceux mis en jeu lors de l'expérience normale (deux points-cible et suiveur sur l'écran)

III.6. Etude du mouvement oculaire résultant d'un mouvement manuel

Le protocole expérimental est ici complètement modifié et ressemble, dans son principe, à celui utilisé par HELD³³ dans ses travaux.

Dans cet essai la cible est supprimée et l'on demande à l'opérateur d'effectuer un mouvement par l'intermédiaire de son levier. Cette mise en action crée une trajectoire du spot suiveur sur l'écran qui devient le spot cible pour le système oculo-moteur. Nous introduisons donc des relations entre la main et l'oeil et non plus entre l'oeil et la main. L'opérateur poursuit du regard l'évolution de sa position manuelle. Ce comportement est proche de celui de l'écriture étudié par A. REMOND³⁴, V.GABERSEK³⁵, F. RICHAUDEAU³⁶.

Nous ferons uniquement apparaître les caractéristiques essentielles de ce test afin de compléter l'élaboration du modèle.

III.6.1. Analyse des tracés observés

Comme le montrent les photographies de tracés ci-après n° 24.XY.OD.MD et n° 40. XY.OD.MD, le comportement non-linéaire du système visuel est évident même à très faible vitesse. Les caractéristiques du système oculo-moteur définies précédemment telles le comportement non-linéaire à partir de la fréquence $f_{c.o}$ et le "décrochage" de la poursuite visuelle à partir de la fréquence $f_{d.o}$, sont à nouveau mises en évidence mais possèdent des valeurs plus faibles :

$$f_{c.o} = 0,2 \text{ Hertz au lieu de } 1,1 \text{ Hertz}$$

$$f_{d.o} = 1,25 \text{ Hertz au lieu de } 1,8 \text{ Hertz}$$

III.6.2. Conséquences de l'analyse

Les résultats issus de cette modification du protocole expérimental confirment la notion de seuil oculaire mentionnée auparavant et illustrée par des saccades et des sauts dans le mouvement de l'oeil. On reconnaît, comme dans la lecture, les temps de pause, caractéristiques de ce comportement.

Ces seuils peuvent se traduire par une non-linéarité dans le système oculo-moteur (variable en fonction de la vitesse du mouvement de la cible). On peut mentionner également, dans le mouvement manuel, un déplacement parfaitement sinusoïdal à partir de la fréquence de un hertz. Rappelons que l'opérateur crée lui-même la cible (spot suiveur) et que son mouvement manuel ne dépasse pas la fréquence de 1,5 Hertz ; il est donc probable que dans l'expérience normale (spot cible et

Y

1 sec.

Figure : Sujet n°24 - Etude inverse

Y_o

10°

N° 24 · X · Y · OD · MD

Y_M

100mm

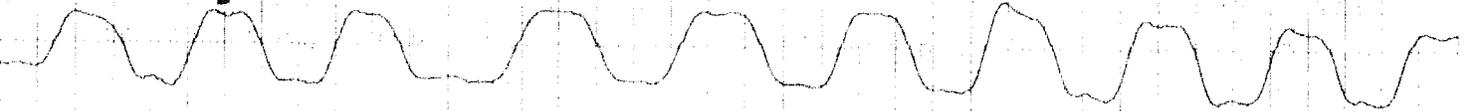
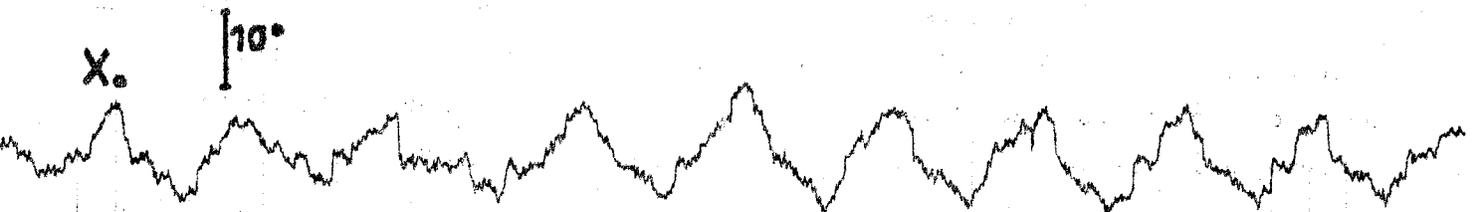
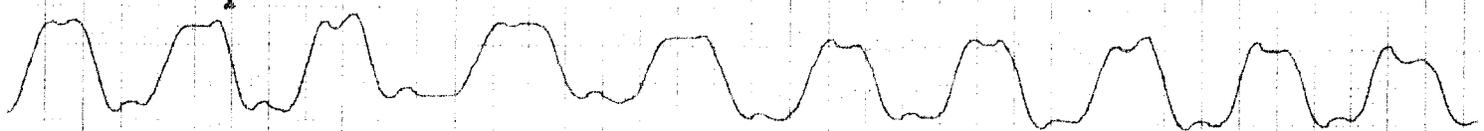
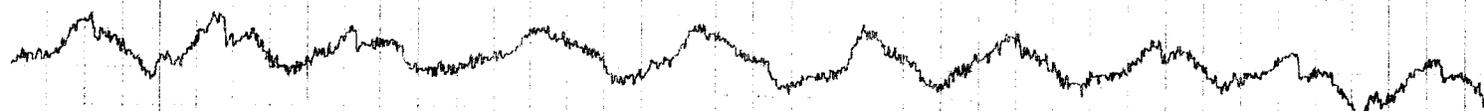
X

X_o

10°

X_M

100mm



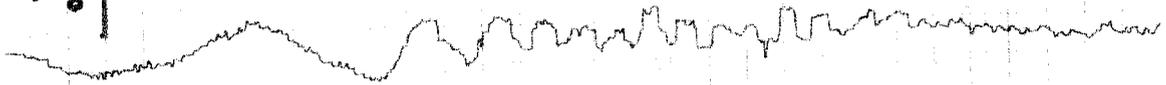
Y

1sec.
↔

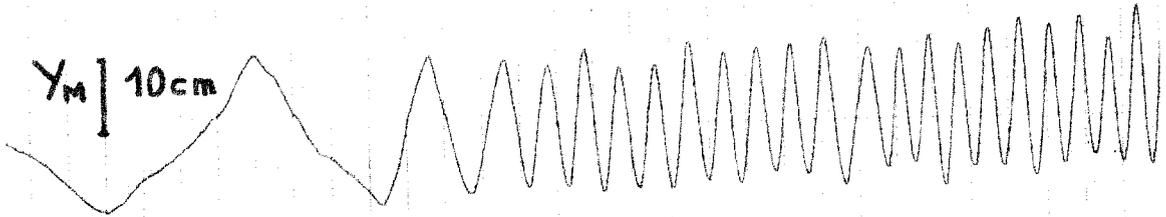
Figure : Sujet n° 40 - Etude inverse

N° 40 · XY · OD · MD ·

$\gamma_0 | 10^\circ$

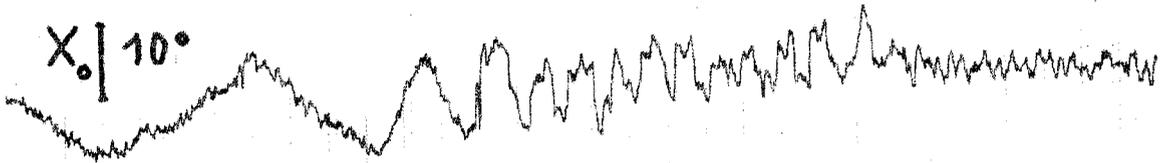


$\gamma_M | 10\text{cm}$

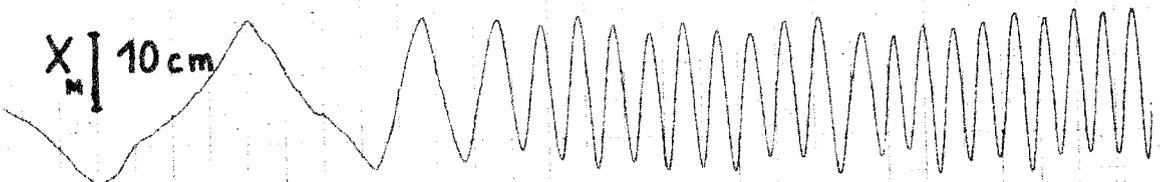


X

$\gamma_0 | 10^\circ$



$\gamma_M | 10\text{cm}$



spot suiveur) le sujet fournit à partir de cette fréquence, un effort considérable de poursuite manuelle.

III.7. Comportement de l'opérateur lorsque la cible ne se trouve pas dans le champ fovéal.

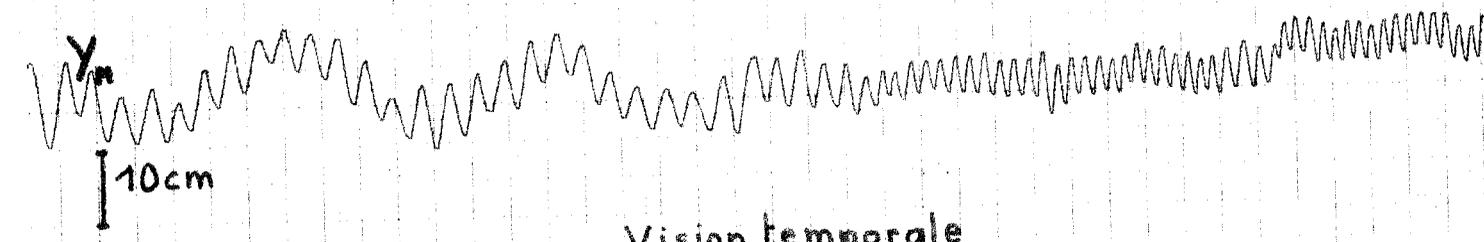
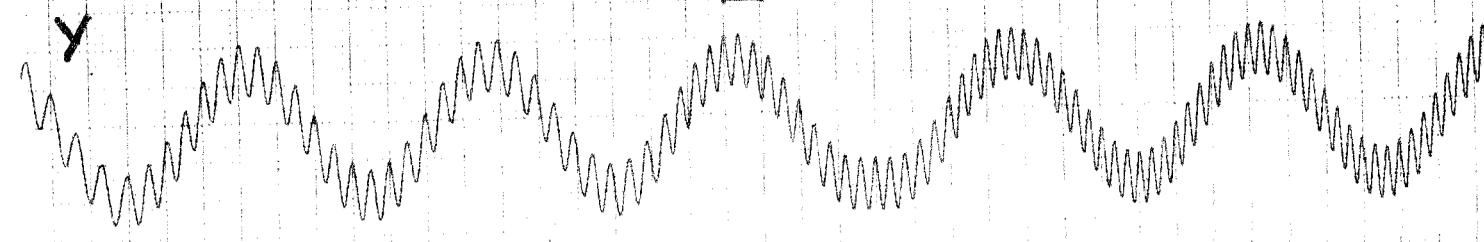
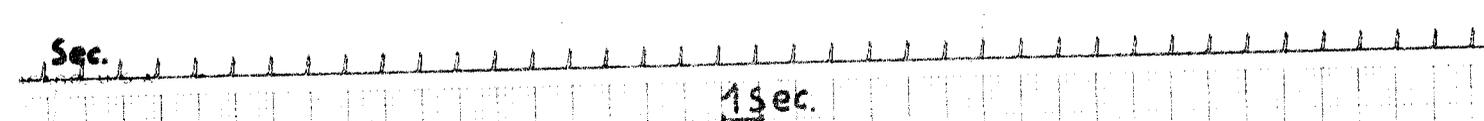
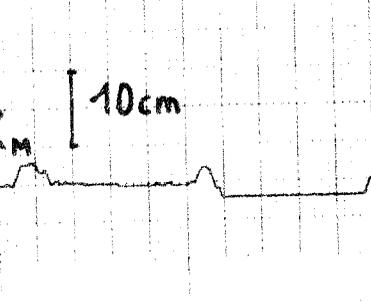
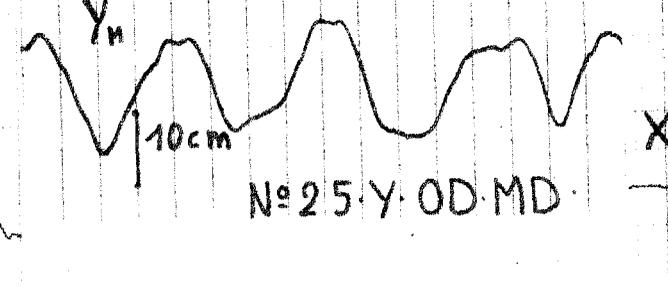
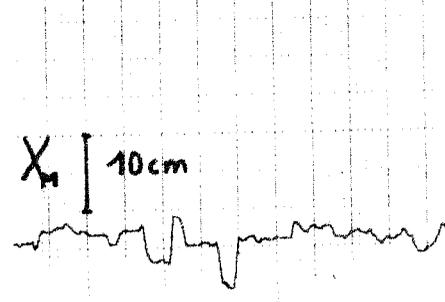
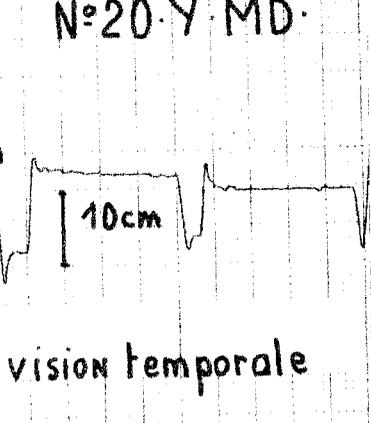
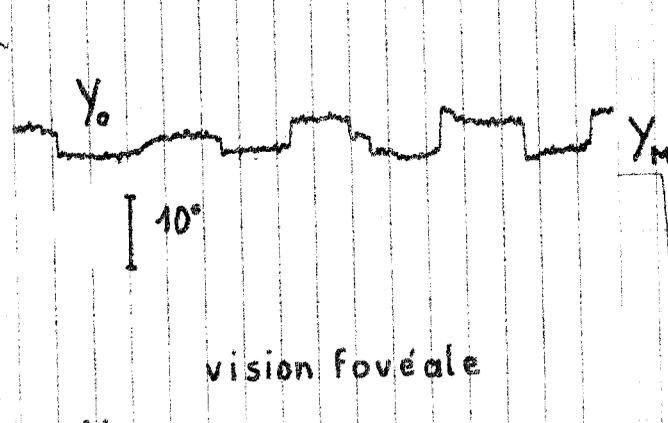
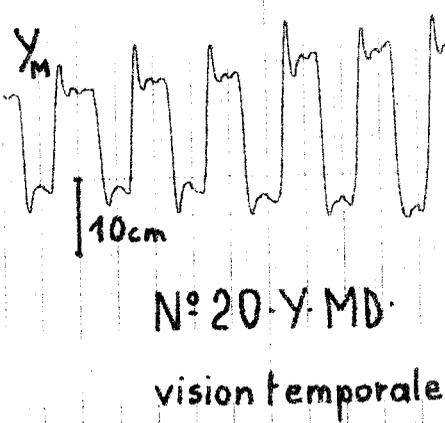
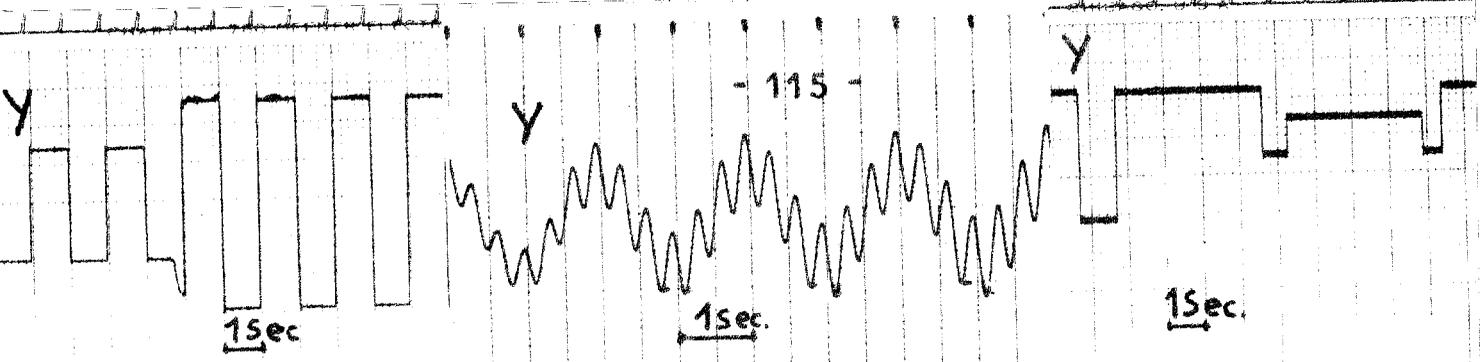
Cette expérience complémentaire consiste à placer volontairement la cible hors du champs fovéal, afin de vérifier l'importance des visions temporale et nasale (D.H. FENDER³⁷, D.S. GILBERT³⁸). L'opérateur est prié de fixer un point placé sur un écran, qui se trouve devant lui, dans le champs fovéal. Les déplacements de la cible et du spot suiveur se font dans le champ de la vision nasale ou temporale sur un écran différent placé sur le côté, toujours à un mètre de l'opérateur mais vu sous un angle éloigné angulairement de 30° de l'écran correspondant à la vision fovéale où se trouve le point fixe. Le reste du protocole expérimental est identique.

III.7.1. Etude des enregistrements obtenus

L'observation des tracés présentés ci-après (Enregistrements n° 25.Y.OG.MD et 20.Y.MD) montre que les réactions manuelles restent en partie asservies à l'information transmise par le capteur visuel. La réponse de l'opérateur est fonction de ce que son système oculaire lui permet de capter. Le renseignement en position est perturbé lorsque la cible se déplace dans le champ de vision nasale ou temporale et l'on se rapproche du cas précédemment étudié où celui-ci était modifié par la coupure de la boucle externe (notion de gain variable, disparition des petites oscillations d'ajustement dans la réponse manuelle). De plus il convient de noter une légère croissance du temps de latence et une composante horizontale manuelle non négligeable pour un mouvement uniquement vertical.

III.7.2. Conséquences de l'analyse

L'enregistrement photographique n° 25.Y.OG.MD est particulièrement intéressant car il montre que la réponse manuelle est sensible à la composante de grande fréquence du stimulus, c'est-à-dire à la vitesse. Autrement dit, il existe dans la rétine des capteurs de "vitesse" et on peut faire intervenir un contrôle tachymétrique aussi bien dans la régulation manuelle que visuelle.



Vision temporeale
N°25·Y·OD·MD·

III.8. Influence de la sensibilité de la commande manuelle sur le comportement de l'opérateur.

En conservant le même protocole expérimental, il s'agit de faire varier la sensibilité du levier manuel (constante dans toute l'étude précédente). Les travaux de J.C. RAOULT², très complets dans ce domaine, montrent la faculté d'adaptation de l'opérateur à la commande manuelle.

En ce qui nous concerne, il est intéressant d'étudier la perturbation du comportement du sujet à une variation aléatoire du gain de la commande. Cet artifice est obtenu par une modification de la sensibilité de l'oscilloscope. Pour un même stimulus, l'opérateur doit alors ajuster l'amplitude de son mouvement.

III.8.1. Analyse sommaire des tracés obtenus

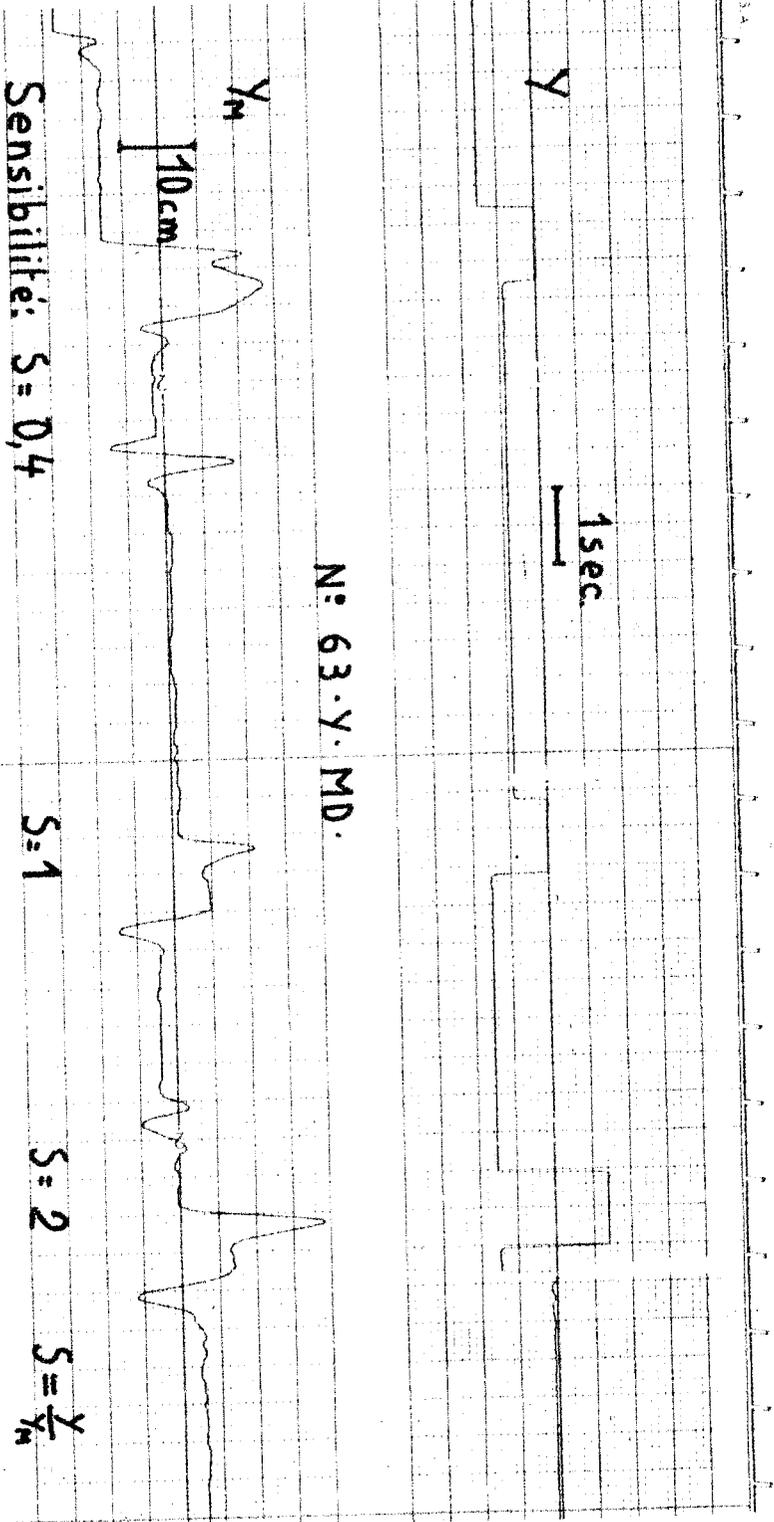
Comme le montre l'enregistrement présenté ci-après n° 63.Y.MD, les perturbations entraînées par une variation du gain de la commande sont importantes, et plus celui-ci augmente, plus le dépassement à un stimulus échelon est important dans la période d'adaptation à la nouvelle commande manuelle. Inversement plus le gain diminue, plus le dépassement est petit. Au cours de la montée manuelle on rencontre parfois des arrêts qui augmentent la valeur du temps de montée t_{mM} . (se référer au paragraphe III.4.3.).

III.8.2. Conséquences

Ces relevés montrent la nécessité d'un modèle à structure variable et sont en concordance avec la faculté d'adaptation du sujet. Si les variations du gain sont suffisamment espacées, on retrouve les résultats de l'étude sur l'apprentissage.

Il est caractéristique de remarquer que dans la majorité des cas, il existe un seul dépassement suivi parfois d'une oscillation unique (en général très petite).

On peut rencontrer des dépassements de 400 % suivis d'aucune oscillation.



Ces propriétés peuvent être considérées comme la manifestation d'un échantillonnage variable qui vérifie les suppositions antérieures et mises précédemment en évidence par l'intermédiaire des petites saccades d'ajustement

III.9. Modèle fonctionnel de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite manuelle et conclusions

L'identification expérimentale effectuée au cours de ce chapitre aboutit au modèle fonctionnel de l'opérateur humain réalisant une tâche de poursuite manuelle de la figure 3.18.

Les déductions expérimentales amènent à envisager un système échantillonné (paragraphe III.3.4.) non-linéaire (non linéarité oculo-motrice, paragraphe III.3.1.) auto-adaptatif (paragraphe III.4.) à gain variable (paragraphe III.5.) possédant un retard pur dont les principales propriétés sont :

- optimiser l'entrée de l'organe musculaire par la fonction régulatrice $g(i)$
- auto-améliorer son fonctionnement par apprentissage
- contenir des non-linéarités possédant des seuils et saturations variables avec la vitesse de la cible.
- réagir à la vitesse de l'entrée
- considérer le système musculaire comme l'organe à régler de transmittance :

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

$\tau = 0,05$ à $0,1$ seconde.

- posséder un échantillonneur bloqueur de premier ordre de période T voisine de $0,2$ seconde variable avec l'erreur, et un gain variable K (5 à 10) fonction de l'amplitude.

Le chapitre suivant va permettre par comparaison des réponses du modèle à celles de l'opérateur humain de vérifier ces hypothèses de travail.

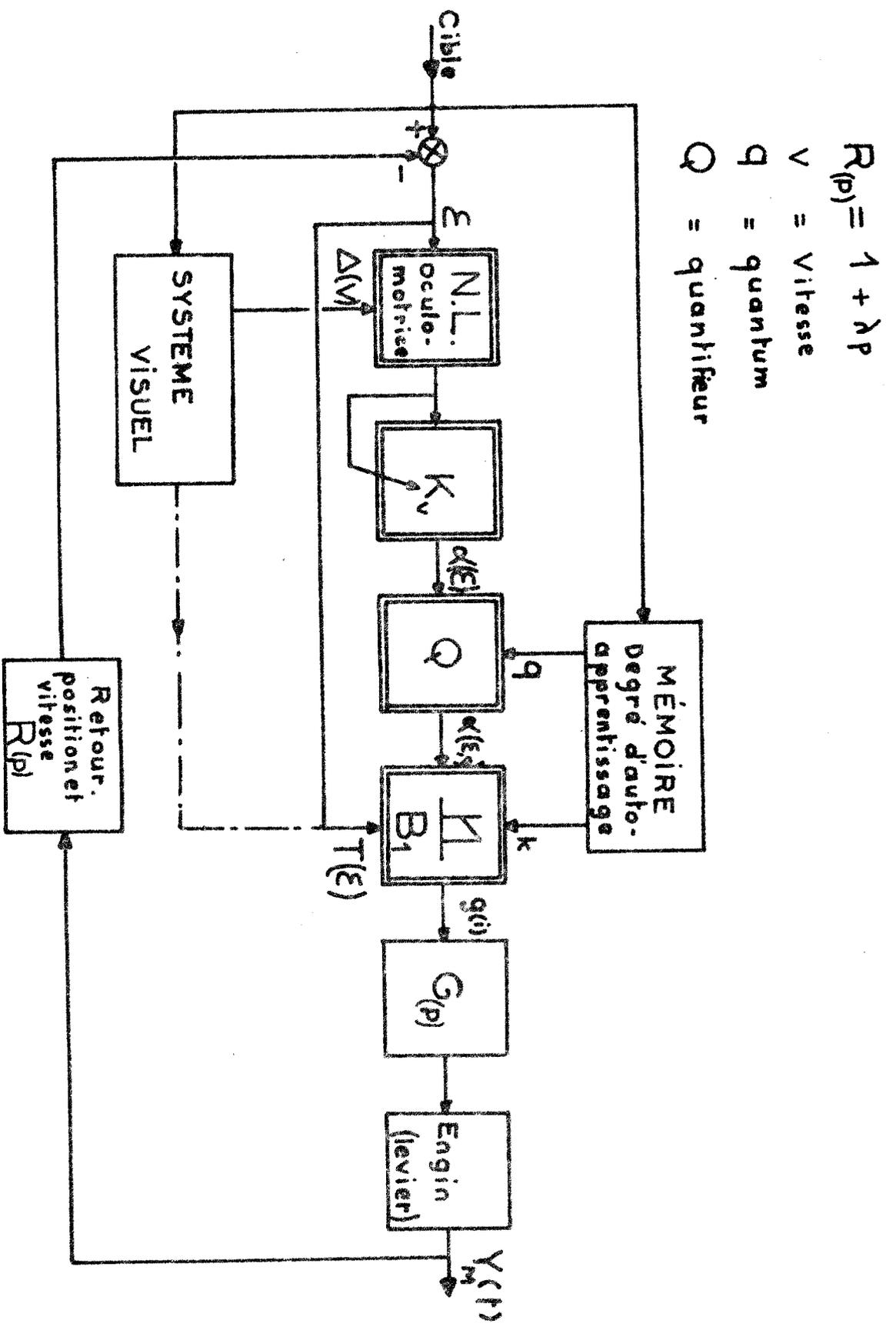


Figure 3.18. Modèle de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite manuelle.

Chapitre IV

Modèle d'opérateur humain en poursuite manuelle et visuelle

Dans les chapitres précédents nous avons particulièrement analysé l'influence du système visuel sur le comportement de l'opérateur, et dans ce sens nous débiterons ce chapitre par un modèle de la fonction oculo-motrice. Cette partie concrétisant les faits observés est destinée d'une part à permettre une meilleure connaissance de l'effet corrélatif des systèmes visuel et manuel, d'autre part à mesurer l'influence de ce système sur la fonction manuelle.

Nous consacrerons ensuite la deuxième partie de ce chapitre à la mise au point d'une simulation de la réponse de l'opérateur à une sollicitation manuelle.

IV.1. Simulation sur calculatrice analogique du système visuel

IV.1.1. Choix du modèle

A partir de l'image de la cible, le cortex visuel, par l'intermédiaire de la rétine fournit des informations aux aires associatives qui élaborent les ordres transmis aux centres oculo-moteurs. De l'étude précédente (chapitre II et III ; en particulier : paragraphes III.3.1., III.3.2., III.6 et III.7) nous pouvons déduire les caractéristiques essentielles du comportement visuel lors d'une tâche de poursuite.

Résumons les principaux caractères spécifiques de la vision, révélés des enregistrements (chapitre II) et de l'identification expérimentale (chapitre III):

- l'organe d'entrée (paragraphe III.3.1.) essentiellement non-linéaire possède un seuil Δ_1 proportionnel à la vitesse du mouvement.
- l'attention du sujet s'interprète par une suite d'échantillonnages, en fonction de la difficulté de la poursuite.

- la transmission de l'information (de nature impulsionnelle) s'accompagne d'un retard dû au temps de latence visuel R_0 de 1^{er} ordre de 0,25 seconde.
- le comportement dynamique de la réponse visuelle, mis en évidence lors de l'étude du stimulus échelon (paragraphe II.1.), présente l'aspect d'un second ordre.
- le système oculo-moteur est sensible à la vitesse du stimulus (paragraphe III.7).

Le modèle, présenté figure 4.1., comporte les éléments suivants :

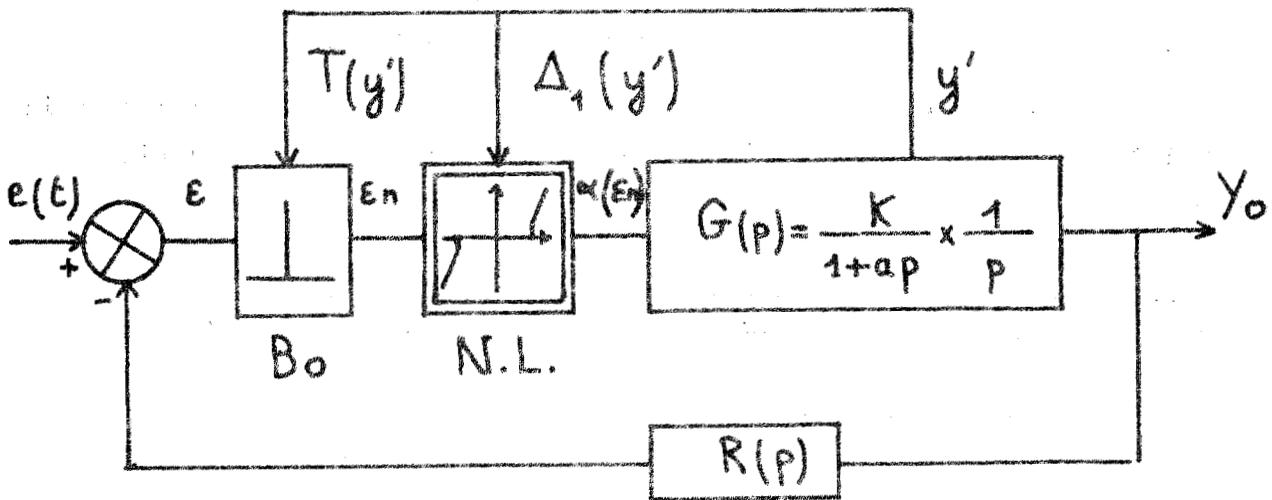


Figure 4.1. Modèle du régulateur visuel

- un échantillonneur bloqueur d'ordre zéro (B_0) à période d'échantillonnage T variable : pour les mouvements à faible vitesse, le modèle a une période d'échantillonnage T lente ; pour les mouvements rapides, la fréquence d'échantillonnage augmente en fonction de la vitesse y' . Dans la période d'échantillonnage, on introduit le temps de latence visuel R_0 .

- un élément non-linéaire dynamique possédant un seuil Δ_1 proportionnel à la vitesse y' du mouvement : l'accroissement de Δ_1 définit la non-linéarité et le "décrochage" du système visuel.
- une transmittance du second ordre de la forme (13)

$$G(p) = \frac{K}{p(1 + ap)} \quad (\text{identifiée par simulation})$$

- une chaîne de retour délivrant un signal proportionnel à la position et à la vitesse du mouvement visuel (paragraphe III.7.) (identifiée par simulation) : $R(p) = 1 + \lambda p$

Détaillons maintenant chaque élément mentionné ci-dessus.

IV.1.2. Non-linéarité dynamique

La poursuite automatique puis volontaire du système oculo-moteur entraîne, d'une part à partir de la fréquence $f_{c.o.}$, pour laquelle la réponse devient saccadée (forme carrée), un effet non linéaire de la réponse visuelle, d'autre part pour des fréquences supérieures à la fréquence $f_{d.o.}$, le "décrochage" (mouvement visuel inexistant lorsque la fréquence du mouvement de la cible est de l'ordre de 1,8 Hertz).

On peut, dans ces conditions, considérer que l'élément non-linéaire N.L. de la figure 4.1. possède un seuil croissant en fonction de la vitesse y' du mouvement visuel.

Nous présentons, figure 4.2., l'évolution dynamique de l'élément non linéaire en fonction de la fréquence du mouvement de la cible pour une entrée supposée sinusoïdale (en vue d'une simplification de la figure, on suppose les seuils acuité visuelle et temps minimum d'impression de la rétine négligeables en régime linéaire).

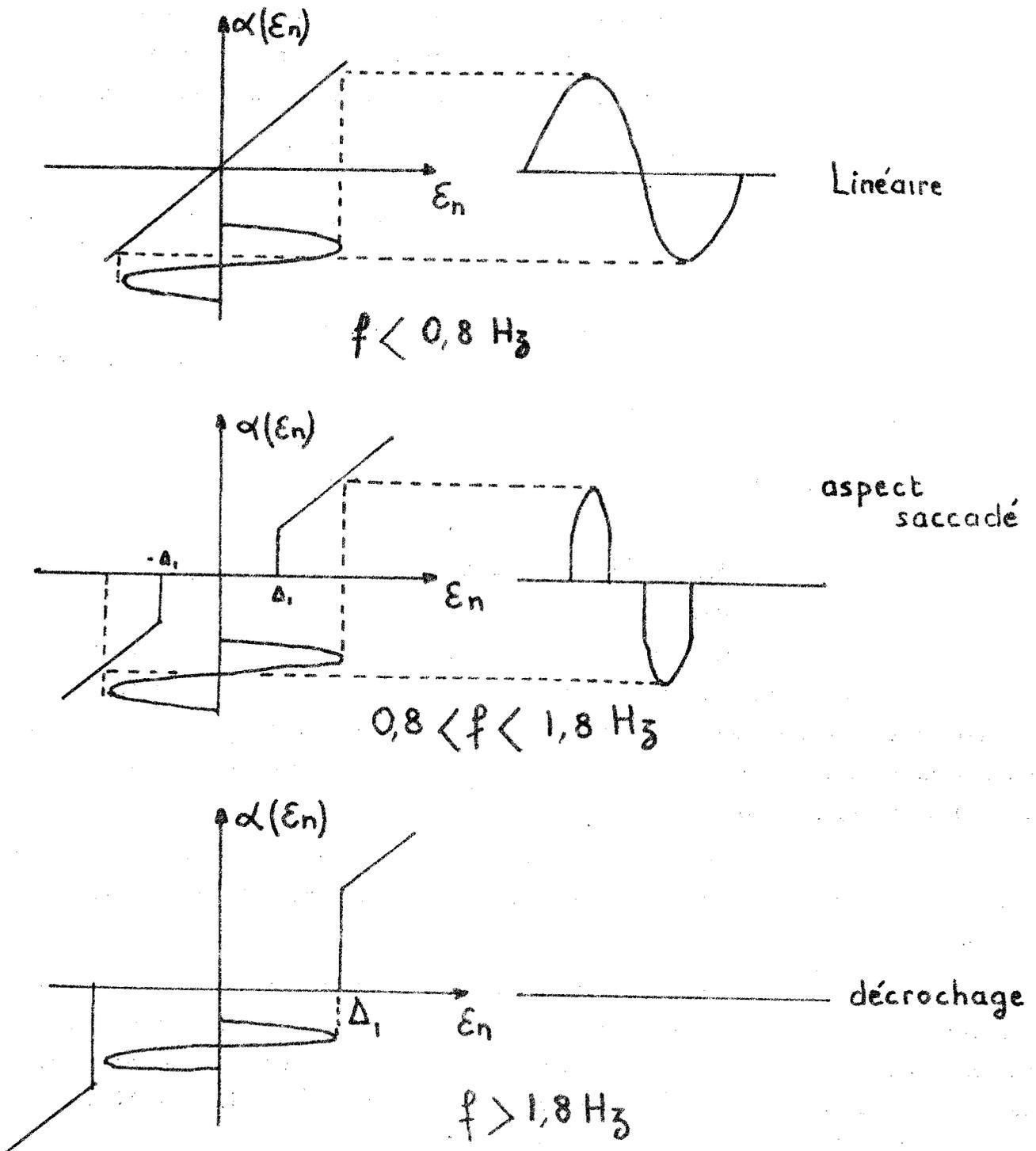


Figure 4.2. Evolution dynamique de l'élément non-linéaire en fonction de la fréquence du mouvement de la cible.

Le comportement de la non-linéarité est fixé par la variation du seuil Δ_1 en fonction de la fréquence du mouvement visuel (figure 4.3.).

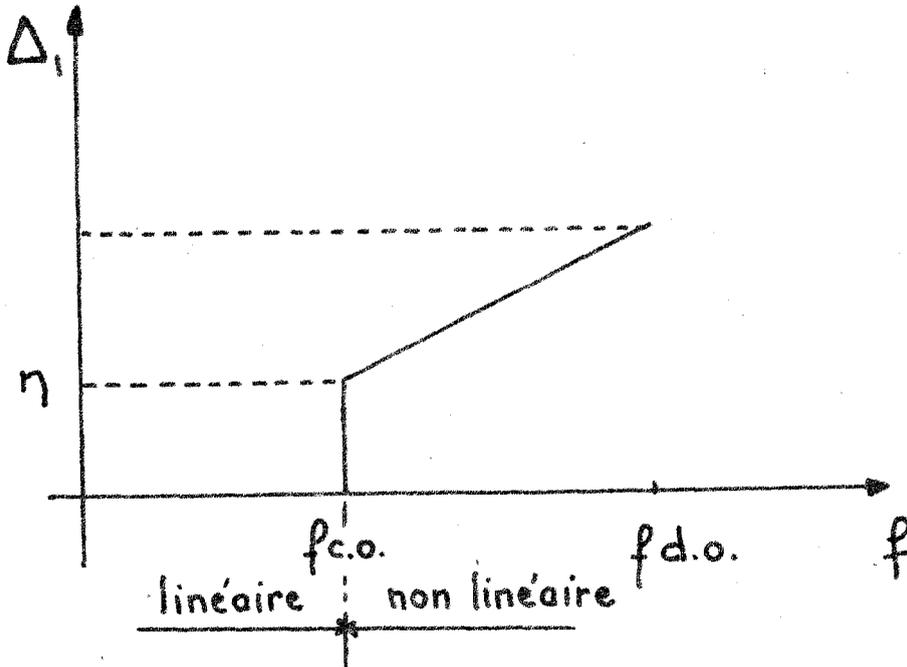


Figure 4.3. Variation du seuil Δ_1 en fonction de la fréquence du mouvement visuel.

Les comportements linéaire et non-linéaire sont définis par l'intermédiaire d'une constante η qui déclenche à partir de $f_{c.o.}$ le régime non-linéaire du système oculo-moteur. Lorsque Δ_1 est inférieur à η , le comportement visuel est linéaire.

Dans certains cas, assez rares, l'aspect saccadé de la réponse oculaire est remplacé par une décroissance rapide de l'amplitude du mouvement visuel. Ce mode de fonctionnement correspond à la non linéarité précédente sans discontinuité.

Nous présentons figure 4.4. le schéma analogique de simulation de la non-linéarité oculo-motrice.

Elaboration de la non-linéarité du seuil

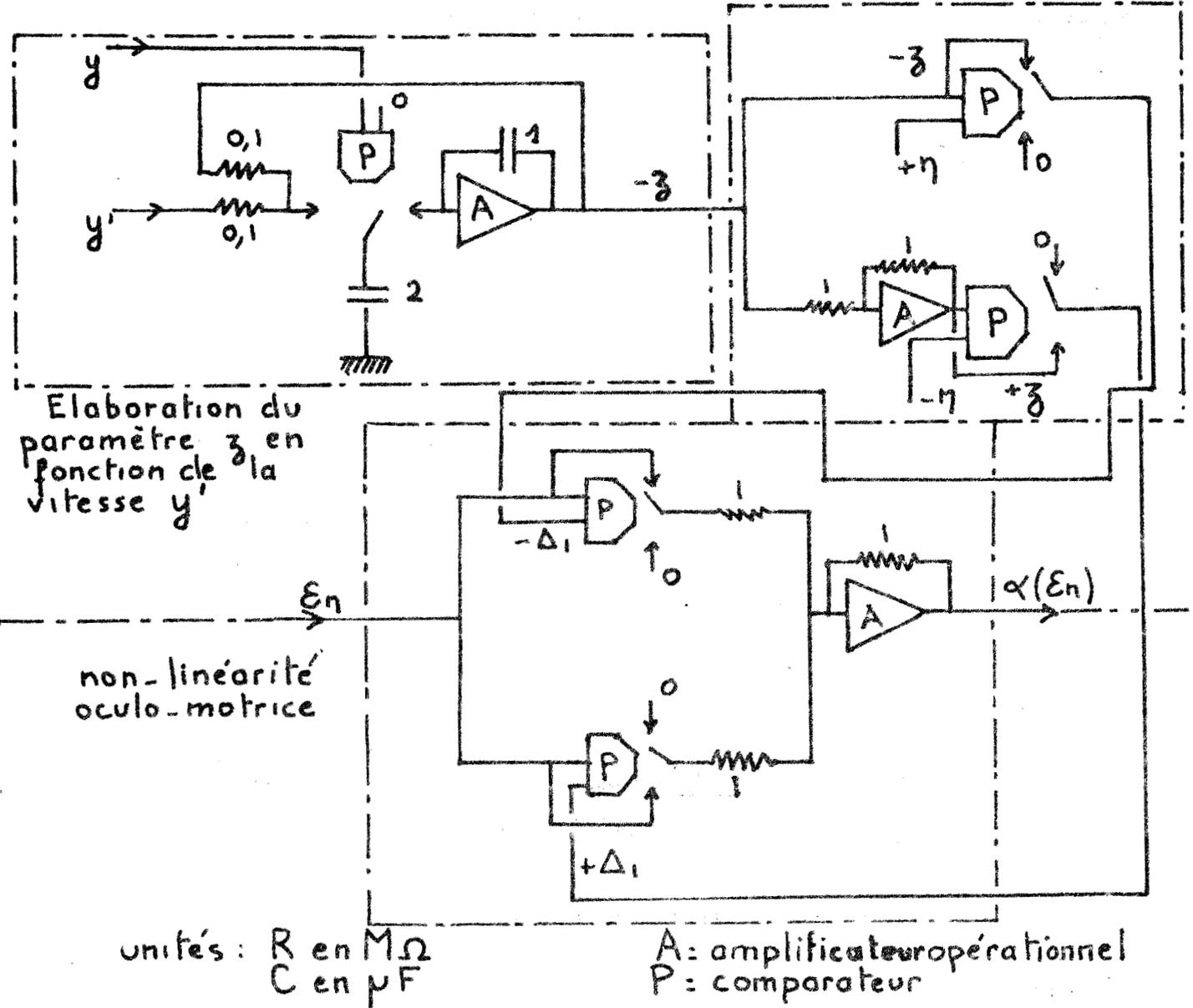


Figure 4.4. Schéma analogique de la non-linéarité oculo-motrice.

La variable y' échantillonnée bloquée constitue l'entrée de l'élément non-linéaire à seuil η définissant le comportement du système oculo-moteur.

$z < \eta$ entraîne $\Delta_1 = 0$: comportement linéaire
 $z > \eta$ entraîne $\Delta_1 = z$: comportement non-linéaire.

y et y' correspondant respectivement à la position et à la dérivée du mouvement, la tension Δ_1 apparaît lorsque $|z| > |\eta|$

Nous avons représenté figure 4.5, l'évolution du seuil Δ_1 à une entrée donnée, compte tenu du paramètre η

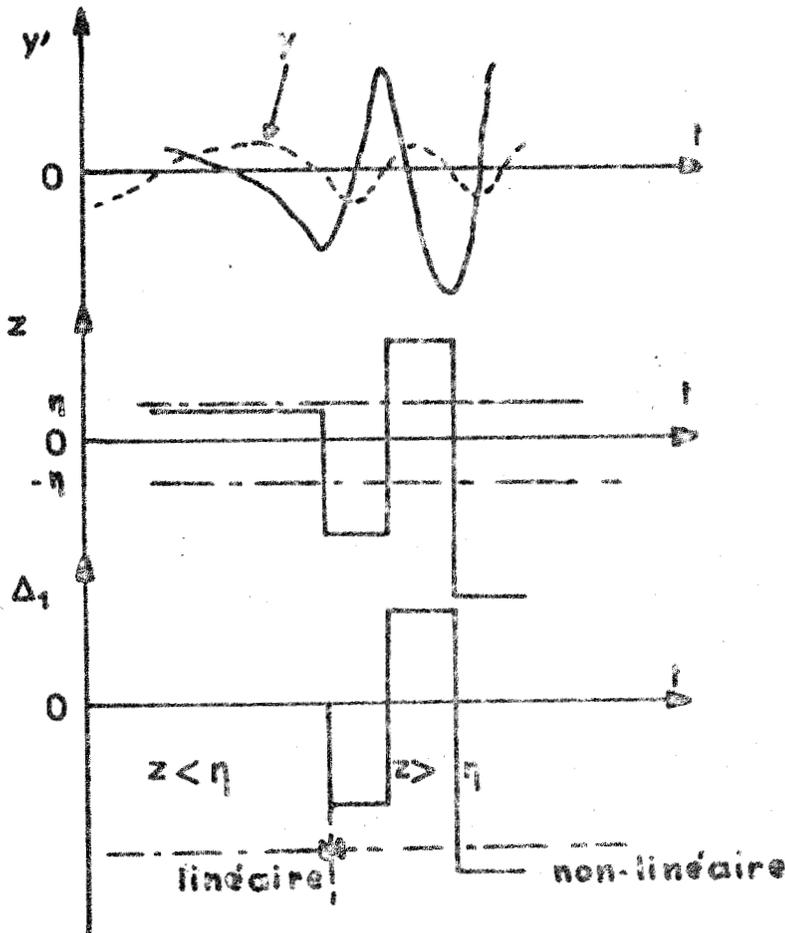


Figure 4.5. Evolution du seuil Δ_1 en fonction de z

Pour la simulation des sujets rares mentionnés plus haut il suffit de remplacer les comparateurs par des redresseurs.

Pour un stimulus sinusoïdal y , la sortie échantillonnée bloquée z est proportionnelle à l'amplitude de la vitesse y'

$$\text{si } y = A \sin \omega t$$

$$z = A \omega$$

Le comportement non-linéaire a lieu pour :

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

$$f_{co} = \frac{\eta}{2 \pi A}$$

et le décrochage a lieu pour f_{do} tel que :

$$\Delta_1 = 2 \pi f_{do} A \geq \epsilon_n \quad (\text{figure 4.2.})$$

$$f_{do} \geq \frac{\epsilon_n}{2 \pi A}$$

ϵ_n : erreur du système oculomoteur.

La relation entre fréquence de décrochage f_{do} du système et amplitude du stimulus A est probable d'un point de vue physiologique car plus l'amplitude de l'entrée augmente, plus le décrochage est rapide.

IV.1.3. Echantillonneur à fréquence variable

Comme nous l'avons déjà signalé nous considérons l'attention de l'opérateur liée à une suite d'échantillonnages dont le nombre varie en fonction de la difficulté de la poursuite.

Dans ce but, nous avons utilisé le modèle représenté figure 4.6.

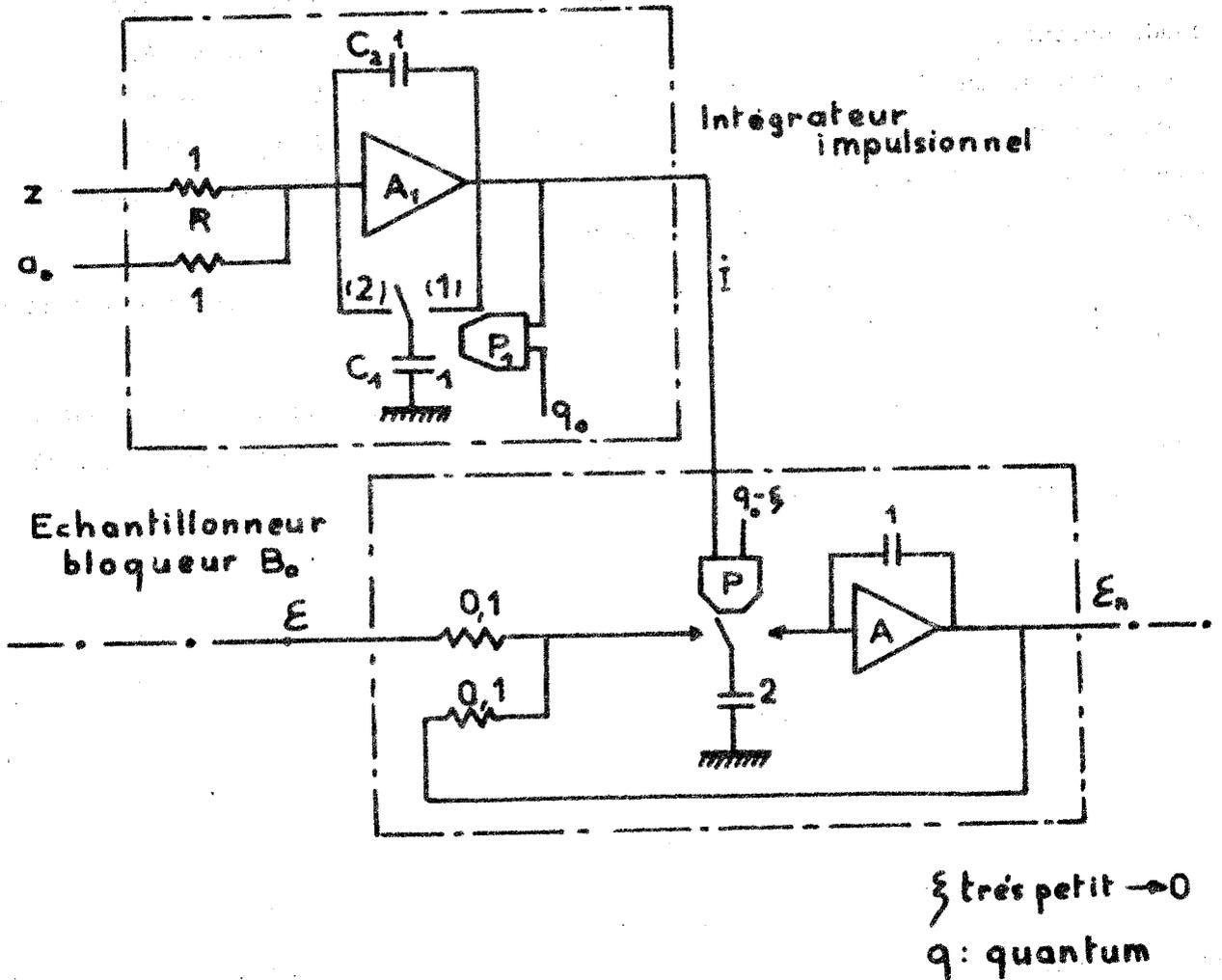


Figure 4.6. Echantillonneur bloqueur d'ordre zéro commandé par l'intégrateur impulsionnel.

Il s'agit d'un échantillonneur bloqueur d'ordre zéro (B_0) commandé par une fréquence variable obtenue à partir d'un intégrateur impulsionnel. Lorsque la sortie de cet intégrateur (A_1) atteint le quantum q_0 , il y a d'une part remise à zéro de la tension de sortie de A_1 par l'intermédiaire des condensateurs C_1 et C_2 , d'autre part émission d'une impulsion commandant l'échantillonneur B_0 . La palette du comparateur P_1 bascule de (1) en (2) lorsque :

$$\int_0^{t=T} [a_0 + z] dt = q_0 \quad (\text{avec } R = 1 \text{ et } C = 1)$$

La charge du condensateur C_1 se trouve reportée aux bornes du condensateur C_2 , changée de signe et annule la tension de sortie de A_1 . La palette revient en (1) et le processus recommence. Il y a alors émission d'une suite d'impulsions à fréquence variable d'une part en fonction de q_0 , d'autre part en fonction de a_0 et de z ($a_0 = \text{constante}$, z proportionnel à la vitesse qui est constante pendant une période du stimulus).

Nous montrons figure 4.7., la variation de la séquence impulsionnelle (I).

La constante a_0 définit la période d'échantillonnage du système obtenue lorsque l'influence de la vitesse du signal de commande est nulle. Il y a émission d'une impulsion lorsque :

$$\frac{1}{RC} \int_0^T a_0 dt = q_0$$

la période des impulsions

$$T = RC \frac{q}{a_0} = 0,2 \text{ seconde}$$

$RC = 1$

traduit également le comportement du sujet lorsque celui-ci n'est pas coopérant ou est fatigué lors d'un stimulus exigeant une grande attention.

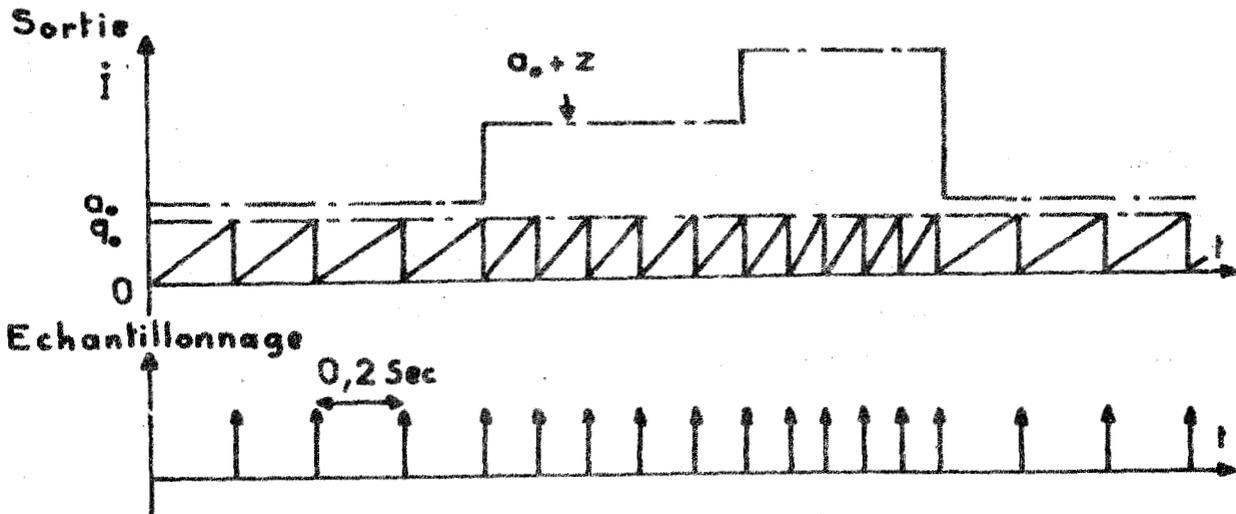


Figure 4.7. Variation de la fréquence des impulsions

Rappelons que la période d'échantillonnage peut être variable à partir d'une certaine vitesse y' correspondant comme dans la non-linéarité oculomotrice, à la fréquence non-linéaire $f_{c.o}$ du système visuel. Il suffit pour cela d'utiliser la variation de Δ_1 (figures 4.4. et 4.5., dans ce cas $z = \Delta_1$)

Introduction du temps de latence dans la séquence d'échantillonnage

Introduisons à l'aide de l'intégrateur impulsionnel (figure 4.6.) le retard dû au temps de latence oculaire. Le principe consiste à retarder l'instant d'échantillonnage de B_0 d'une valeur correspondante à R_0 (retard visuel) par l'intermédiaire du quantum q_0 .

En effet, si l'on augmente q_0 de Δq_0 on a :

$$\int_0^T a_0 dt = q_0 + \Delta q_0 \text{ (en supposant la vitesse nulle)}$$
$$T = \frac{q_0 + \Delta q_0}{a_0} = \frac{q_0}{a_0} + \frac{\Delta q_0}{a_0}$$

avec $\frac{q_0}{a_0} = 0,2$ seconde.

Nous réalisons le décalage de l'instant d'échantillonnage par l'intermédiaire de l'erreur ϵ du système oculomoteur. En effet lors du paragraphe II.1.6, on a constaté que le retard visuel R_0 est fonction de l'amplitude du stimulus ; par ailleurs, la notion de retard variable peut se justifier d'un point de vue physiologique, car après la mise en action du mouvement visuel, l'opérateur se trouve en régime "dynamique" et tend à rattraper son retard.

Lors de la simulation, la quantité Δq_0 est fonction de ϵ (erreur du système oculomoteur $\epsilon = e-y$, figure 4.1.).

Nous présentons, figure 4.8, la nouvelle séquence impulsionnelle et figure 4.9 le schéma analogique réalisé.

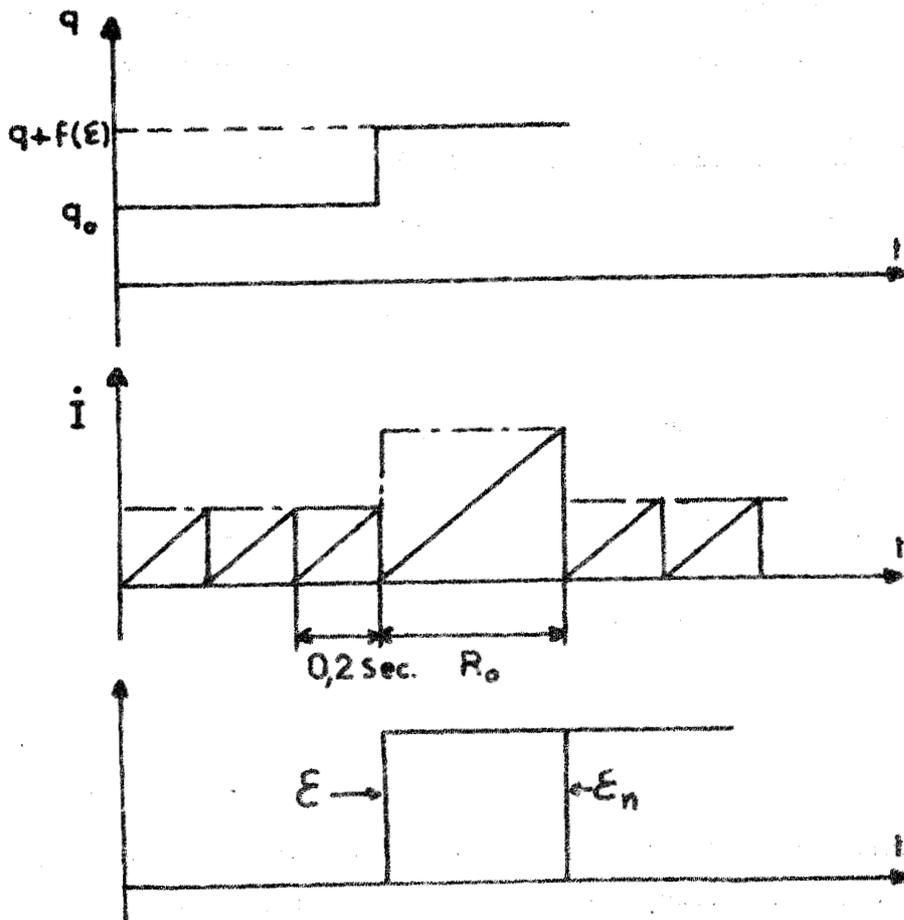


Figure 4.8. Elaboration du retard visuel R_0

Pour les stimulus sinusoïdaux en particulier, on peut considérer que la mise en mouvement du système oculo-moteur, juste à l'instant de démarrage de présentation de la sinusoïde sur l'écran, se fait de façon analogue à celle d'un stimulus en échelon : le premier point capté du stimulus sinusoïdal est identique au premier point du stimulus échelon.

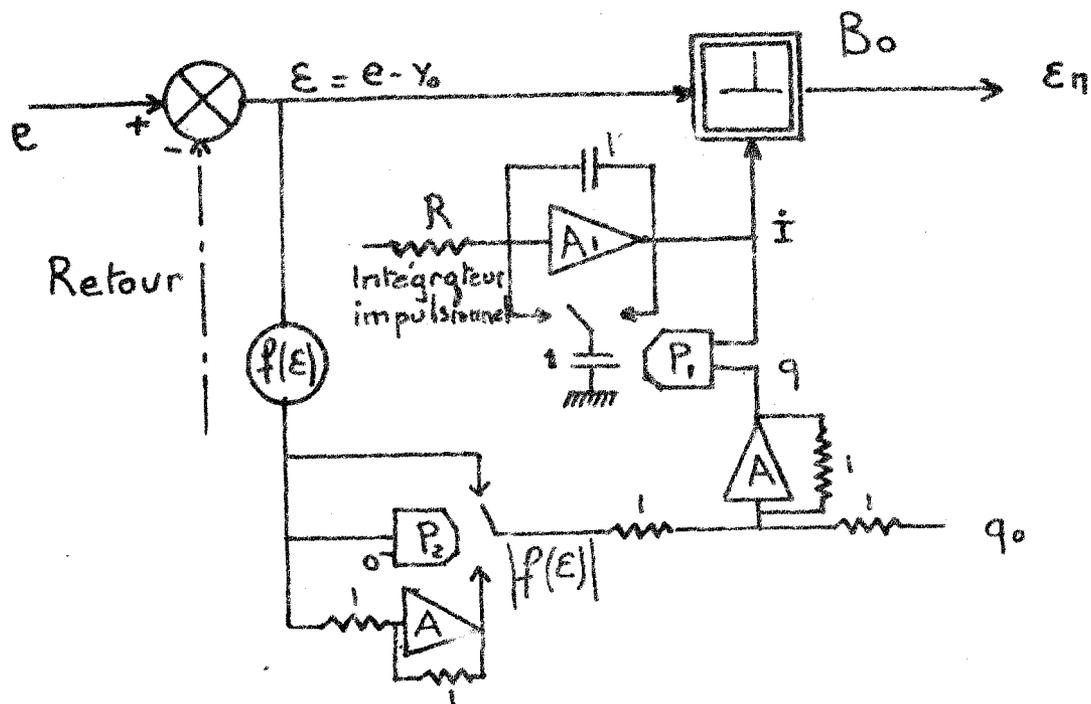
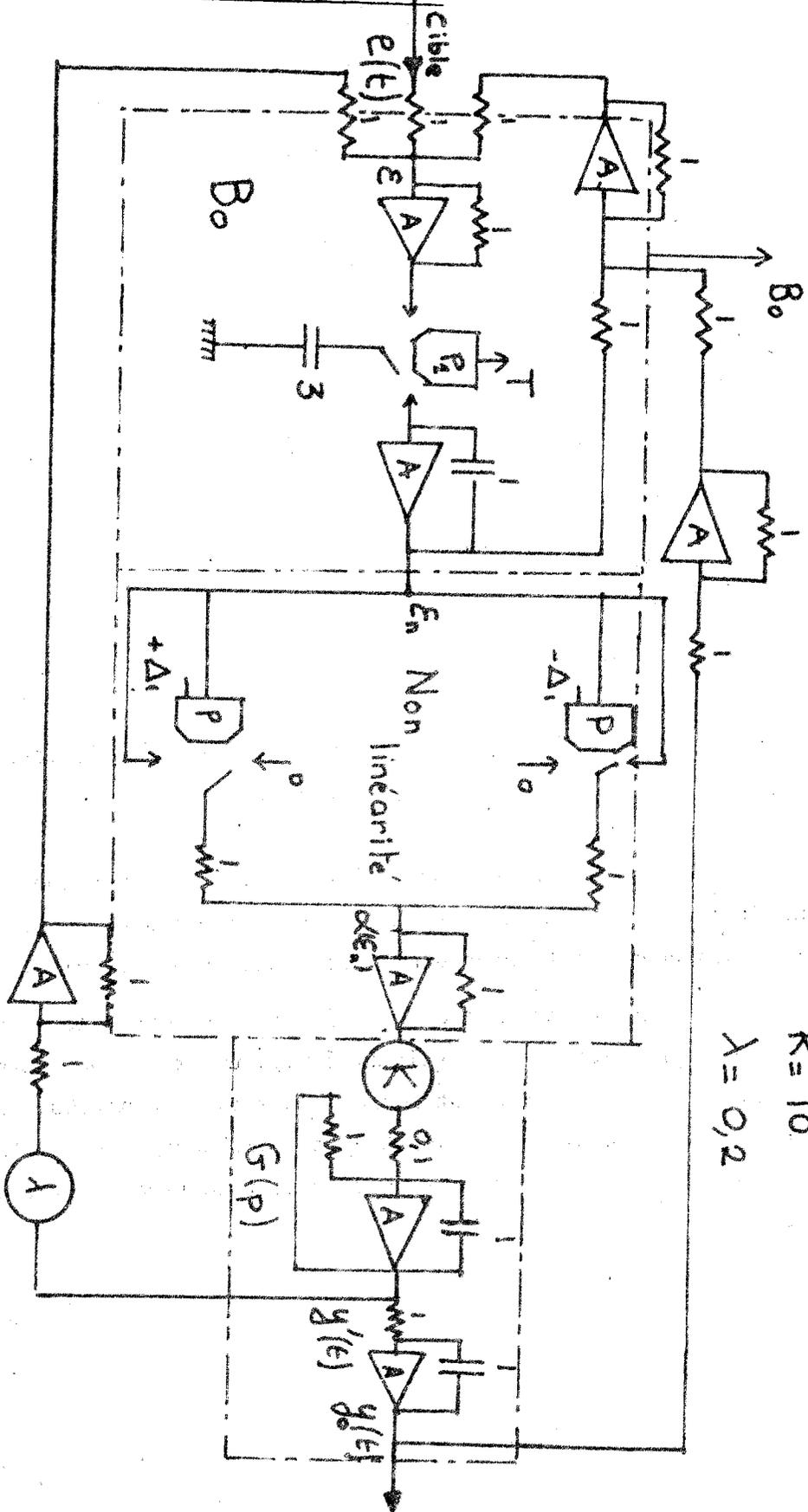


Figure 4.9. Elaboration du retard visuel, fonction de l'erreur ϵ .

Néanmoins pour un bon fonctionnement de la simulation, il est souhaitable que $f(\epsilon)$ n'existe que durant la période correspondant à R_0 (figure 4.8), c'est-à-dire lors des changements brusques de la position du stimulus.

La simulation est améliorée en intercalant entre les endroits où l'on détecte les variables ϵ et q , (figure 4.9.), un organe permettant de réaliser l'influence de $f(\epsilon)$, seulement lorsque $\epsilon = e$. La contribution de $f(\epsilon)$ est alors supprimée après le premier instant d'échantillonnage. Par ailleurs on voit (figure 4.9) que l'on peut à volonté faire varier le temps de latence R_0 en ajustant la valeur de $f(\epsilon)$.

1.4. Modèle analogique du système visuel



$$T = 0,2 \text{ s}$$

$$K = 10$$

$$\lambda = 0,2$$

Figure 4.10.

P_1 est commandé par la séquence impulsionnelle I , le seuil Δ_1 est élaboré à partir de y et y' .
Schéma analogique du système visuel effectuant une tâche de poursuite.

En posant :

$$- \frac{T}{a}$$

$$D = e^{-\frac{T}{a}}$$

a = constante du filtre

K = gain du filtre = 10

$\alpha(\epsilon_n)$ = sortie de l'élément non-linéaire

y_n et y_{n+1} = réponses aux instants nT et $(n+1)T$

y'_n et y'_{n+1} = vitesses aux instants nT et $(n+1)T$

On montre aisément que le modèle est régi par l'équation de récurrence (41).

$$\begin{aligned} \epsilon_{n+2} - (1+D) \epsilon_{n+1} + D \epsilon_n - K \alpha(\epsilon_n) & \left[\lambda (1-D) - (a - TD - aD) \right] + \dots \\ \dots K \alpha(\epsilon_{n+1}) & \left[\lambda (1-D) + (T - a + aD) \right] = e_{n+2} - (1+D) e_{n+1} + D e_n \end{aligned}$$

c'est-à-dire :

$$\epsilon_{n+2} + f_1 \epsilon_{n+1} + f_2 \epsilon_n = e_{n+2} - (1+D) e_{n+1} + D e_n$$

Une condition pour que le système du second ordre réponde en deux périodes d'échantillonnage est (42) :

$$f_1 = f_2 = 0$$

Conclusions

Nous n'insisterons pas davantage sur la simulation de la fonction visuelle ; néanmoins signalons que la disproportion entre le retard R_0 et le temps de montée t_{m0} visuels a amené, lors de la simulation (figure 4.10), à effectuer un changement d'échelle des temps de rapport : 5

De cette analyse retenons principalement les deux caractéristiques essentielles de la vision : la non-linéarité oculo-motrice (paragraphe IV.1.2.) et l'échantillonneur commandé par une fréquence variable d'impulsions (paragraphe IV.1.3), elles se retrouveront lors de la simulation du comportement de l'opérateur humain

réalisant une tâche de poursuite manuelle. Rappelons (paragraphe III.1.) que les éléments capteur d'information et de transmission sont communs aux deux boucles des systèmes visuel et manuel .

IV.2. Simulation sur calculatrice analogique du système manuel

Nous avons montré lors du chapitre précédent les différentes parties que l'on pouvait dégager du système de commande manuelle (figure 3.18). Aussi allons-nous tout d'abord examiner ces éléments afin de proposer une simulation de l'ensemble (43).

IV.2.1. Non-linéarité dynamique

La nécessité d'une caractéristique non-linéaire présentant un seuil s'est révélée impérative lors de l'examen des tracés expérimentaux. La recherche d'une minimalisation de l'erreur entre les réponses du modèle et du sujet conduit au schéma de la figure 4.11. (où pour la clarté de l'exposé nous n'avons représenté que le schéma analogique du quantifieur) :

- N.L. non-linéarité oculo-motrice définie au paragraphe IV.1.2.
- K_v représentant l'amplificateur à gain variable, défini au paragraphe III.5 (effet de saturation)

ε et $\alpha_q(\varepsilon)$ = entrée et sortie de la non-linéarité dynamique

$\alpha(\varepsilon)$ = sortie de la non-linéarité oculo-motrice (seuil Δ_1 variable avec la vitesse y') associée au gain variable K_v

q_0 = quantum ("pas" du quantifieur)

$q = q_0 - F_m$ = valeur du quantum au cours de l'apprentissage

F_m = fonction mémoire qui sera définie par la suite ; elle est fonction du nombre de stimulus identiques présentés à l'opérateur.

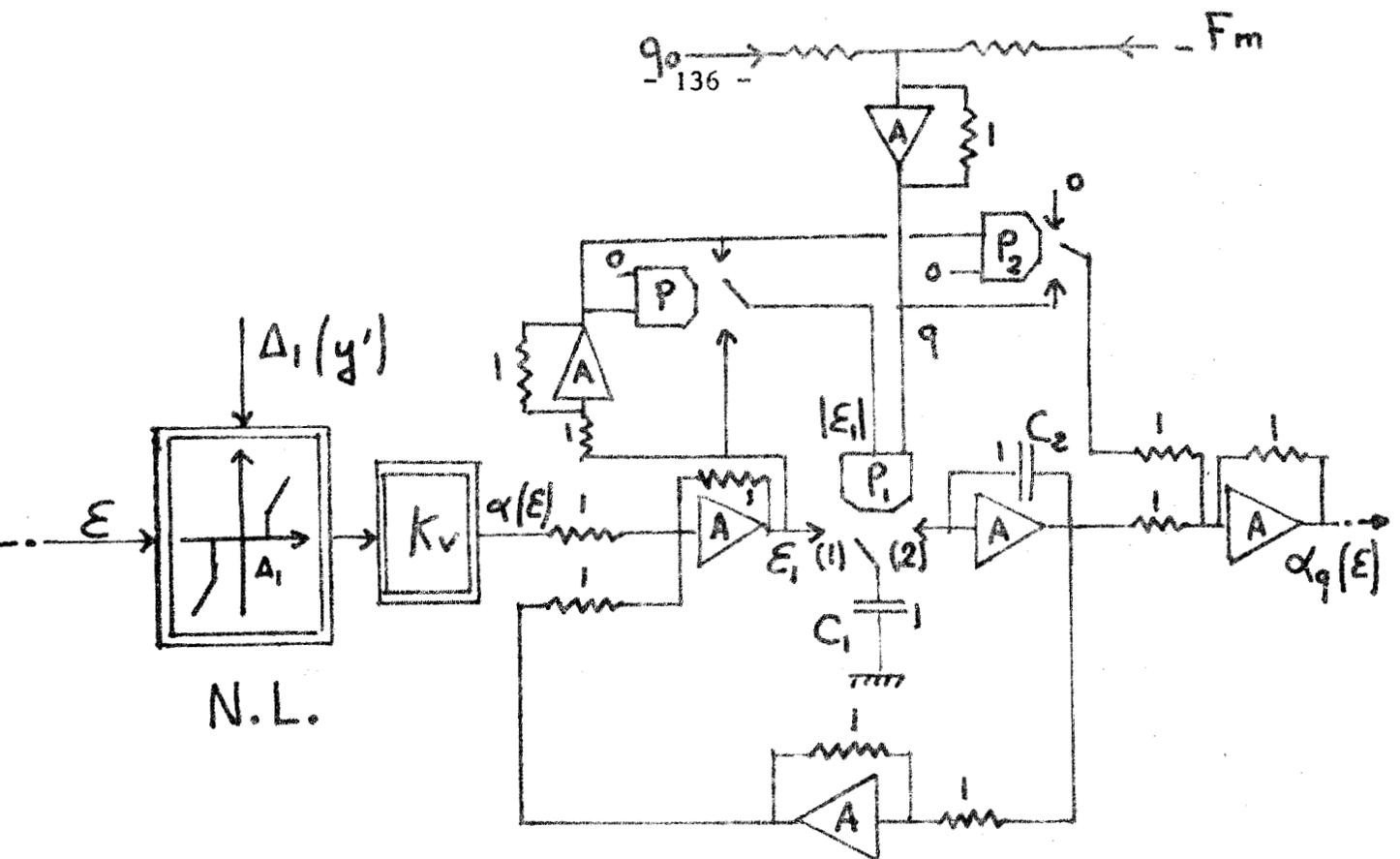


Figure 4.11. Schéma analogique de la non-linéarité dynamique.

Rappelons que l'introduction d'une quantification s'est révélée nécessaire lors de l'étude de l'apprentissage (paragraphe III.4.). Supposons un signal quelconque $\alpha(\epsilon)$ à l'entrée du quantifieur. Lorsque la valeur absolue de la tension $|\epsilon_1|$ (figure 4.11.) atteint la valeur du quantum q , la palette du comparateur P_1 qui se trouvait en position (1) vient en position (2). La charge du condensateur C_1 est bloquée par l'amplificateur bloqueur (condensateur C_2). La contre-réaction négative ramène la palette en position (1) et le processus se renouvèle à chaque quantum. Le comparateur P_2 est destiné à éliminer l'hystérésis du quantifieur lorsque la dérivée de $\alpha(\epsilon)$ est négative.

Nous présentons figure 4.12., la variation de la sortie $\alpha_q(\epsilon)$ en fonction d'une entrée $\alpha(\epsilon)$.

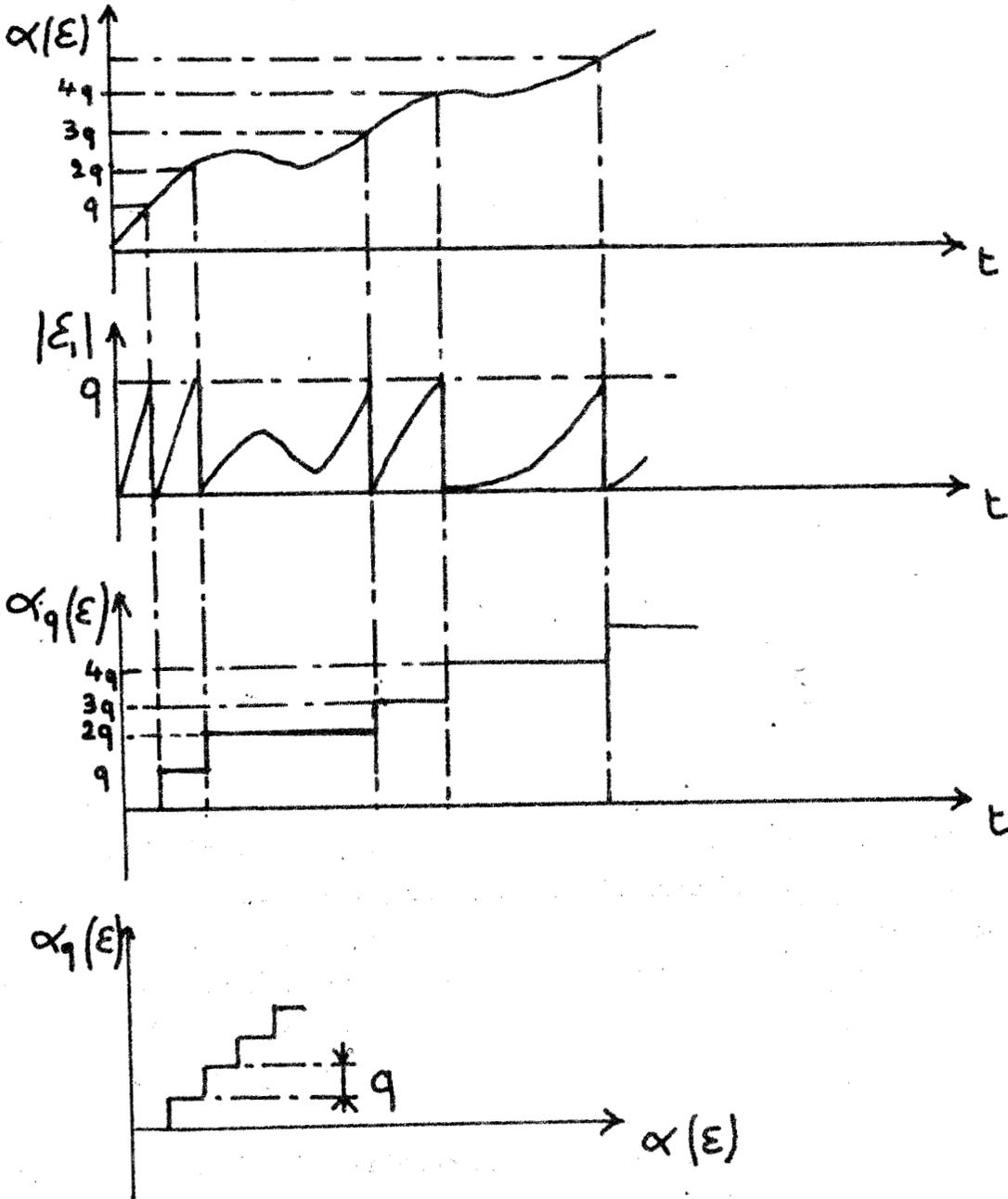


Figure 4.12. Variation de la sortie $\alpha_q(\epsilon)$ en fonction de $\alpha(\epsilon)$

Une particularité essentielle du quantifieur réside dans la facilité de rendre le quantum q variable (tout en utilisant un nombre minimum d'organes de calcul).

En effet on doit prévoir (paragraphe III.4.) une modification de la caractéristique non-linéaire au cours de l'entraînement du sujet si les tests

présentés sont identiques. Dans ce cas la quantité F_m (fonction mémoire ou faculté d'apprentissage, liée au nombre de tests identiques) s'approche de la valeur du quantum q_0 (figure 4.11.). Il en résulte un "pas" du quantifieur décroissant en fonction du nombre de tests présentés à l'opérateur (explicité au paragraphe suivant IV.2.3.).

Nous présentons, figure 4.13, la caractéristique de la non-linéarité dynamique (non-linéarité oculaire N.L, gain variable K_v et quantifieur).

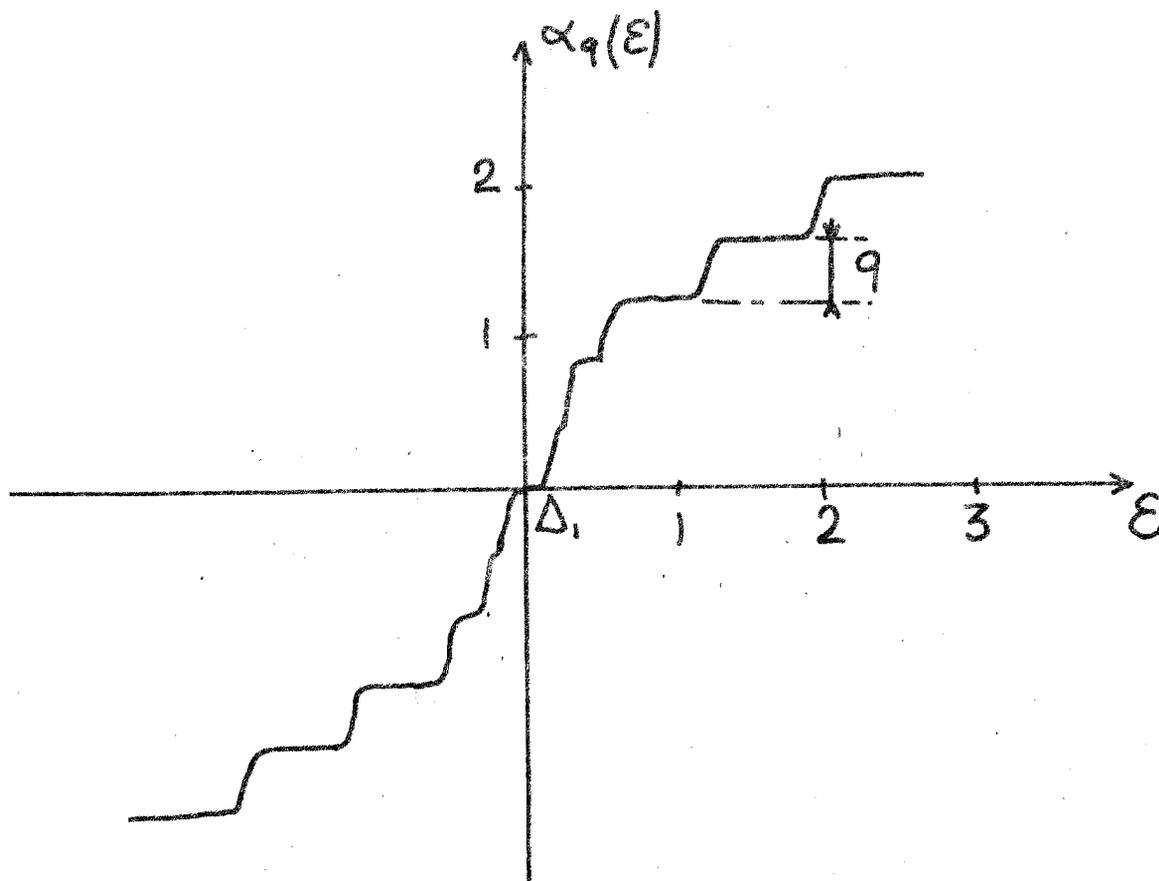


Figure 4.13. Caractéristique de la non-linéarité dynamique (à quantum variable).

Lorsque la valeur du quantum q est élevée, on remarque une légère hystérésis de la caractéristique $\alpha_q(\epsilon)$. Ce régime correspondant au début d'une suite de stimulus disparaît au bout d'un certain nombre de tests (influence de l'apprentissage F_m).

Rappelons que le seuil Δ_1 , augmentant en fonction de la vitesse, peut engendrer une oscillation limite correspondant à la fréquence limite manuelle de l'opérateur.

Soulignons enfin que le paramètre K_v s'est avéré fort important lors de la minimisation de l'erreur entre les réponses du modèle et du sujet.

IV.2.2. Transmission échantillonnée

Elle est réalisée à partir d'un échantillonneur bloqueur de premier ordre (B_1) délivrant à sa sortie $g(i)$: (figure 4.14.).

$$g(i)_{nT+t} = f_{nT} + \frac{k(m)}{T} \left[f_n - f_{n-1} \right] \times t$$

avec :

$$f = \alpha_q(\epsilon)$$

$g(i)$: entrée et sortie de l'échantillonneur

nT : instant d'échantillonnage période T

Δ_n : différence première = $f_n - f_{n-1}$

$k(m)$: estimation de la vitesse entre deux instants d'échantillonnage (paragraphe III.4) elle varie au cours de l'apprentissage en fonction du nombre de tests identiques.

L'amélioration des caractéristiques de l'opérateur (paragraphe III.4) peut s'interpréter au moyen de la modification du deuxième terme de la transmission échantillonnée car la contribution de la différence première Δ , élaborée par l'échantillonneur B_1 , peut varier en changeant la valeur de $k(m)$ au cours de l'entraînement.

Nous présentons figure 4.14, le schéma analogique de l'échantillonneur B_1 (B_0 échantillonneur bloqueur d'ordre zéro).

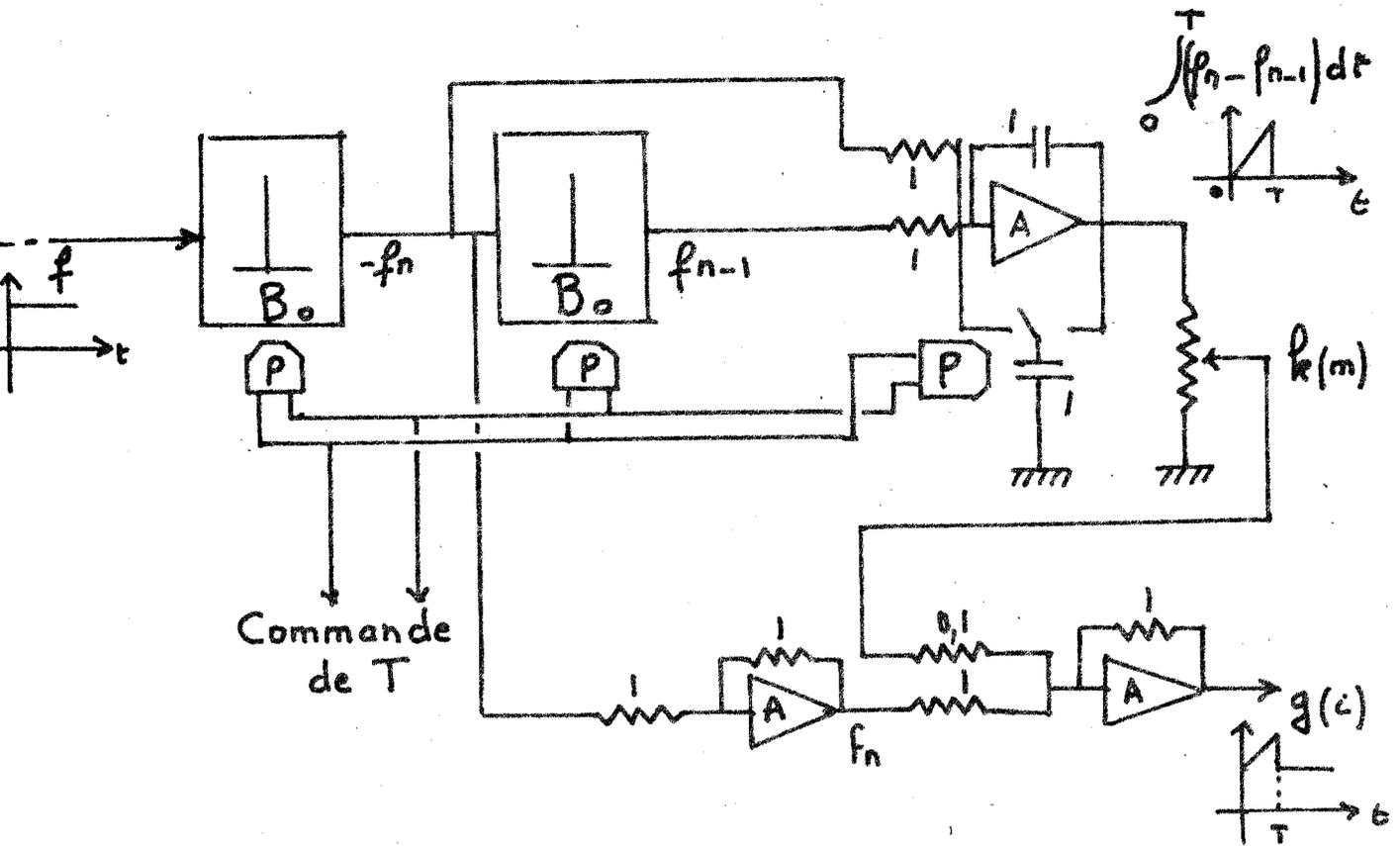


Figure 4.14. Schéma analogique de l'échantillonneur B_1

Les dépassements réels pouvant être très importants, $k(m)$ est susceptible d'atteindre des valeurs élevées telles que $k = 2, 3, \dots$

Le deuxième terme de la transmission échantillonnée est fonction de l'écart en position entre les deux instants d'échantillonnage nT et $(n-1)T$ et du coefficient $k(m)$.

Générateur d'impulsions de commande de l'échantillonneur B_1

La commande de la période d'échantillonnage est basée sur l'utilisation de l'intégrateur impulsionnel mentionné lors de l'étude du système visuel (paragraphe IV.1.3.).

Rappelons la mise en mouvement de la réponse manuelle de l'opérateur à un stimulus : le retard manuel R_M est égal au temps mis par le capteur visuel pour saisir l'information, augmenté du temps de "calcul" et de "décision" ΔR_M d'estimation de la trajectoire, du délai de transmission de l'ordre enregistré. On a montré précédemment que l'apprentissage agit de manière à réduire les temps de "calcul" et de décision ΔR_M ; remarque qui nécessite l'introduction d'un autre terme ΔR_M ayant pour but de diminuer ΔR_M au cours des tests effectués par le sujet (lors de la séquence impulsionnelle).

Nous présentons figure 4.15. le schéma analogique de commande de l'échantillonneur B_1 .

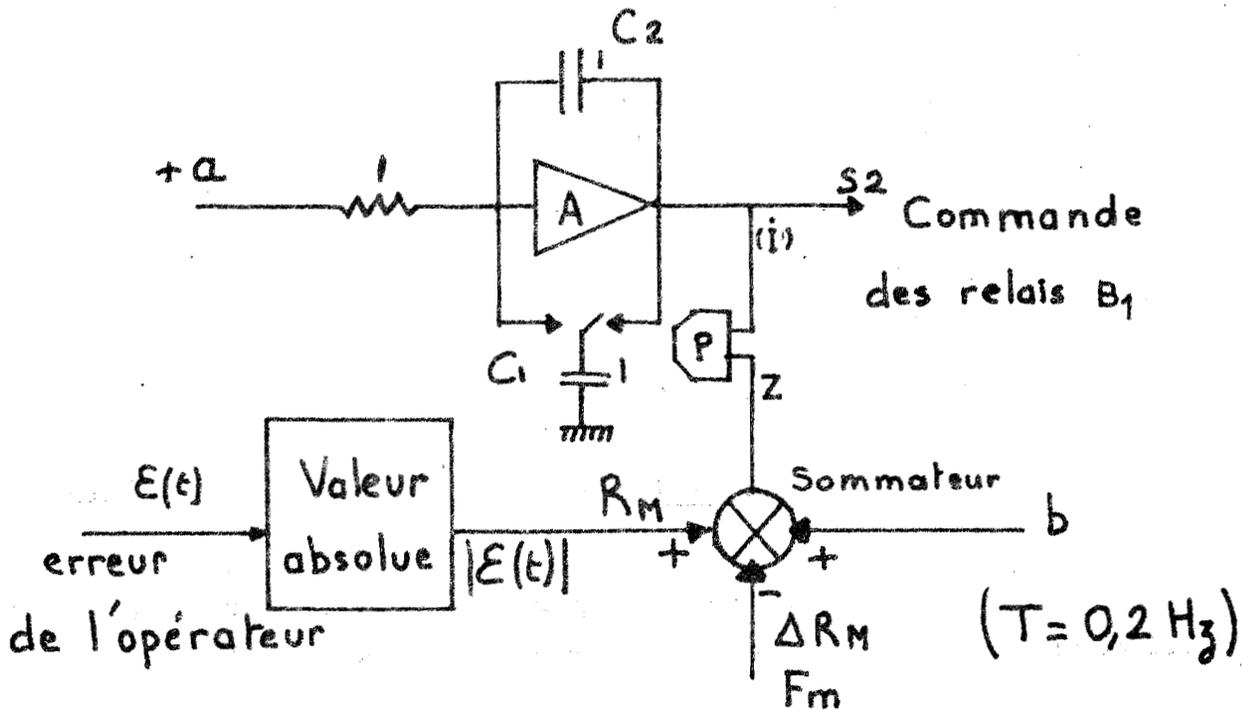


Figure 4.15. Elaboration de la séquence impulsionnelle (manuelle).

F_m est fonction du nombre de stimulus identiques et tend à diminuer le retard manuel R_M .

Lorsque l'intégrale $\int_0^{t=T} a dt$ est égale à z il y a émission

d'une impulsion (paragraphe IV.1.3.). La quantité z est fonction de la constante b qui définit la période d'échantillonnage du système manuel

$$T = \frac{b}{a} = 0,2 \text{ seconde.}$$

On utilise par ailleurs l'erreur $\epsilon(t)$ de l'opérateur entre la cible et la réponse manuelle (comme dans le système visuel) pour retarder l'instant d'échantillonnage nT et élaborer le temps de latence manuel R_M

$$R_M = T + \Delta T ; \text{ fonction de l'erreur } \epsilon(t)$$

On interprète alors une des facultés d'apprentissage du sujet (au bout d'un certain nombre de tests identiques) en simulant la décroissance des temps de "calcul" et de "décision" ΔR_M .

Nous présentons figure 4.22. le schéma analogique de l'ensemble de la transmission après l'étude de la fonction mémoire.

Remarque :

L'échantillonneur B_1 (figure 4.14.) tient compte à sa sortie de la différence première Δ de son entrée

$$\Delta = f_n - f_{n-1}$$

Il est possible, en généralisant le schéma analogique présenté, d'obtenir une transmission très élaborée et complexe (paragraphe III.4.) fonction de la différence $n^{\text{ième}}$, Δ^n de l'entrée. On constate (figure 4.14.) qu'il est facile d'ajouter un échantillonneur bloqueur B_0 et d'obtenir :

$$\Delta^2 = f_n - 2 f_{n-1} + f_{n-2}$$

Par ailleurs, nous avons mentionné précédemment (paragraphe III.3.4) l'existence d'une période d'échantillonnage T variable avec la vitesse y' du stimulus. Cette propriété, mise en évidence dans le système visuel, n'a pas eu d'influence sensible lors de la recherche de la minimalisation de l'erreur entre les réponses du modèle et du sujet.

Néanmoins, on a pu observer une amélioration pour les signaux de très faible vitesse, mais cette variation T (y') s'est révélée moins importante pour les sujets habitués à l'expérience.

IV.2.3. Elaboration de la fonction mémoire : influence de l'apprentissage sur les caractéristiques de l'opérateur

L'élaboration de la fonction mémoire F_m agissant sur les différents paramètres du modèle : le "pas" q de la non-linéarité dynamique, le coefficient $k(m)$ du deuxième terme de la transmission échantillonnée et les temps de "calcul" et de décision ΔR_M ; est effectuée selon le principe indiqué figure 4.16.

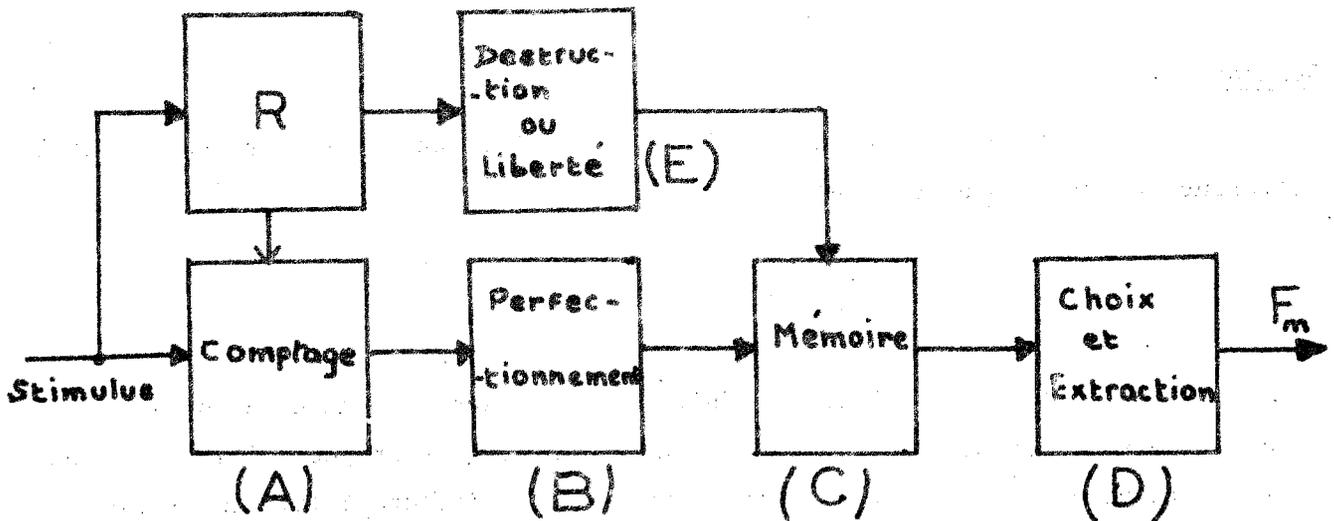


Figure 4.16. Principe d'élaboration de la fonction mémoire.

- A : engendre une information proportionnelle au nombre de stimulus identiques présentés au sujet, fournit des impulsions, et ne fonctionne que si les tests sont identiques (commande par l'organe de reconnaissance des stimulus R)
- B : définit le degré (ou la rapidité) de perfectionnement de l'opérateur.
- C : est une mémoire capable de stocker les informations afférentes et de se modifier en fonction de la reconnaissance des structures du stimulus par l'intermédiaire de l'organe E.
- D : élabore la fonction F_m à partir du choix du critère de perfectionnement désiré.
- R et E : fournissent le renseignement nécessaire à la reconnaissance des stimulus aux éléments de comptage (A) et de mémoire (C).

La simulation de cette fonction mémoire met en oeuvre des circuits très complexes et exige une calculatrice hybride que le laboratoire ne possédait pas. Néanmoins avec les moyens dont nous disposons nous réaliserons un dispositif permettant de simuler les caractéristiques principales révélées au cours de l'apprentissage de l'opérateur (paragraphe III.4.).

Réalisation de la fonction mémoire F_m

Le principe de la fonction mémoire (figure 4.16.) est indiqué figure 4.17.

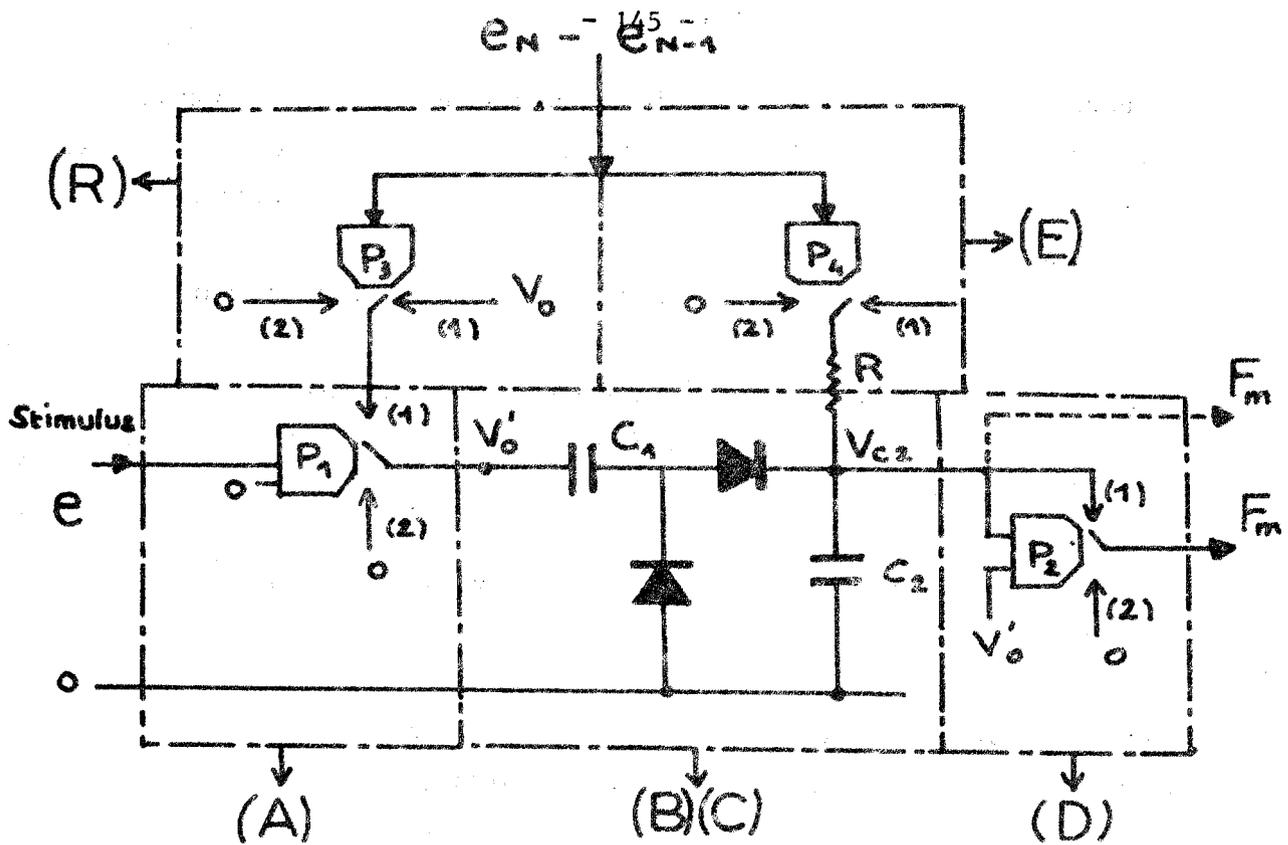


Figure 4.17. Elaboration du critère de perfectionnement du sujet.

Les palettes des comparateurs P_3 et P_4 sont commandées par l'organe de reconnaissance des stimulus dont le principe est basé sur l'utilisation de deux échantillonneurs bloqués placés en série, dont la fréquence d'échantillonnage est synchronisée avec celle du stimulus. On peut alors se servir de la différence de leur sortie e_N et e_{N-1} (N étant le numéro d'ordre de la série identique de stimulus) afin de renseigner les éléments de comptage (A) et de mémoire (C) sur l'identité du stimulus (figure 4.18.). Signalons toutefois que cette simulation ne donne des résultats satisfaisants que pour le modèle étudié (les moyens mis à notre disposition n'étant pas suffisants pour résoudre des problèmes plus élaborés).

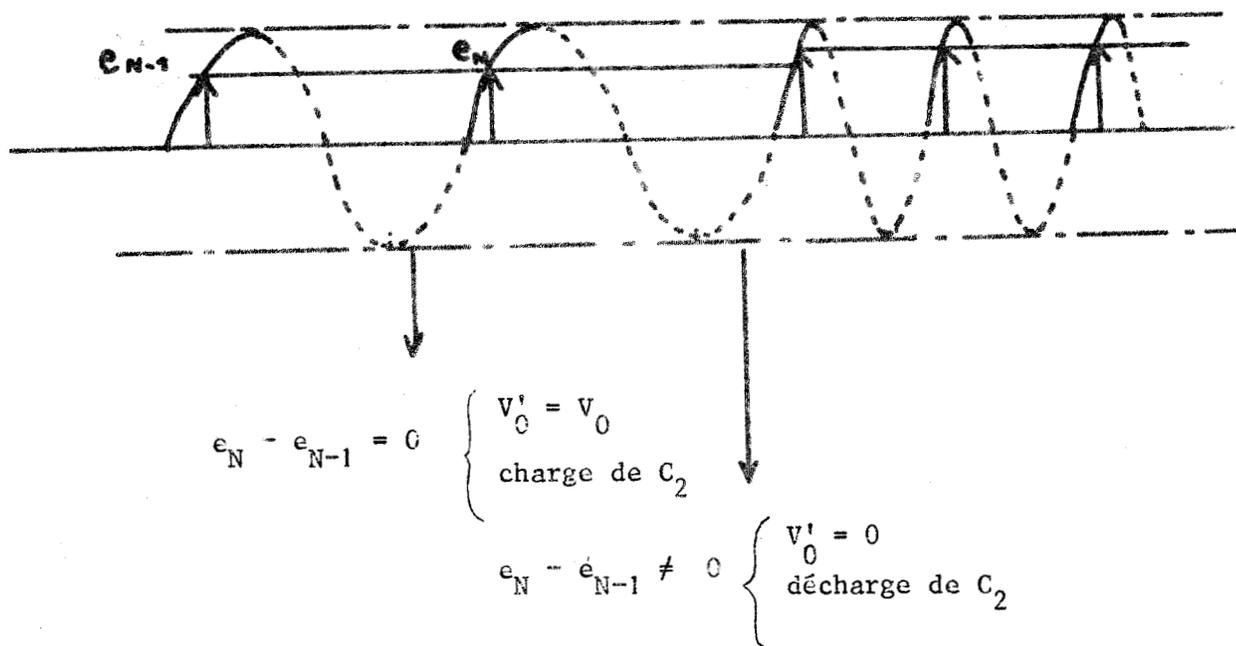


Figure 4.18. Elaboration de la commande des comparateurs P_3 et P_4 .

Lorsque la série de tests est modifiée, le dispositif de reconnaissance des structures de l'entrée décharge la mémoire (palette du comparateur P_4 en position (2)) et annule la tension V'_0 (palette du comparateur P_3 en position (2)).

La mémoire (B et C) est réalisée par l'intermédiaire d'un condensateur C_2 dont la charge est fonction du degré de perfectionnement du sujet ; ce dernier étant défini par les valeurs attribuées aux condensateurs C_1 et C_2 .

A chaque passage par zéro du stimulus de forme périodique, présenté au sujet, le bloc mémoire est modifié d'une quantité, fonction du paramètre à améliorer (représenté figure 4.17 par V'_0) et définie par le degré d'auto-amélioration du sujet. La tension aux bornes du condensateur C_2 est :

$$V_{C_2} = V'_0 \times \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

le rapport $\frac{C_1}{C_1 + C_2}$ définit le degré mentionné.

Si on lie V_0' à q_0 on constate qu'à partir d'un certain nombre de tests le quantum $q = q_0 - F_m$ tend vers une valeur très petite ξ ; afin d'éviter un mauvais fonctionnement de la simulation (vitesse de commutation des relais trop rapide) le quantum q n'est jamais rigoureusement égal à zéro mais tend vers une grandeur ξ très faible (figure 4.19.)

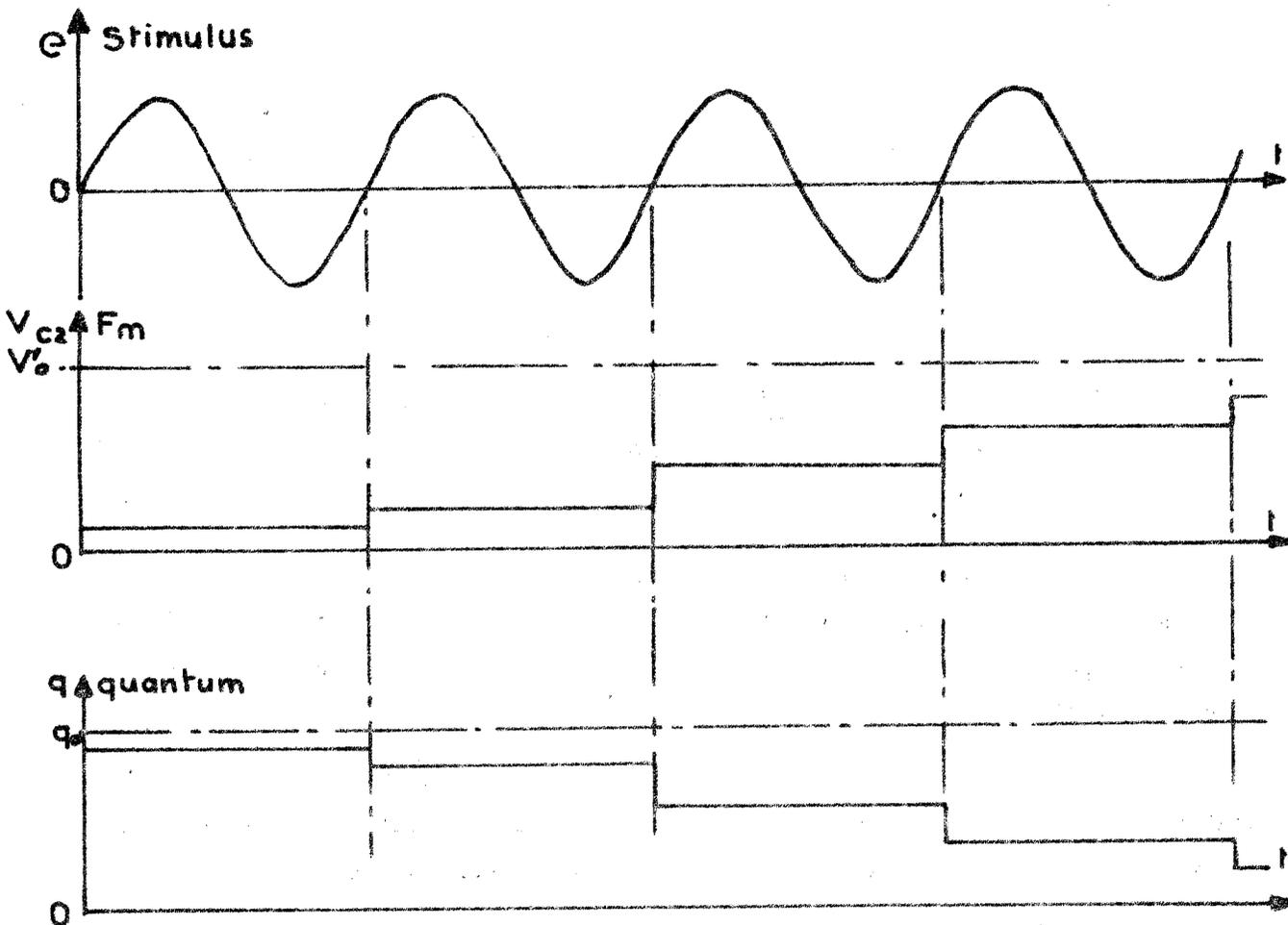


Figure 4.19. Variation du quantum q au cours de l'apprentissage.

Notons que la charge du condensateur C_2 n'est pas linéaire en fonction du nombre de tests, néanmoins nous avons conservé ce montage à cause de sa simplicité.

Le bloc mémoire est suivi d'un élément d'extraction (figure 4.17.) composé de comparateurs afin que l'information stockée soit disponible au moment

voulu durant la période du stimulus. La palette du comparateur d'extraction P_2 (figure 4.17.) est en position (1) lorsque V_0^i est supérieur à V_{C_2} ; dans ce cas on recueille l'information mémorisée lorsqu'une tension existe à l'entrée du condensateur C_1 ($V_0^i \neq 0$) figure 4.20.

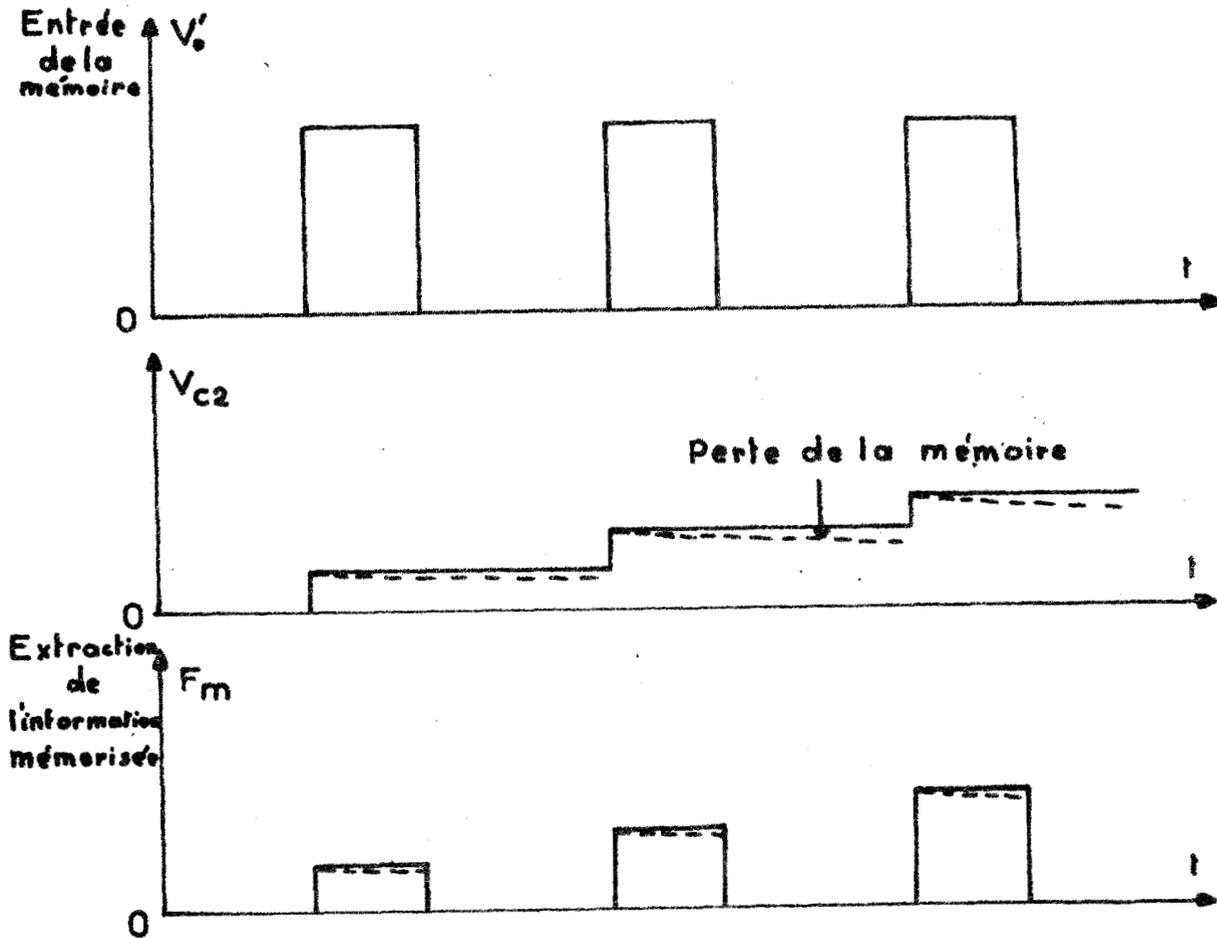


Figure 4.20. Variation de F_m pour le stimulus donné

La perte d'information au cours du temps, consécutive à la décharge des condensateurs ne peut pas être facilement compensée sur une calculatrice analogique classique et dans notre cas, nous avons interprété cette perte d'information par une perte de mémoire du sujet considéré.

Obtention de la fonction k (m) (paragraphe IV.2.2.)

La fonction k(m) peut être considérée comme une perturbation du système, provoquée par l'élan que prend la main de l'opérateur et corrigée au cours de l'apprentissage par sa faculté de mémoire.

Afin de simuler cette fonction on utilise un servo-mécanisme, excité par la fonction F_m considérée, commandant le curseur d'un potentiomètre alimenté par la quantité.

$$\int_0^T \left[f_n - f_{n-1} \right] dt \quad (\text{se référer à la figure 4.14.}),$$

deuxième terme de la transmission échantillonnée du type B_1 .

A chaque test, la fonction mémoire croît d'un "pas" et entraîne une diminution du paramètre k (m) - figure 4.21. -

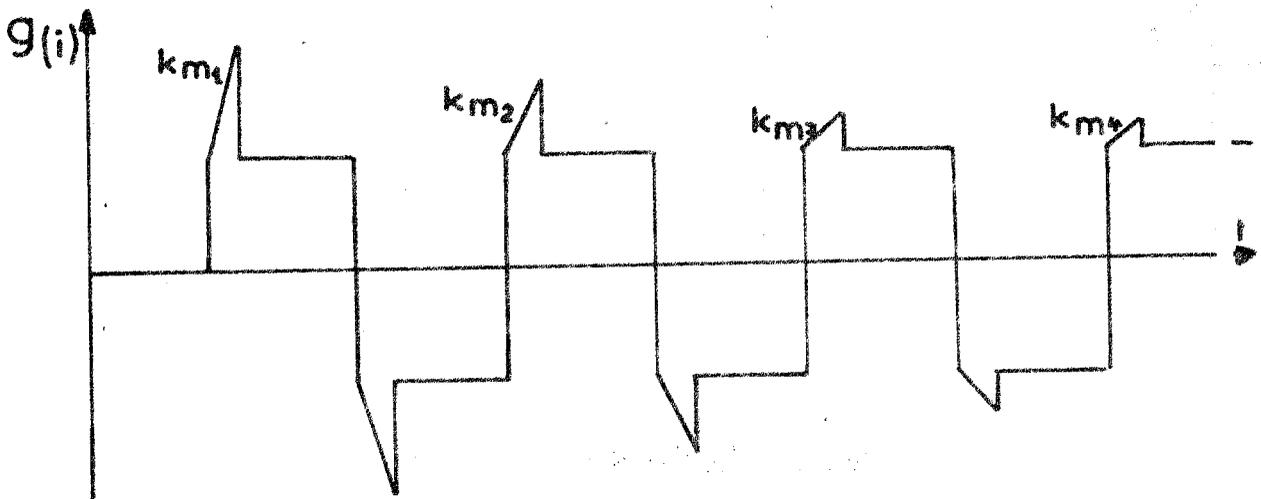


Figure 4.21. Relevé sur calculatrice de la sortie échantillonnée pour un stimulus de forme carrée.

Nous présentons l'ensemble de ces divers organes sur le schéma analogique complet de la fonction manuelle (figure 4.22.). Le coefficient C permet la commande du servo-mécanisme et par conséquent de k. (NL = non-linéarité oculomotrice et N.L.D = non-linéarité dynamique définie au paragraphe IV.2.1.).

IV.2.4. Formulation mathématique du modèle de l'opérateur humain

Les équations mathématiques représentant le comportement global de l'opérateur humain effectuant une tâche de poursuite sont difficiles à mettre en évidence. Aussi allons-nous simplifier le modèle fonctionnel de la figure 4.22., afin de dégager les caractéristiques principales de l'opérateur humain (figure 4.23.)

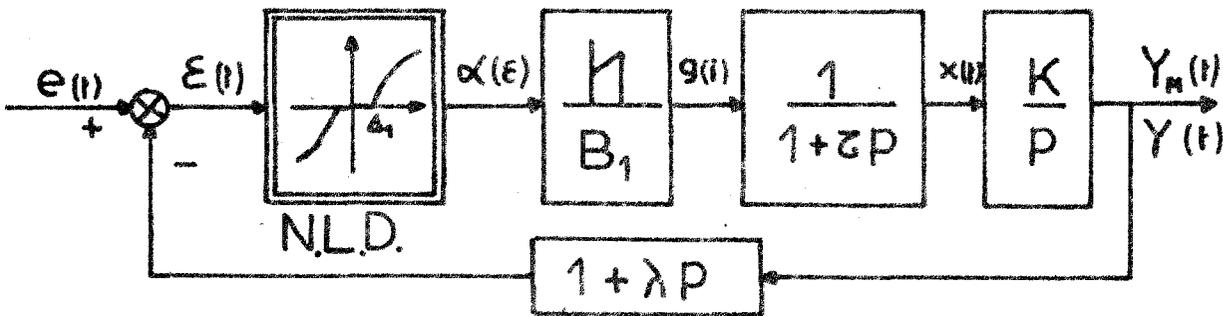


Figure 4.23. Modèle simplifié de l'opérateur humain

Relation entre la sortie du modèle y(t) et la sortie de la non-linéarité dynamique α(ε)

$$\text{en posant : } g_{nT+t} = \alpha(\epsilon)_{nT} + \frac{k t}{T} \left[\alpha(\epsilon)_{nT} - \alpha(\epsilon)_{(n-1)T} \right]$$

et en simplifiant les indices :

$$g_{nT+t} = \alpha_n + \frac{k t}{T} \left[\alpha_n - \alpha_{n-1} \right] = \alpha_n + \frac{k t}{T} \Delta\alpha_n$$

$$\Delta\alpha_n = \alpha_n - \alpha_{n-1} \quad : \text{différence première}$$

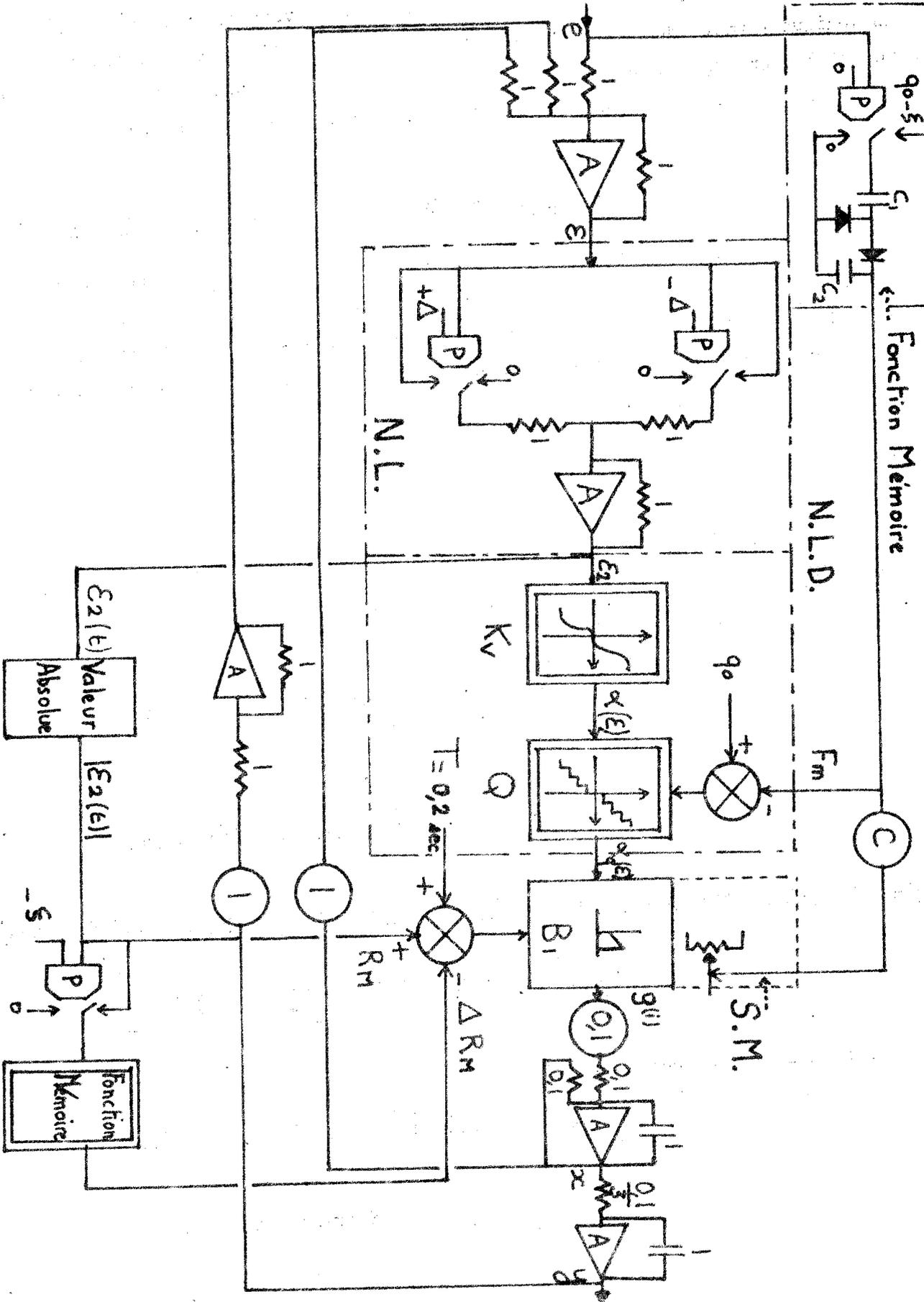


Figure 4.22. Schéma analogique de l'ensemble de la fonction manuelle réalisant une tâche de poursuite.

On obtient les expressions suivantes liant des variables du système :

$$(1') \quad x_{n+t} = x_n e^{-t/\tau} + \alpha_n (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{k \Delta \alpha_n}{T} (t - \tau + \tau e^{-t/\tau})$$

$$(2') \quad y_{n+t} = y_n + K \tau x_n (1 - e^{-t/\tau}) + K \alpha_n (t - \tau + \tau e^{-t/\tau}) + \dots \\ \dots + \frac{K k \Delta \alpha_n}{T} \left(\frac{t^2}{2} - \tau t - \tau^2 e^{-t/\tau} + \tau^2 \right)$$

Aux instants d'échantillonnages, ces équations peuvent se mettre sous la forme matricielle : (posons $D = e^{-T/\tau}$)

$$\begin{bmatrix} y_{n+1} \\ x_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \tau (1-D) \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_n \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K(T - \tau + \tau D) \\ 1 - D \end{bmatrix} \alpha_n + \dots \\ \dots + \begin{bmatrix} \frac{K}{T} \left(\frac{T^2}{2} - \tau T - \tau^2 D + \tau^2 \right) \\ \frac{1}{T} (T - \tau + \tau D) \end{bmatrix} k \Delta \alpha_n$$

La relation entre $y(t)$ et $\alpha(\epsilon)$ aux instants d'échantillonnages est alors :

$$(3') \quad y_{n+2} - (1 + D) y_{n+1} + D y_n = K k \alpha_{n-1} \left[\frac{\tau D}{2} + \frac{\tau}{T} (\tau - T - \tau D) \right] + \dots \\ \dots K \alpha_n \left[(\tau - \tau D - \tau D) - \frac{2 k \tau^2}{T} (1 - D) + \frac{k}{2} (4\tau - T - \tau D) \right] + \dots \\ \dots K \alpha_{n+1} \left[(T - \tau + \tau D) + \frac{k}{2T} (T^2 + 2 \tau^2 - 2 \tau T - 2 D \tau^2) \right]$$

Equation reliant l'erreur du modèle $\epsilon(t)$ aux différents instants d'échantillonnages

En linéarisant le système et en posant :

$$\alpha_n(\epsilon) = \epsilon_n \\ \epsilon_n = e_n - y_n - \lambda^v x_M \quad (\lambda^v = \frac{\lambda}{K}) \\ e_n = 0$$

Il vient :

$$\varepsilon_{n+3} - f_1 \varepsilon_{n+2} - f_2 \varepsilon_{n+1} - f_3 \varepsilon_n = 0$$

$$f_1 = 1 + D - \lambda' (1 - D) - K (T - \tau + \tau D) - \dots$$

$$\dots - \frac{k}{T} \left[\lambda' (T - \tau + \tau D) + K \left(\frac{T^2}{2} - \tau T - \tau^2 D + \tau^2 \right) \right]$$

$$f_2 = -D + \lambda' (1 - D) + K (\tau D - TD - \tau) + \dots$$

$$+ \frac{k}{T} (T - \tau + \tau D) \left[2 \lambda' - K \tau (1 - D) \right] + \dots$$

$$+ \frac{Kk}{T} (1 + D) \left(\frac{T^2}{2} - \tau T - \tau^2 D + \tau^2 \right)$$

$$f_3 = \frac{k}{T} \left[(T - \tau + \tau D) (K\tau - \lambda') - \frac{K D T^2}{2} \right]$$

Nous verrons dans le prochain chapitre l'utilisation de cette équation lors de l'identification des réponses du modèle à celles de l'opérateur.

Conclusions

Les chapitres précédents ont révélé certaines corrélations entre les systèmes visuel et manuel (on peut également souligner quelques similitudes entre les deux modèles visuel et manuel).

- la fréquence d'échantillonnage est identique $T = 0,2$ Hertz :
les influx moteurs sont élaborés au niveau du cerveau

- la transmittance des fonctions de transfert est semblable :

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

Dans les deux cas, il y a commande musculaire mais celle-ci se différencie principalement par : moments d'inertie, frottements visqueux et constantes d'élasticité.

- les deux systèmes peuvent réagir en vitesse. Ils comportent un retour tachymétrique.
- la non-linéarité oculaire ne peut pas être exclue du comportement de l'opérateur humain lors de l'accomplissement d'une action manuelle.

Afin de terminer cette étude et de vérifier nos hypothèses simplificatrices, le chapitre suivant va concrétiser notre simulation en comparant les enregistrements simultanés de la réponse de l'opérateur à celle du modèle proposé.

Chapitre V

Comparaison des réponses du modèle analogique

à celles de l'opérateur humain

Après avoir simulé le modèle de l'opérateur humain réalisant une tâche de poursuite, nous allons compléter les chapitres précédents en comparant les réponses du modèle proposé (figure 4.22.) à celles du sujet.

V.1. Protocole expérimental d'identification

Le schéma expérimental permettant d'identifier le comportement du modèle à celui de l'opérateur est présenté figure 5.1.

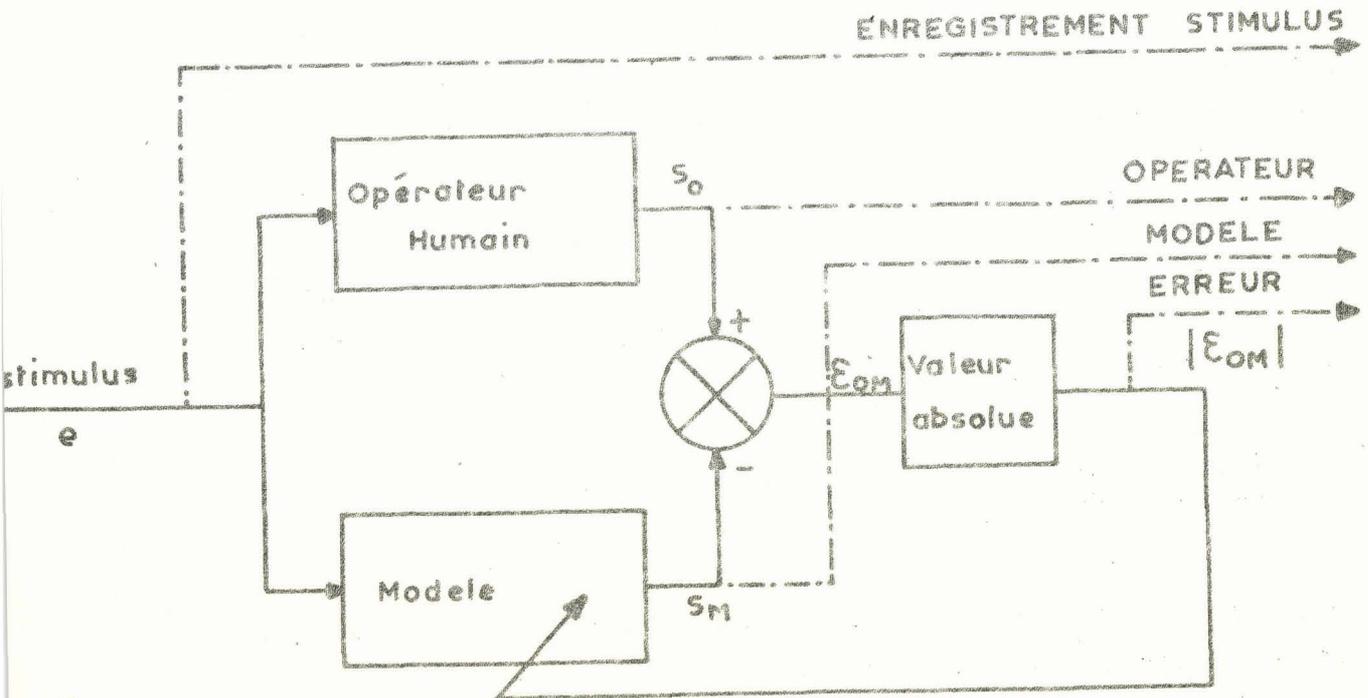


Figure 5.1. Protocole expérimental d'identification.

e = Stimulus quelconque

S_0 = réponse manuelle de l'opérateur

S_M = réponse du modèle

ϵ_{OM} = différence entre les réponses de l'opérateur et du modèle

$$|\epsilon_{OM}| = |S_0 - S_M| : \text{critère de qualité du modèle}$$

Le stimulus est envoyé d'une part à l'écran de présentation des signaux, d'autre part à l'entrée du modèle, réalisé sur calculatrice analogique. L'ajustement des paramètres de la simulation est fonction de la valeur absolue de l'erreur $|\epsilon_{OM}|$.

Dans ces conditions, on peut, au cours de l'expérience, modifier la valeur du paramètre le plus sensible du modèle de façon à diminuer au maximum l'erreur $|\epsilon_{OM}|$, critère de qualité du modèle (44).

Notons que, pour une même série de stimulus, l'opérateur ne répond pas toujours avec une égale précision. Il convient alors de ne pas insister outre mesure sur l'importance d'une erreur instantanée due par exemple à une légère variation du temps de latence R_M du sujet au cours de l'expérience.

Il est, d'autre part difficile d'identifier l'opérateur en régime perturbé (lorsqu'il se trouve dans la période d'adaptation), car il n'est alors pas possible de prévoir toutes les réactions du sujet.

Dans ces conditions il est donc nécessaire, d'une part que l'opérateur soit le plus "fidèle" possible à des stimulus de forme identique, d'autre part que le modèle soit suffisamment élaboré, et contienne les principaux caractères fonctionnels du sujet, ce qui exige des sujets habitués à l'expérience et une mise au point préliminaire du modèle.

V.2. Mise au point des paramètres du modèle

Lors du chapitre III (identification de l'opérateur humain) nous avons relevé certains paramètres du comportement de l'opérateur (période d'échantillonnage T, gain K, constante de temps τ ...) et défini la non-linéarité dynamique du modèle. Il est intéressant de rappeler ici les conclusions de l'analyse des enregistrements obtenus sur soixante sujets (paragraphe III.3.5.) : nécessité d'un organe non-linéaire présentant des

seuils, aspect "prédictif" de la réponse manuelle, séquence successive de "travail" interprétée par une suite d'échantillonnages ($T = 0,2$ secondes), transmittance de l'opérateur du second ordre, constante de temps τ de 0,05 à 0,1 seconde.

5.2.1. Modèle simplifié

Le modèle proposé figure 5.2. possède une non-linéarité à seuils.

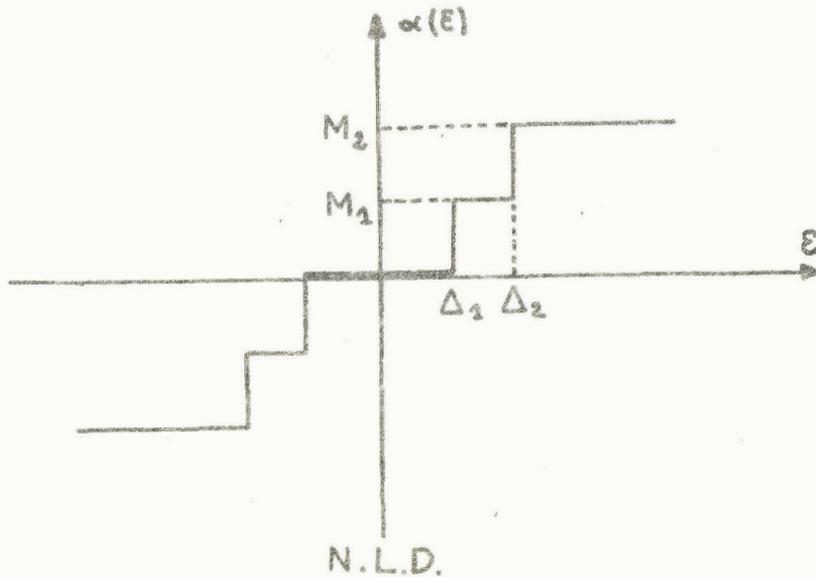
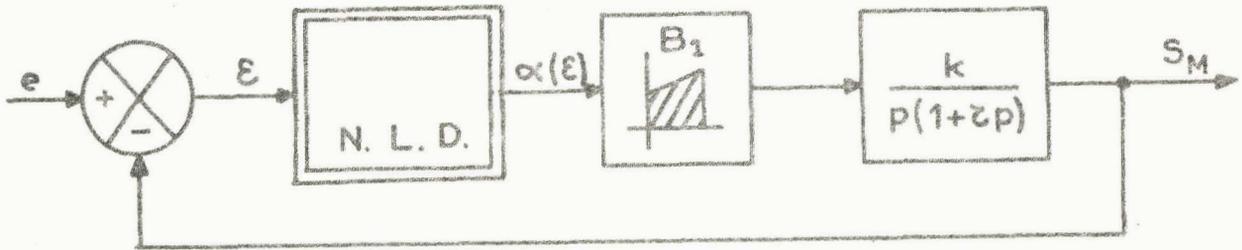


Figure 5.2. Premier schéma-bloc du modèle

L'enregistrement de la figure 5.3. représente la réponse du modèle lorsque :

Amplitude du signal d'entrée : $e = 1$ Volt (forme en échelon, sinusoïdale ou en dents de scie)

Premier seuil de la non-linéarité $\alpha(\epsilon)$: $\Delta_1 = 0,5^V$ et $M_1 = 0,5^V$

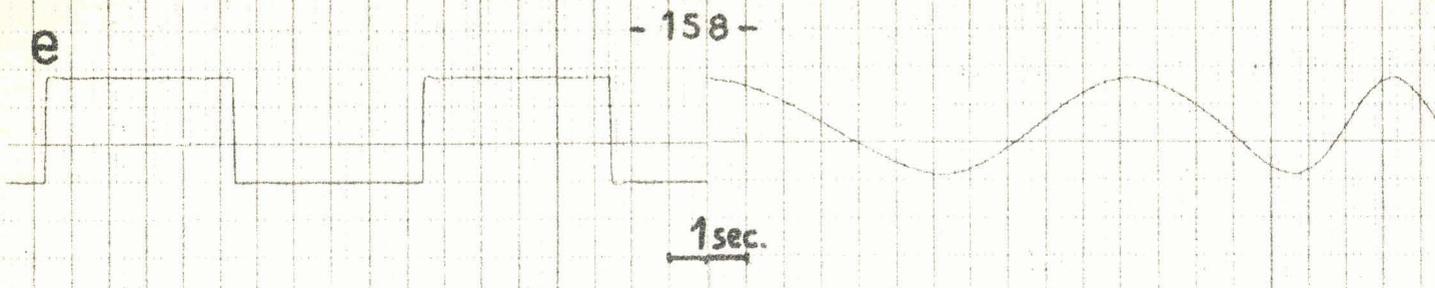


Figure: 5.3

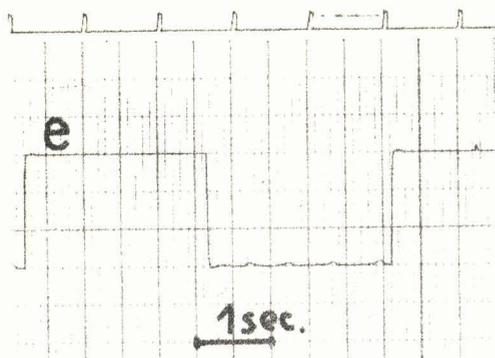
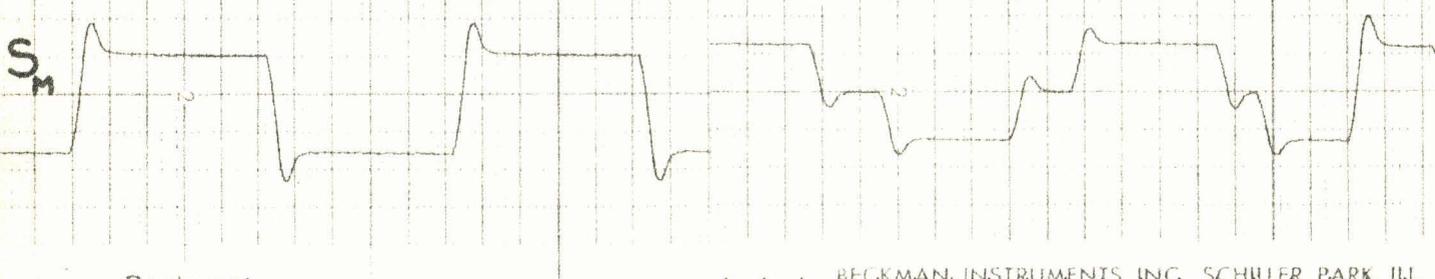


Fig: 5.3a

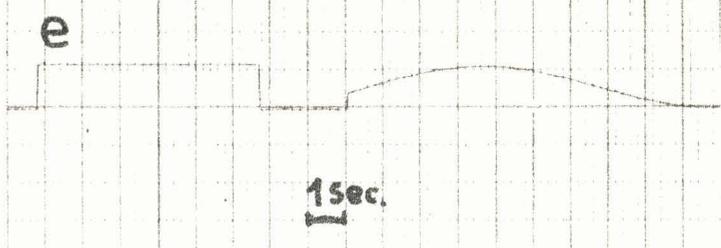
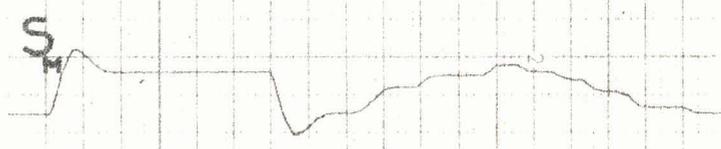
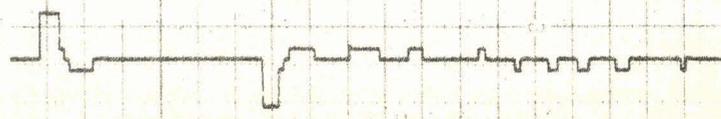


Figure : 5.4



Beckman

$$\alpha(E) = \alpha(e - s_M)$$



Deuxième seuil de la non-linéarité α (ϵ) : $\Delta_2 = 0,9^V$ et $M_2 = 1^V$

Période d'échantillonnage : $T = 0,2$ seconde

Paramètre k (définition du bloqueur d'ordre un) : $k = 1$

Gain statique de la transmittance : $K = 10$

Constante de temps : $\tau = 0,05$ seconde

Temps de latence (introduit dans la séquence d'échantillonnage)

$$R_M = 0,4 \text{ seconde.}$$

Les réponses du modèle caractérisent les propriétés du comportement de l'opérateur à un stimulus en échelon :

- . Temps de latence $R_M = 0,4$ sec (que l'on peut faire varier en agissant sur l'intégrateur impulsif, figure 5.3 a)
- . Temps de montée $t_{mM} = 0,2$ sec
- temps d'ajustement $t_{AM} = 0,8$ sec

$t_{AM} = R_M + t_{mM} + 0,2$ sec, avec un seul dépassement que l'on peut rendre variable par modification du paramètre k (figure 5.3 a).

Toutefois le gain $K = 10$ est trop important si l'on considère la courbe de variation expérimentale du gain (paragraphe III.5 : K_V variant entre 5 et 10) en fonction de l'amplitude du stimulus. Par ailleurs, les réponses obtenues à partir d'une entrée de forme sinusoïdale ne correspondent pas à celles du sujet : l'aspect saccadé est trop accentué.

Néanmoins pour un signal de caractéristiques données (fréquence, amplitude), on peut obtenir un comportement très voisin de celui de l'opérateur (figure 5.4.), à condition de modifier les paramètres du modèle : en particulier en diminuant les valeurs du seuil Δ_1 de la non-linéarité et du gain K de la transmittance :

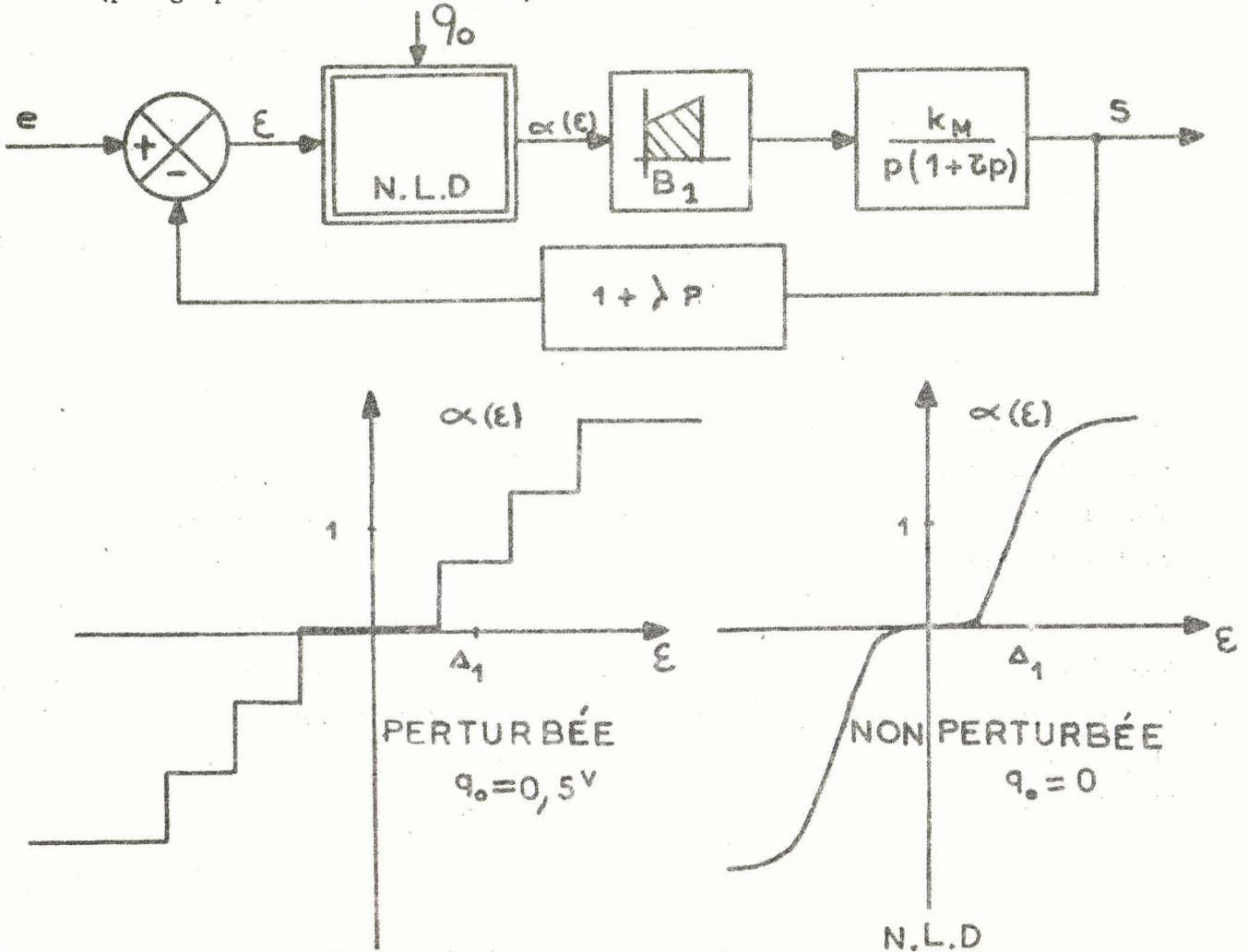
$$\Delta_1 = 0,3^V \quad \text{et} \quad M_1 = 0,3^V$$

$$K = \frac{10}{2} = 5 \quad (\text{ce qui entraîne une augmentation de } t_{mM} \text{ et } t_{AM})$$

Notons alors que la réponse de ce modèle est très sensible à l'amplitude et à la forme du signal d'entrée, (consécutif à la structure fixe de la non-linéarité).

5.2.2. Modèle définitif

Il convient alors, afin de réduire ces inconvénients, d'effectuer des essais avec un quantifieur et un gain variable (figure 5.5.) résultant de l'identification expérimentale (paragraphes III.4 et III.5). La caractéristique de la non-linéarité dynamique présente alors une infinité de seuils Δ_i , M_i (valeur du seuil importante en régime perturbé) et une "courbure" du type saturation (gain variable). On introduit en outre un retour tachymétrique (paragraphes III.5. et III.7.).



N.L. Figure 5.5. Modèle de l'opérateur réalisant une tâche de poursuite.

Amplitude crête à crête du signal d'entrée $e = 3,5$ Volts (e , forme quelconque)

Δ_1	=	0,2 Volt
T	=	0,2 seconde
k	=	1
K	=	4,5 (K_V variant de 6,3 à 3,2 pour e de 1 à 3,5 Volts)
τ	=	0,1 sec
R_M	=	0,2 à 0,3 seconde
q_0	=	0,5 à 0 Volt ($q_0 = 0$)
(quantum)		
λ	=	0,03

Les valeurs de ces paramètres en particulier la variation du gain K_V (figure 3.16), correspondent à celles relevées lors des chapitres précédents (II et III), il est alors nécessaire de présenter les enregistrements simultanés de l'opérateur humain et du modèle (non perturbés).

4.3. Comparaison simultanée des réponses de l'opérateur humain et du modèle

Les sujets choisis ne connaissent pas la succession des stimulus mais sont habitués à l'expérience. On peut donc considérer un régime non perturbé de l'opérateur ($q = 0$, pas de quantifieur). Les signaux présentés au sujet (et au modèle) sont ceux utilisés lors de l'analyse corrélative du chapitre II.

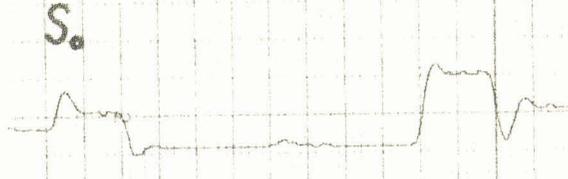
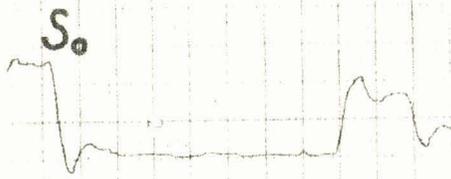
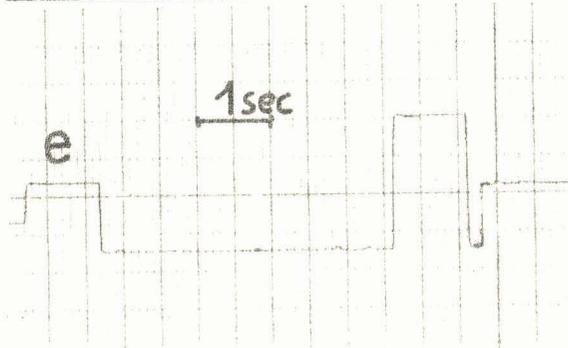
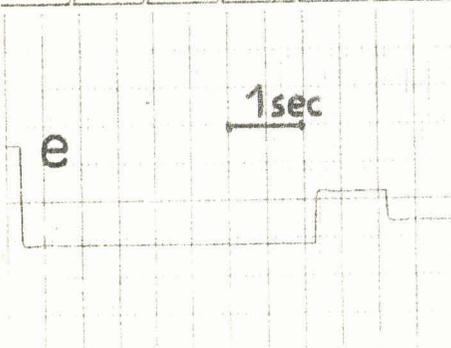
Rappelons que l'entraînement a pour effet d'"optimiser" le mouvement, sans exclure pour autant les variations aléatoires de l'opérateur durant l'expérience. Les paramètres du modèle (figure 5.5.) sont les mêmes, quelle que soit la forme du stimulus.

Stimulus en échelon de position

L'enregistrement simultané des réponses de l'opérateur S_0 du modèle S_M ainsi que l'erreur absolue $|\epsilon_{OM}| = |S_0 - S_M|$ et le stimulus e sont présentés figure 5.6.

ITS INC. SCHILLER PARK, ILL.

BECKMAN



Beckman

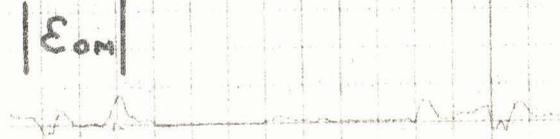
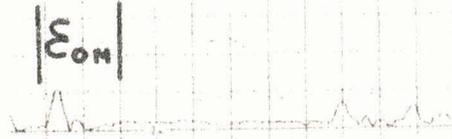
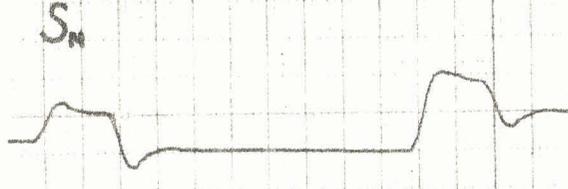
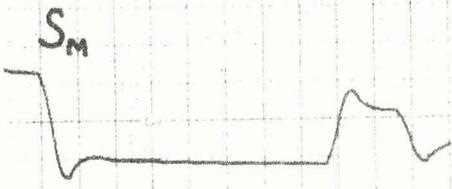


Figure : 5.6

On remarque sur les enregistrements une diminution du dépassement transitoire pour de grandes amplitudes du stimulus ainsi qu'une erreur $|\epsilon_{OM}|$ relativement faible. Il est toutefois difficile d'obtenir au cours de l'expérience des retards et des formes de réponses exactement identiques. Signalons que, contrairement à ce que pensent certains auteurs, la réponse manuelle possède assez souvent une légère erreur permanente.

Stimulus sinusoïdaux

La réponse S_M du modèle est ici considérablement améliorée par rapport à celle présentée figure 5.3. (modèle sans gain variable). On reconnaît les petites saccades d'ajustement de la réponse S_0 de l'opérateur et du modèle S_M . Toutefois, il arrive que ces mouvements de précision ne se fassent pas simultanément, entraînant une erreur $|\epsilon_{OM}|$ (figures 5.7. et 5.8.).

Notons que les différents comportements de l'opérateur (mouvements de précision, réponses "harmonique" et "limite" (paragraphe II.2.)) sont reproduits par le modèle : les saccades disparaissent dans les réponses S_0 et S_M , lorsque la fréquence du stimulus e atteint un Hertz ($f_{a.M}$), et les fréquences limites manuelles $f_{L.M}$ du sujet et du modèle sont de l'ordre de deux Hertz (figure 5.7.)

Les sujets étant habitués à l'expérience, on constate parfois une anticipation du mouvement manuel pour des fréquences assez élevées (1,5 à 2,5 Hertz). Ce comportement très difficile à identifier entraîne une augmentation de l'erreur $|\epsilon_{OM}|$.

Stimulus en dents de scie

Sur les enregistrements effectués figures 5.9 et 5.10 il convient, de remarquer à nouveau les petites saccades de "précision", accentuées lors d'un changement du signe de la dérivée du stimulus, aussi bien dans la réponse de l'opérateur que dans celle du modèle (se référer aux paragraphes II.3 et III.3). L'erreur $|\epsilon_{OM}|$ entre les réponses S_0 et S_M est relativement faible (parfois uniquement liée au fait que les saccades d'ajustement ne se font pas toujours simultanément).

BECKMAN

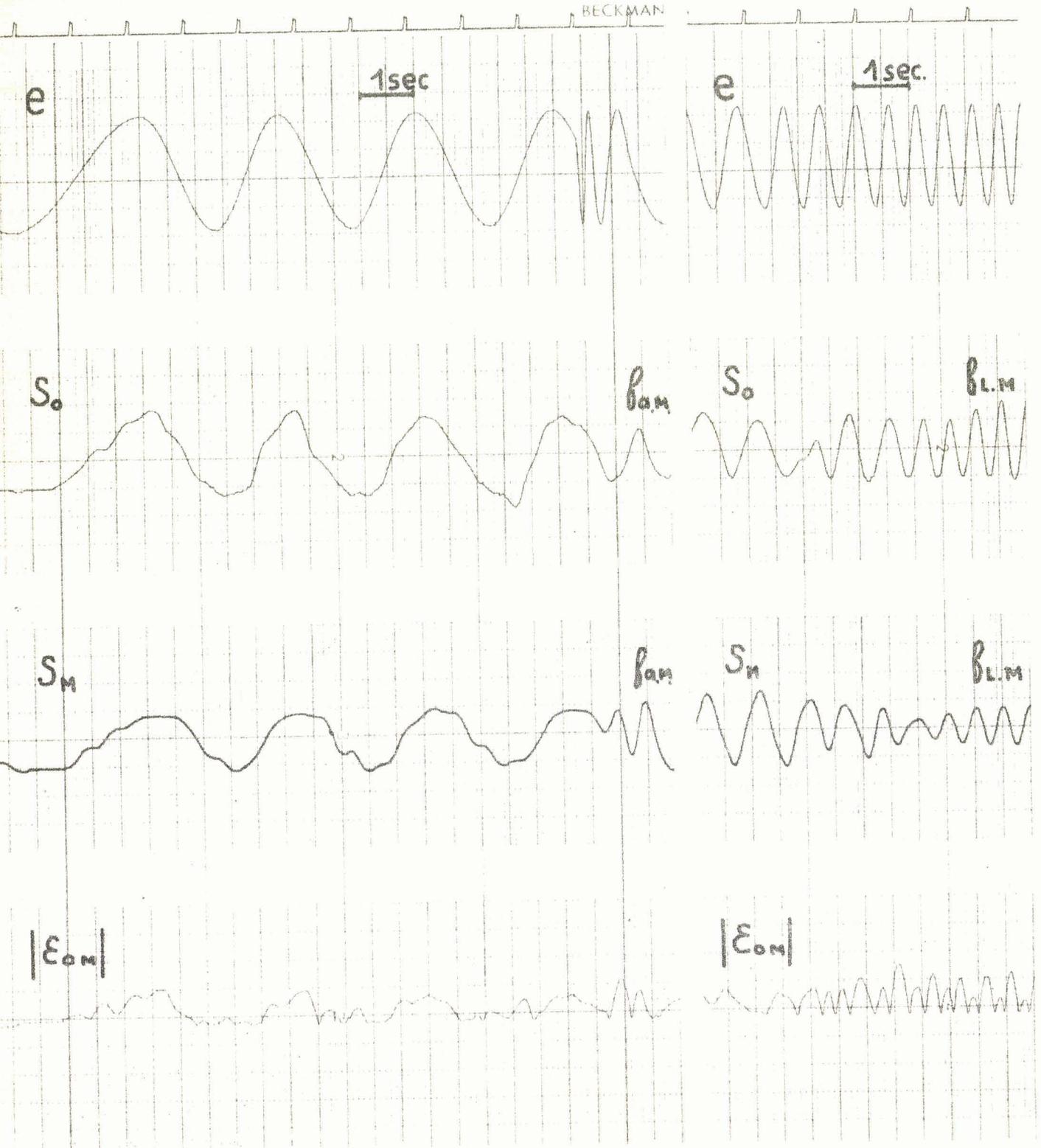


Figure: 5.7

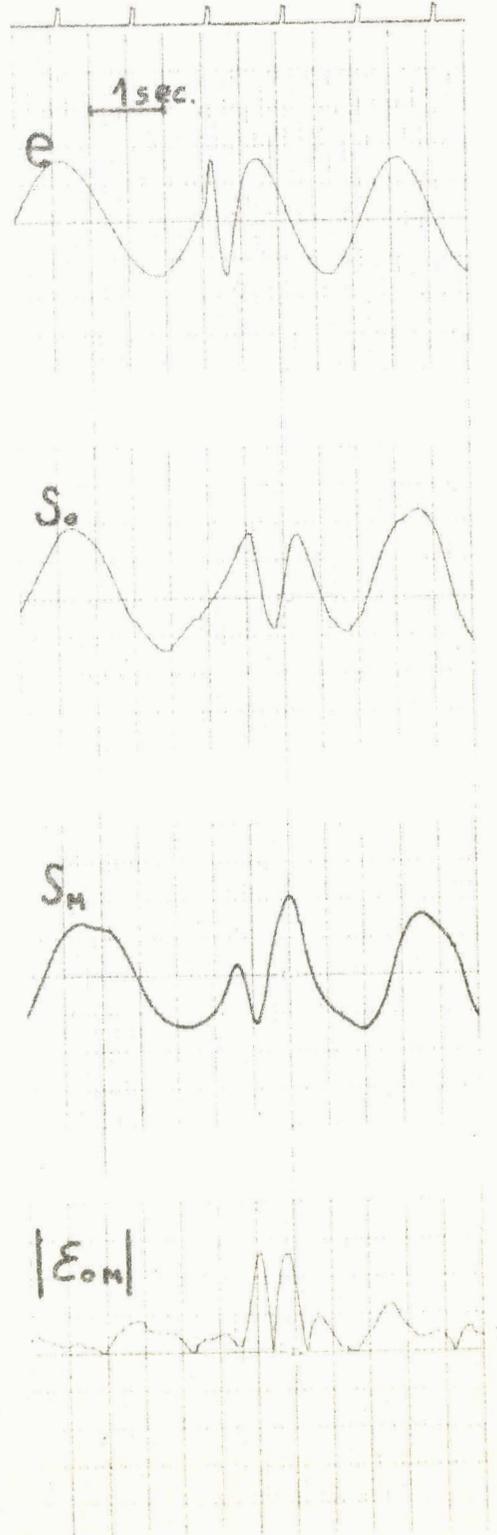
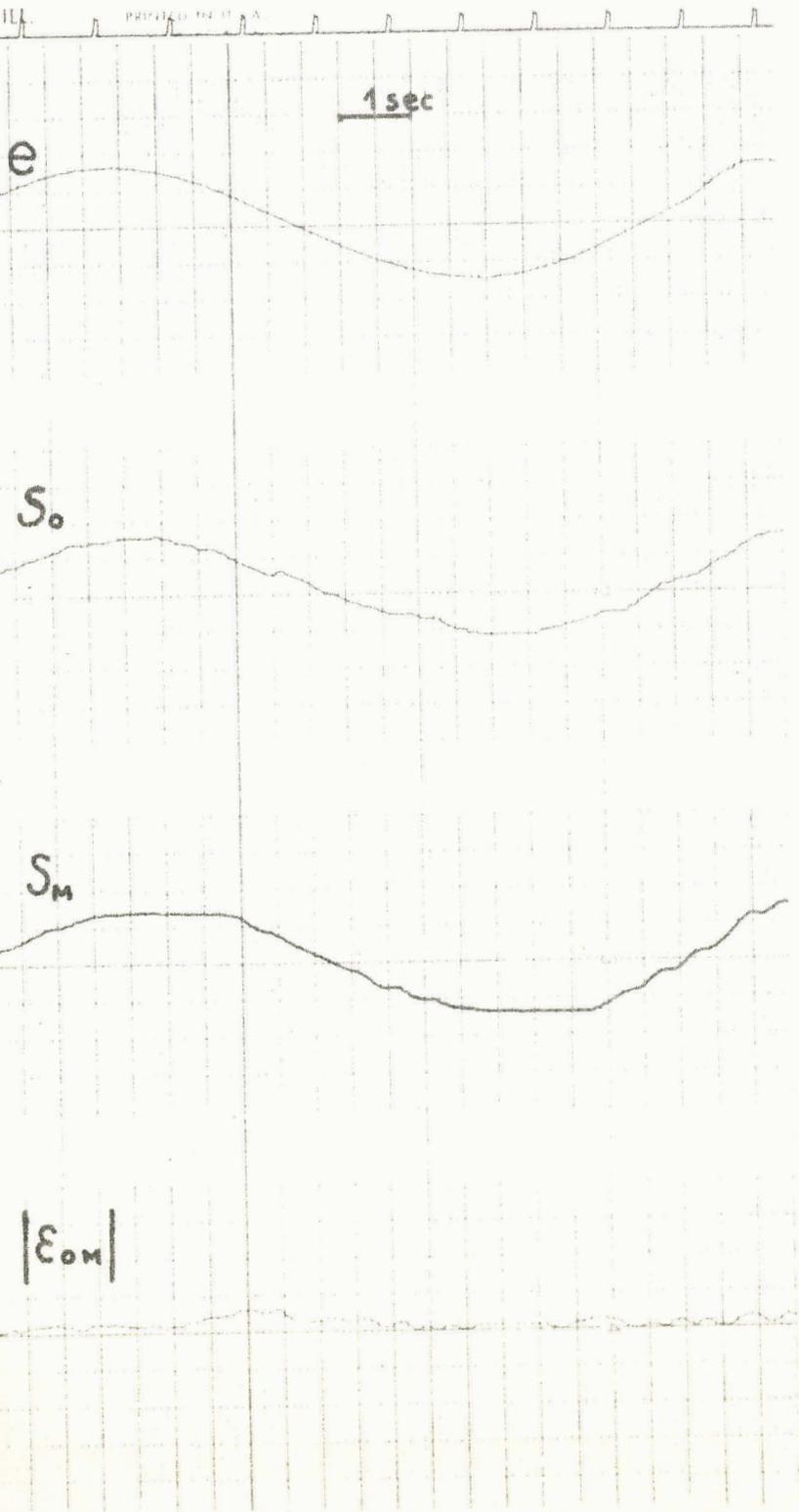


Figure: 5.8

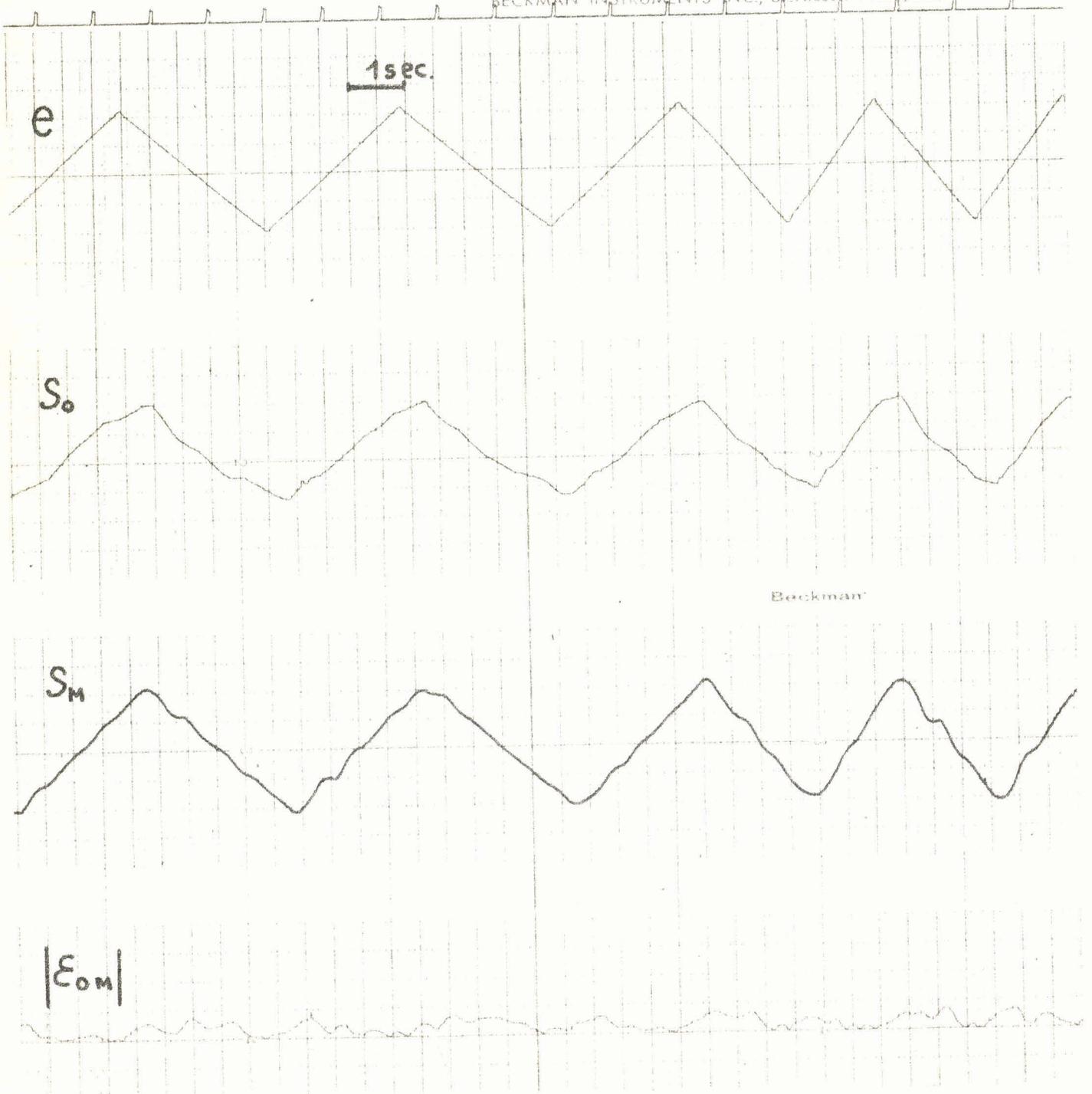


Figure: 5.9

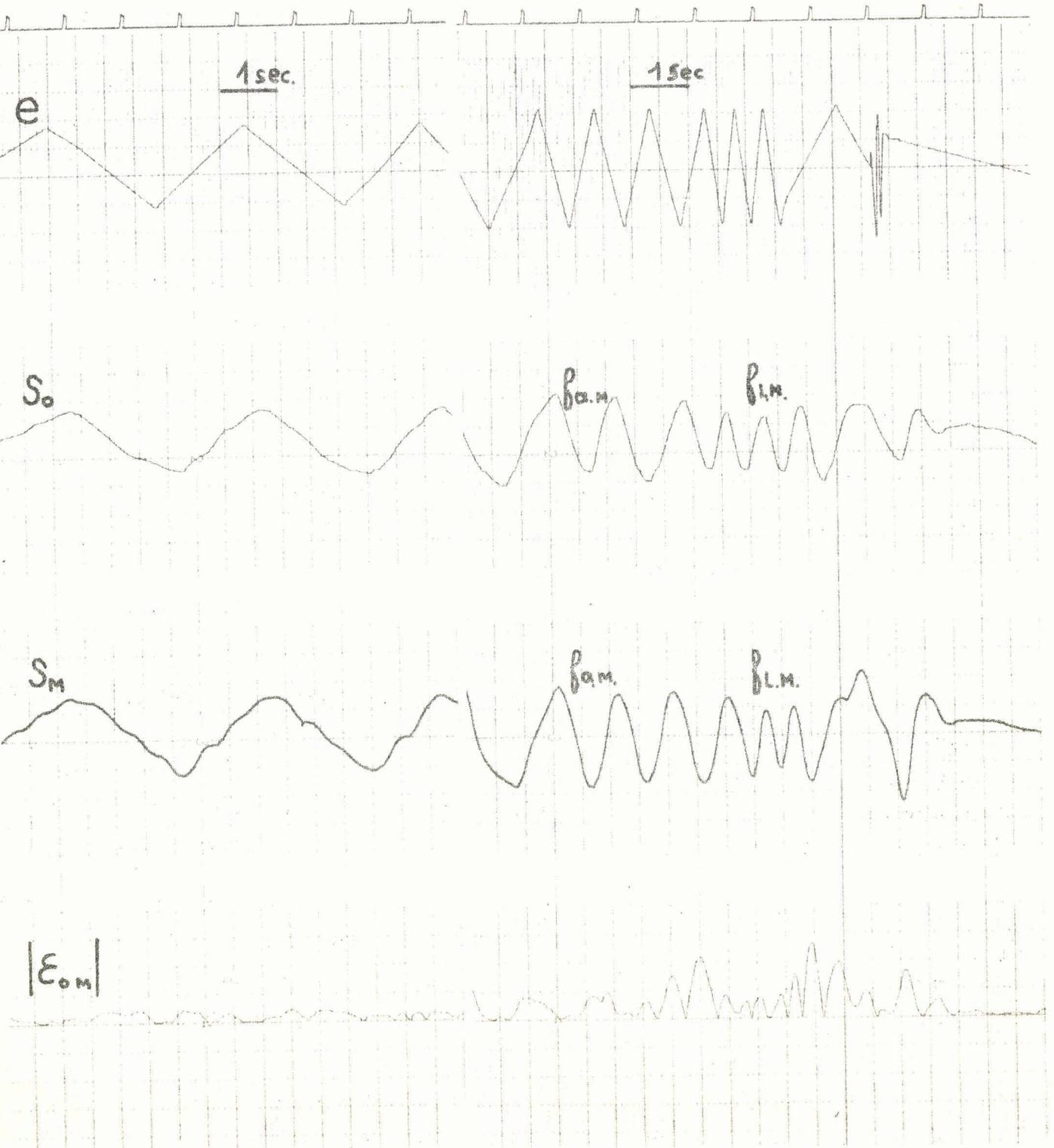


Figure: 5.10

De plus, les fréquences caractéristiques de l'opérateur (fréquence pour laquelle la réponse manuelle devient harmonique f_{aM} et fréquence limite manuelle $f_{L.M}$) se retrouvent dans la réponse S_M du modèle : f_{aM} égale à un Hertz et $f_{L.M}$ égale à deux Hertz (figure 5.10.). Remarquons encore figure 5.10 le comportement du modèle lors d'une variation brusque de la fréquence du stimulus e . Comme pour la réponse manuelle, avant de répondre à la nouvelle sollicitation, le modèle continue à répondre pendant une période à la fréquence d'excitation antérieure.

Ajoutons que, pour une amplitude différente du signal d'entrée, nous constatons un comportement qualitatif du modèle identique.

V.4. Conclusions

Le comportement du modèle reproduit les propriétés essentielles de la réponse manuelle de l'opérateur et les tracés des réponses obtenues vérifient l'étude expérimentale du chapitre III.

Le modèle de la figure 4.22 est, selon notre critère, représentatif du comportement du sujet effectuant une tâche de poursuite.

Les caractéristiques révélées lors du chapitre II : fréquence harmonique manuelle, fréquence limite manuelle, mouvement de précision aux vitesses lentes, régime harmonique aux vitesses rapides, temps de latence, de montée et d'ajustement manuels... sont reproduites par le modèle, et le phénomène d'anticipation est évident lors d'une réponse à un stimulus en dents de scie.

Dans ce dernier chapitre nous avons illustré le comportement du modèle lors de la totalité des tests de l'opérateur, sans aucune modification des paramètres de la simulation (quel que soit le stimulus présenté au sujet). Bien que la simulation ne soit pas parfaite, elle met en évidence l'idée du modèle unique, indépendant des signaux d'entrée.

Il est néanmoins fort possible qu'un régulateur plus élaboré et une transmittance dont la constante de temps serait variable, aboutissent à une meilleure simulation du modèle autodidactique de l'opérateur humain.

Conclusions

Le protocole expérimental, permettant l'étude simultanée des mouvements des yeux et de la main (en bidimensionnel) a contribué à l'analyse du comportement de l'opérateur humain réalisant une tâche, et a mis en évidence les notions de "prédiction", d'adaptation et d'apprentissage du sujet.

L'analyse de l'action manuelle chez l'homme montre que celle-ci est nécessairement corrélée avec d'autres fonctions internes à l'organisme et qu'il est difficile d'isoler une fonction particulière de l'opérateur réalisant un test donné. Aussi avons-nous modifié au maximum le protocole expérimental du sujet afin de proposer un modèle unique permettant la simulation de la fonction de transfert de l'opérateur humain lors de toute une série de tests différents.

L'étude du sujet aux stimulus visuels a mis en relief un certain nombre de différences entre les systèmes visuel et manuel, et a permis l'identification de l'ordre de la transmittance de l'opérateur humain.

Les différentes "sortes" de réponses (avec et sans dépassement, arrêt dans la montée manuelle), ont été en grande partie expliquées : le mode, sans dépassement ni arrêt, correspondant à la réponse "optimale" de l'opérateur (temps d'ajustement minimum).

Il est toutefois difficile, même avec des stimulus pseudo-aléatoires d'éviter l'effet de la mémoire du sujet qui se manifeste dans le comportement manuel.

Bien des auteurs utilisent des stimulus sinusoïdaux pour trajectoire du point cible, mais nous n'avons pas eu de résultats conséquents lors de l'étude des réponses visuelle et manuelle à ces signaux. Les courbes de Bode, tracées expérimentalement, ne nous ont pas permis d'apporter des éléments intéressants pour l'identification de l'opérateur ; celui-ci étant sensible à la vitesse du stimulus qui dans ce cas, varie constamment.

Bien plus importante à notre sens est l'analyse des réponses du sujet à un stimulus en dents de scie car elle met en évidence certaines propriétés essentielles de l'opérateur ainsi que son effet "prédictif".

L'étude lors de l'apprentissage, de la lecture, d'une modification de la sensibilité de la commande manuelle et du protocole expérimental, montre la nécessité d'une structure variable et auto-adaptative du sujet, effectuant un test donné.

On peut entreprendre à partir de cette étude, l'analyse du comportement de l'homme dans les trois dimensions de l'espace à l'aide d'une commande manuelle à trois directions. De plus, l'analyse binoculaire permettrait d'aborder le problème de la reconnaissance des formes et d'approfondir les corrélations existant entre la main et l'oeil.

Par ailleurs, on peut également analyser le système visuel en "poursuite réelle" (deux points sur l'écran) et en "compensation réelle" ; (en utilisant les signaux représentatifs du mouvement de l'oeil) c'est-à-dire déterminer un comportement de la fonction visuelle identique à celui de la fonction manuelle.

On peut entrevoir également de vastes recherches du système humain sous l'aspect multivariable, elles déboucheraient sur l'étude complexe du régulateur central : le cerveau. Pour cela il conviendrait d'effectuer des stimulus sonores, sensitifs ou codés d'une façon appropriée ainsi que des corrélations entre les différentes fonctions internes et externes de l'opérateur.

Les physiologistes et les automaticiens peuvent retirer de cette étude, soit une connaissance meilleure du système humain, soit un exemple d'automatisation très élaborée : système à structure variable, auto-adaptatif, non-linéaire et à transmission complexe.

Sur le plan clinique, cette analyse peut être à la base d'examens sûrs et efficaces destinés à la détection de nombreuses maladies neurologiques et ophtalmologiques.

En conclusion dans ce mémoire nous avons tenté de faire le point des recherches actuelles et d'apporter notre contribution aux études effectuées à propos du régulateur humain.

Bibliographie

1. D.T. Mc RUER and E.S. KRENDEL
" *Dynamic response of human operators* "
WADC Tech Rept. 56.524, 1957;
" *The human operator as a servo system element* "
J. Franklin Inst, vol. 267, p. 381-403, May 1959 and p.511-536, June 59.

A. TUSTIN
" *The nature of the operator's response in manual control and its implications for controller design* ".
J. IEE, vol. 94, p. 190-202, 1947.

2. J.C. RAOULT
" *Etude de l'opérateur humain en tant qu'élément d'un système asservi* ".
Thèse Docteur ès-Sciences, Toulouse le 15 Décembre 1962.

3. G.V. SOUKHODOLSKI
" *L'homme utilisé comme système de surveillance* ".
Automaticheskije sistemy (Moskva) p. 233.237, 1966.

4. et 5. R.W. WILDE and J.H. WESTCOTT
" *Characteristics of the human operator engaged in a tracking task* ".
Automatica, vol.1, January 1963 (in biological control systems analysis, J.H. Milsum, Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY).

6. et 7. W.H. LEVISON and J.I. ELKIND
" *Two dimensional manuel control systems with separated displays* "
I.E.E.E., Trans human factors electron (U.S.A.), t.8, n° 3, p.202-209, 1967.
8. C. RASHBASS
" *The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements* "
J. Physiol, Vol. 159, p. 326-338, december 1961.
9. et 10. L.R. YOUNG and L.STARK
" *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.
11. L.E. JOHNSON
" *Dynamic analysis of visual tracking, systems research center.* "
Case, Institute of Technology, Cleveland, Ohio,
S.R.C. 28.B.63.6, 1963.
12. P.J. DALLOS
" *Learning phenomena during tracking eye motions* "
Digest 15 th, Annual Conf. Engrg in medicine and biology, (Chicago)
Vol 5, 7, p.33, November 1962.
13. M. LECLERCQ
" *Dispositif d'étude et modèle analogique du système oculo-moteur chez l'homme* "
Thèse Docteur-Ingénieur, Lille le 11 Janvier 1969.
14. G. DHEDIN
" *Enregistrement des mouvements des yeux par une méthode optico-électronique* ".
Thèse pour le doctorat en médecine, Lille le 5 Novembre 1969.
- 15, 16 et 17. A. JAMPOLSKI, E. MARG and E. TAMLER
" *Elements of human extra-ocular electro-myography* "
Arch. Ophtal, A.M.A. 1959.

40. N. MALVACHE
Dans le compte rendu du colloque I.N.S.E.R.N. - la fonction du regard - Paris les 21-23 Mai 1969.
41. P. VIDAL
" *Systèmes échantillonnés non-linéaires* ".
GORDON and BREACH, 1968.
42. J.M. TOULOTTE, F. LAURENT et P. VIDAL
" *Régulation par échantillonnage et correction tachymétrique* ".
Communication au congrès international des systèmes pulsés, Budapest, les 8-12 Avril 1968.
- P. VIDAL, M. BOURTON et F. LAURENT
" *Sur la simulation de l'influx nerveux* "
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 262, p. 450-453, le 21 Février 1966.
43. N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL
" *Simulation de l'opérateur humain ; corrélation oeil-main* "
Lille Médical, 3ème Série, t. 15, n° 1, 1970.
- N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL
" *Etude du régulateur visuel sur le comportement de l'opérateur humain* "
Société de biologie, les 4-5 Avril 1970.
- N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL
" *Fonction mémoire - Applications à la cybernétique* "
Congrès National d'Automatique Madrid, les 14-17 Avril 1970 (à paraître).
- N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL
" *Etude des régulateurs et de l'apprentissage dans le comportement de l'opérateur humain* "
VI ème Congrès international de cybernétique, Namur (Belgique), les 7 et 11 Septembre 1970 (à paraître).
- P. FRANCOIS, G. MILBLED, N. MALVACHE, et G. DHEDIN
" *Analyse du système oeil-main* "
Arch. Ophtal, 1970 (à paraître).

N. MALVACHE, G. MILBLED et P. VIDAL

" *Etude corrélatrice du tracking visuel et manuel dans une poursuite bidimensionnelle* ".

J. Physio et de Neuro 1970 (à paraître).

44.

A. RAULT, J. RICHALET et R. POULIQUEN

" *Identification and sensitivity* "

E.F.A.C Symposium, Dubrovnik, (Yugoslavia), August 26.31, 1968.

A.P. FIRLA et J. MORAWSKI

" *Identification des propriétés dynamiques de l'homme en tant qu'opérateur dans les systèmes à commande manuelle* ".

Arch. Automat. Telemekh. Polska, t. 14, n° 1, p. 103, 129, 1969.

18. G. HOHLMAN, N.G. HENRIKSSON and C. ANDERN
"A method for direct registration of the speed of the eye movements in nystagmic reaction".
Acta Oto-Laryng, vol. 46, n° 4, p. 323-333, 1956.
19. P. NAYRAC, G. MILBLED, P.J. PARQUET, M. LECLERCQ et G. DHEDIN
"Sur un procédé d'enregistrement des mouvements oculaires, Application aux tests de poursuite".
Société de Biologie, Lille le 20 Novembre 1968.
20. P. NAYRAC, P. FRANCOIS, P.H. MALBREL, M. LECLERCQ et G. DHEDIN
"Nouvelle méthode d'exploration des mouvements oculaires".
Soc. Opht. de Paris, le 19 Octobre 1968.
- 21 et 22. L. STARK, G. COOK and B.L. ZUBER
"Horizontal eye movements studied with the online computer".
Arch. of Ophtal, Vol 76. n°4, p. 589-595, 1966.
- L. STARK and S.F. STANTEN
"A biological stochastic process (pupil noise)".
Automat. remote control III. Proc. 3 rd Congr. international (London) 1966.
23. J.D. Mc DONNELL
"A preliminary study of human operator behavior following a step change in the controlled element".
I.E.E.E. Trans. Human Factors Electron (U.S.A.), t. 7, n° 3,
p. 125-128, 1966.
24. T.B. SHERIDAN
"The human operator in control instrumentation".
in Progress in control engineering, vol.1, p.141-187 (New-York) 1962.
25. A. SKOLNICK
"Stability and performance of manned control systems".
I.E.E.E. Trans humans Factors Electron (U.S.A.), t.7, n°3, p.115-124-1966
26. G.W. LANGE
"Representation of the human operator as a sampled data system".
Proc. Instit. electr. Engrs (G.B), t.115, n° 2, p.342-354, 1968.

- 27, 28 et 29. L. STARK, G. VOSSIUS and L.R. YOUNG
" *Predictive control of eye movements.* "
Quarterly Progress Report n° 62, Research laboratory of electronics,
Massachusetts, Institute of technology, Cambridge, July 15, 1961.
30. P.I. TCHINAËV
" *Systèmes auto-adaptatifs* "
Calcul et Projet, Dunod, Paris 1966.
31. C. PENESCU
" *L'anticipation dans les mouvements humains* "
2ème Congrès International de cybernétique, Namur (Belgique) 1958.
32. V. STREJC (méthode de V. STREJC) dans :
" *Identification expérimentale des processus industriels par
LOEB et CAHEN* ".
Dunod, Paris 1967.
33. R. HELD
" *On visually-guided movements* "
Colloque I.N.S.E.R.M. La fonction du regard -
Paris les 21-23 Mai 1969.
- 34, et 35. R. REMOND, V. GABERSEK et N. LESEVRE
" *Les cheminements du regard au cours de la lecture* ".
Revue Neurol. t.95, p. 510-521, 1956.
36. F. RICHAUDEAU
" *L'apprentissage de la lecture et de la lecture rapide* ".
Colloque I.N.S.E.R.M - La fonction du regard - Paris les 21-23 Mai 1969.
- 37 et 38. D.H. FENDER et D.S. GILBERT
" *Temporal and Spatial Filtering in the human visual system* ".
Sci. Progress. 1965.
39. K.U. SMITH, V. PUTZ and K. MOLITOR
" *Eye movement retina delayed feedback* ".
Science, Vol. 166, n° 3912, 19 Décembre 1969.

Plan du mémoire

Introduction.....	1
<u>CHAPITRE 1</u> : Dispositif de mesure et protocole expérimental	
1. Dispositif de mesure permettant l'étude simultanée des mouvements visuel et manuel.....	10
1. Schéma-bloc de l'ensemble.....	11
2. Dispositif visuel.....	11
3. Dispositif manuel.....	15
4. Ecrans de présentations des points cible et suiveur	23
5. Matériel complémentaire.....	26
2. Protocole expérimental.....	26
1. Choix du protocole expérimental.....	27
2. Choix, succession et durée des stimulus.....	28
3. Population étudiée.....	29
<u>CHAPITRE 2</u> : Analyse corrélative des réponses visuelles et manuelles	
1. A un stimulus en échelon.....	30
1. Résultats expérimentaux.....	30
2. Courbe de probabilité des temps de latence.....	35
3. Etude du temps de coïncidence main-oeil et de la vitesse de déplacement.....	37
4. Courbes de variation du retard manuel et de l'écart entre les temps de latence visuel et manuel.....	41
5. Variation du temps de coïncidence.....	42
6. Relation entre le temps de latence et la vitesse manuelle en fonction de l'amplitude du stimulus.....	43
2. A un stimulus sinusoïdal.....	46
1. Résultats expérimentaux.....	46
2. Probabilités des fréquences caractéristiques.....	50

3. Variation de la fréquence limite manuelle en fonction de la fréquence de décrochage visuel.....	52
4. Influence des fréquences caractéristiques sur les courbes de Bode.....	53
3. A un stimulus en dent de scie	
1. Résultats expérimentaux.....	57
2. Etude statistique.....	60
3. Relations entre la fréquence limite manuelle et les fréquences caractéristiques visuelles.....	61
4. Conséquences fondamentales.....	63
4. A un stimulus carré périodique.....	64
5. A des stimulus pseudo-aléatoires.....	67
1. Réponse de l'opérateur à des signaux en échelons, aléatoires dans le temps et dans l'espace.....	68
2. Réponse de l'opérateur à un stimulus de forme circulaire.	70
3. Superposition pseudo-aléatoire de sinusoides, de dents de scie et de créneaux.....	72
6. Principales caractéristiques des réponses suivant le sens de déplacement de la trajectoire de la cible.....	72
7. Caractéristiques des réponses suivant la combinaison oeil-main effectuée.....	74
8. Conclusions.....	75

CHAPITRE 3 : Identification expérimentale de l'opérateur humain

1. Elaboration d'un modèle.....	81
2. Méthode expérimentale d'identification.....	83
3. Influence du système visuel sur la réponse manuelle.....	84
1. Etude du capteur visuel.....	84
2. Vérification du comportement non-linéaire du système visuel.....	85

3. Caractéristiques de la réponse manuelle.....	85
4. Introduction d'un échantillonneur dans la fonction mouvement.....	87
5. Premières conclusions et modèle de l'opérateur humain..	92
4. Influence de l'apprentissage sur le comportement de l'opé- rateur.....	95
1. Analyse des mouvements effectués lors des premiers essais.....	95
2. Nouveau modèle de l'opérateur.....	100
3. Simulation de la non-linéarité dynamique.....	102
5. Influence d'une perturbation entraînée par la coupure de la boucle de retour externe.....	105
1. Analyse des tracés observés.....	105
2. Conséquences de cette analyse.....	106
6. Etude du mouvement oculaire résultant d'un mouvement manuel	110
1. Analyse des tracés observés.....	111
2. Conséquences de l'analyse.....	111
7. Comportement de l'opérateur lorsque la cible ne se trouve pas dans le champ fovéal	
1. Etude des enregistrements obtenus.....	114
2. Conséquences de l'analyse.....	114
8. Influence de la sensibilité de la commande manuelle sur le comportement de l'opérateur	
1. Analyse sommaire des tracés obtenus.....	116
2. Conséquences.....	116
9. Modèle fonctionnel de l'opérateur humain et conclusions....	118

CHAPITRE 4 : Modèle d'opérateur humain en poursuite manuelle et visuelle

1. Simulation sur calculatrice analogique du système visuel.....	120
1. Choix du modèle.....	120
2. Non-linéarité dynamique.....	122
3. Echantillonneur à fréquence variable.....	127
4. Modèle analogique du système visuel.....	133
2. Simulation sur calculatrice analogique du système manuel	
1. Non-linéarité dynamique.....	135
2. Transmission échantillonnée.....	139
3. Elaboration de la fonction mémoire : Influence de l'ap- prentissage sur les caractéristiques de l'opérateur.....	143
4. Formulation mathématique du modèle de l'opérateur humain.	150

CHAPITRE 5 : Comparaison des réponses du modèle analogique à celles de
l'opérateur humain.....

1. Protocole expérimental d'identification.....	155
2. Mise au point des paramètres du modèle.....	156
1. Modèle simplifié.....	157
2. Modèle définitif.....	160
3. Comparaison simultanée des réponses de l'opérateur humain et du modèle.....	161
4. Conclusions.....	168

CONCLUSIONS.....	169
------------------	-----

