

50376
1975
190

N° d'ordre : 553

50376
1975
190

THESE

Présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

par

Jean-Marie JACQUESSON

ETUDE DES COMPOSANTES MANUELLES ET CEPHALIQUES
DE L'OPERATEUR HUMAIN EFFECTUANT DES TACHES DE
LOCALISATION SPATIALE DE STIMULUS VISUELS
ET AUDITIFS.



Soutenue le 26 Septembre 1975, devant la Commission d'Examen

| | | |
|-------------------|---------------|------------|
| Membres du Jury : | MM. P. VIDAL | Président |
| | N. MALVACHE | Rapporteur |
| | J.M. TOULOTTE | Examineur |
| | G. MILBLED | Invité |



030 043847 6

Or toute qualité n'est conférée
à un objet que par un passage à l'infini.

SARTRE

LES TROIS LOIS DE LA ROBOTIQUE :

PREMIERE LOI : Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger.

DEUXIEME LOI : Un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la première loi.

TROISIEME LOI : Un robot doit protéger son existence dans la mesure où cette protection n'est pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi.

Manuel de la Robotique

58^e édition (2058 ap. J.C.)

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

---oo0oo---

Depuis plusieurs dizaines d'années de nombreuses recherches mettent en évidence certaines propriétés ou caractéristiques des phénomènes existant entre l'Homme et la Machine. Initialement stimulés par des objectifs militaires, ces travaux se sont orientés ces dernières années vers des sujets plus ergonomiques voire médicaux. Ceux-ci englobent non seulement les analyses du comportement de l'opérateur humain effectuant un travail donné mais aussi celles des caractéristiques de la machine elle-même ; le but étant d'adapter la machine le mieux possible aux spécifications propres de l'homme en vue d'une amélioration globale du système Homme-Machine. La principale difficulté de ces recherches consiste bien souvent à minimiser les différences entre l'environnement expérimental de recherche et celui du cas réel (sur le "terrain").

En effet les conditions réelles impliquent un grand nombre de paramètres et de perturbations diverses souvent difficilement simulables dans une expérimentation de laboratoire.

Ces difficultés amènent la nécessité de définir d'une manière précise le protocole utilisé ainsi que les entrées et sorties considérées.

L'étude des différentes fonctions (vision, audition, équilibration, etc...) chez l'homme ne peut pas se réaliser en une seule expérimentation ; chaque expérience, apportant sa contribution à un ensemble, permet de vérifier ou de confronter des résultats divers améliorant la connaissance de l'homme.

Dans cet esprit, le travail que nous présentons consiste à apporter une contribution à la connaissance du comportement de l'homme à une entrée visuelle ou auditive.

Plus précisément les expériences sont relatives aux phénomènes de localisation d'un stimulus visuel ou auditif en considérant les mouvements de la tête et de la main comme variables de sortie ainsi que le montre la figure 0 - 1.

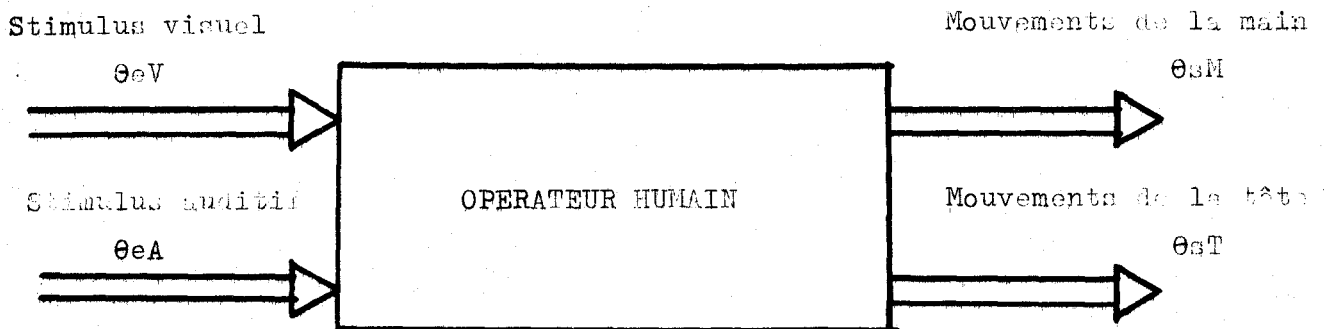


FIGURE 0 - 1 : Informations appréhendées par l'opérateur humain, et réactions effectuées.

Présentons maintenant quelques raisons du choix de cette recherche.

Depuis près de dix ans les laboratoires d'Automatique et de Physiologie de Lille ont étudié les systèmes visuel et manuel.

Les expériences de poursuite visuelle en vision frontale, où l'opérateur doit observer un point cible se déplaçant sur un écran, ont permis une première approche de la connaissance du système visuel par la proposition d'un modèle (1).

L'étude similaire des poursuites manuelle et visuelle a pu mettre en évidence certaines corrélations existant entre ces systèmes (2).

Ces expériences réalisées aussi en vision périphérique ont contribué fortement à la compréhension du comportement des systèmes visuel et manuel (3).

Rappelons que lors de tests de poursuite l'opérateur voit d'une part les déplacements du but et ceux du système commandé alors que dans des tests de compensation, il ne voit que l'erreur entre les deux déplacements.

Ces expériences de poursuite ou de compensation considèrent l'oeil comme capteur d'information. Or dans une tâche réelle (surveillance dans un atelier, conduite d'engin), l'opérateur humain peut être considéré comme un ensemble complexe appréhendant plusieurs informations simultanées (visuelles, auditives, somesthésiques) et réagissant par divers organes (la main, le pied, la parole).

Ainsi des expériences préliminaires ont montré une amélioration des performances de la réponse manuelle dans une tâche de poursuite si l'on combine une information sonore à un stimulus visuel en échelon de position.

Une première série d'expériences consiste à envoyer un top sonore de 1 000 Hz d'une durée de 200 ms, synchronisé avec chaque changement de position du stimulus visuel ; les résultats montrent une nette amélioration des caractéristiques du mouvement manuel et notamment en régime d'apprentissage (4).

Dans une deuxième série d'expériences on envoie un signal sonore dont l'intensité est proportionnelle à l'erreur manuelle commise. La fréquence de ce signal est de 1 000 Hz pour une erreur positive et de 800 Hz pour une erreur négative (5). Les résultats (tableau figure 0 - 2) montrent que les meilleures performances sont obtenues lorsque l'information auditive est combinée à l'information visuelle. On voit également que l'amélioration des temps de latence (par rapport à une information visuelle seule) est due à l'information auditive.

| Nature de l'information | TLM = Temps de latence manuel | | | TC = Temps de coïncidence oeil-main | | |
|-------------------------|-------------------------------|--------|------|-------------------------------------|--------|------|
| | I.V. | I.V.A. | I.A. | I.V. | I.V.A. | I.A. |
| Stimulus aléatoires | 0,31 | 0,25 | 0,25 | 1 | 0,9 | 1,9 |
| Stimulus identiques | 0,24 | 0,17 | 0,19 | 0,85 | 0,73 | 1,3 |

I.V. = Information visuelle

I.A. = " auditive

I.V.A. = visuelle auditive

FIGURE 0 - 2 : Valeurs des temps de latence manuel (TLM) et des temps de coïncidence oeil-main (TC) pour des entrées en échelon de position de natures différentes (5).

Cette amélioration sensible des performances de l'opérateur humain observée dans un test de simple tâche (6) a été mise en évidence également dans un test de double tâche (7) dans lequel l'aide auditive est apportée à l'information visuelle dans la tâche secondaire, poursuite manuelle d'un système du premier ordre, la tâche principale consistant à commander un système du second ordre ; l'analyse des résultats montrant dans ce cas que l'amélioration des performances est significative.

Dans toutes ces expériences, l'information auditive est ponctuelle (haut-parleur, écouteurs stéréophoniques), et de même qu'un test de poursuite manuelle en vision frontale ne permet pas de mettre en évidence le caractère binoculaire du système visuel ainsi que l'importance de la vision périphérique, de même un test de poursuite manuelle d'un stimulus auditif "spatialement fixe" (dans ce cas c'est l'information énergétique, intensité ou fréquence, qui varie) ne permet pas ou très peu de mettre en évidence le caractère binaural de l'audition.

La poursuite et plus précisément la localisation spatiale de stimulus sonores paraît être un moyen d'étude des phénomènes du caractère binaural de l'audition et d'approche de la connaissance du comportement de l'opérateur

humain dans les conditions réelles ; l'homme, dans son environnement naturel, appréhende en effet des informations auditives variables "énergétiquement" et "spatialement".

Dans nos expériences, la tâche du sujet est de localiser soit un stimulus visuel, soit un stimulus auditif, apparaissant dans son champ de "vision" ou "d'audition" périphérique, à l'aide d'un dispositif de pointage manuel.

La comparaison des réponses de l'opérateur soumis à des stimulus visuels ou auditifs a été dictée par les considérations suivantes :

- Les systèmes visuels et auditifs sont tous deux composés de deux organes de prise d'information permettant de définir des analogies : vision stéréoscopique et audition stéréophonique (8).
- Ces deux ensembles de capteurs (visuels et auditifs) ont un support commun : la tête.
- Les mouvements conjugués tête-oeil sont bien connus (9), l'influence des mouvements céphaliques sur la localisation du son ("mouvements tête-oreille") paraît intéressante à établir.

Ces dernières remarques semblent mettre en évidence l'importance du rôle de la tête lors de la localisation spatiale de stimulus visuels ou auditifs :

- La tête est le support des organes de prise d'information.
- Les mouvements céphaliques permettent de localiser la source : mouvements conjugués "tête-oeil" ou mouvements plus ou moins complexes pour la localisation d'un son.

Les dispositifs permettant de capter les mouvements céphaliques sont nombreux. Citons notamment un dispositif à un degré de liberté captant la rotation gauche droite de la tête autour de son axe vertical, à l'aide de signaux électromyographiques des muscles du cou (10), et un dispositif optico-électronique à trois degrés de liberté (11) ; ces capteurs sont légers mais présentent des inconvénients : un seuil de 45° pour le premier, un traitement de l'information recueillie important et une limitation des amplitudes céphaliques ($\pm 20^\circ$).

Le système électro-mécanique retenu à 6 degrés de liberté, s'il présente quelques inconvénients (gène pour le sujet en particulier), permet des rotations importantes ($\pm 90^\circ$ de droite à gauche).

Après avoir présenté le dispositif expérimental (chapitre I) et défini le protocole d'expérience (chapitre II), nous donnons les résultats obtenus lors des expériences relatives aux stimulus visuels (chapitre III) et auditifs (chapitre IV), la synthèse des résultats (chapitre V) fait apparaître des comportements différents selon les sujets, en particulier lors du processus de localisation de stimulus auditifs.

CHAPITRE I

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

---ooOoo---

INTRODUCTION

Le but de nos expériences consiste à étudier le comportement de l'opérateur humain effectuant une tâche de localisation spatiale de stimulus visuels ou sonores apparaissant dans son environnement proche.

L'opérateur doit, en s'aidant éventuellement des mouvements de la tête, localiser le stimulus dont il indique la direction au moyen d'un dispositif de pointage manuel.

Un ensemble expérimental a été mis en place ; il est composé de divers éléments que nous présentons maintenant.

I - CABINE EXPERIMENTALE

Le choix des divers paramètres de l'environnement expérimental (forme de la cabine, matériaux utilisés) a été motivé par plusieurs impératifs :

- La tâche de localisation spatiale de l'opérateur humain implique un champ de présentation des stimulus le plus étendu possible.
- Les perturbations provenant de l'extérieur (bruits des appareils de mesure, éclairage ambiant) et de l'intérieur de la cabine (lumières parasites, réverbération des ondes sonores) doivent être évitées au maximum compte tenu de la nature des signaux stimulus.

Le premier impératif conduit à choisir un support de présentation des stimulus ayant la forme d'un demi-cylindre dont l'axe vertical est confondu avec celui correspondant à la rotation principale de la tête de l'opérateur.

La deuxième considération amène à utiliser, pour la constitution des parois de la cabine, des matériaux antiréverbérants, et isolant les bruits extérieurs de la cabine ; en outre afin d'éviter toutes perturbations visuelles, l'obscurité dans la cabine est complète.

La géométrie de la cabine et les divers éléments constitutifs du dispositif expérimental sont présentés fig. I - 1.

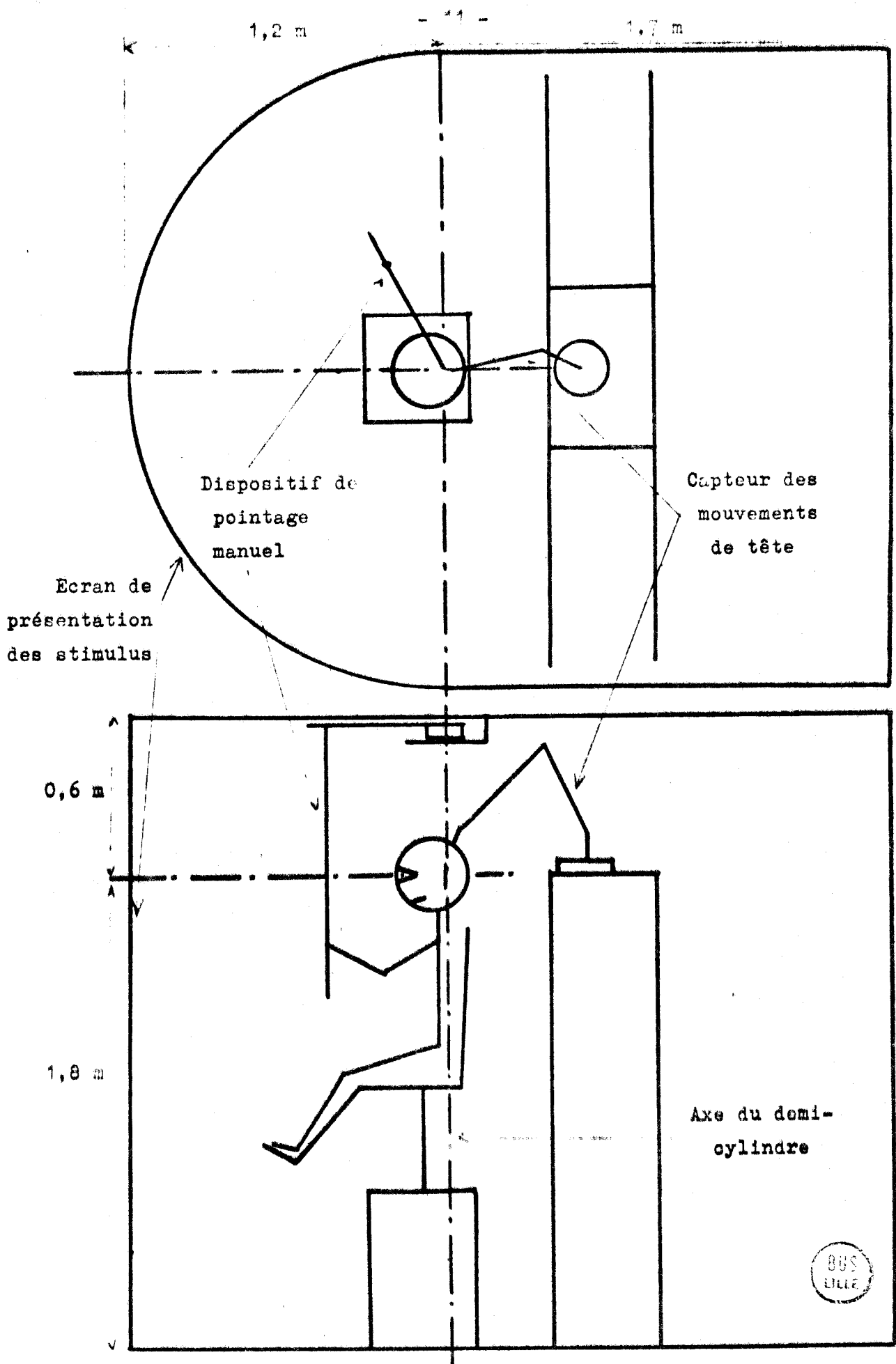


FIGURE I - 1 : Présentation d'ensemble de la cabine expérimentale

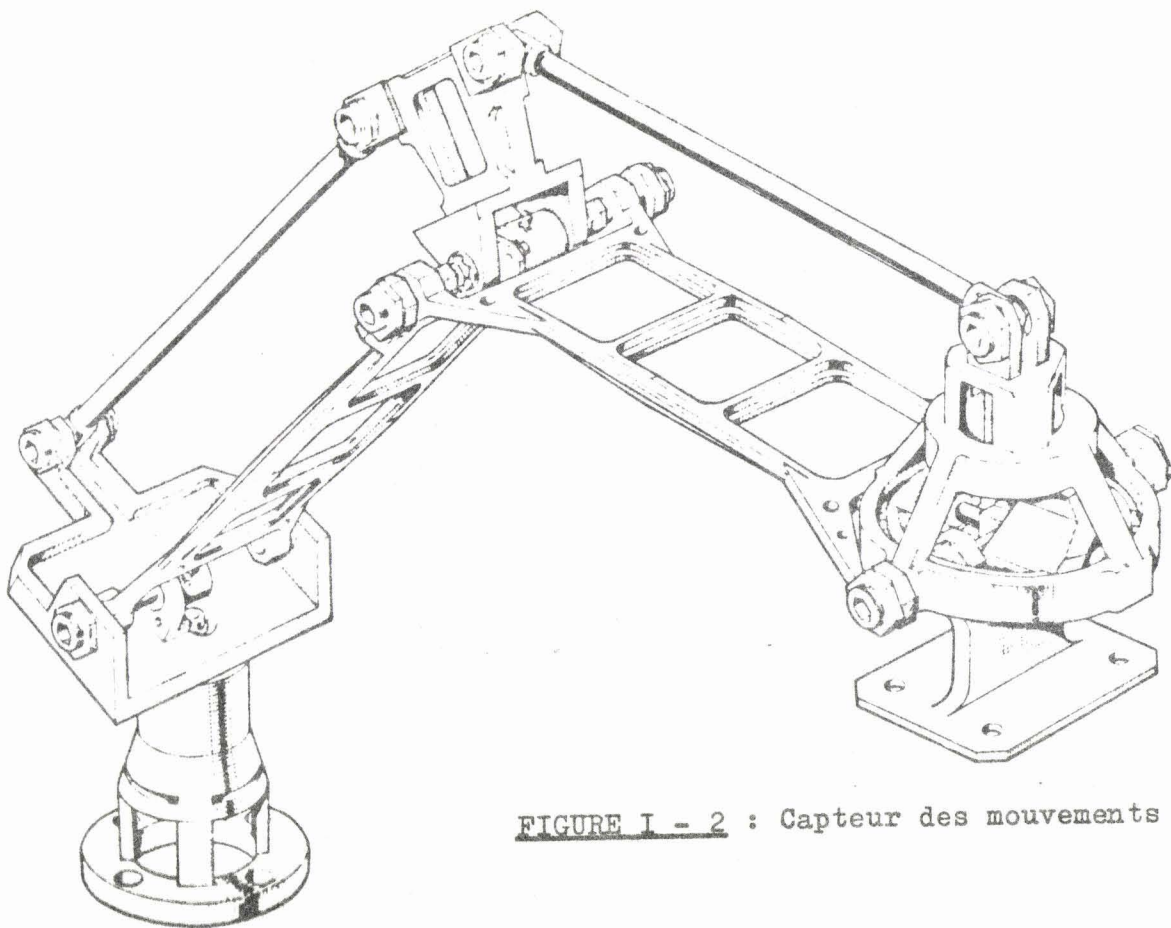


FIGURE I - 2 : Capteur des mouvements de tête.

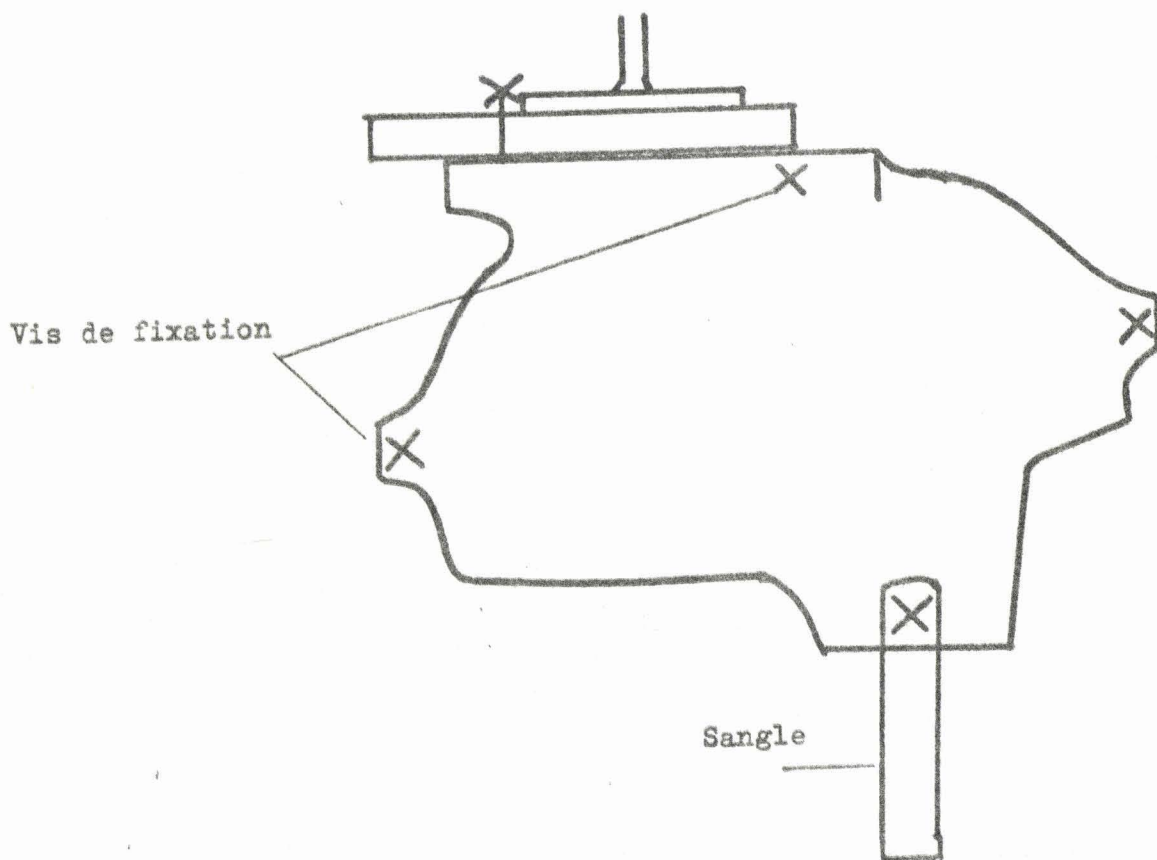


FIGURE I - 3 : Casque moulé en résine de polyester.

BUS
LILLE

II - CAPTEUR DES MOUVEMENTS DE TÊTE

Les expériences décrites dans ce rapport ont été effectuées à l'aide d'un capteur des mouvements de la tête, conçu et réalisé au Centre d'Etudes et de Recherches Techniques Sous-Marines de Toulon (12).

Ce système, présenté en Annexe I, permet la mesure de six degrés de liberté des déplacements de la tête, composés de trois rotations et de trois translations (fig. I - 2).

Ce dispositif mécanique dont les axes sont solidaires de potentiomètres capteurs, engendre six tensions électriques proportionnelles aux déplacements de la tête par rapport à une référence indépendante de la position de l'opérateur humain.

Ce dispositif capteur est couplé à la tête de l'opérateur par l'intermédiaire d'un casque moulé en résine de polyester (fig. I - 3).

Les problèmes relatifs à la mise en place du capteur sur le casque et à l'inertie du système capteur associée à celle de la tête sont décrits en Annexe I. En effet le poids rapporté par ce dispositif sur la tête peut engendrer une gêne lors de certains déplacements et être la cause d'oscillations après un mouvement rapide de la tête.

III - DISPOSITIF DE PRESENTATION DES STIMULUS VISUELS ET SONORES

III.1 - Implantation des stimulus dans la cabine

La présentation des stimulus à l'opérateur humain est telle que (fig. I - 4) :

- Les stimulus sonores et lumineux sont situés dans le plan horizontal passant par les yeux du sujet.
- Le nombre de stimulus auditifs et visuels est de sept : six sources placées en périphérie et une située au centre de l'écran circulaire.
- Les signaux stimulus périphériques sont placés (fig. I - 4) à ± 20 , ± 40 , ± 60 degrés par rapport à celui correspondant à la position de référence, en vision centrale.

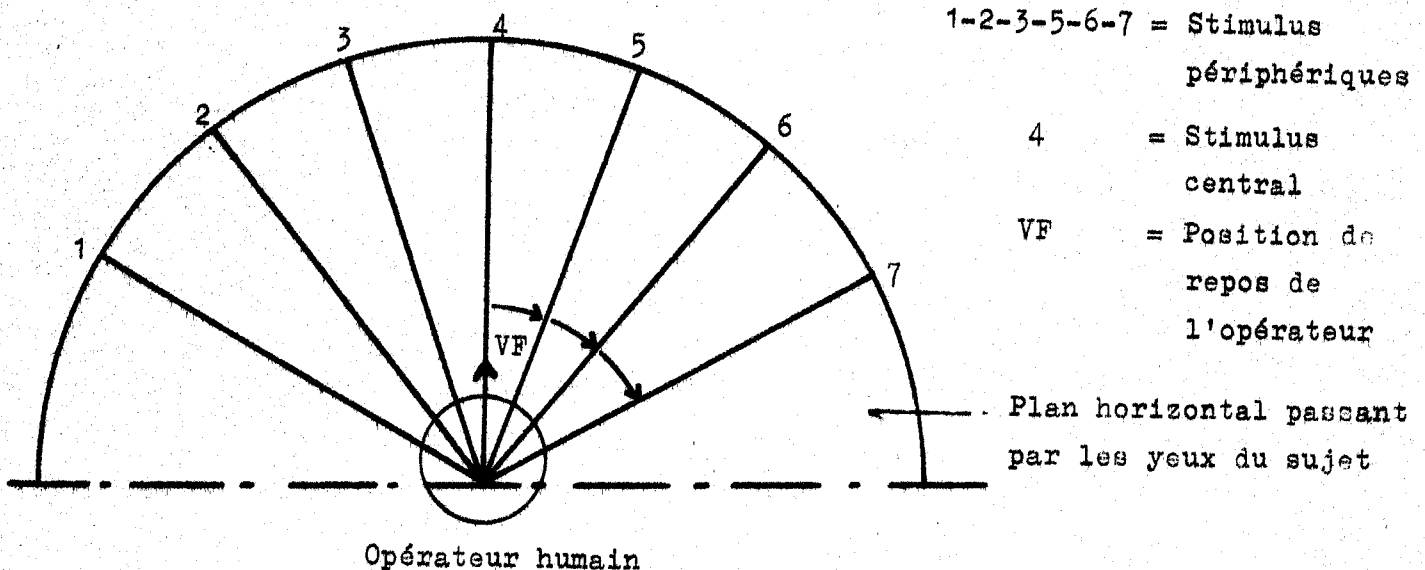


FIGURE I - 4 : Dispositif de présentation des stimulus.

- Les stimulus sonores sont élaborés à partir de bobines (large bande d'impédance 5Ω) fixés sur la paroi interne du demi-cylindre (fig. I - 5) et isolés acoustiquement les uns par rapport aux autres.

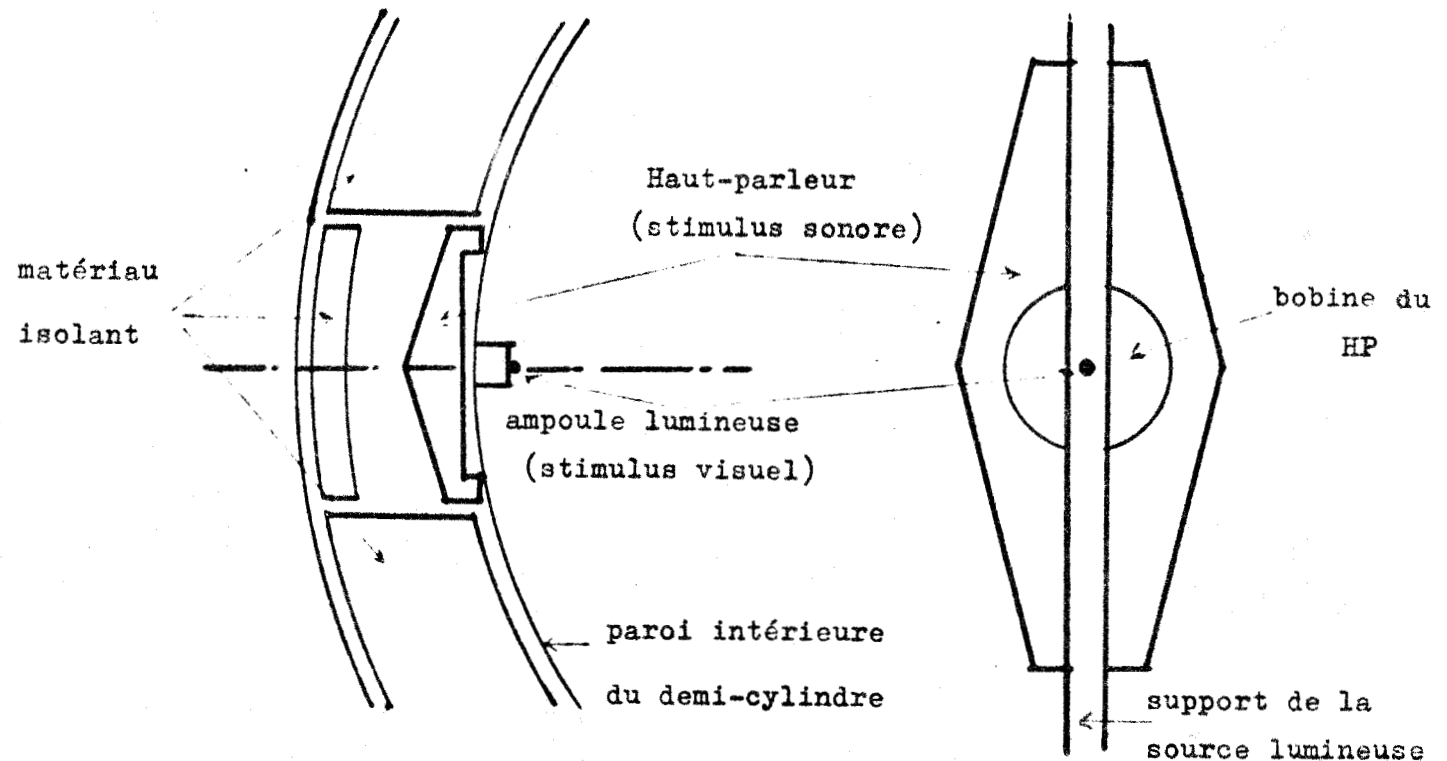


FIGURE I - 5 : Implantation des sources sonores et lumineuses

- Les sources lumineuses sont constituées par des ampoules de faibles dimensions (surface circulaire de l'ordre de 15 mm^2) fixées sur la paroi du demi-cylindre ; la position de chaque source lumineuse coïncide avec celle de la bobine de chaque haut parleur (fig. I - 5). Les faibles dimensions des ampoules et de leurs supports n'apportent aucune perturbation dans la transmission de l'information sonore.

III.2 - Caractéristiques des stimulus

L'objectif principal de cette étude étant l'analyse des processus de localisation spatiale de stimulus, à partir des mouvements de la tête et de la main, nous n'avons pas pris en compte la variabilité possible de l'intensité des stimulus. Ceux-ci ont donc une intensité sonore ou lumineuse constante.

Les stimulus sont des échelons de position lumineux ou sonores et sont présentés à l'opérateur selon une séquence pseudo-aléatoire en durée et en succession dans le temps (leur durée d'apparition varie de 3 à 9 s) et en amplitude spatiale (six valeurs comptées positivement ou négativement à partir du stimulus de référence situé au centre de l'écran).

Afin de faciliter l'exploitation des résultats et de prendre en compte certaines considérations physiologiques, la référence (stimulus central) est présentée au sujet entre chaque stimulus périphérique. Le choix de ce protocole a été motivé par les deux raisons suivantes :

- Les expériences préliminaires sur la localisation d'un son par l'opérateur humain ont mis en évidence la difficulté de la tâche et révélé la préférence par le sujet d'une "référence". La disparition de celle-ci entraîne en effet un comportement différent de l'opérateur tant au point de vue "physiologique" qu'"anatomique".
- Les conditions expérimentales initiales (positions de la main et de la tête) peuvent être supposées identiques pour chaque localisation d'un stimulus périphérique. Ceci permet d'éviter de tenir compte du fait que l'opérateur commet une erreur d'amplitude variable lors du pointage d'un stimulus périphérique. Afin de discriminer le stimulus sonore central, sa fréquence est différente de celle des stimulus périphériques.

Les stimulus visuels et sonores présentent les caractéristiques suivantes :

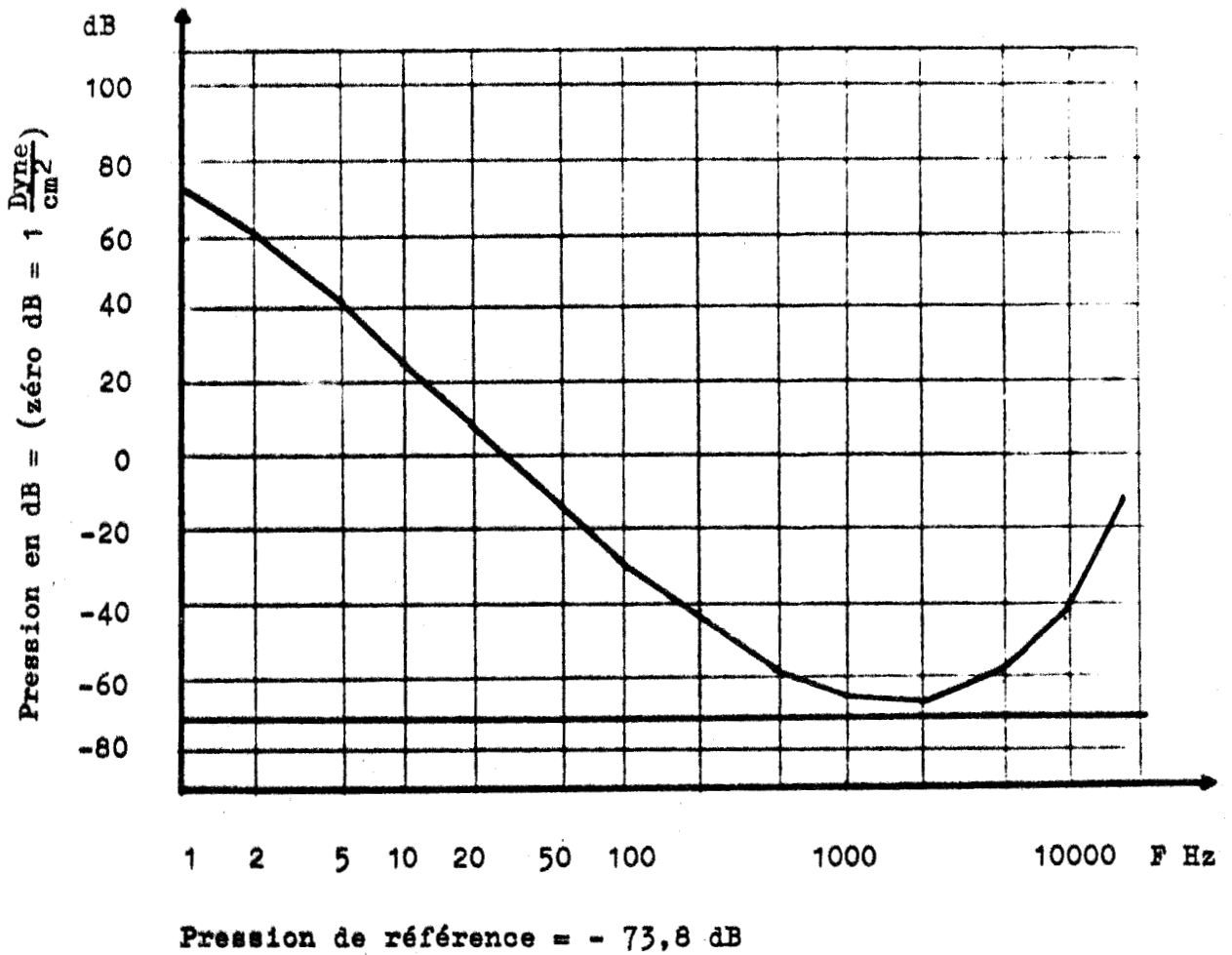
- Les stimulus visuels sont produits à partir d'ampoules au néon qui diffusent une lumière orangée et qui présentent une faible constante de temps (quelques ms) à l'allumage et à l'extinction.

La luminance, mesurée au nitomètre, est voisine de 10 cd/m^2 .

- Les stimulus sonores émis par les hauts parleurs sont des sons sinusoidaux de fréquence 1 000 Hz pour les sources périphériques et de 800 Hz pour le haut parleur central. L'intensité constante de ceux-ci, mesurée au sonomètre, est voisine de 70 phones (équivalent de 70 dB à 1 000 Hz).

Bien qu'un son pur soit plus difficile à localiser qu'un "bruit" ou qu'un top sonore (13), nous avons choisi un son sinusoidal afin d'éviter la présence d'harmoniques pouvant se réfléchir sur les parois de la cabine et ne pas être perçues de la même façon par tous les sujets.

Les fréquences choisies (800 et 1 000 Hz) se situent dans la plage d'audibilité maximum (fig. I - 6) (14).



Variation du seuil d'intensité, en décibels, de l'audition de l'homme (en ordonnées) en fonction de la fréquence du son (en abscisses). Représentation logarithmique.

FIGURE I - 6 : Courbe d'audibilité d'après STEVENS et DAVIS (14)



III.3 - Vérification de l'acoustique de la cabine

Afin de vérifier les caractéristiques des haut parleurs (implantation, directionnalité) et la neutralité acoustique de la cabine, des tests préliminaires ont été effectués.

Ces tests ont consisté à mesurer la différence d'intensité sonore reçue au niveau des deux oreilles du sujet.

Ceci a été réalisé à l'aide de deux micros directionnels, placés sur le casque porté par le sujet (fig. I - 7) (les axes des deux micros sont perpendiculaires entre eux afin d'obtenir une grande sensibilité ; un angle de 180° serait trop élevé car les micros sont directionnels).

M_I et M_{II} = Micros
directionnels
1....7 = Hauts
parleurs

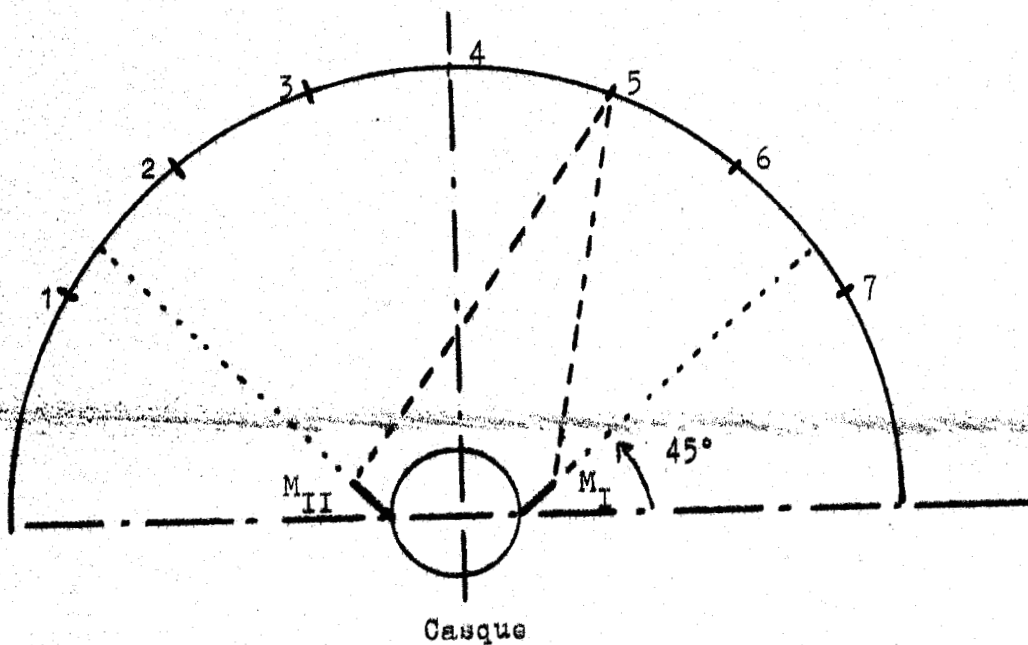


FIGURE I - 7 : Vérification de l'acoustique de la cabine

Le casque est orienté vers le haut parleur central et les hauts parleurs périphériques sont excités les uns après les autres selon une séquence déterminée.

Le signal enregistré (fig. I - 8) est représentatif de la différence d'intensité sonore ΔI reçue par chacun des micros ; les signaux issus des deux micros après amplifications sont détectés puis différenciés.

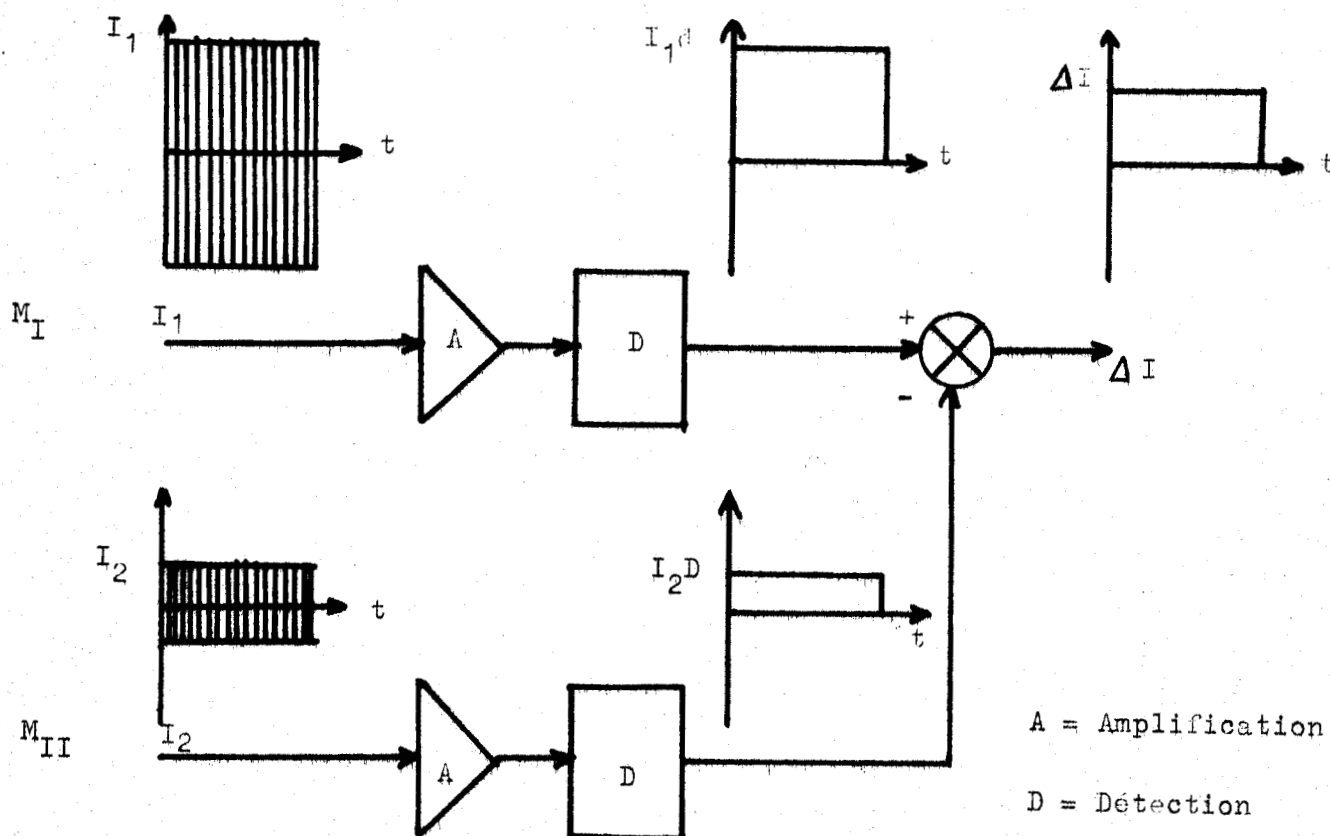


FIGURE I - 8 : Mesure de la différence d'intensité sonore (ΔI) recueillie par les deux micros placés sur le casque de l'opérateur.

Les enregistrements , fig. I - 9 et I - 10, montrent un minimum de la grandeur ΔI lorsque le "pointage" du casque est dirigé vers le haut parleur excité (stimulus) et une symétrie des réponses obtenues lors des différentes excitations des stimulus périphériques (excepté une légère dissymétrie pour les hauts parleurs situés à la plus grande excentricité : les micros n'étant pas rigoureusement identiques).

Ces tests sommaires, ne prenant en compte que le paramètre intensité du stimulus, montrent cependant que les phénomènes de réflexion des ondes sonores, pouvant perturber la localisation de l'opérateur, sont minimisés au centre de la cabine.

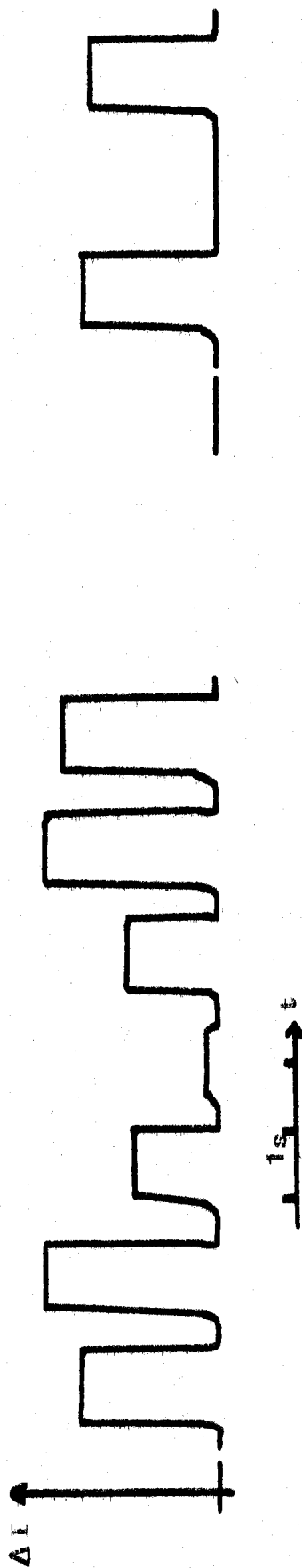
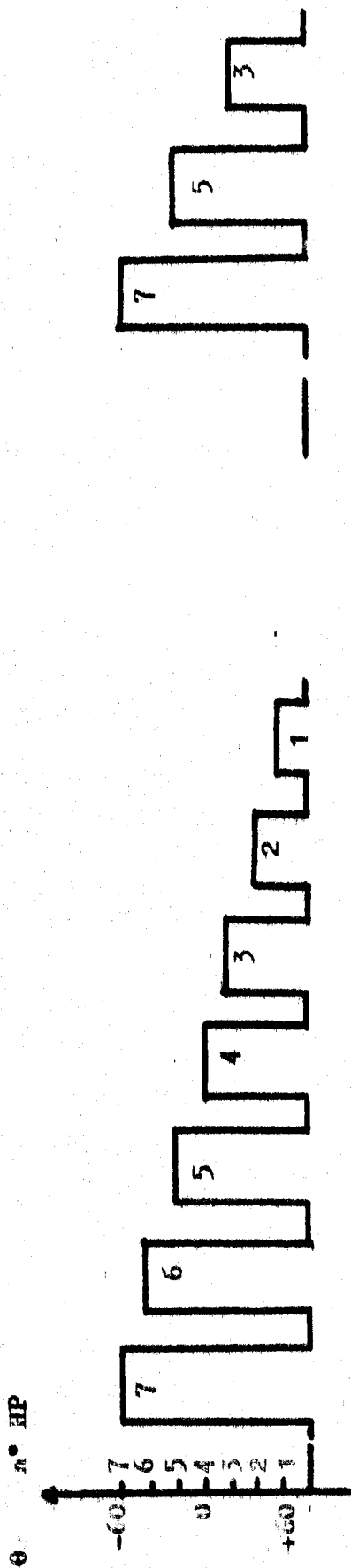


FIGURE I - 10 : Vérification acoustique
Casque pointé sur H P 5 (+ 20°
par rapport au stimulus central)

FIGURE I - 9 : Vérification acoustique
Casque pointé sur H P central



IV - DISPOSITIF DE POINTAGE MANUEL

L'analyse du comportement de l'opérateur humain effectuant une charge de travail nécessite la connaissance des paramètres relatifs aux variables d'entrée (nature, forme des stimulus) et de sortie (réponses de l'opérateur à ces stimulus).

Après avoir décrit le dispositif de production de ces stimulus, nous exposons maintenant le dispositif de pointage manuel.

IV.1 - Choix du dispositif de pointage

Lorsque l'opérateur doit localiser un stimulus sonore ou visuel dans l'espace, il peut effectuer cette tâche selon plusieurs procédures en utilisant par exemple : la parole, un organe discret à touches commandées par les doigts, un pointage de la tête, un pointage manuel, une direction des yeux voire même celle du corps.

- La locution paraît être le moyen le plus naturel. La réponse peut être très précise mais elle nécessite un traitement important des informations fournies.
- L'utilisation d'un organe discret, clavier à touches par exemple, implique que l'information recueillie soit discrète ; elle ne permet pas alors une analyse du comportement dynamique de l'opérateur lors de la phase de recherche du stimulus.
- Le pointage de la tête ou de la main, si l'on dispose de capteurs appropriés, présente l'avantage de fournir, tout au long de la phase de recherche, une information analogique dont le

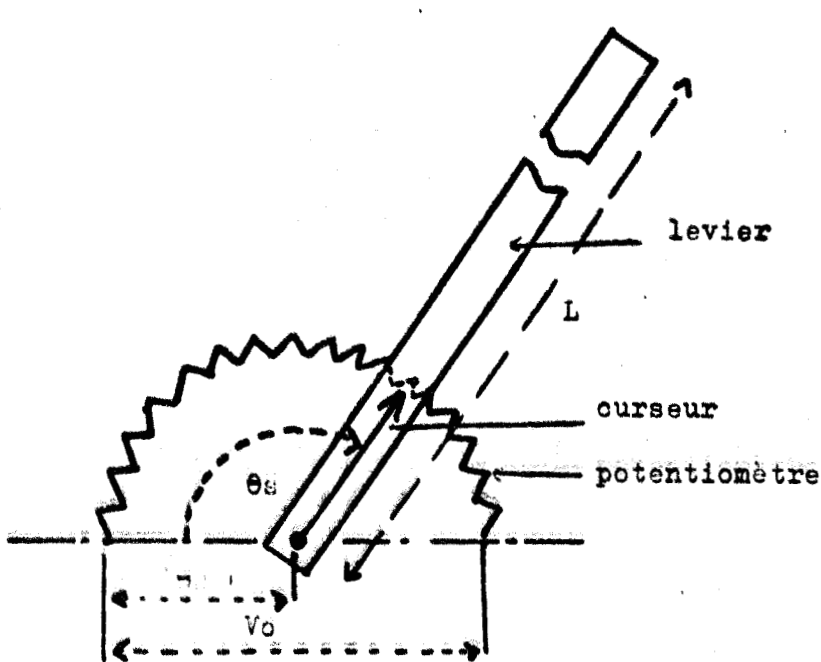
traitement est facilement réalisable.

Le pointage manuel, à l'aide d'un levier manœuvré par la main et la main, a été retenu en tant que variable de sortie principale.

Les mouvements de tête sont enregistrés en tant que variable de sortie secondaire. Les informations provenant des capteurs de mouvements de la main et de la tête peuvent alors être comparées en vue d'une étude corrélative permettant de mettre en évidence la contribution de l'orientation de la tête dans le processus de pointage manuel.

IV.2 - Description du dispositif de pointage manuel

Le dispositif est un système électromécanique, à un degré de liberté, essentiellement composé d'un potentiomètre alimenté en tension continue dont le curseur est solidaire d'un levier manuel (fig. I - 11).



V_{os} = tension de sortie
 V_o = tension d'alimentation
 θ_s = amplitude spatiale du levier
 $L = 45 \pm 5$ cm

FIGURE I - 11 : Dispositif de pointage

La relation liant l'angle de sortie θ_s du déplacement du levier à la tension $V_{\theta s}$ recueillie sur le curseur est linéaire =

$$V_{\theta s} = \frac{KV_0}{180} \theta_s \quad V_{\theta s} = \frac{\theta_s}{100} \quad K = 0,1 \quad V_0 = 18 \text{ v}$$

$V_{\theta s}$ en volts θ_s en degrés

Afin d'assurer une bonne rigidité de l'ensemble potentiomètre-levier un bâti a été réalisé ; ses caractéristiques ainsi que celles du potentiomètre sont données en Annexe II.

IV.3 - Implantation du levier dans la cabine

Lors d'un mouvement manuel les interactions main-tête peuvent exister pour des amplitudes et des vitesses du mouvement importantes.

Il est possible de minimiser ces interactions en choisissant une position du levier telle que l'amplitude du déplacement manuel demandé soit relativement faible ; dans ce cas le centre de rotation du levier doit être placé au voisinage de la main de l'opérateur (fig. 1 = 12).

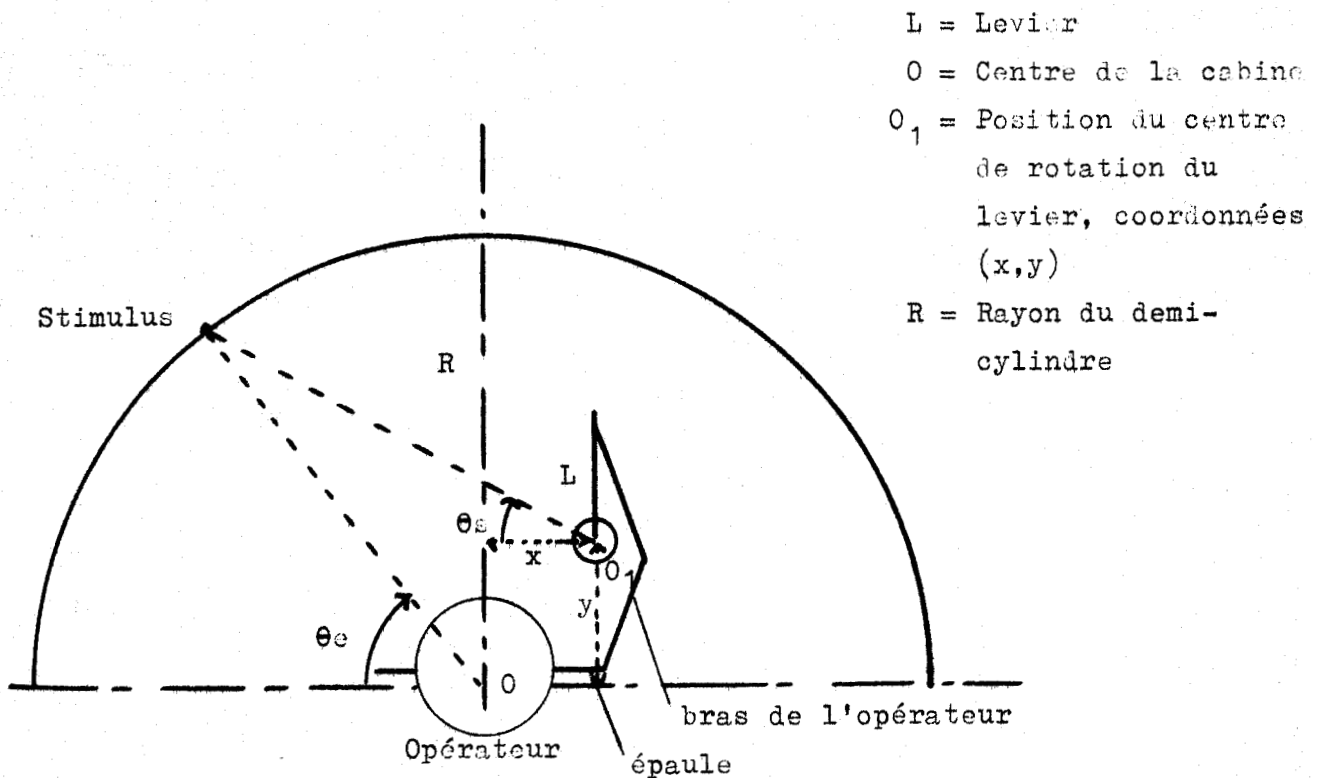


FIGURE I - 12 : Non linéarité introduite quand la position du centre de rotation du levier n'est pas confondue avec le centre de la cabine.

La relation liant l'angle de rotation du levier θ_s à l'excentricité du stimulus θ_e , lorsque le levier L est pointé sur le stimulus, n'est plus alors linéaire :

$$\text{On a } \text{tg } \theta_s = \frac{\sin \theta_e - y/R}{\cos \theta_e + x/R}$$

Pour éliminer cette non linéarité, le centre de rotation du levier a été confondu avec l'axe du demi-cylindre de la cabine correspondant à l'axe de rotation principale de la tête.

Des impératifs techniques, notamment la présence du siège de l'opérateur, ont amené à placer le support du centre de rotation du levier au-dessus du siège du sujet (fig. I - 13) et à

modifier le levier en lui ajoutant un deuxième bras perpendiculaire au premier ; les deux bras en L du levier sont en aluminium afin de diminuer l'inertie du système. L'opérateur tient le levier par l'intermédiaire d'une poignée (fig. I - 13).

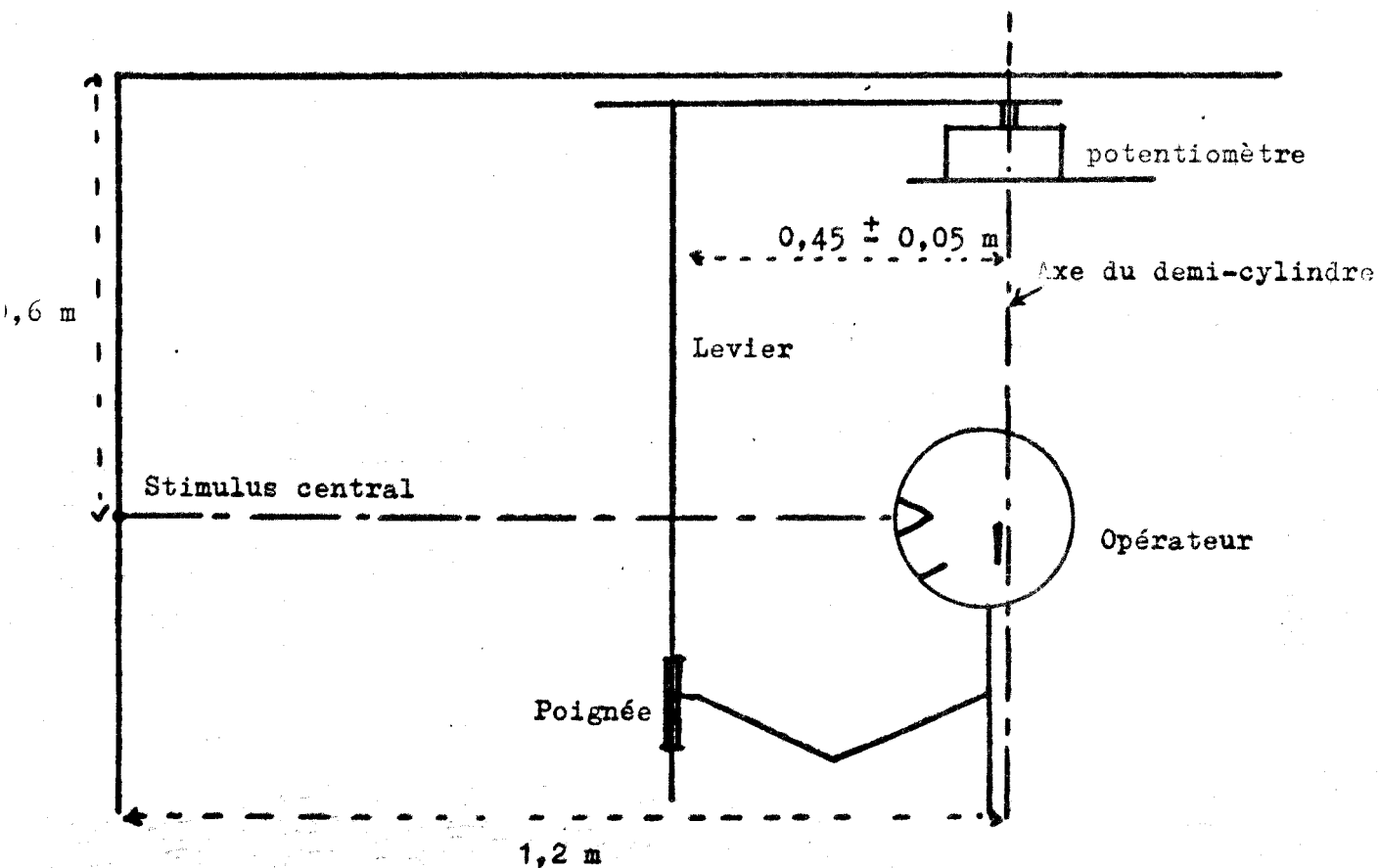
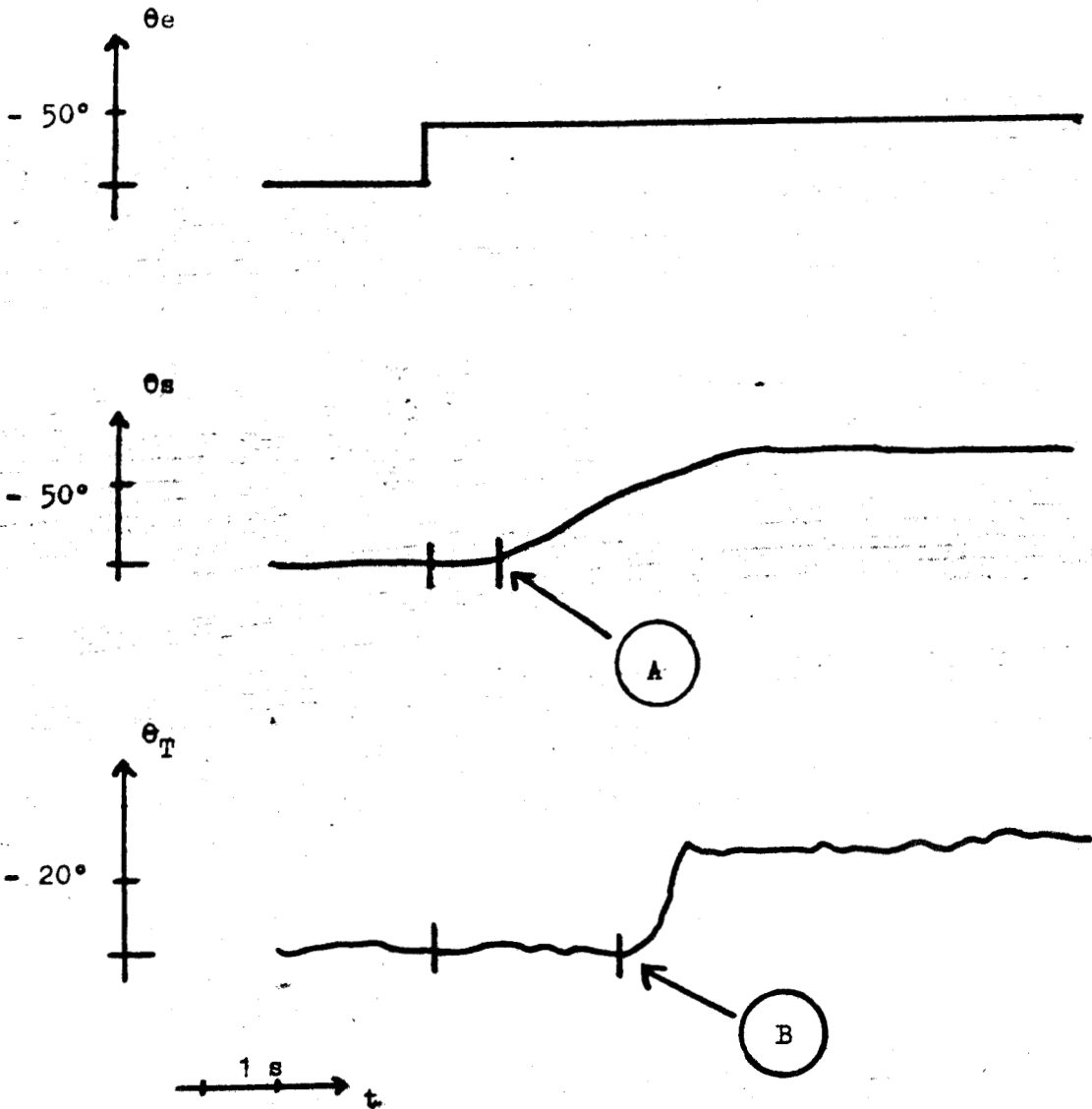


FIGURE I - 13 : Implantation du levier dans la cabine

REMARQUES SUR LES CONSÉQUENCES DE L'IMPLANTATION DU LEVIER DANS LA CABINE :

- Les interactions main-tête peuvent exister par l'intermédiaire des épaules. De part la constitution du siège de l'opérateur (voir chap.II), ces interactions sont très faibles et dans nos conditions expérimentales, les enregistrements obtenus ne mettent pas en évidence un mouvement de tête consécutif à un mouvement du bras et inversement (fig. I - 14).



A → un départ du bras ne provoque pas un mouvement de tête

B → un mouvement de tête ne perturbe pas le mouvement manuel

θ_e = excentricité du stimulus

θ_s = réponse manuelle

θ_T = réponse céphalique



FIGURE I - 14 : Interactions main-tête

- La présence d'une partie du levier (fig. I - 13 segment AB) dans le champ de vision de l'opérateur permet de donner à celui-ci une information visuelle supplémentaire relative à la position spatiale du stimulus.
- La localisation des stimulus visuels ou sonores par les déplacements de la main et de la tête de l'opérateur s'effectue sans amplification ni atténuation de la relation liant la position spatiale du levier et celle du stimulus (à une stabilisation parfaite $\theta_s = \theta_e$).

V - APPAREILLAGE (Fig. I - 15)

Le système de présentation des stimulus sonores et visuels, le dispositif de pointage manuel et le capteur des mouvements de tête étant définis, il est maintenant nécessaire de décrire l'appareillage annexe permettant l'obtention des divers signaux d'entrée et de sortie indispensables pour le traitement des mesures représentatives des réactions de l'opérateur en expérimentation.

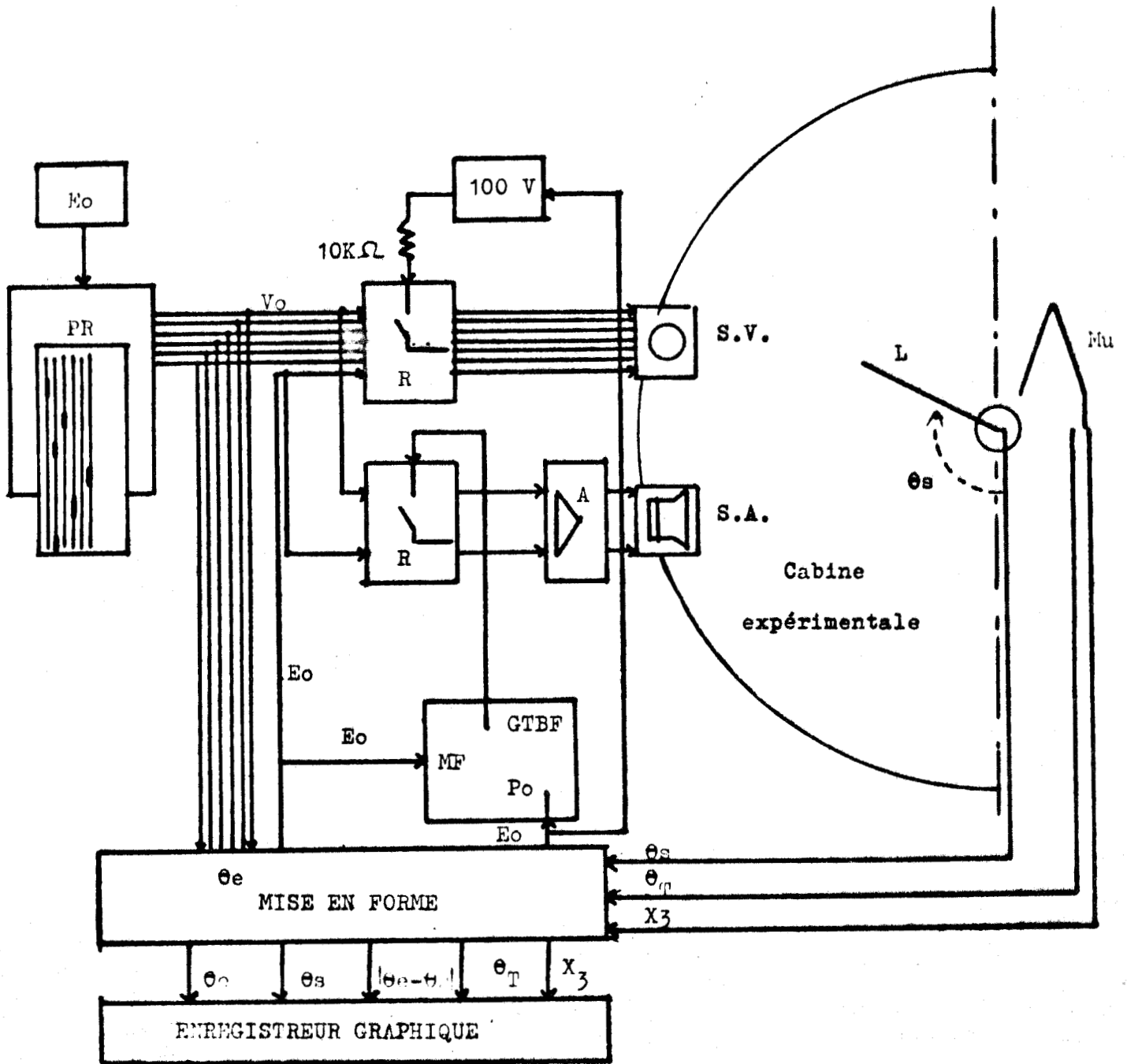
Le schéma détaillé de câblage du dispositif expérimental est donné en Annexe III.

V.1 - Signaux d'entrée

La séquence de production des stimulus est commandée et synchronisée par un programmeur à bandes à 24 pistes pouvant être perforées selon un protocole déterminé ; la bande est entraînée à la vitesse de 150 mm/m et provoque la fermeture ou l'ouverture de 24 relais (relais fermés aux endroits de perforation de la piste).

Il a paru nécessaire de laisser un intervalle entre les perforations afin d'éviter un chevauchement possible entraînant l'apparition de deux stimulus pour l'opérateur.

Cet intervalle a été exploité pour générer le stimulus central. Six pistes sont donc perforées, elles déterminent la séquence des excitations des stimulus périphériques (fig. I - 15).



PR = Programmateur

R = Relais

A = Amplification basse-fréquence

L = Levier manuel

Mu = Capteur des mouvements de tête

MF = Modulation de fréquence ; l'apparition d'une tension E_o module la fréquence du stimulus de 1 000 à 800 Hz

Po = Porte = une tension E_o appliquée à la porte annule le signal de sortie

S.V. = Stimulus visuels

S.A. = Stimulus auditifs



FIGURE I - 15 : Appareillage du dispositif expérimental

L'examen de la figure I - 16 précise la génération des stimulus central et périphériques et l'obtention d'une tension $V_{\theta e}$ rendant compte de la position spatiale de chaque stimulus θ_e ($V_{\theta e} = \frac{K E_o \theta_e}{180}$ $K = 0,2$).

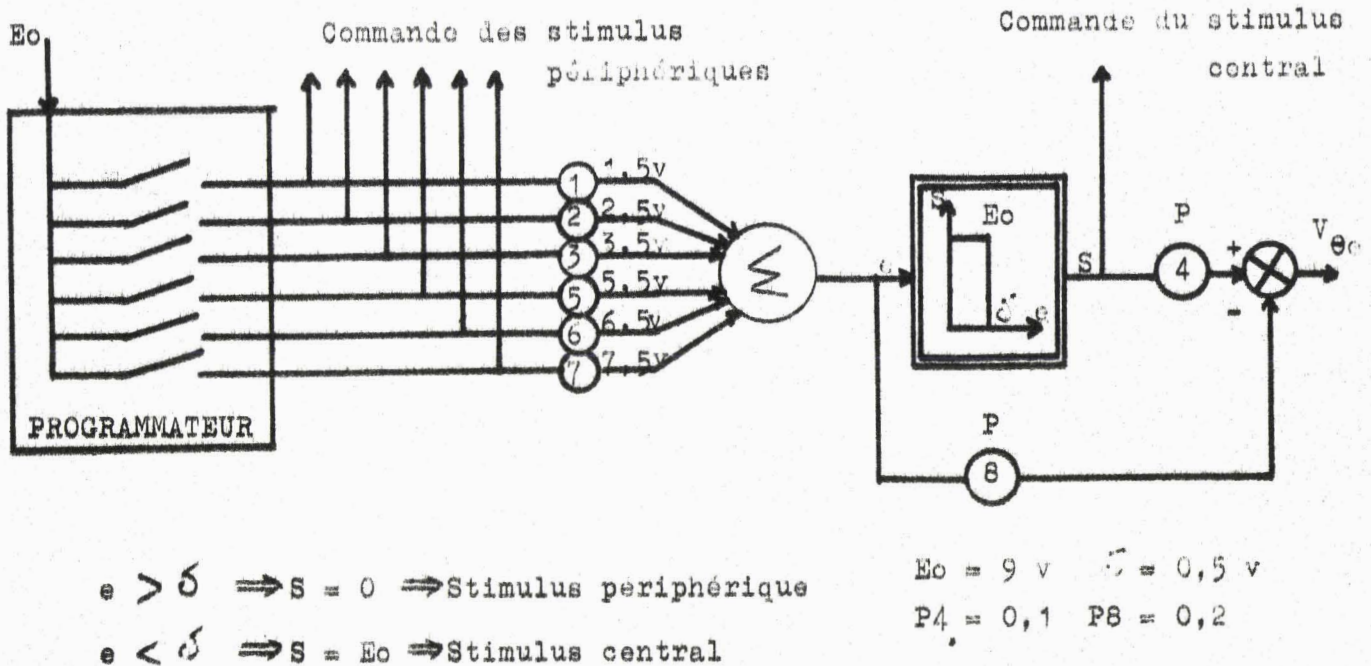


FIGURE I - 16 : Génération des stimulus central et périphériques

Les sept signaux obtenus commandent par l'intermédiaire de deux séries de sept relais (fig. I - 15) l'apparition des stimulus sonores ou visuels. Ces relais sont des composants au mercure à faible temps de commutation ($< 500 \mu s$), temps satisfaisant pour nos mesures.

- Un générateur basse fréquence délivre une tension sinusoïdale d'amplitude constante de fréquence 1 000 Hz pour les stimulus périphériques et de 800 Hz pour le stimulus central (la commande du stimulus central module la fréquence du générateur)

qui, par l'intermédiaire d'amplificateurs (constitués de circuits intégrés) excite les hauts parleurs.

- Une alimentation stabilisée fournit, sous une tension de 100 V, le courant nécessaire à l'allumage des lampes par l'intermédiaire de résistances de $10\text{ K}\Omega$.

V.2 - Signaux de sortie

Les signaux de sortie sont relatifs aux déplacements céphaliques (sortie intermédiaire) et à ceux de la main (sortie principale). Seules deux des six composantes du capteur des mouvements de tête sont enregistrés.

La composante $Z + X_3$ (Annexe I) est notée θ_T ; elle rend compte des déplacements de la tête autour de son axe de rotation vertical confondu avec celui du demi-cylindre de la cabine expérimentale.

La composante X_3 rend compte des rotations du système capteur lui-même autour de l'axe vertical passant par son point fixe (fig. I - 19).

L'enregistrement de cette valeur donne une indication sur les déplacements de l'axe de rotation de la tête.

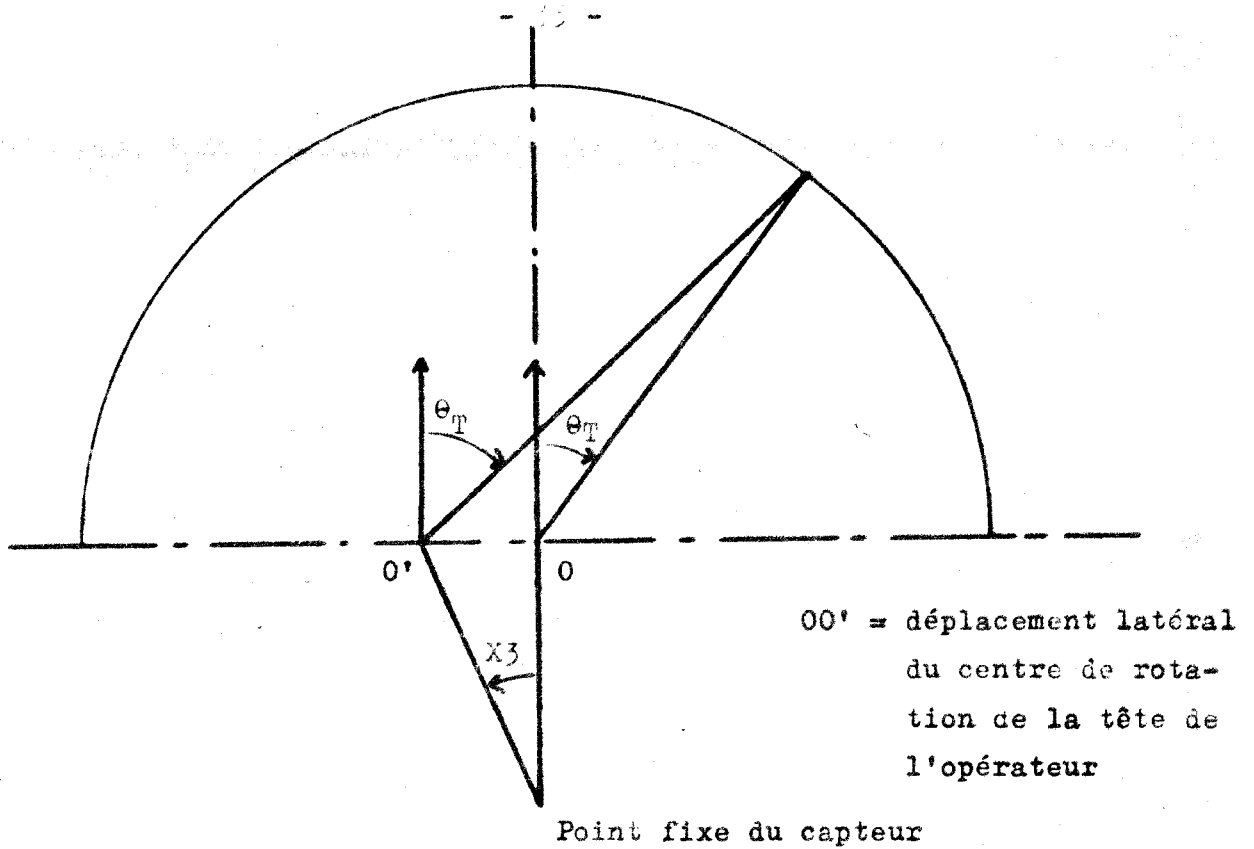


FIGURE I - 19 : Réle de la composante X_3 du capteur de tête.

rend compte des déplacements.

Remarque : Ce capteur est utilisé par ailleurs dans des tâches de détection de symboles visuels dans l'espace (15). Lors de ces expériences les six composantes du capteur sont enregistrées.

La tension délivrée par les circuits électroniques associés au capteur est de la forme :

$$V_{\theta_T} = \frac{\theta_T}{100} \quad V_{\theta_T} \text{ en volts, } \theta_T \text{ en degrés.}$$

De même V_{θ_e} est la tension recueillie relative à la position spatiale des stimulus avec

$$V_{\theta_e} = \frac{\theta_e}{100}$$

V.3 - Enregistrement des données

Cinq signaux sont enregistrés :

- θ_e = entrée échelon de position (position spatiale du stimulus).
- θ_s = sortie principale (position spatiale de la main).
- $|\theta_e - \theta_s|$ = valeur absolue de l'erreur manuelle commise.
- θ_T = sortie secondaire (mouvement de rotation de la tête
Z + X₃).
- θ_{x_3} = rotation autour du point fixe du capteur.

Toutes ces positions angulaires converties en tensions correspondantes sont comprises entre 0 et 1,8 V, compte tenu de nos systèmes enregistreurs.

CONCLUSION

Le dispositif expérimental décrit permet d'élaborer le protocole proposé au chapitre suivant.

L'emploi d'un capteur des mouvements de la tête a orienté plus particulièrement notre protocole vers l'étude du rôle des mouvements de la tête dans une tâche de localisation spatiale de stimulus sonores ou visuels.

Il est cependant possible de réaliser d'autres types d'expériences qui ne nécessitent pas ou peu de modifications des éléments constitutifs de ce dispositif. Il est possible par exemple de faire varier les caractéristiques du stimulus (fréquence, intensité) ou d'étendre le champ de présentation de ces stimulus à un espace à deux dimensions, ou encore de présenter simultanément plusieurs stimulus à l'opérateur.

CHAPITRE II

P R O T O C O L E E X P E R I M E N T A L

E T

D E F I N I T I O N D E S P A R A M E T R E S

C O M P O R T E M E N T A U X

---ooOoo---

INTRODUCTION

Afin de mettre en évidence le rôle des mouvements de la tête, dans le processus de localisation spatiale de stimulus sonores et visuels, chaque sujet a été soumis à plusieurs expériences. Celles-ci diffèrent les unes des autres par des modifications du protocole expérimental : introduction ou non d'une boucle de retour de l'information de sortie Θ_s , fixation ou non de la tête de l'opérateur face au stimulus central.

Ce chapitre présente l'ensemble du protocole expérimental et décrit les diverses expériences réalisées par les opérateurs humains, en précisant les caractéristiques de l'information appréhendée par le sujet lors des diverses tâches.

L'analyse des réponses manuelles et céphaliques obtenues, permet de définir les paramètres comportementaux de l'opérateur humain dans ces tâches de localisation spatiale en vue d'une modélisation du système.

I - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'opérateur est installé dans la cabine expérimentale après une série de tests destinés à contrôler ses acuités visuelle et auditive.

I.1 - Tests préliminaires

Les sujets ont été soumis à des tests sommaires de campimétrie et d'audiométrie :

- Les tests de campimétrie ont consisté à explorer le champ visuel de l'opérateur dans le plan horizontal. Les résultats obtenus montrent que les sujets ont tous un champ de vision correcte supérieur à 140 degrés ($\pm 70^\circ$ par rapport à l'axe du regard) ; rappelons que l'étendue du champ de présentation des stimulus (chapitre I) est de 120 degrés ($\pm 60^\circ$ par rapport à la position de repos).
- Les tests d'audiométrie destinés à vérifier l'acuité auditive montrent (fig. II - 1), pour les fréquences sonores considérées (800 et 1 000 Hz), que tous les sujets ont un niveau d'audibilité nettement suffisant et qu'aucun d'entre eux ne présente de dissymétrie notable au niveau de l'audition (les différences de perception entre les deux oreilles ne dépassent jamais 10 dB).

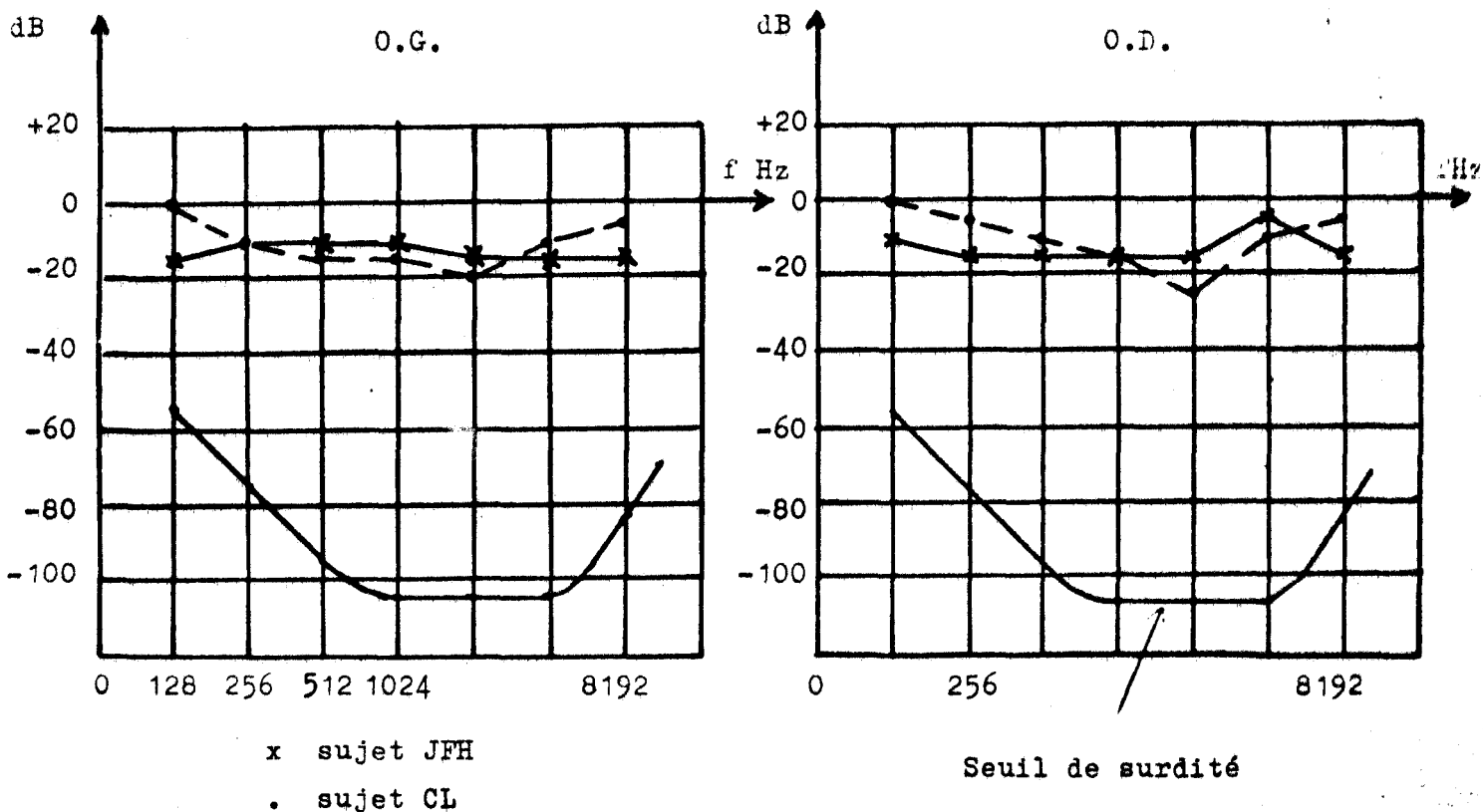


FIGURE II - 1 : Audiogrammes

I.2 - Installation du sujet dans la cabine

L'opérateur est assis librement sur un siège d'odontologie, placé au centre de la cabine ; ce siège possède un repose-pieds et son dossier est galbé ; il n'est donc pas absolument nécessaire d'attacher le sujet ; ceci pouvant amener une gêne pour l'opérateur et perturber ses mouvements de tête.

Le sujet fixe un repère situé devant lui (stimulus visuel central) et on procède alors à divers réglages (fig. II - 2) :

- Le réglage d'inclinaison du dossier du siège permet de positionner la tête du sujet de façon à ce que l'axe principal de rotation de la tête (rotation gauche droite) soit confondu a-

vec l'axe du demi-cylindre de la cabine expérimentale (chapitre I). (La méthode de repérage de l'axe de rotation de la tête est décrite en Annexe I).

Remarque : Ce réglage n'est pas de grande amplitude ($< 10^\circ$) puisqu'il corrige les différences inter-individuelles concernant la position relative de la tête par rapport aux épaules et au dos lorsque le sujet est assis le plus naturellement possible.

- Le réglage de hauteur de l'assise du siège permet de positionner les yeux du sujet dans le plan horizontal passant par les stimulus.
- Le réglage de la fixation du capteur des mouvements de la tête sur le casque porté par l'opérateur est décrit en Annexe I.
- Le réglage de la longueur du bras horizontal du levier et de la position de la poignée permet d'adapter le levier à la morphologie de l'opérateur ; ce réglage est effectué de telle façon que le plan passant par la main et l'épaule du sujet soit horizontal, l'opérateur ayant le bras légèrement fléchi.

Remarque : Lors de nos expériences, seul le réglage de la poignée a été nécessaire. La longueur du bras horizontal du levier étant de 45 cm.

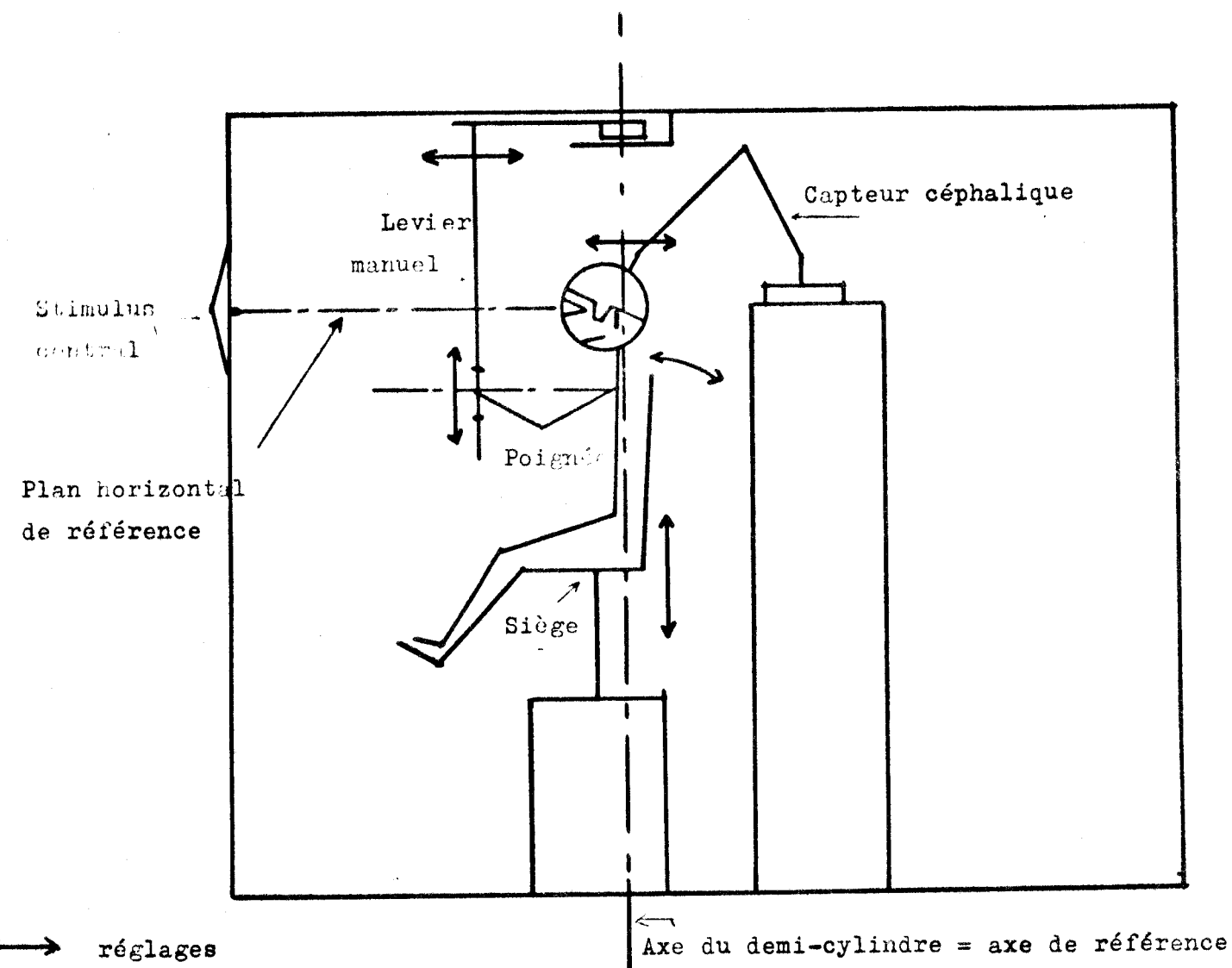


FIGURE II - 2 : Installation du sujet dans la cabine

I.3 - Déroulement des expériences

Les expériences se déroulent dans l'obscurité complète ; celles relatives à la localisation de stimulus sonores sont effectuées les yeux fermés afin qu'aucune information visuelle, si minime soit-elle, ne soit apportée à l'opérateur.

Au début de chaque expérience l'opérateur est en position de repos face au stimulus (signalons que tous nos sujets sont droitiers). L'expérimentateur enregistre et vérifie les conditions expérimentales initiales et la séquence d'apparition des stimulus est déclenchée.

L'opérateur a comme seule consigne : pointer le levier le plus rapidement et le plus exactement possible vers le stimulus ; aucune consigne particulière ne lui est donnée concernant ses mouvements de tête.

La séquence d'apparition des stimulus est donnée en Annexe III ; signalons toutefois qu'après chaque localisation d'un stimulus périphérique, l'opérateur doit revenir à sa position de repos définie par l'apparition du stimulus central.

A la fin de la séquence on relève une dernière fois, à des fins de comparaison, les conditions expérimentales correspondant à la position de repos de l'opérateur.

II - ELABORATION DE LA BOUCLE DE RETOUR ET CARACTERISTIQUES DES INFORMATIONS APPREHENDÉES PAR L'OPERATEUR LORS DU POINTAGE

Lors d'une tâche manuelle (poursuite d'une cible, commande d'engins), l'opérateur humain est plus ou moins renseigné sur la position spatiale de sa main ou de son bras par ses perceptions somesthésiques.

Dans nos expériences ce renseignement est important car la notion de "pointage" implique qu'il n'existe aucune amplification ni atténuation dans le système de commande du dispositif de pointage manuel (lors d'un pointage correct le déplacement angulaire du levier est égal à celui du stimulus, voir chap. I § IV.3).

Il nous a semblé intéressant, afin de déceler des différences éventuelles de comportement de l'opérateur humain, de donner à l'opérateur dans certains cas un renseignement supplémentaire sur la validité de son pointage.

La notion de "boucle de retour", empruntée à la théorie des systèmes asservis, signifie que l'opérateur connaît à tout instant (ou à des instants discrets) l'erreur qu'il commet entre la position du stimulus et celle de son organe de commande (levier). On parle alors de boucle de retour "fermée" ou "ouverte" lorsqu'elle n'existe pas.

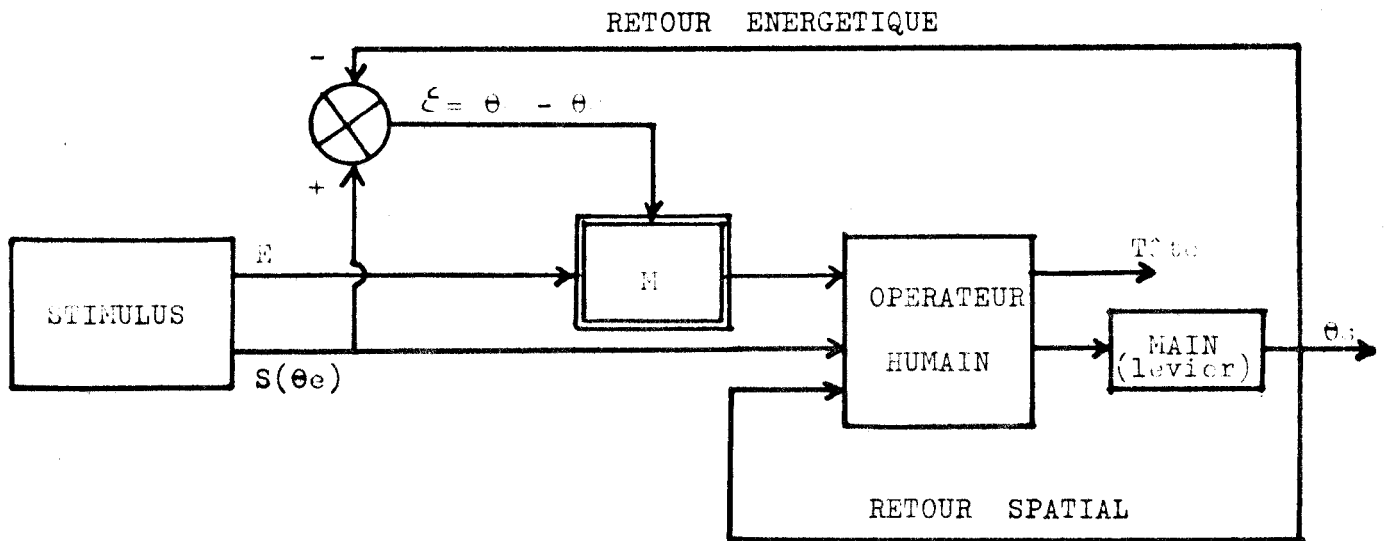
II.1 - Choix de l'information de retour

Les stimulus d'entrée appréhendés par l'opérateur sont définis, dans nos expériences, par leur position spatiale θ_e et par leur contenu énergétique (fréquence, intensité).

L'information représentative de la sortie θ_s , donnée à l'opérateur par l'introduction d'une boucle de retour, peut être spatiale ou énergétique :

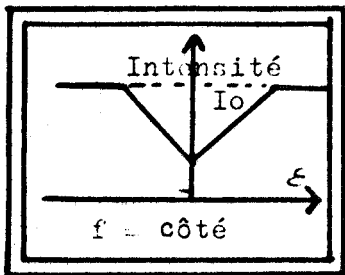
- Une information spatiale suppose que l'opérateur commande par l'intermédiaire de son levier manuel un "point suiveur" lumineux ou sonore de même nature que le "point cible" (stimulus) (fig. II - 3). Un retour de ce type est réalisable ; mais s'il est aisé à mettre en oeuvre dans des tâches de détection de stimulus visuels (25) il peut entraîner ici de grandes perturbations dans la localisation d'un stimulus sonore du fait de la présence simultanée de deux sources (points "cible" et "suiveur").

- Une information énergétique peut être donnée à l'opérateur en modulant certains paramètres caractéristiques du stimulus (intensité, fréquence) par l'erreur manuelle commise entre la position spatiale du stimulus (θ_e) et celle du levier (θ_s) (fig. II - 3).



E = Contenu énergétique
(fréquence, intensité)
S = Contenu spatial (θ_e)
M = Modulation

Exemple de Modulation



Modulation de l'intensité du stimulus par l'erreur permanente manuelle.

FIGURE II - 3 : Boucle de retour - Information spatiale ou énergétique.

Ce type de retour est souvent employé dans des tâches de pistage en compensation de stimulus sonores dans lesquelles la position spatiale de la source reste fixe : haut parleur placé devant l'opérateur (7) ou écouteurs (6).

Dans les tâches de localisation spatiale de stimulus sonores ou visuels, l'utilisation d'un tel retour implique que la caractéristique du stimulus-source change à tout instant ($I = f(\theta_e - \theta_s)$ par exemple) ; or il paraît vraisemblable que le procé-

sus de localisation d'un stimulus sonore dépende (26) non seulement de la position de la source dans l'espace mais aussi de ses caractères énergétiques (forme, intensité, fréquence).

Bien qu'une étude systématique de l'influence de ces divers paramètres (spatiaux et énergétiques) sur la localisation spatiale d'un stimulus sonore ou visuel puisse être ultérieurement envisageable, nous nous limitons à étudier l'influence du seul paramètre spatial (θ_e), (le contenu énergétique (voir chapitre I § III des stimulus restant fixe tout au long de l'expérience)).

L'information de retour appréhendée par l'opérateur lors de nos expériences est donc une information énergétique particulière en ce sens qu'elle fait appel à une modulation par "tout ou rien" de l'intensité du stimulus par l'erreur manuelle ($\epsilon_p = \theta_e - \theta_s$) commise par l'opérateur.

II.2 - Caractéristiques de la boucle de retour

L'opérateur perçoit le stimulus visuel ou sonore (contenu énergétique $E = E_0$) tant que l'erreur manuelle (entre les positions spatiale du stimulus et du levier) est supérieure en valeur absolue, à un certain seuil Δ ; lorsque l'erreur devient inférieure à ce seuil le stimulus disparaît totalement (son contenu énergétique devient nul $E = 0$) (fig. II - 4).

Des essais préliminaires ont amené à choisir une valeur de ce seuil égale à 2 degrés.

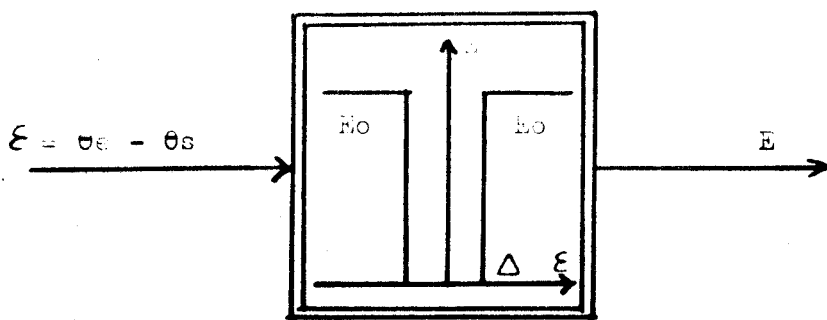


FIGURE II - 4 : Non linéarité modulant l'énergie du stimulus

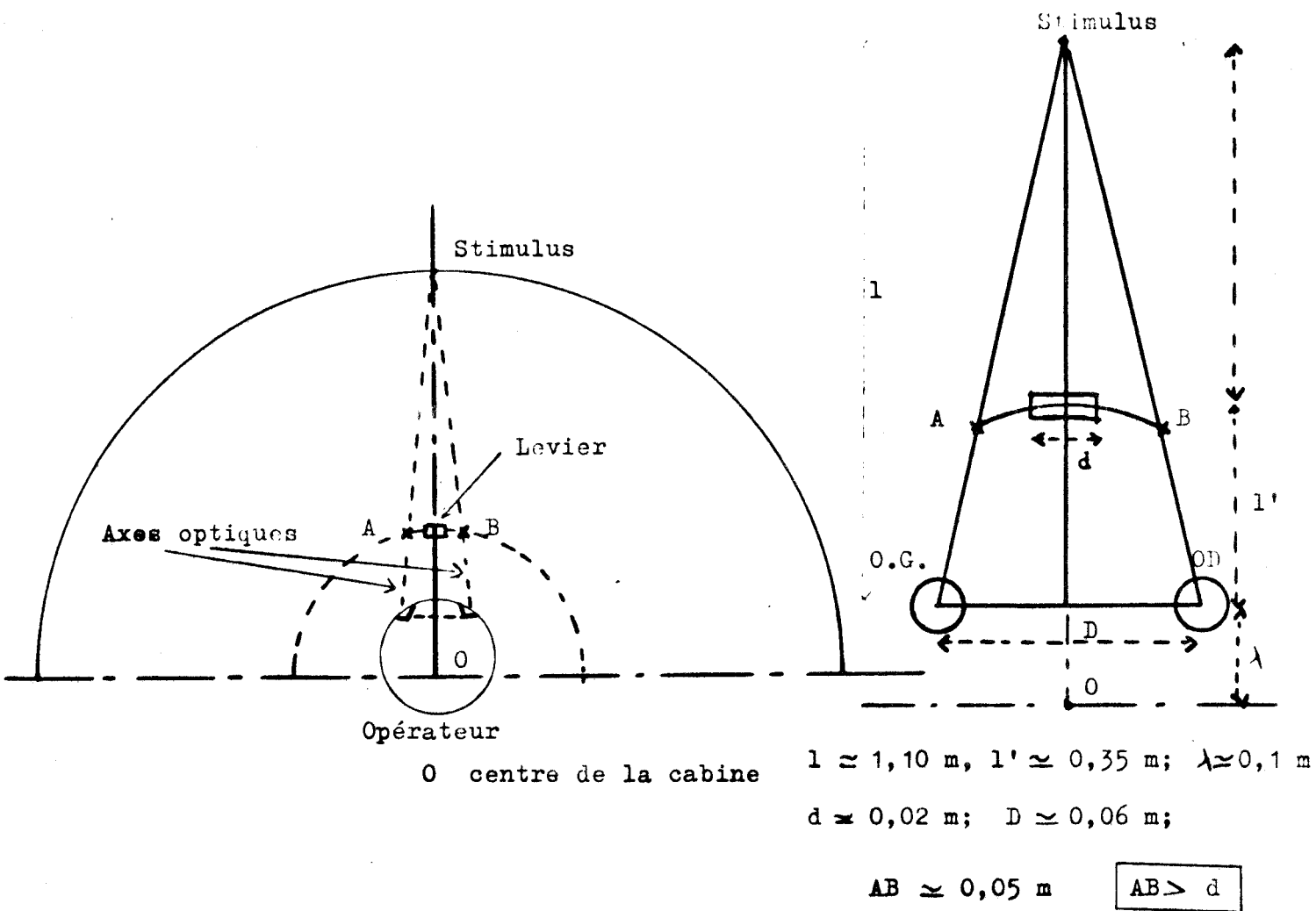
Remarque : Lorsque l'énergie du stimulus devient nulle ($E = 0$), l'opérateur n'a plus d'information directe sur la position apparente θ_e de ce stimulus (la perception de θ_e étant directement liée à celle de E) mais du fait de la consigne la non-perception du stimulus est elle aussi une information sur la position de ce stimulus (lorsque l'opérateur ne perçoit plus le stimulus, son pointage est correct).

La boucle de retour est appelée "ouverte" lorsqu'il n'y a aucune disparition du stimulus lors d'un pointage correct.

II.3 - Problèmes relatifs à la localisation des stimulus visuels

L'implantation du levier dans la cabine expérimentale est telle que la partie verticale du levier est située dans le champ de vision de l'opérateur (chap. I § IV.3).

Lors des expériences sans information de retour (pas d'extinction de lampe) l'opérateur perçoit le stimulus mais, au voisinage du pointage correct, le levier peut masquer le stimulus (fig. II - 5). Ce masquage ne peut intervenir que pour un seul oeil à la fois (point A ou point B, figure II - 5) en raison des caractéristiques géométriques (explicitées figure II - 5) de l'implantation du levier dans la cabine par rapport à la position de l'opérateur humain.



O.G. = oeil gauche

O.D. = oeil droit

FIGURE II - 5 : Masquage du stimulus par le levier

Ce masquage, lorsqu'il intervient, provoque une perte d'information énergétique pour l'opérateur (perte d'information difficile à définir au niveau cortical).

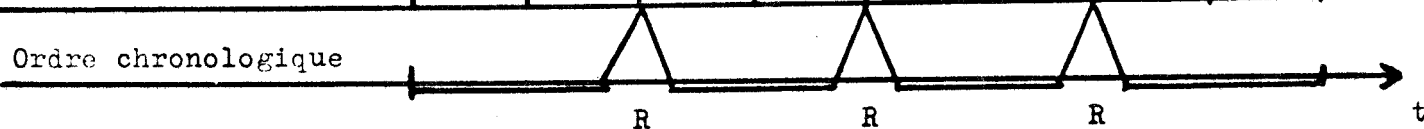
Nous verrons (chap. III) que l'opérateur peut néanmoins être renseigné sur la position de son levier (l'erreur manuelle permanente peu importante) mais que ce renseignement est nettement moins important que celui qui existe lorsque l'information de retour définie au paragraphe précédent lui est donnée.

III - NATURE DES TESTS EFFECTUES PAR LES OPERATEURS HUMAINS

Les sujets ont effectué huit expériences différentes dont les principales caractéristiques et l'ordre chronologique sont indiqués figure II - 6.

| | | | | | | | | | |
|------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| STIMULUS | Lumineux L | L | | L | | L | | L | |
| | Sonore S | | S | | S | | S | | S |
| BOUCLE DE RETOUR | fermée BF | BF | BF | | | BF | BF | | |
| | ouverte BO | | | BO | BO | | | BO | BO |
| TETE | Libre TL | TL | TL | TL | TL | | | | |
| | Bloquée TB | | | | | TB | TB | TB | TB |
| EXPERIENCES | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

Ordre chronologique



R = Repos de $\frac{1}{2}$ journée



FIGURE II - 6 : Chronologie et caractéristiques des divers tests effectués par l'opérateur humain.

- La première expérience permet à l'opérateur de se familiariser avec la tâche à effectuer : les stimulus sont visuels, le sujet peut bouger la tête librement, et la "boucle de retour", définie au paragraphe précédent, est "fermée".
- La deuxième expérience est identique à la première mais concerne les stimulus sonores.
- Chaque série d'expériences suivantes, qui présente de plus en plus de difficultés ("boucle ouverte" puis tête bloquée en position de repos), est soumise au sujet après une période de repos d'une demi-journée.
- Pour les expériences "tête bloquée", la tête de l'opérateur est maintenue dans sa position de repos (face au stimulus central) par un appui-tête incorporé au dossier du siège et une sangle (fig. II - 7).
Aucune consigne particulière ne lui est donnée concernant les mouvements des yeux.

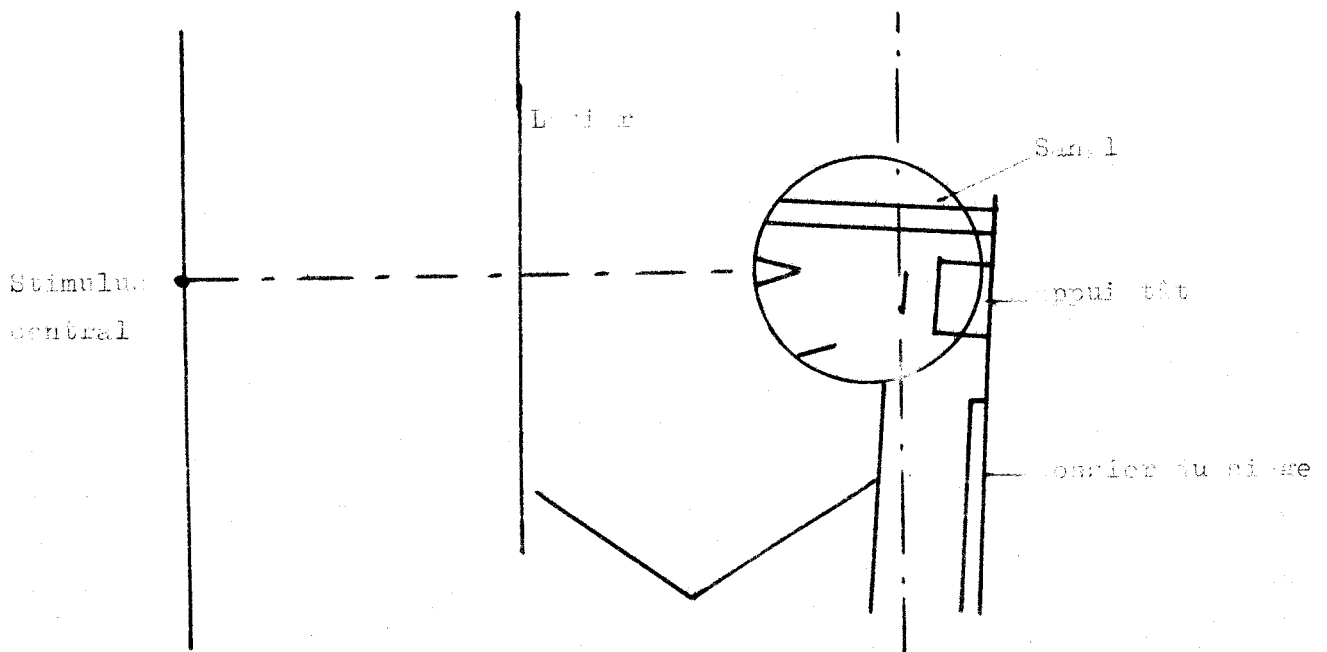


FIGURE II - 7 : Fixation de la tête du sujet

IV - CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DES SUJETS EXPERIMENTES

On rencontre dans les travaux relatifs à l'opérateur humain deux types d'expérimentations différentes ayant chacune leur objectif :

- Soumettre un grand nombre de sujets à une seule expérience, pour faire ensuite une analyse statistique des résultats.
- Soumettre un plus petit nombre de sujets à plusieurs expériences différant les unes des autres par des modifications des conditions expérimentales et analyser ensuite les différences de comportements de ces sujets.

Nous avons retenu la deuxième solution en effectuant huit expériences différentes sur un nombre limité de six sujets ; trois de sexe masculin, trois de sexe féminin, âgés de 22 à 28 ans ; tous d'un niveau d'études supérieures ; leurs fonctions de chercheurs les ont amené à effectuer ces tests avec une forte motivation. Il est à remarquer qu'un seul sujet connaissait le but de nos expériences, ce fait n'a d'ailleurs pas été mis en évidence sur les résultats obtenus.

De plus, afin de déceler des différences éventuelles de comportement chez un même sujet, quelques uns de ceux-ci ont été soumis plusieurs fois à la même expérience (stimulus sonore, "boucle ouverte", tête libre).

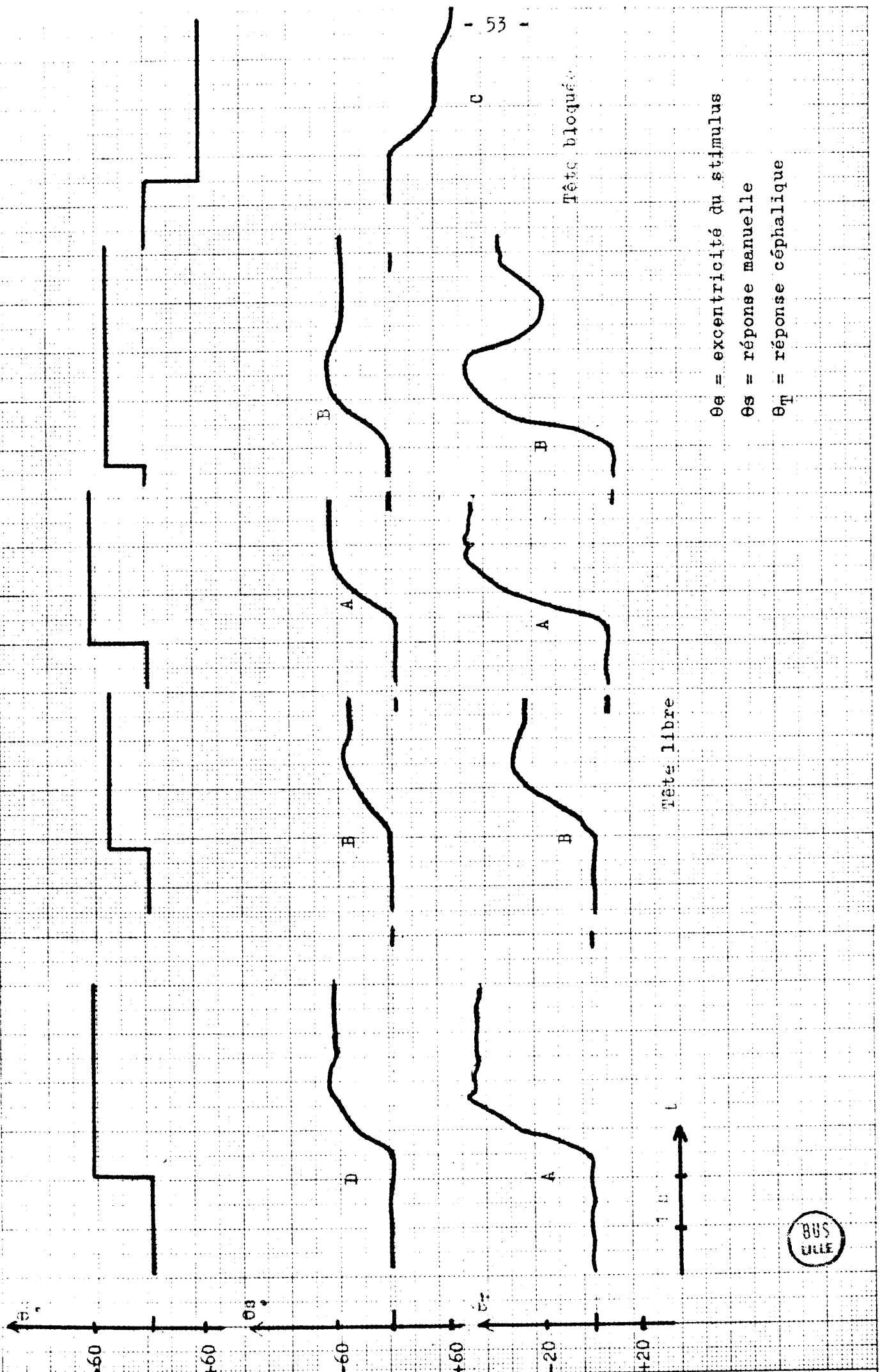
Au contraire d'autres expériences (tête bloquée, "boucle fermée") n'ont été effectuées que par deux sujets étant donné que les résultats ne mettaient pas en évidence des différences de comportement

V - DEPOUILLEMENT DES RESULTATS

DEFINITION DES PARAMETRES COMPORTEMENTAUX

Le traitement informatique des réponses de l'opérateur à des stimulus en échelon de position a été envisagé, mais sa mise au point n'est pas encore à ce jour complètement terminée.

Les réponses observées sur les tracés (figure II - 8) présentent des formes très diverses que l'on peut classer en quatre catégories : avec ajustement continu (type A), dépassement (type B), palier (type C), dépassement et palier (type D).



θ_e = excentricité du stimulus
 θ_s = réponse manuelle
 θ_π = réponse céphalique

FIGURE II - 8 : Différents types de réponses manuelles et céphaliques observées sur les enregistrements.

Les paramètres caractéristiques relevés dans la réponse de l'opérateur à un stimulus échelon de position sont présentés figure II - 9.

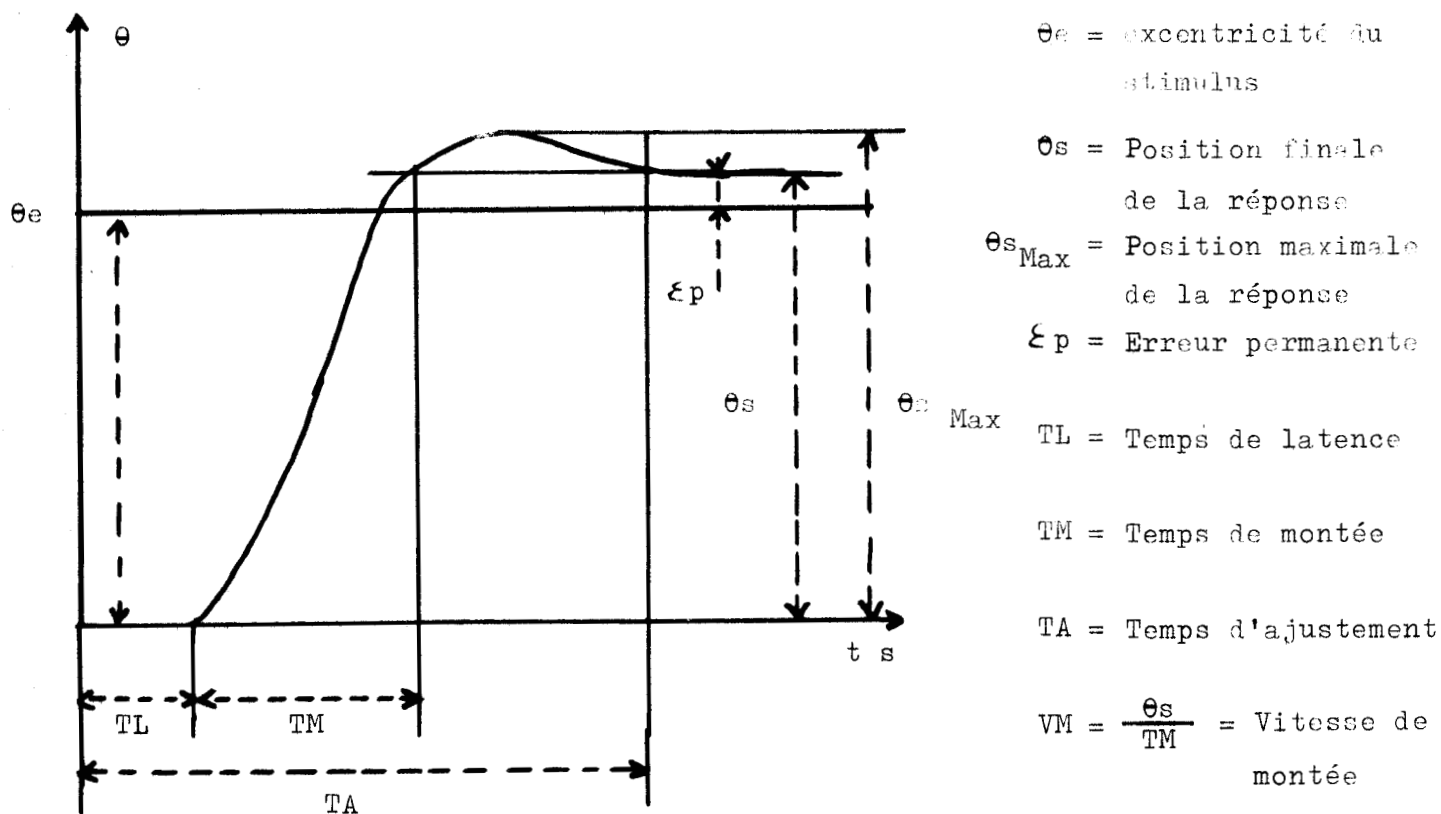


FIGURE II - 9 : Réponse à un échelon de position.

Rappelons que :

- Le temps de latence (TL) est le temps compris entre l'apparition du stimulus et le début de la réponse manuelle ou céphalique.
- Le temps d'ajustement (TA) est le temps compris entre l'apparition du stimulus et le moment où la réponse est constante.
- Le temps de montée (TM) est le temps compris entre le début de la réponse et le moment où la réponse atteint pour la première fois le niveau de sa position finale.

Tous ces paramètres sont relevés pour chaque stimulus tant pour les réponses de la main que pour celles de la tête.

L'analyse des premiers résultats expérimentaux (notamment ceux relatifs aux expériences de localisation de stimulus sonores) a amené la définition d'autres paramètres, découlant des précédents mais caractérisant davantage le comportement "global" de chaque opérateur.

La courbe figure II - 10 illustre la répartition de l'écart entre les temps de latence manuel et céphalique (TLM - TLT) lors d'une expérience de localisation d'un stimulus sonore. On remarque l'importance de la dispersion et que les valeurs des écarts sont aussi bien positives, négatives que nulles. Il paraît alors difficile de dégager un comportement commun pour tous les sujets.

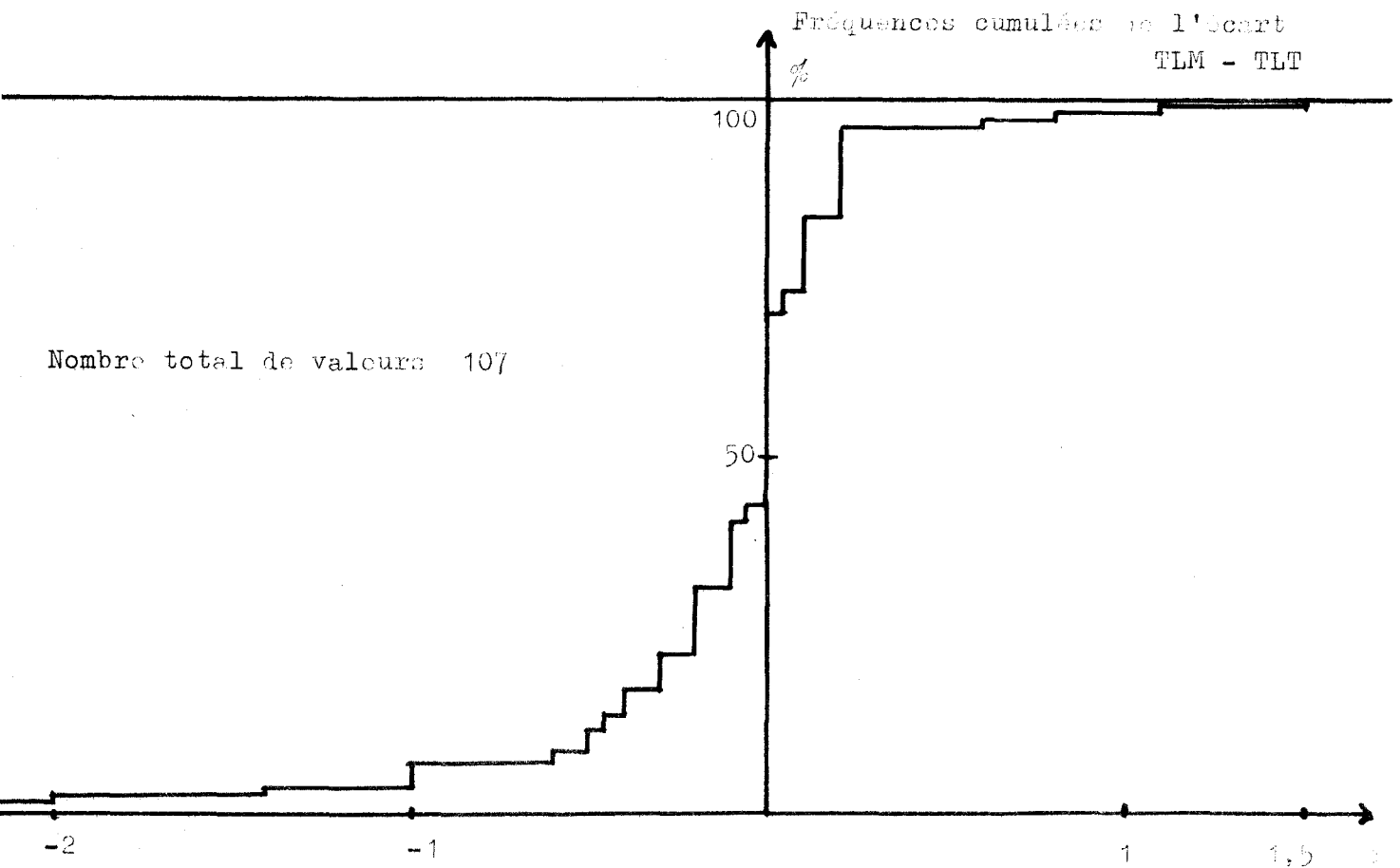


FIGURE II - 10 : Répartition de l'écart entre les temps de latence (TLM - TLT) pour 6 sujets. (Expérience 4)

Les paramètres "globaux" définis ci-après permettent de préciser le comportement de chaque sujet puis (chap. III et chap. IV) de comparer et de classer les sujets entre eux.

- S = Pourcentage de réponses où la valeur de l'écart entre les temps de latence de la main (TLM) et de la tête (TLT) est positive ou nulle pour un opérateur dans une expérience donnée ; S = 80 % signifie que l'opérateur dans 80 % des cas effectue un mouvement de tête avant sa réaction manuelle (ou juste en même temps).

- D = Rapport moyen de l'amplitude finale des mouvements effectués par la tête sur l'amplitude des stimulus pour une expérience donnée.

D grand signifie que l'opérateur effectue des mouvements de tête de grande amplitude.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T i}}{\theta_{e i}} = \left(\frac{\overline{\theta_T}}{\overline{\theta_e}} \right)$$

- C = Pourcentage de "coups au but" réalisés par l'opérateur, pendant une expérience, lors de son pointage manuel vers les stimulus périphériques.

Le pointage est dit correct ("coup au but") lorsque la valeur absolue de l'erreur manuelle permanente est inférieure à un seuil α .

Pour la localisation des stimulus sonores, le seuil α a été fixé à 5°, étant donné que cette valeur correspond à l'erreur manuelle maximale relevée, sur tous les enregistrements, lors du retour manuel de l'opérateur à sa position de repos (pointage du levier vers le stimulus central).

- E = Rapport moyen en valeur absolue de l'erreur manuelle permanente commise par le sujet sur l'excentricité du stimulus.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\epsilon_{pi}}{\theta_{ei}} \right| = \left| \frac{\overline{\epsilon_p}}{\overline{\theta_e}} \right|$$

CONCLUSION

Nous venons de définir le protocole expérimental et de déterminer les paramètres comportementaux de l'opérateur humain dans ces expériences de localisation de stimulus sonores et visuels.

Le protocole expérimental utilisant les stimulus visuels et sonores est identique. Celui-ci est modifié par l'existence ou non d'une information de retour et/ou par le maintien ou non de la position de la tête.

Les modifications expérimentales ont permis de mettre en évidence le rôle des mouvements de la tête et de dégager certains paramètres représentatifs du comportement de l'opérateur humain dans des tâches de localisation. Ceci fait l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE III

ANALYSE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES
DE L'OPERATEUR HUMAIN DANS UNE TACHE DE LOCALISATION
SPATIALE DE STIMULUS VISUELS

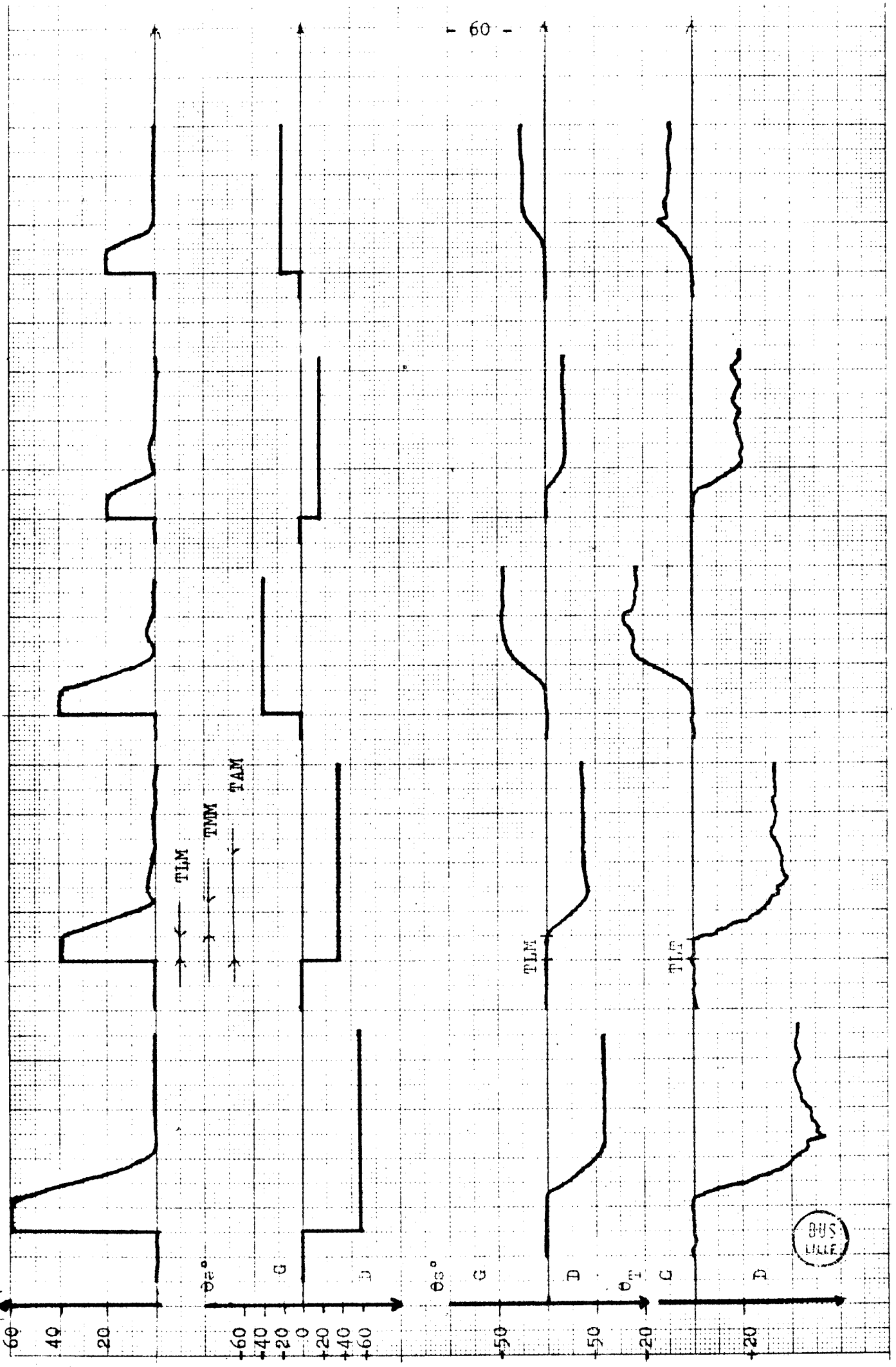
---ooOoo---

INTRODUCTION

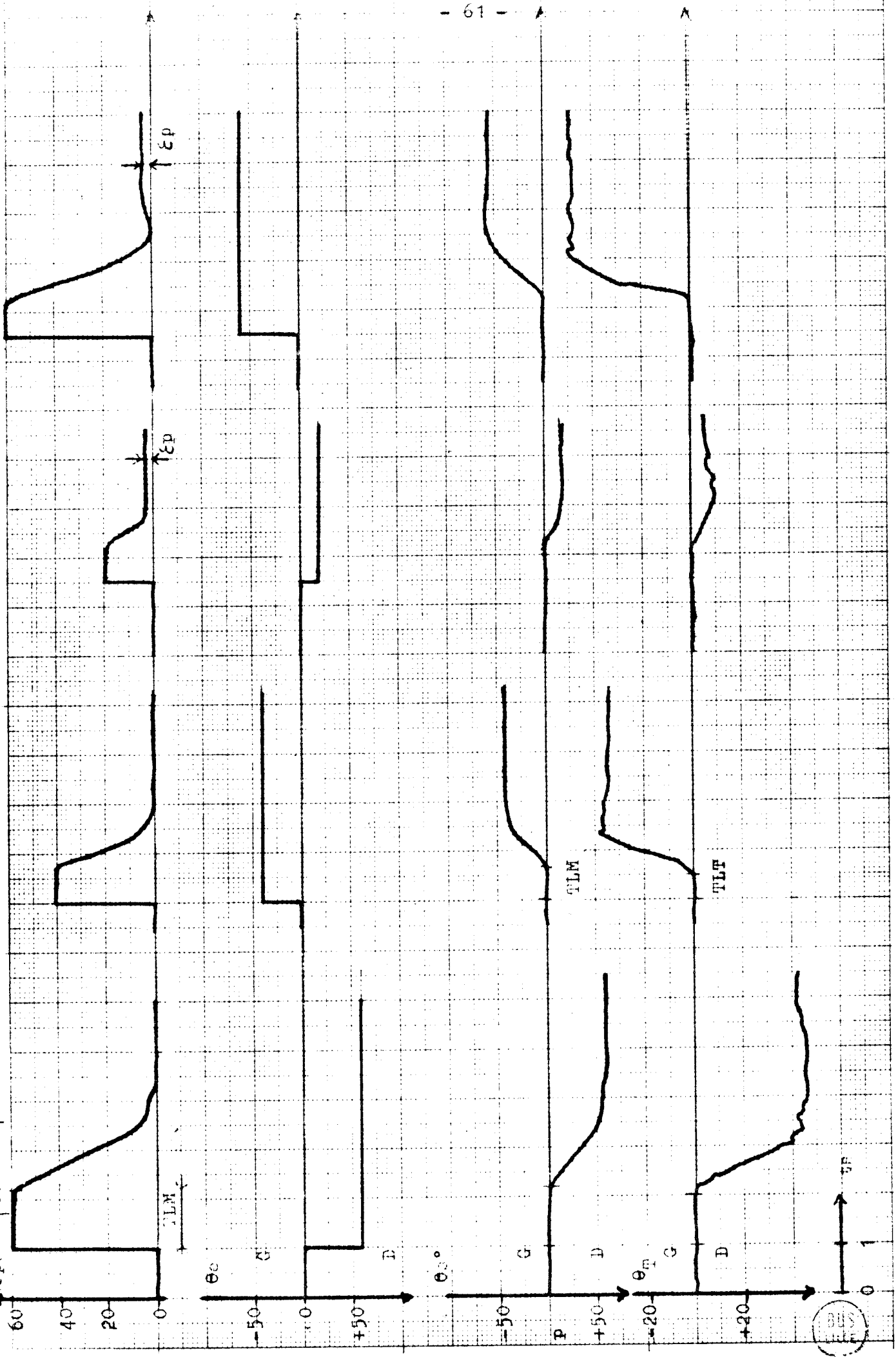
Le but de l'analyse des résultats relatifs à nos expériences consiste à mettre en évidence :

- l'influence de l'excentricité du stimulus (θ_e) sur les réponses manuelles et céphaliques de l'opérateur,
- le rôle des mouvements de la tête sur le processus de localisation du stimulus (influence des réponses céphaliques sur les réponses manuelles),
- l'influence des modifications des conditions expérimentales (introduction d'une boucle de retour, fixation de la tête) sur le comportement de l'opérateur.

Ce chapitre expose les diverses réactions de l'opérateur humain à un stimulus visuel périphérique.

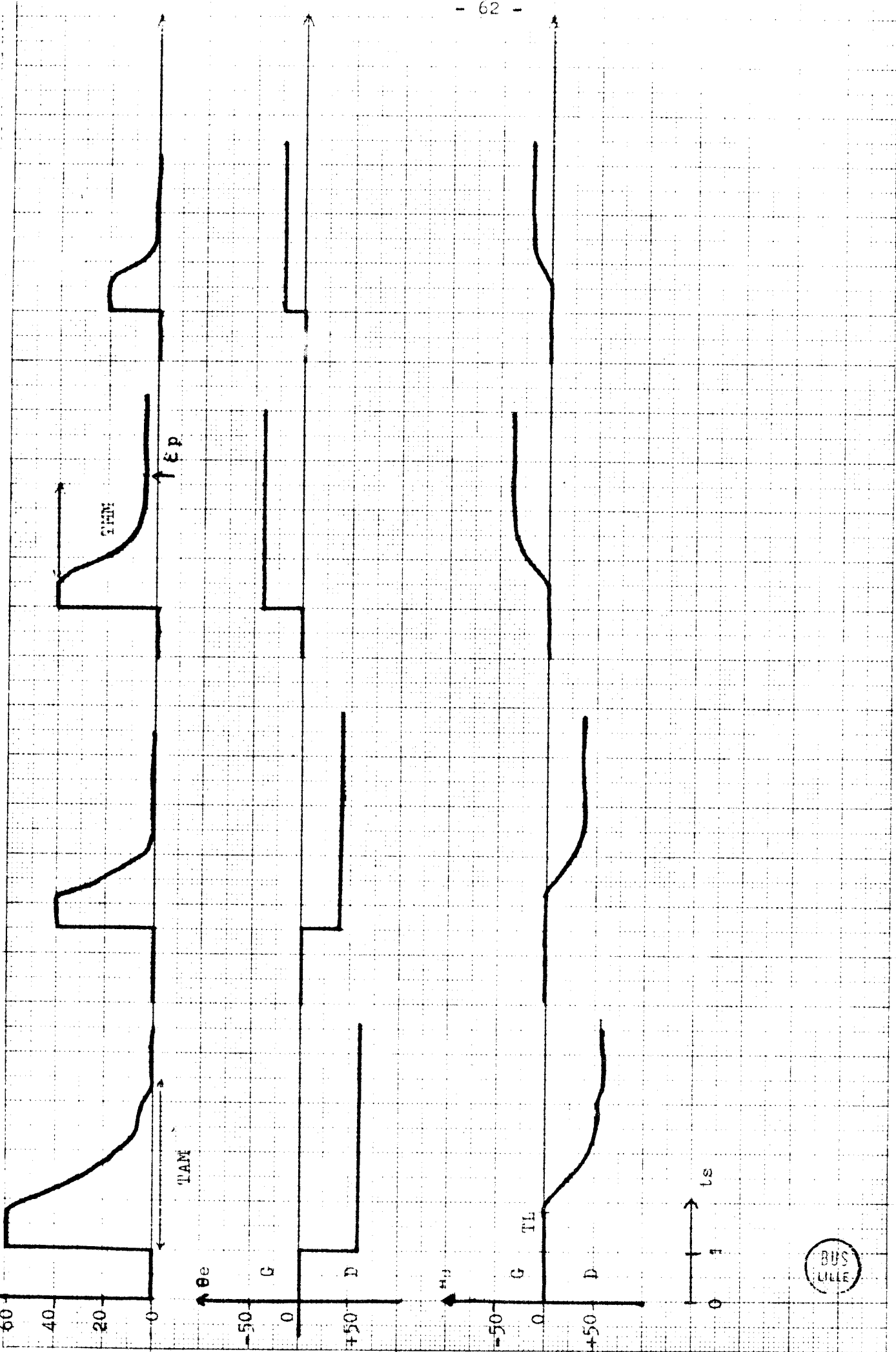


Enregistrements, figure III - 1, expérience 1 (Tête libre, boucle fermée) Sujet MB



Enregistrements, figure III - 2, expérience 3 (Tête libre, boucle ouverte) sujet MB

BUS
TLF



Enregistrements, figure III - 3, expérience 7 (Tête bloquée, boucle ouverte) sujet MB



I - ANALYSE DES DONNEES RELEVÉES SUR LES ENREGISTREMENTS

L'examen des enregistrements figures III - 1, III - 2, III - 3, met en évidence les réponses obtenues respectivement dans les expériences appelées "tête libre - boucle fermée" (expérience 1), "tête libre - boucle ouverte" (expérience 3), "tête bloquée - boucle ouverte" (expérience 7). Les diverses réponses manuelles et céphaliques peuvent être analysées par la caractérisation :

- de la réaction initiale de l'opérateur au stimulus,
- du régime dynamique des réponses correspondant à la phase de recherche du stimulus,
- du régime permanent lors de la stabilisation des mouvements manuels et céphaliques.

Cette analyse a été effectuée à l'aide de méthodes classiques rencontrées en statistique notamment :

- le calcul de la valeur moyenne ($\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$), de l'écart type $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{M})^2}{n}}$, du coefficient de variation ($V = \frac{\sigma}{\bar{M}}$), qui permet d'obtenir une indication chiffrée sur la répartition et la dispersion des résultats,
- la représentation graphique des histogrammes et des courbes de fréquences cumulées, qui visualise la répartition des paramètres,
- l'application du test de "t" de Student (16) qui permet la comparaison des moyennes entre deux populations en donnant le degré de significativité de la différence entre celles-ci, par exemple comparaison entre les temps de latence manuels (TLM) et céphaliques (TLT),
- le calcul du coefficient de corrélation (16) et les courbes de régression linéaire qui établissent, dans certains cas, la re-

lation entre deux séries de valeurs.

Ces outils statistiques sont utilisés pour la caractérisation des paramètres exposés dans les paragraphes suivants.

II - ETUDE DES TEMPS DE LATENCE MANUELS (TLM) ET CEPHALIQUES (TLT)

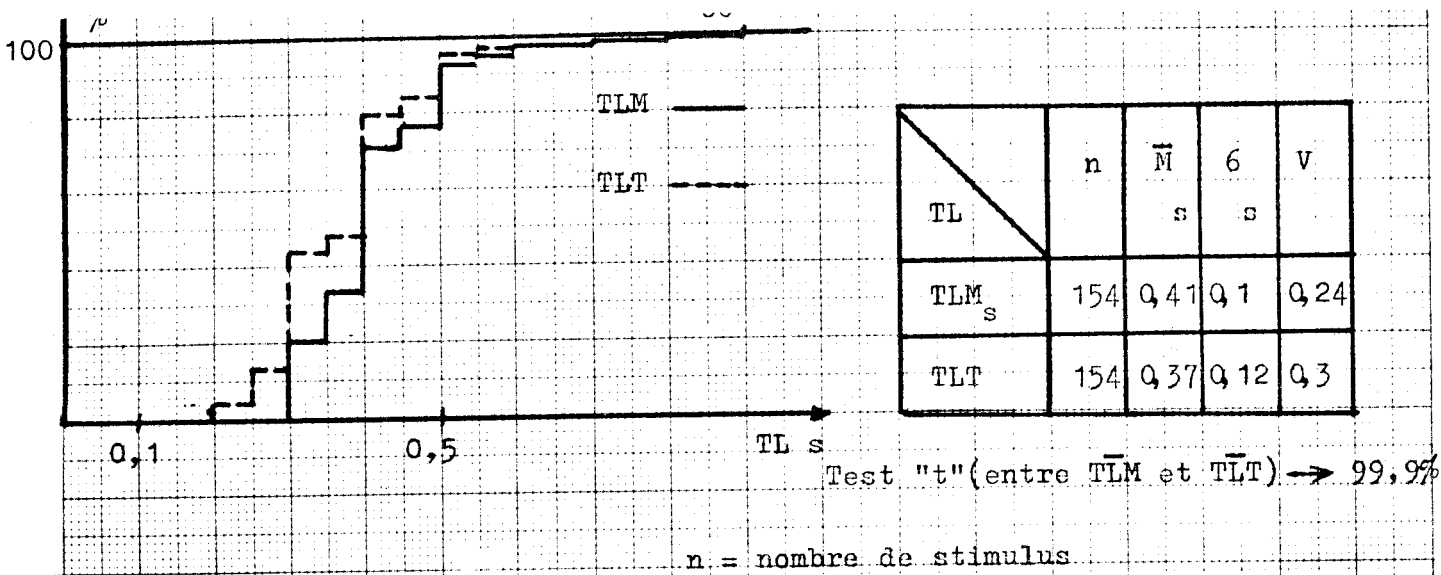
Le début de la réaction de l'opérateur à un stimulus visuel apparaît après un temps de latence fonction principalement des caractéristiques de l'entrée appréhendée (θ_e , I_e , etc...), du type de réponse demandée et des conditions expérimentales (17). L'étude de ces temps de latence donne alors une première indication sur le comportement de l'opérateur dans une tâche de localisation spatiale de stimulus visuels.

II.1 - Analyse des temps de latence dans les conditions de l'expérience 1 : "tête libre - boucle fermée" (Enregistrement figure III - 1)

Les résultats concernant les temps de latence de la main et de la tête sont présentés figure III - 4. Cette première analyse ne considère pas l'amplitude du stimulus. La dispersion est importante mais on observe qu'en moyenne la réaction céphalique de l'opérateur (TLT = 0,37 s) intervient avant sa réaction manuelle (TLM = 0,41 s).

Ce résultat est confirmé par la valeur prise par "t" (différence des moyennes significative à plus de 99,9 %) et par les valeurs positives ou nulles de l'écart entre les temps de latence manuels et céphaliques (paramètre S cf. chapitre II § V) relevées pour chaque sujet, indiquées tableau figure III - 4 bis.

L'étude des variations des temps de latence en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus, figure III - 5, révèle une augmentation non négligeable de ces temps de latence aux fortes excentricités ($\pm 60^\circ$). Signalons toutefois que pour les faibles amplitudes du stimulus la grande dispersion des résultats ($V \simeq 0,2$) ne permet pas de déceler une variation.



III - 4bis

| SUJETS | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL | S=% (TLM-TLT ≥ 0) |
|--------|-----|----|----|----|-----|-----|----------------------|
| S % | 84 | 92 | 89 | 98 | 81 | 100 | |

FIGURE III - 4 : Répartition des temps de latence manuels et céphaliques et valeurs des écarts entre ces temps de latence (paramètre S) (Exp. 1).

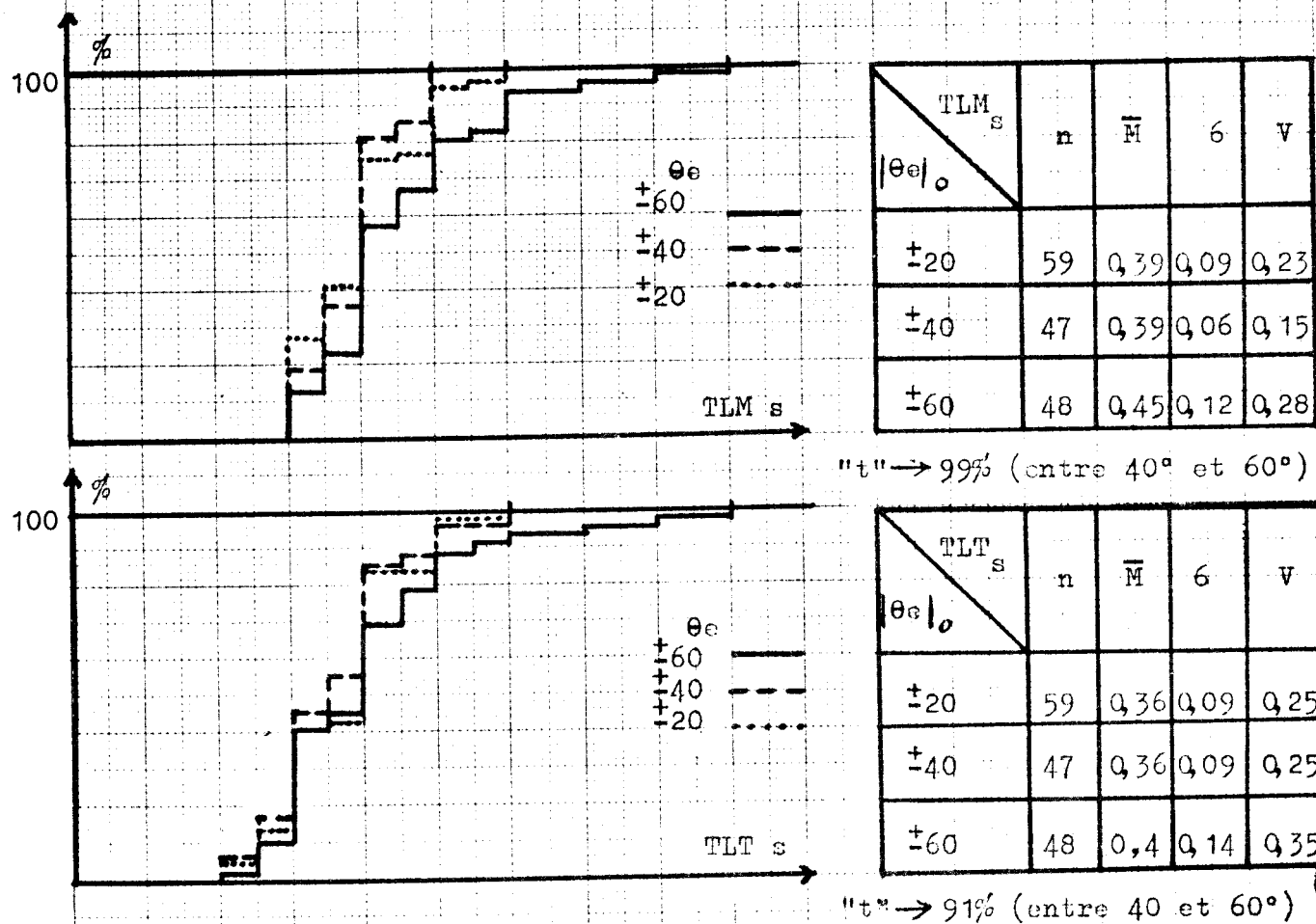


FIGURE III - 5 : Influence de l'excentricité θ_e du stimulus sur les courbes de fréquences cumulées et sur les valeurs moyennes des temps de latence manuels et céphaliques (Exp. 1).

805
LILLE

La croissance de ces temps de latence et le problème relatif à la dispersion des résultats ont déjà été signalés dans des travaux antérieurs (18) où il s'agissait de mettre en évidence la relation entre la valeur du temps de réaction de la réponse manuelle (appui sur un bouton poussoir) en fonction de l'excentricité du stimulus visuel périphérique (figure III - 6).

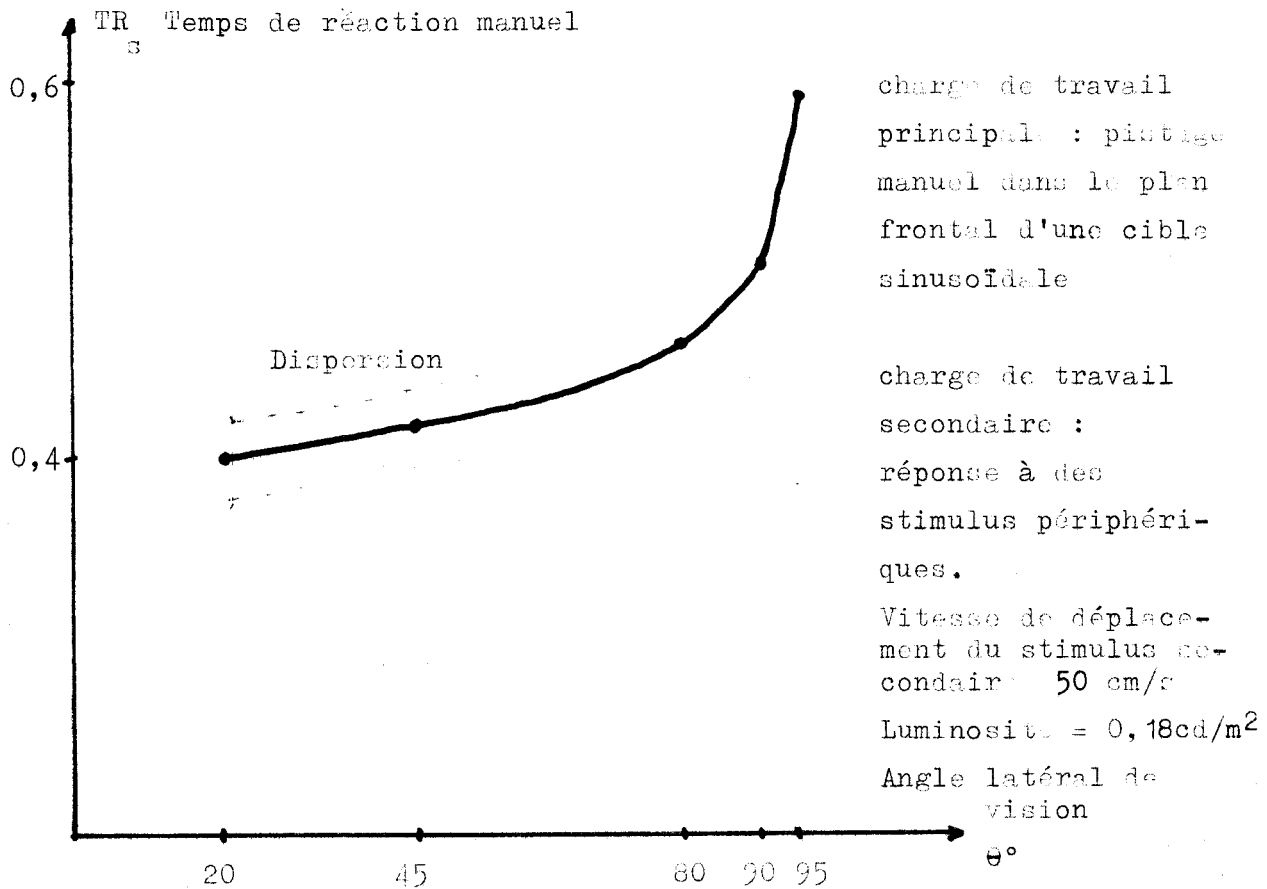


FIGURE III - 6 : Influence de l'excentricité du stimulus (θ_e) sur le temps de réaction manuel dans un test de double tâche (18).

L'une des origines de la croissance des temps de latence manuels et céphaliques provient des caractéristiques du capteur visuel en fonction de l'excentricité du stimulus (19).

Signalons encore que le temps de latence manuel moyen relevé lors d'une tâche de poursuite manuelle en vision extra-fovéale d'une cible située à une excentricité de 35° ($\overline{TLM} = 0,39$ s) corrobore nos résultats.(20)

Remarque : Les résultats représentés sur les tableaux faisant intervenir θ_e comme paramètre confondent les excentricités positives et négatives ($\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 60^\circ$) ; le dépouillement des résultats n'ayant pas fait apparaître de différences significatives.

II.2 - Influence de la suppression de la boucle de retour sur les temps de latence manuels et céphaliques (Expérience 3) (Enregistrement figure III - 2)

La modification de l'information de retour, engendrée par la suppression de la boucle, chapitre II § II, se traduit par une difficulté supplémentaire pour l'opérateur humain dans le processus de localisation du stimulus, difficulté que nous rencontrerons encore dans les paragraphes suivants. En effet après que le sujet a effectué la localisation du premier stimulus (où il n'apparaît pas de différence significative avec l'expérience précédente) il constate qu'il est moins renseigné sur son pointage manuel et sur l'orientation de la tête vers le stimulus à cause de la non disparition de celui-ci. Cette imprécision engendre une appréhension plus importante du sujet vis à vis de sa tâche et s'illustre sur les enregistrements par (tableau et figure III - 7) :

- une augmentation des temps de latence manuels et céphaliques (figure III - 7 a)
- une diminution de l'écart existant entre les temps de latence TLM et TLT, figure III - 7b, (0,02 s au lieu de 0,04 s dans les expériences précédentes cf. figure III - 4 et figures III - 7b), figure III - 7c.

- une grande dispersion des résultats masquant d'éventuelles variations des temps de latence en fonction de l'excentricité du stimulus, figures III - 7 d.

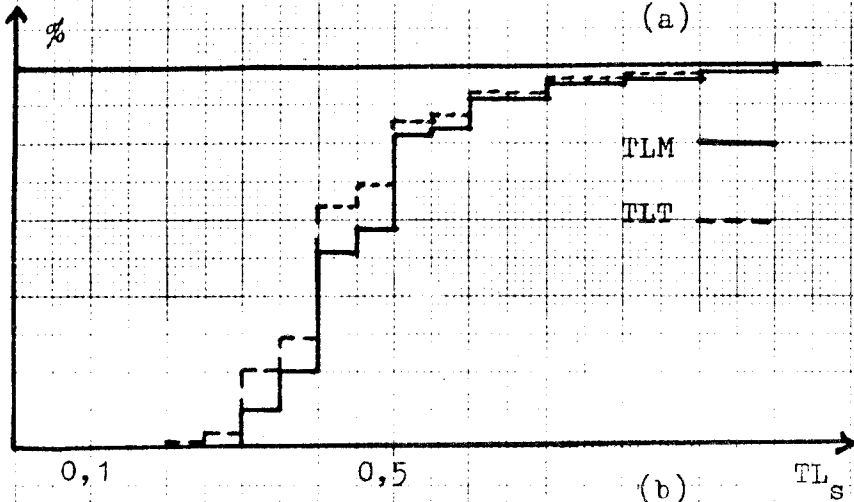
Les conditions expérimentales initiales étant les mêmes que dans les expériences précédentes, la présence ou non de la boucle de retour ne devrait pas agir sur les valeurs des temps de latence pouvant principalement se décomposer en des temps de conduction de l'information, de calcul ou de décision et de mise en oeuvre de la réaction motrice (21). On peut alors supposer que l'augmentation du temps de latence est due principalement à un temps de calcul ou de décision plus important consécutif à la plus grande difficulté du test.

Par ailleurs la dispersion intra et inter-individuelle (valeurs du paramètre S et courbes de fréquences cumulées figure III - 7) ne permet pas de conclure sur les modifications apportées par la suppression de la boucle de retour dans les relations entre temps de latence et excentricité du stimulus.

| Exp. | \overline{TL}_s | \overline{TLM}_s | \overline{TLT}_s |
|-----------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1 (BF-TL) | | 0,41 | 0,37 |
| 3 (BO-TL) | | 0,46 | 0,44 |

Test "t" → 99,9 %

(a)



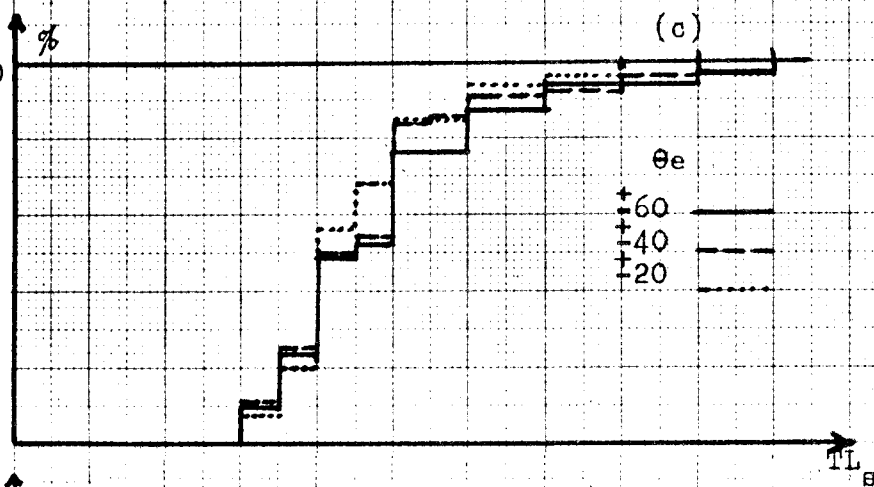
| TL | n | \overline{M} | σ | V |
|---------|-----|----------------|----------|------|
| TLM_s | 133 | 0,46 | 0,12 | 0,25 |
| TLT_s | 129 | 0,44 | 0,14 | 0,32 |

Test "t" → 80 %

(b)

n = nombre de stimulus

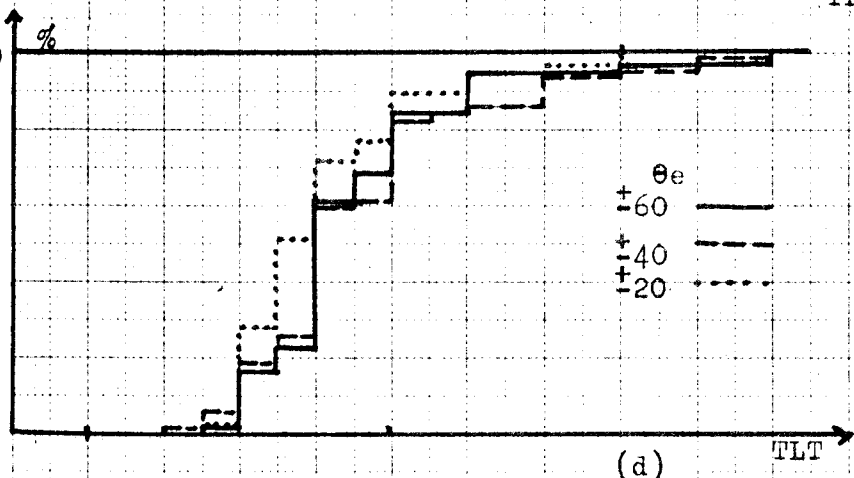
| SUJETS | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
|--------|-----|-----|----|----|-----|-----|
| S % | 58 | 100 | 89 | 72 | 95 | 100 |



(c)

| $ \theta_e _s$ | n | \overline{M} | σ | V |
|----------------|----|----------------|----------|------|
| ± 20 | 55 | 0,46 | 0,13 | 0,28 |
| ± 40 | 35 | 0,45 | 0,11 | 0,24 |
| ± 60 | 43 | 0,48 | 0,15 | 0,31 |

"t" → 30% (entre 20 et 40)
75% (entre 40 et 60)



(d)

| $ \theta_e _s$ | n | \overline{M} | σ | V |
|----------------|----|----------------|----------|------|
| ± 20 | 52 | 0,45 | 0,16 | 0,35 |
| ± 40 | 35 | 0,41 | 0,12 | 0,29 |
| ± 60 | 42 | 0,44 | 0,13 | 0,3 |

"t" → 75% (entre 20 et 40) 70% (entre 40 et 60)

FIGURE III - 7 : Influence de la suppression de la boucle de retour sur les temps de latence manuels et céphaliques (Exp. 3).

II.3 - Influence de la fixation de la tête, en position de repos, sur les temps de latence manuels (boucle de retour fermée et ouverte)

L'analyse des réponses obtenues dans les expériences avec ou sans boucle de retour, lorsque la tête est maintenue en position de repos, dirigée vers le stimulus central (cf. chapitre II § III), ne montre pas de différences significatives entre les temps de latence manuels relevés avec ou sans maintien de la tête.

Dans le cas des expériences effectuées sans boucle de retour (expérience 7) les résultats indiqués figure III - 8 ne révèlent pas de modifications des temps de latence manuels introduite par la fixation de la tête.

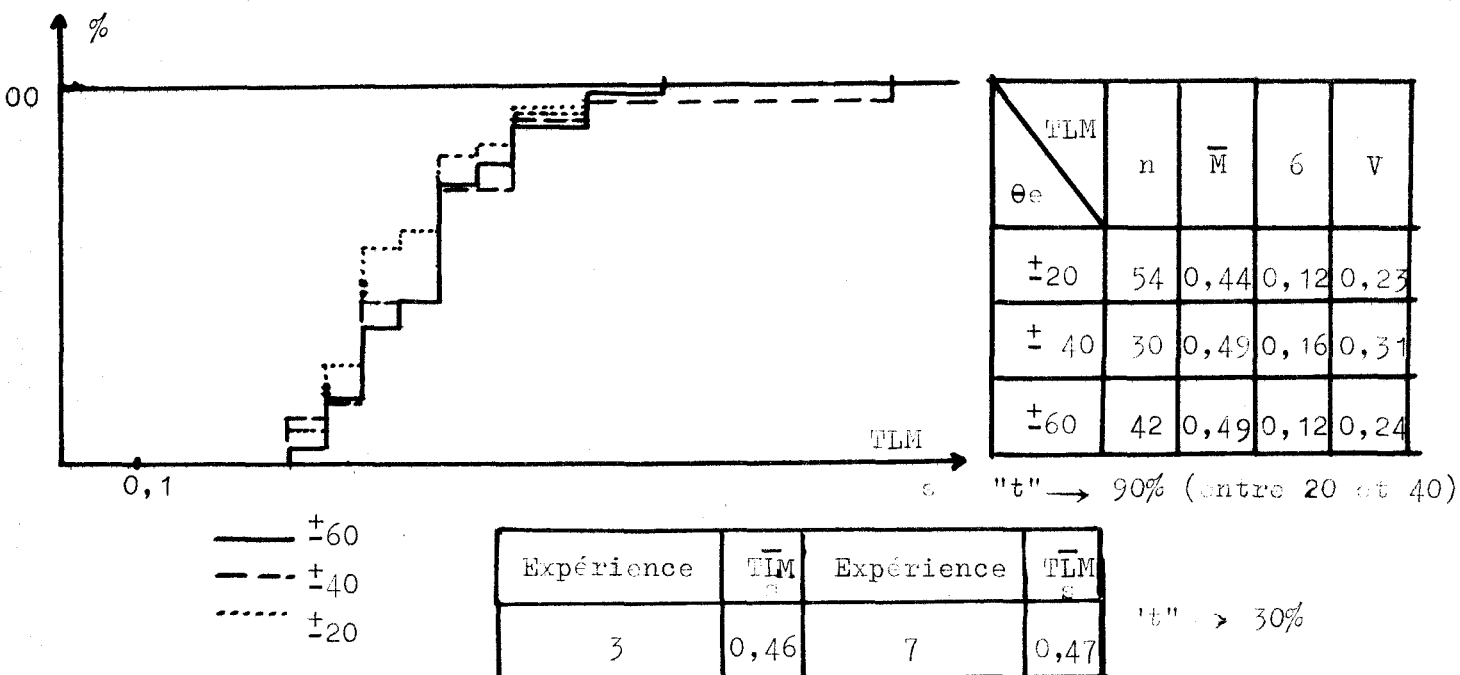


FIGURE III - 8 : Courbes de fréquences cumulées et valeurs moyennes des temps de latence manuels en fonction de l'excentricité du stimulus lorsque la tête est fixe (expérience 7).

II.4 - Rappel des principaux résultats relatifs aux temps de latence manuels et céphaliques

Malgré la grande dispersion des résultats, ceux-ci font apparaître que :

- la réponse céphalique de l'opérateur humain à un stimulus visuel périphérique débute généralement avant la réponse manuelle,
- les temps de latence manuels et céphaliques augmentent aux fortes excentricités du stimulus visuel,
- l'augmentation sensible des temps de latence, amenée par la suppression de la boucle de retour, semble être à l'origine d'une difficulté supplémentaire de la tâche de localisation, figure III - 9,
- la similitude des résultats relatifs aux expériences 3 et 7, figure III - 9, correspondant à une fixation de la tête en position de repos, semble montrer que le blocage de celle-ci n'intervient pas dans le démarrage du mouvement de pointage manuel.

Ces premières indications sur le comportement de l'opérateur humain dans une tâche de localisation sont complétées dans les paragraphes suivants par l'analyse des réponses dynamiques.

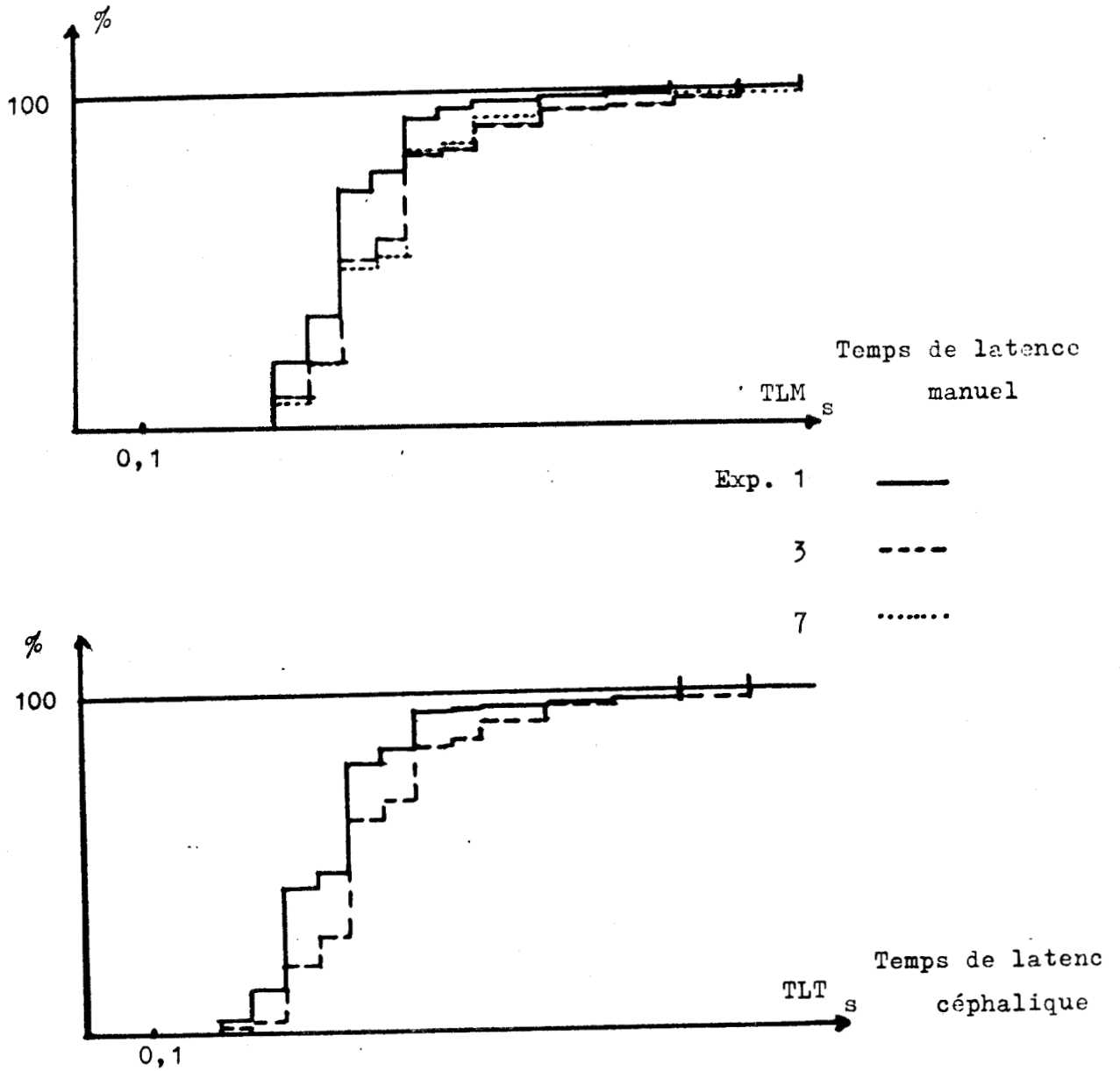


FIGURE III - 9 : Influence des modifications des conditions expérimentales sur la répartition des temps de latence manuels et céphaliques.

Expérience 1 : "Tête libre - boucle fermée"

Expérience 3 : "Tête libre - boucle ouverte"

Expérience 7 : "Tête bloquée - boucle ouverte"



III - ANALYSE DU REGIME DYNAMIQUE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES DE L'OPERATEUR HUMAIN

Le régime dynamique des réponses de l'opérateur à un stimulus visuel en échelon de position peut être caractérisé globalement par la forme des réponses (classement en divers types A, B, C, D, cf. chapitre II § V) et plus particulièrement par l'étude des vitesses de montée, des temps d'ajustement et des dépassements des réponses.

III.1 - Analyse de la répartition des types de réponses obtenues

Le classement des formes de réponses manuelles et céphaliques peut donner une première indication globale sur le processus de localisation spatiale des stimulus visuels par l'opérateur (figure III - 10).

III.1.1 - Expériences avec boucle de retour (Expérience 1)

L'observation des tableaux figure III - 10 a met en évidence que :

- la répartition des réponses manuelles (maximum de réponses avec ajustement continu type A) est différente de celle des réponses céphaliques (maximum de réponses avec dépassement type B),
- la répartition des réponses de la main et de la tête varie suivant l'excentricité du stimulus (diminution des réponses du type A et augmentation des réponses du type B quand θ_e augmente).

En conséquence les examens des tableaux figure III - 10 a et de l'enregistrement figure III - 1 permettent de supposer que le sujet effectue :

- un mouvement de tête dans la direction du stimulus puis ramène celle-ci dans une position intermédiaire entre la position du stimulus et sa position de repos (réponses type B) ; le sujet peut en effet effectuer un pointage manuel correct en vision extra-fovéale (détection de l'extinction du stimulus) sans avoir besoin de stabiliser parfaitement la tête sur le stimulus,
- un mouvement manuel continu (réponses type A) jusqu'à ce qu'il "éteigne" le stimulus correspondant à un pointage manuel correct.

III.1.2 - Expériences sans boucle de retour (Expérience 3)

L'analyse indiquée figure III - 10 b met en évidence un comportement différent de l'opérateur pouvant s'interpréter par les remarques suivantes :

- la suppression de l'information de retour oblige le sujet à regarder le stimulus et donc à stabiliser la tête dans la direction de celui-ci. On enregistre une augmentation de réponses céphaliques avec ajustement continu type A (53 % au lieu de 39 % dans les expériences 1),
- la difficulté du pointage manuel oblige l'opérateur à effectuer davantage de mouvements de "va-et-vient" autour du stimulus. On constate en effet une légère augmentation des réponses manuelles du type B (41 % au lieu de 36 % dans les expériences 1).

Sans distinction de l'excentricité

Influence de l'excentricité du stimulus

1962

EXP 1
TL-BF

| Réponse de la | | Main | Tête |
|---------------|---|------|------|
| | | | |
| | A | 50 | 39 |
| | B | 36 | 56 |
| | C | 5 | 4 |
| | D | 9 | 1 |
| n | | 156 | 153 |

| | | Main | | | Tête | | |
|------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | ± 20 | ± 40 | ± 60 | ± 20 | ± 40 | ± 60 |
| Type | A | 58 | 47 | 42 | 58 | 21 | 32 |
| | B | 32 | 36 | 40 | 40 | 71 | 64 |
| | C | 3 | 4 | 8 | 2 | 4 | 4 |
| | D | 7 | 13 | 10 | 0 | 4 | 0 |
| | n | 60 | 47 | 48 | 59 | 47 | 47 |

EXP 3
TL-B0

| Réponse de la | | Main | Tête |
|---------------|---|------|------|
| | | | |
| | A | 48 | 53 |
| | B | 41 | 40 |
| | C | 6 | 4 |
| | D | 5 | 3 |
| n | | 136 | 124 |

| | | Main | | | Tête | | |
|------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | ± 20 | ± 40 | ± 60 | ± 20 | ± 40 | ± 60 |
| Type | A | 50 | 55 | 39 | 57 | 57 | 46 |
| | B | 45 | 36 | 41 | 39 | 40 | 38 |
| | C | 5 | 3 | 9 | 4 | 0 | 8 |
| | D | 0 | 6 | 11 | 0 | 3 | 8 |
| | n | 56 | 36 | 44 | 51 | 35 | 38 |

EXP 7
TB-B0

| Réponse de la | | Main |
|---------------|---|------|
| | | |
| | A | 45 |
| | B | 41 |
| | C | 11 |
| | D | 3 |
| n | | 126 |

| | | Main | | |
|------|---|----------|----------|----------|
| | | ± 20 | ± 40 | ± 60 |
| Type | A | 57 | 37 | 33 |
| | B | 37 | 43 | 45 |
| | C | 6 | 17 | 14 |
| | D | 0 | 3 | 8 |
| | n | 54 | 30 | 42 |

n = nombre de stimulus



FIGURE III - 10 : Tableaux illustrant la répartition des réponses manuelles et céphaliques à des stimulus visuels périphériques.

III.1.3 - Expériences avec fixation de la tête (Expériences 7)

L'augmentation de la difficulté de la tâche par rapport aux expériences précédentes semble être mise en évidence, figure III - 10 c, par une croissance des réponses représentant des paliers (type C) et une légère diminution des réponses du type A).

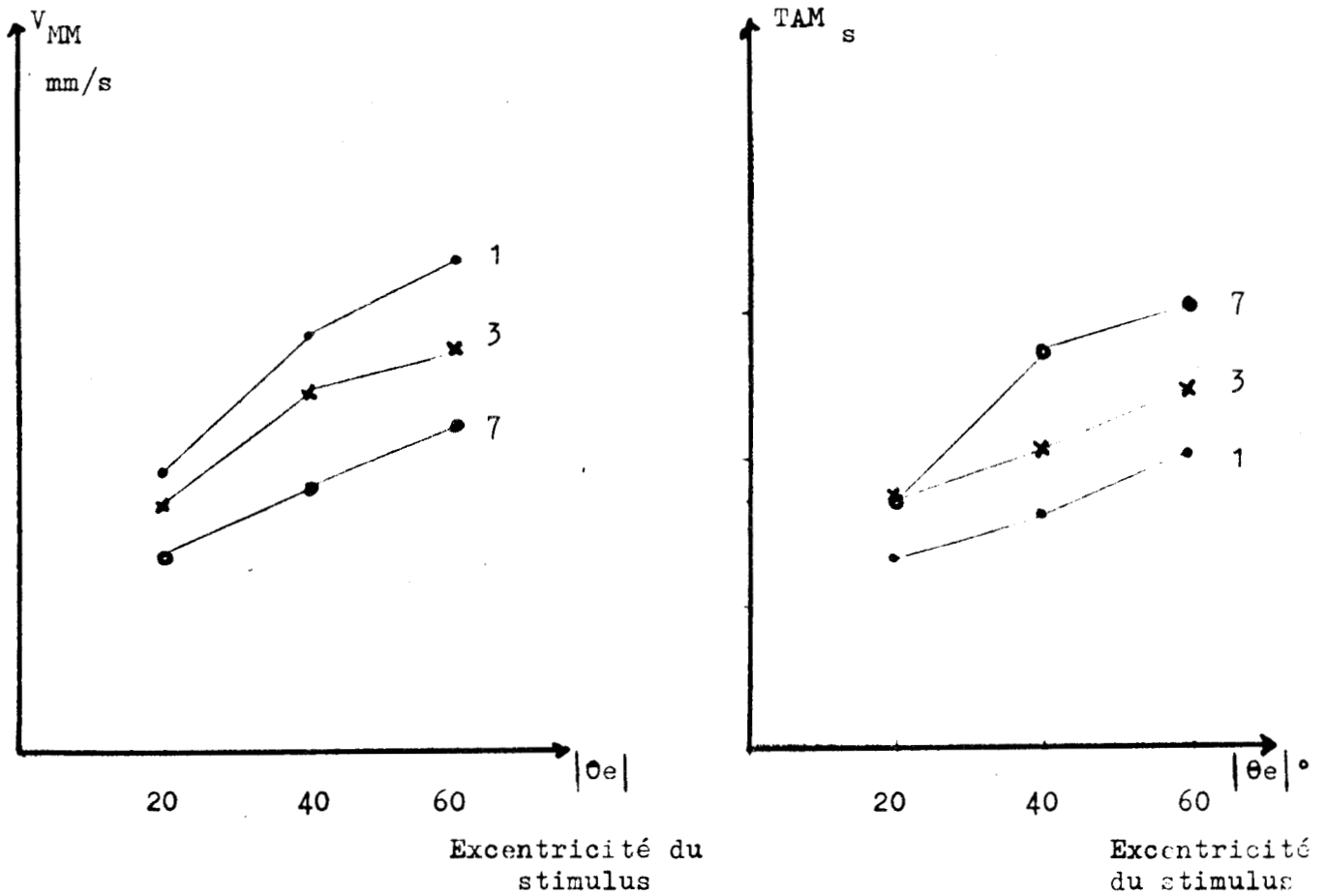
III.2 - Etude des vitesses de montée (VMM) et des temps d'ajustement (TAM) manuels en fonction de l'excentricité (θ_e) du stimulus, figures III - 11 et III - 12

Les vitesses de montée et les temps d'ajustement manuels croissent en fonction de l'excentricité du stimulus; cette croissance n'est pas linéaire et on observe, figure III - 11 :

- une tendance vers une limite pour les vitesses de montée lorsque θ_e augmente ; ceci pour les trois expériences réalisées (exp. 1, 3, 7),
- une forte augmentation des temps d'ajustement entre 40° et 60° pour les expériences effectuées "tête libre" (exp. 1 et 3),
- une différence non significative pour les valeurs du temps d'ajustement entre 40° et 60° pour les expériences effectuées "tête bloquée" (exp. 7) ; (différence significative à moins de 65 %, figure III - 12),
- une augmentation générale très importante des temps d'ajustement et une diminution importante des vitesses de montée, selon les diverses expériences, figure III - 11.

Vitesse de montée manuelle

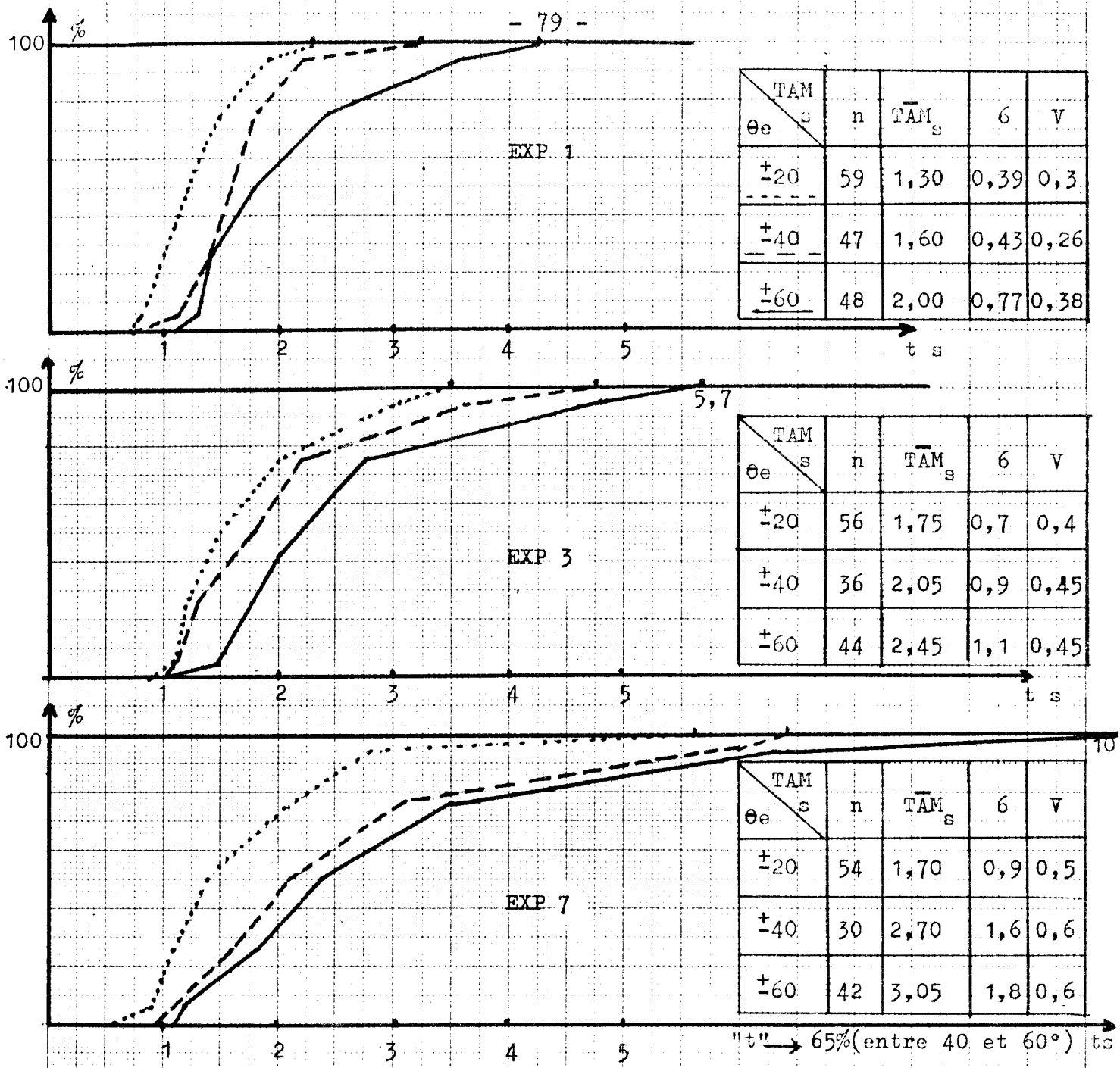
Temps d'ajustement manuel



- Valeurs relatives à l'expérience 1 (Tête libre, boucle fermée)
- x " " " 3 (Tête libre, boucle ouverte)
- o " " " 7 (Tête bloquée, boucle ouverte)

FIGURE III - 11 : Courbes de variations des vitesses de montée (VMM) et des temps d'ajustement (TAM) en fonction de l'excentricité (θ_e) du stimulus.





| θ_e \ VMM | EXP 1 | | | | EXP 3 | | | | EXP 7 | | | |
|------------------|-------|-----------------------|-----|------|-------|-----------------------|-----|------|-------|-----------------------|-----|------|
| | n | \overline{VMM} mm/s | 6 | V | n | \overline{VMM} mm/s | 6 | V | n | \overline{VMM} mm/s | 6 | V |
| ± 20 | 59 | 380 | 160 | 0,4 | 55 | 335 | 145 | 0,45 | 54 | 265 | 150 | 0,55 |
| ± 40 | 47 | 565 | 270 | 0,48 | 35 | 485 | 170 | 0,35 | 30 | 360 | 200 | 0,55 |
| ± 60 | 48 | 665 | 270 | 0,4 | 43 | 550 | 200 | 0,35 | 42 | 440 | 260 | 0,6 |

n = nombre de stimulus

FIGURE III - 12 : Influence de l'excentricité du stimulus sur les courbes de fréquences cumulées et les valeurs moyennes des vitesses de montée et temps d'ajustement manuels.



Interprétation des résultats

Les résultats concernant les variations des vitesses de montée (VMM) avec θ_e sont en accord avec les résultats antérieurs observés lors d'une tâche de pistage manuel en vision frontale (2), notamment le phénomène de saturation de la vitesse du déplacement découlant de limites physiologiques.

Pour les expériences effectuées avec "tête libre", l'augmentation des temps d'ajustement manuels en fonction de l'excentricité du stimulus, notamment entre 40° et 60° , peut être due à la proportion importante des réponses avec palier (type C) et des réponses avec palier et dépassement (type D), figure III - 10, pour les grandes amplitudes du stimulus.

Lors des expériences effectuées "tête bloquée -boucle de retour ouverte", (expérience 7), les valeurs du temps d'ajustement manuel relevées à 40° et 60° , ne révélant pas une différence significative, permettent de supposer un processus de localisation différent de l'opérateur correspondant respectivement à une vision binoculaire ($\theta_e = 40^\circ$) et monoculaire ($\theta_e = 60^\circ$) :

- A une excentricité du stimulus de 40° , le levier manuel peut masquer le stimulus pour un oeil à la fois (cf. chapitre II § II.3) rendant alors le pointage manuel difficile pour l'opérateur.
- A une excentricité de 60° , seul un oeil peut percevoir le stimulus (l'arête du nez masque le stimulus pour l'autre oeil) et l'opérateur peut effectivement masquer le stimulus par le levier, le pointage est alors plus facile.

L'ouverture de la boucle de retour (cas des expériences 3) et la non liberté des mouvements de tête (cas des expériences 7) se traduisent par une réaction manuelle beaucoup plus "prudente", (enregistrements figure III - 2 et III - 3). Ce comportement est en outre illustré figure III - 11 par les variations de

VNM et de TAM dans ces expériences. Cette augmentation des temps de montée et d'ajustement peut provenir de la difficulté de la tâche pour l'opérateur engendré par la fixation de la tête.

La dispersion des valeurs des vitesses de montée et des temps d'ajustement manuels, figure III - 12, est importante. Celle-ci est due d'une part aux différences inter-individuelles, d'autre part aux différentes formes de réponses observées ; une réponse avec palier (type C), par exemple, entraîne une vitesse de montée très faible et un temps d'ajustement élevé. De plus cette dispersion est reliée au degré de difficulté de la tâche (22) demandée au sujet (tableaux figure III - 12).

Remarque : Nous n'avons pas étudié les variations des vitesses de montée et des temps d'ajustement céphaliques en fonction de l'excentricité du stimulus. En effet, les erreurs permanentes céphaliques étant très importantes (cf. § IV.1 ci-après), les valeurs relevées seraient fonction non seulement de l'excentricité du stimulus (θ_e) mais aussi de l'excentricité céphalique atteinte (θ_m).

III.3 - Rappel des principaux résultats relatifs au régime dynamique des réponses manuelles et céphaliques

Les types de réponses obtenues figure III - 10 sont principalement fonction de l'excentricité du stimulus et des modifications des conditions expérimentales : notamment les caractéristiques de la boucle de retour sur les mouvements de la tête (§ III - 1 - 2).

L'importance du rôle des mouvements céphaliques est mise en évidence par une augmentation du temps d'ajustement et une diminution des vitesses de montée manuelles relevées entre les expériences 3 et 7, figure III - 11.

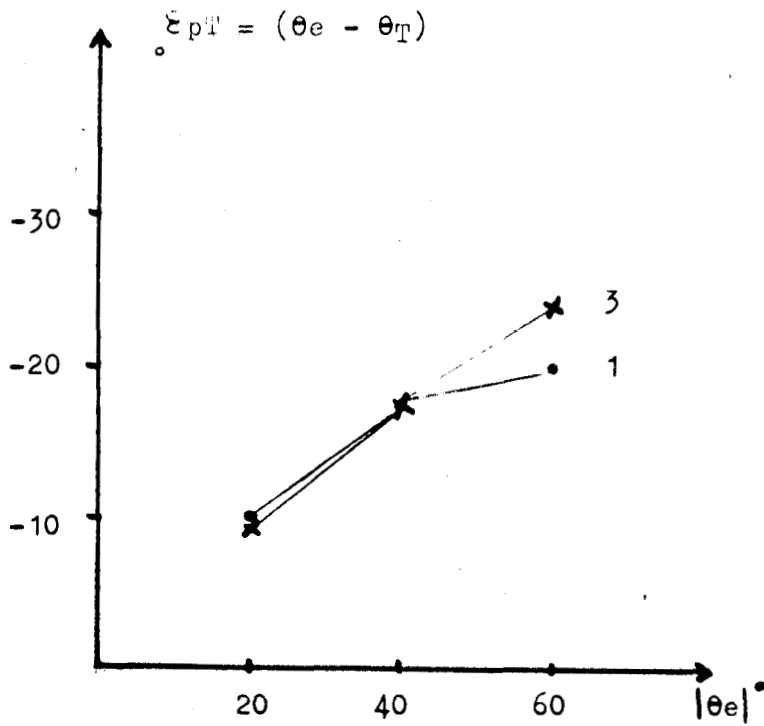
La difficulté des tests effectués peut être caractérisée par une grande dispersion des résultats, figure III - 12, et par un comportement plus "prudent" de l'opérateur humain dans la phase de recherche du stimulus.

IV - ETUDE DES RESULTATS RELATIFS A LA STABILISATION DES REPOSES MANUELLES (POINTAGE) ET CEPHALIQUES

Le régime permanent, lors de la stabilisation, des réponses manuelles et céphaliques peut être caractérisé par (chapitre II § V) les valeurs des erreurs permanentes manuelles (ϵ_{pM}) et céphaliques (ϵ_{pT}), l'amplitude finale des mouvements de la tête (O_T) et par le calcul du paramètre D rendant compte globalement de l'importance de l'amplitude des mouvements de la tête effectués par un opérateur au cours d'une expérience.

IV.1 - Etude de la position de la tête lors de sa stabilisation par rapport au stimulus d'entrée θ_e

L'opérateur humain, après avoir effectué la phase de recherche du stimulus, ne positionne généralement pas la tête face à celui-ci ; il existe une erreur permanente céphalique importante entre la position de la tête (θ_T) et celle du stimulus (θ_e). De plus cette erreur est toujours négative, figure III - 13. Cette erreur permanente (ϵ_{pT}) varie non linéairement en fonction de l'excentricité du stimulus, figure III - 13.



| | | EXP 1 TL - BF | | EXP 3 TL - B0 | |
|-------------------------|------------|------------------|------------|------------------|--|
| θ_e / θ_T | θ_T | θ_{TMax} | θ_T | θ_{TMax} | |
| ± 20 | 10 | 11 | 11 | 13 | |
| ± 40 | 22 | 27 | 22 | 26 | |
| ± 60 | 40 | 44 | 36 | 40 | |

FIGURE III - 13 : Variation de l'erreur permanente céphalique moyenne ($\bar{\epsilon}_{pT}$) en fonction de l'excentricité du stimulus (θ_e) et valeurs moyennes des amplitudes maximales (θ_{TMax}) et finales (θ_T) des mouvements de tête.

Cette erreur permanente céphalique ($\bar{\epsilon}_{pT}$) peut être reliée à l'amplitude relative des mouvements des yeux par rapport à la tête quand celle-ci est stabilisée, figure III - 14. Ceci pourrait expliquer l'allure des courbes, indiquée figure III - 13, illustrant l'augmentation de l'erreur permanente en fonction de l'excentricité du stimulus.

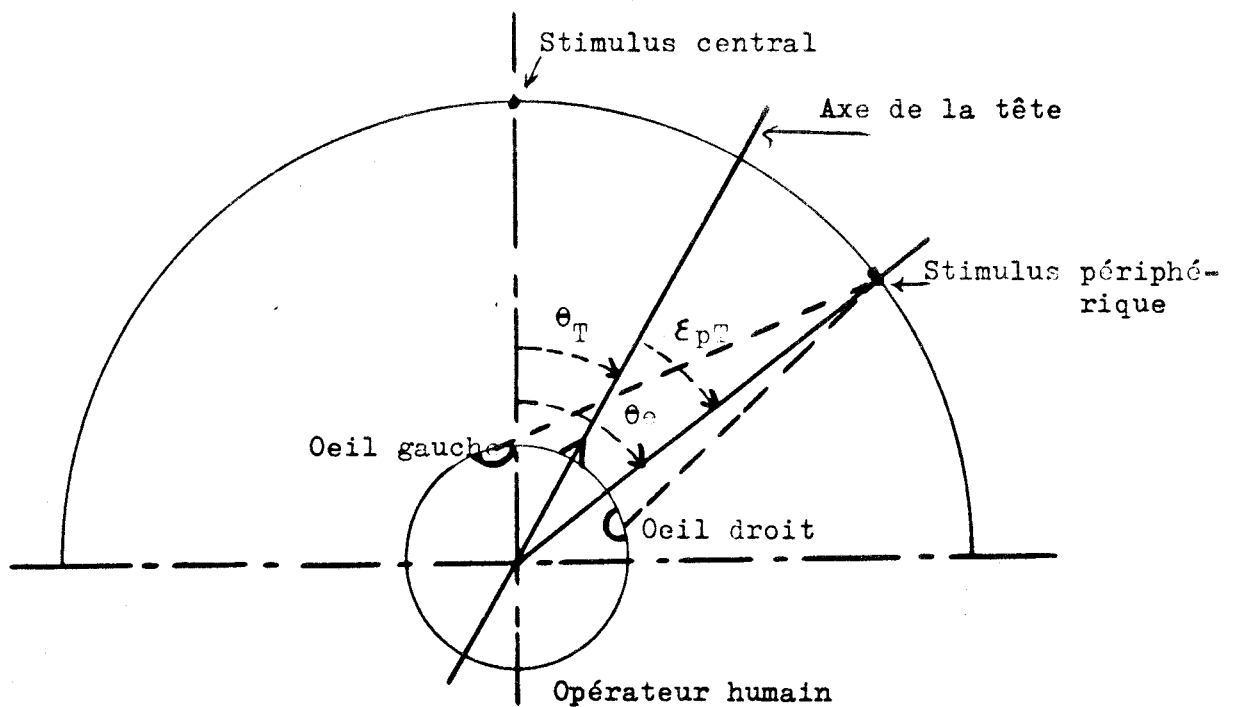


FIGURE III - 14 : Relation entre l'erreur permanente céphalique et l'amplitude relative des mouvements des yeux par rapport à la tête.

En outre cette analyse ne révèle pas de différences notables entre les résultats relatifs aux expériences effectuées avec (expérience 1) ou sans (expérience 3) boucle de retour ; ceci est dû probablement à la dispersion inter-individuelle importante, notamment pour les expériences en "boucle ouverte" (expérience 3), figure III - 15. Toutefois l'allure des courbes de variation de l'erreur permanente en fonction de θ_e semble conservée, figure III - 15.

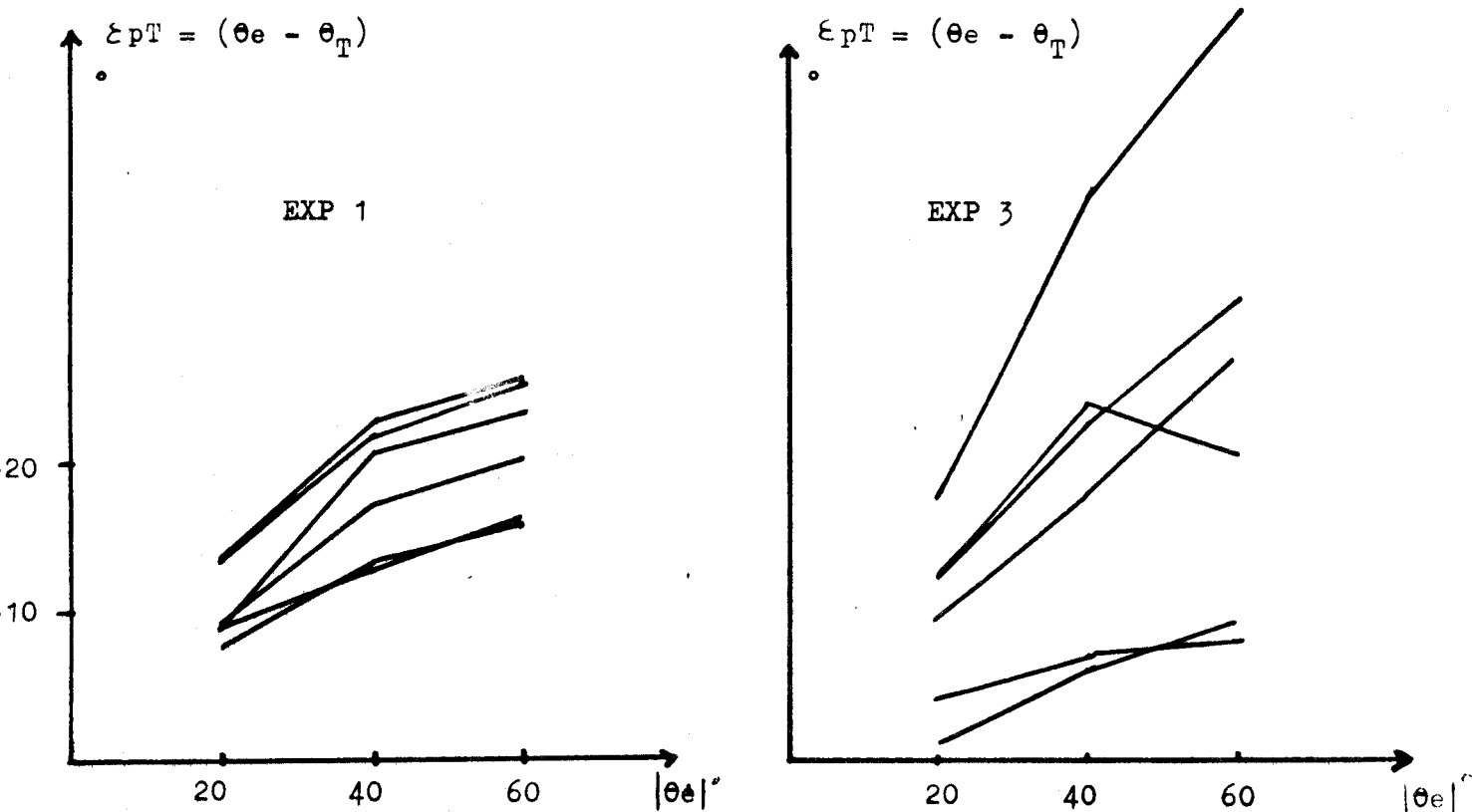
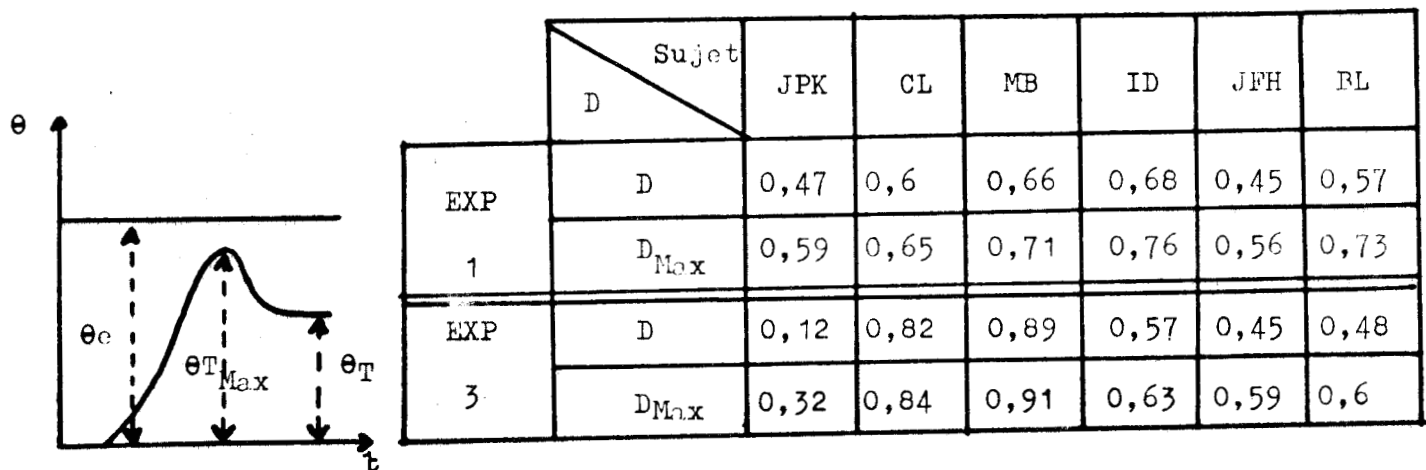


FIGURE III - 15 : Variation de l'erreur permanente céphalique (ε_{pT}) en fonction de l'excentricité du stimulus (θ_e), pour chaque sujet.

Le calcul du paramètre D (rapport moyen de l'amplitude des mouvements de la tête sur l'excentricité du stimulus, cf. chapitre II § V) permet de rendre compte de l'importance des mouvements céphaliques de chaque sujet, figure III - 16. On remarque la grande dispersion inter-individuelle signalée précédemment.



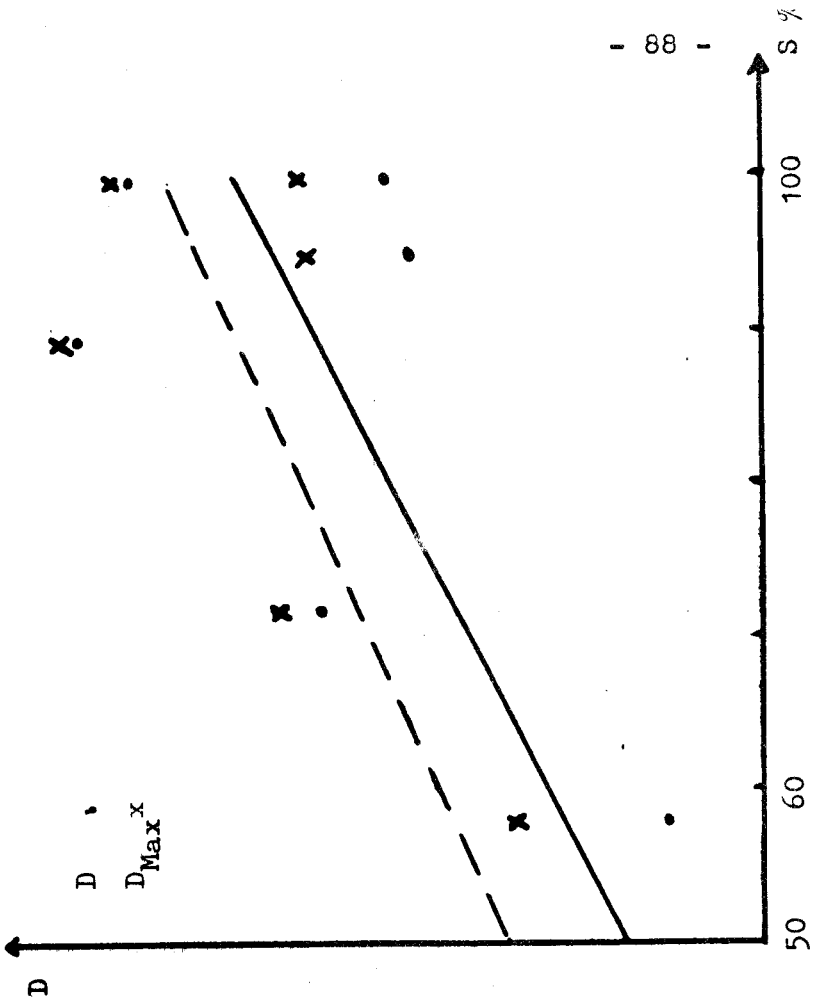
$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T i}}{\theta_{e i}}$$

$$D_{Max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T_{Max} i}}{\theta_{e i}}$$

FIGURE III - 16 : Importance des mouvements de tête (paramètre D) effectués par chaque sujet lors des expériences en "boucle fermée" (exp. 1) et en "boucle ouverte" (exp. 3).

Par ailleurs les variations de D en fonction de S (pourcentage de réactions manuelles apparaissant après la réaction céphalique) sont indiquées figure III - 17. Le coefficient de corrélation ($\rho \approx 0,6$ à $0,7$) existant entre les valeurs de D et S n'est pas très élevé (figure III - 17) ; toutefois les droites de régression linéaire (16) montrent que D augmente avec S. Il semble donc que si un sujet effectue un mouvement de tête avant sa réaction manuelle (S grand), son déplacement céphalique sera de grande amplitude (D grand).

Si on appelle D_{Max} le rapport moyen des déviations maximales ($\theta_{T_{Max}}$) atteintes par la tête au cours de la phase de recherche de la position du stimulus sur les excentricités θ_e correspondantes, on observe, figure III - 17, que les variations de D_{Max} en fonction de S sont identiques à celles de D ; le coefficient de corrélation est légèrement augmenté, voisin de $0,7$ à $0,9$.



$$S = \%(\text{TLM-TLF} \geq 0)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T i}}{\theta_{e i}}$$

$$D_{\text{Max}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{\text{TM} x i}}{\theta_{e i}}$$

$$D = 0,9 \cdot 10^{-2} S - 0,24 ; \rho = 0,7$$

$$D_{\text{Max}} = 0,95 \cdot 10^{-2} S - 0,2 ; \rho = 0,9$$

EXPERIENCE 1

$$D = 10^{-2} S - 0,31 ; \rho = 0,62$$

$$D_{\text{Max}} = 0,88 \cdot 10^{-2} S - 0,1 ; \rho = 0,68$$

EXPERIENCE 3

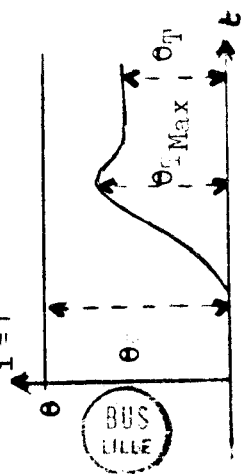


FIGURE III - 17 : Variations de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués (paramètre D) en fonction du pourcentage de réactions manuelles apparaissant après la réaction céphalique (paramètre S)

IV.2 - Etude des variations de l'erreur permanente manuelle (ϵ_{pM} en fonction de l'excentricité du stimulus

Lorsque l'information de retour est supprimée, pas d'extinction du stimulus au pointage correct, on observe une erreur permanente manuelle (ϵ_{pM}) variable selon l'excentricité du stimulus (θ_e) et la possibilité ou non pour l'opérateur de bouger la tête, figure III - 18^a. On remarque que les erreurs ne sont pas très importantes ($\leq 10^\circ$) mais varient en fonction, non seulement, de l'excentricité mais aussi du signe du stimulus (droite ou gauche). En effet on constate que :

- $\overline{\epsilon_{pM}}$ (valeur moyenne de l'erreur) est positive pour les excentricités θ_e positives et négative pour les excentricités θ_e négatives, figure III - 19.
- Les erreurs permanentes pour deux excentricités symétriques (+ 40° et - 40° par exemple) sont plus importantes à gauche qu'à droite.

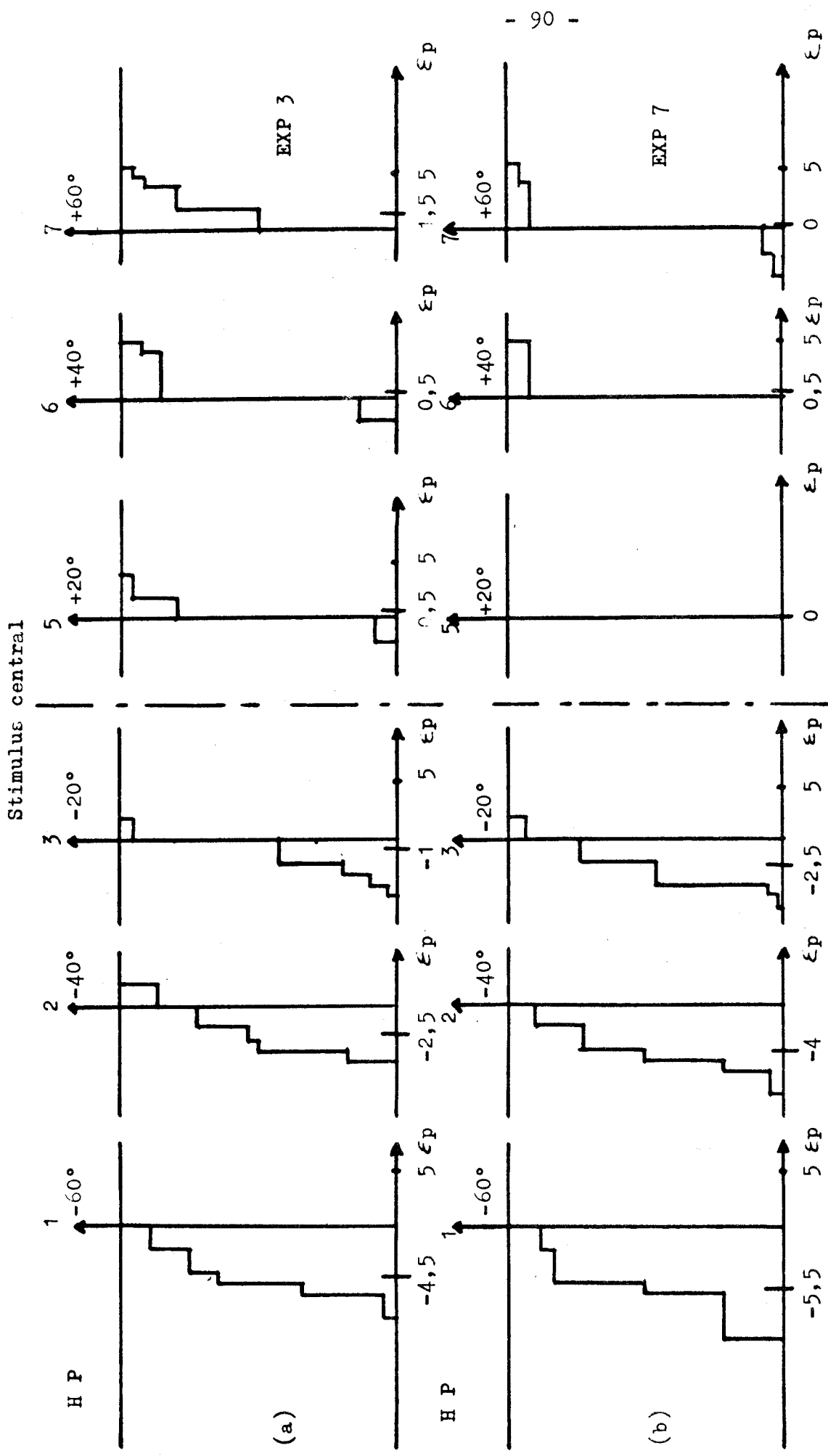


FIGURE III - 18 : Courbes de fréquences cumulées des erreurs permanentes manuelles selon l'excentricité du stimulus.



Ces résultats peuvent être interprétés par la considération suivante, figure III - 19 :

Tous nos sujets sont droitiers et leur oeil directeur (23) est l'oeil droit. Lors du pointage manuel l'opérateur "vise" le stimulus à l'aide de l'oeil directeur et estime que son pointage est correct quand le levier masque le stimulus pour cet oeil directeur. En conséquence pour les stimulus situés à droite de l'opérateur les résultats font apparaître une erreur permanente positive (assez faible), figure III - 18^a, et pour ceux situés à gauche de l'opérateur une erreur négative.

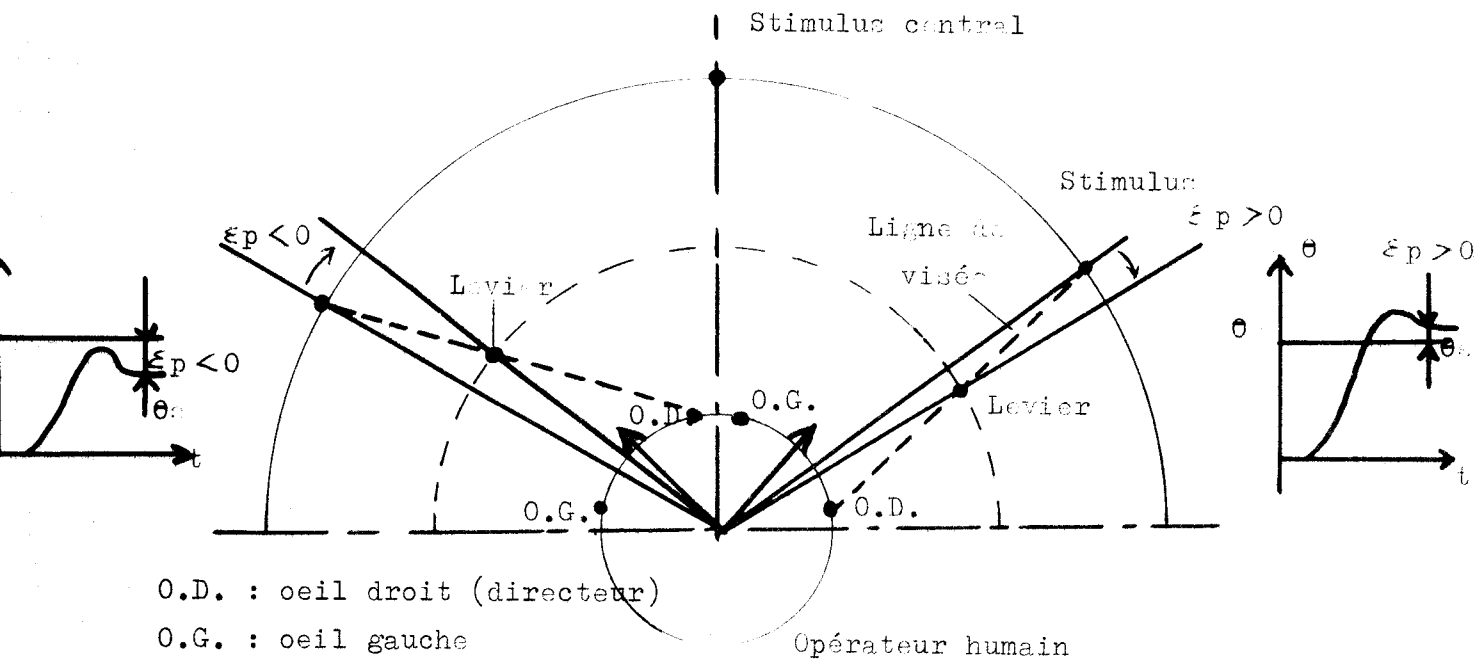


FIGURE III - 19 : Importance de l'oeil directeur sur l'erreur permanente manuelle.

Dans le cas des expériences avec fixation de la tête (exp. 7), les erreurs manuelles sont très faibles, figure III - 18^b, à droite et plus particulièrement à une excentricité du stimulus de + 60° (dans ce cas le levier cache le stimulus, cf. § III.2). Par contre pour les stimulus situés à sa gauche les erreurs sont importantes, figure III - 18^b, car le sujet ne peut plus viser avec son oeil directeur et le pointage manuel est plus difficile.

L'importance du rôle des mouvements de la tête dans la précision du pointage manuel peut être mise en évidence en étudiant les variations de E ($E = \left| \frac{\epsilon_p}{\theta_e} \right|$), cf. chapitre III § V) en fonction du paramètre D, figure III - 20. Il semble que plus l'opérateur effectue des mouvements céphaliques de grande amplitude, plus son pointage manuel (caractérisé par le paramètre E) est précis.

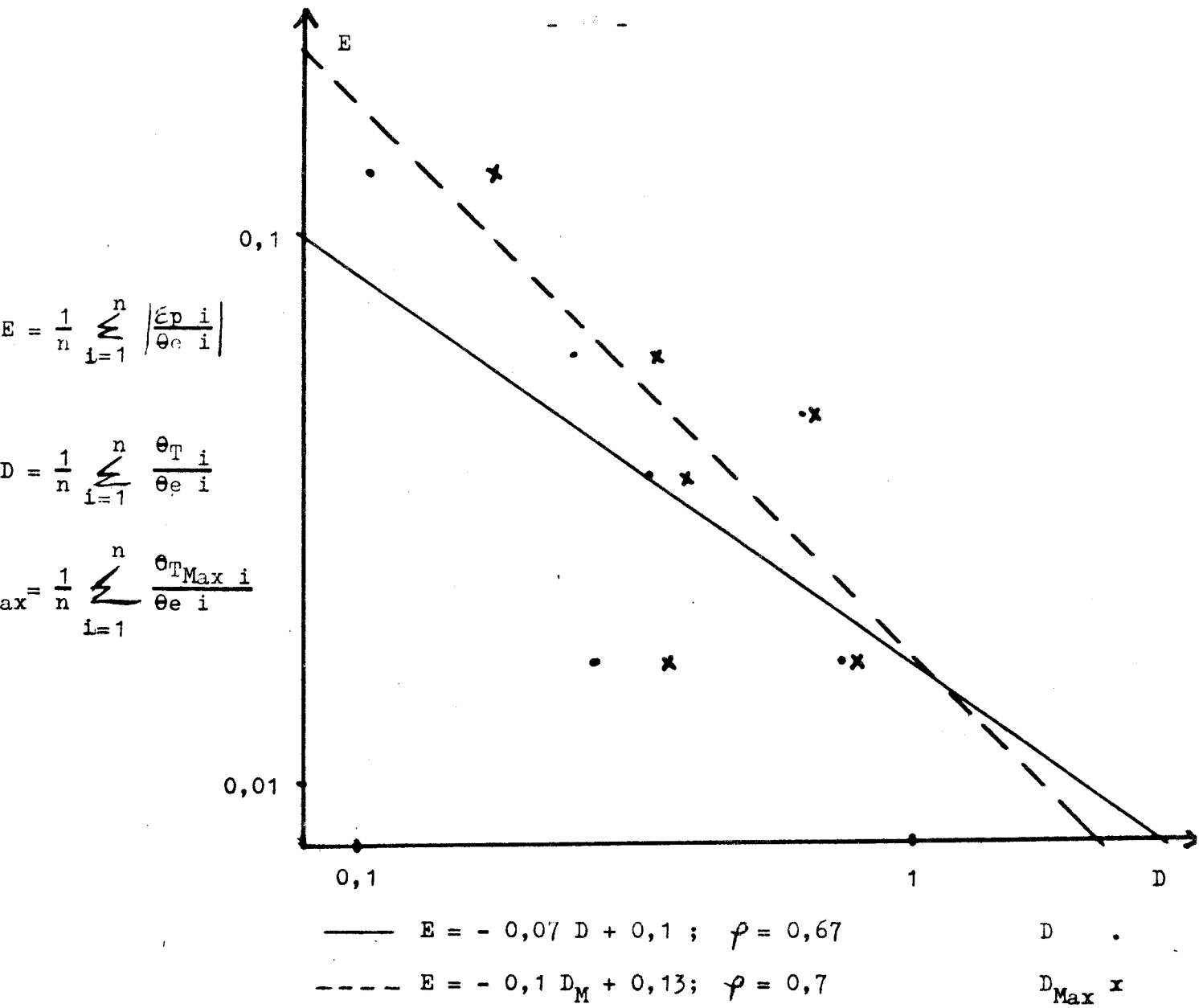


FIGURE III - 20 : Influence de l'amplitude des mouvements de la tête (paramètre D et D_{Max}) sur la précision du pointage manuel (paramètre E).



IV.3 - Rappel des résultats concernant les erreurs permanentes manuelles et céphaliques

L'erreur permanente céphalique (ϵ_{pT}) augmente, en tendant vers une limite, en fonction de l'excentricité du stimulus, elle est toujours négative, et la dispersion inter-individuelle est importante, figures III - 13 et III - 15.

La loi de variation illustrée, figure III - 17, (D augmente avec S) caractérise l'influence de l'écart entre les temps de latence manuels et céphaliques (paramètre S) sur l'amplitude des mouvements de la tête (paramètre D).

L'erreur permanente manuelle (ϵ_{pM}) est de faible amplitude mais semble dépendre, dans nos expériences, du dispositif expérimental notamment de l'implantation du levier dans la cabine, et des caractéristiques physiologiques des sujets (oeil directeur).

Les mouvements céphaliques jouent un rôle important sur les performances manuelles réalisées, figure III - 20, par l'opérateur humain ; l'absence de mouvements de tête (expérience 7) entraîne des erreurs manuelles importantes, figure III - 18.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce chapitre confirment certaines hypothèses obtenues antérieurement lors d'expériences de pistage manuel de stimulus visuels périphériques, concernant en particulier les temps de latence et les vitesses de montée manuels.

Ce chapitre met, en outre, en évidence l'importance de l'environnement expérimental (constitution du dispositif, nature de la boucle de retour) et l'influence prépondérante du rôle des mouvements de la tête dans ces tâches de localisation spatiale de stimulus visuels sur les performances des visées manuelles.

Le chapitre suivant présente l'analyse des réponses de l'opérateur humain dans un test de localisation spatiale de stimulus auditifs dans un but d'étude du comportement de l'opérateur humain dans un environnement visuel et sonore.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES
DE L'OPERATEUR HUMAIN DANS UNE TACHE DE LOCALISATION
SPATIALE DE STIMULUS AUDITIFS

---ooOoo---

INTRODUCTION

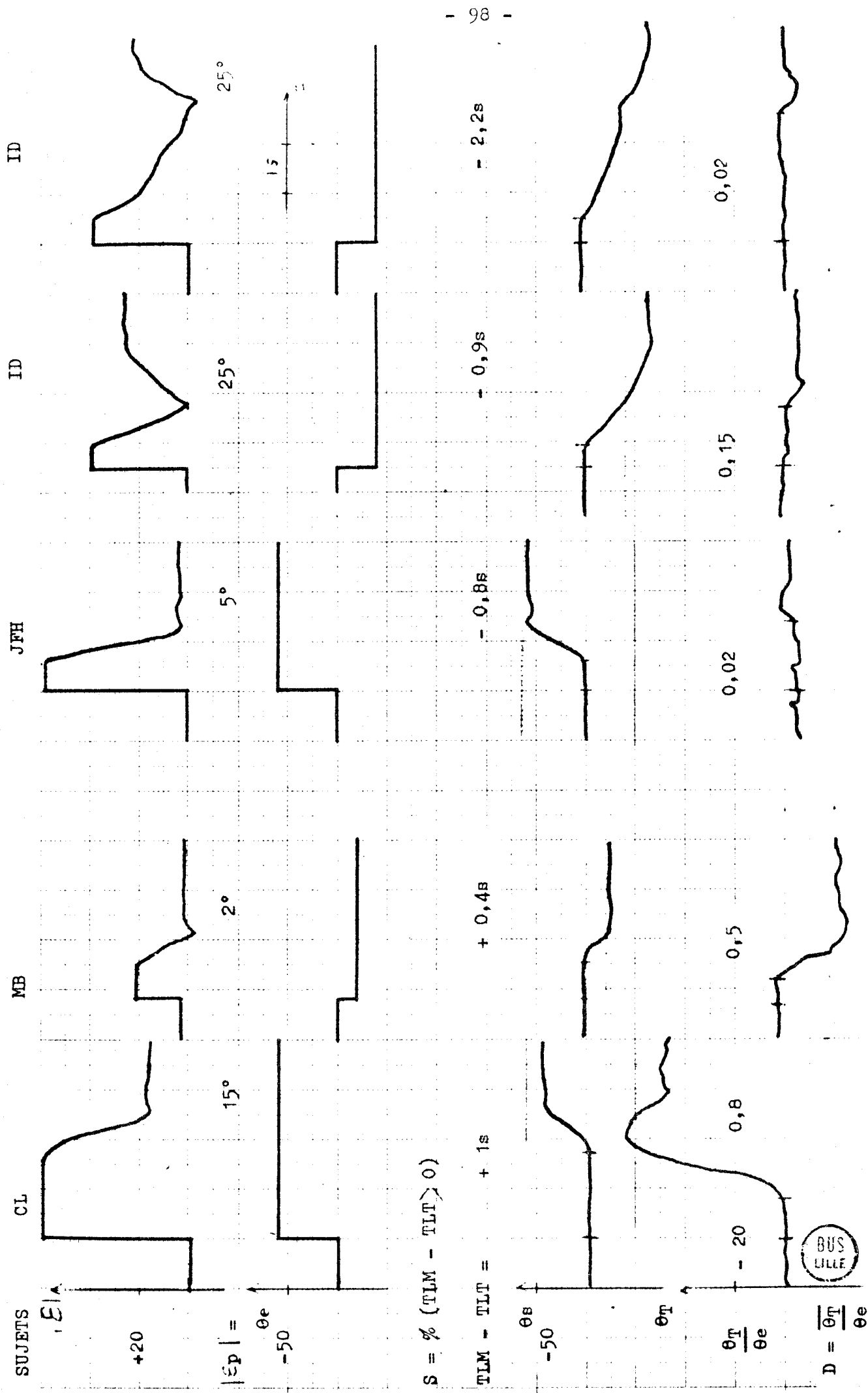
Les expériences sur la localisation de stimulus auditifs, dont nous présentons les résultats dans ce chapitre, sont réalisées à l'aide du même protocole expérimental (cf. chapitre II) que celui relatif à la localisation de stimulus visuels ; seule la nature du stimulus est modifiée.

Le but de l'analyse de ces résultats, concernant les stimulus auditifs, consiste essentiellement à mettre en évidence le rôle des mouvements de la tête dans le processus de localisation manuelle du stimulus par l'opérateur humain, en comparaison avec celui d'un stimulus visuel (cf. chapitre III).

Soulignons de suite qu'il apparaît, lors de l'examen des enregistrements, figure IV - 1, des différences inter-individuelles importantes concernant notamment :

- l'écart entre les temps de latence manuels et céphaliques (paramètre S),
- l'importance de l'amplitude de la réponse céphalique (paramètre D),
- les performances du sujet lors de son pointage manuel (paramètres C et E).

Nous présentons tout d'abord les résultats des expériences appelées "Tête libre - boucle fermée" (expérience 2) dans lesquelles l'étude de ces différences inter-individuelles permet de proposer un classement de nos sujets en deux groupes. Ce classement sera ensuite confirmé par l'ana-



$S = \% (TLM - TLT > 0)$

$TLM - TLT = + 1s$

$+ 0,4B$

$- 0,8B$

$- 0,9s$

$- 2,2s$

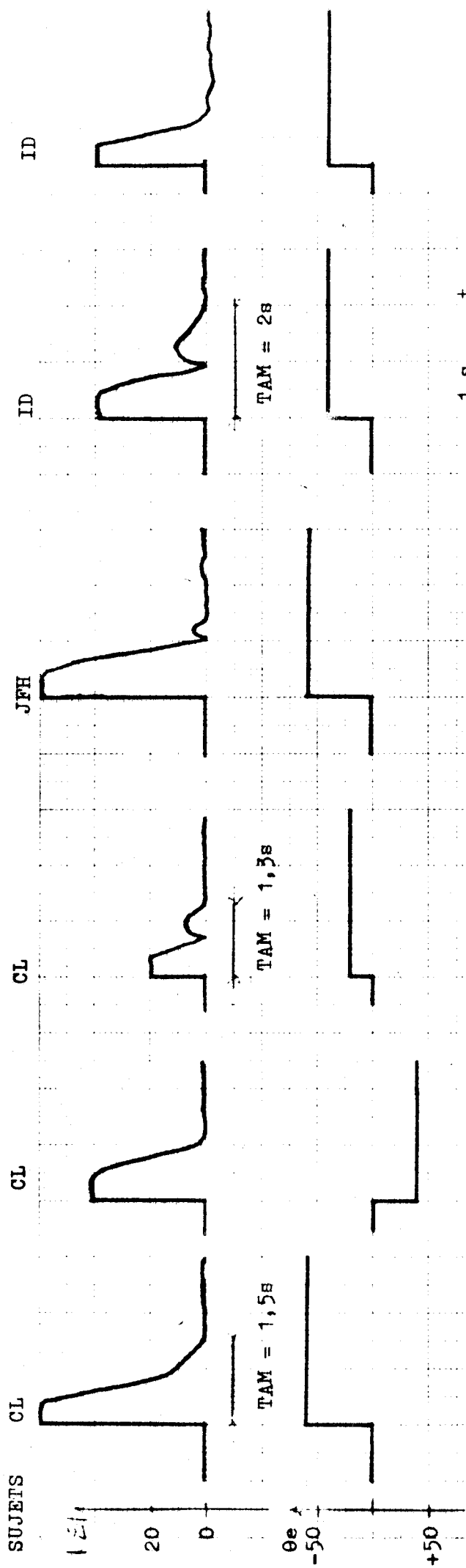
FIGURE IV - 1 : Enregistrements mettant en évidence les différences inter-individuelles en ce qui concerne pM, OT, TLM - TLT. (Expérience 4)



lyse des résultats des expériences appelées "Tête libre - boucle ouverte" (expérience 4). Enfin les résultats des expériences appelées "Tête bloquée - boucle ouverte" (expérience 8) permettront d'étudier particulièrement l'influence de la fixation de la tête sur les performances réalisées (précision du pointage) par les sujets de chacun des deux groupes.



GRUPE I



GRUPE II

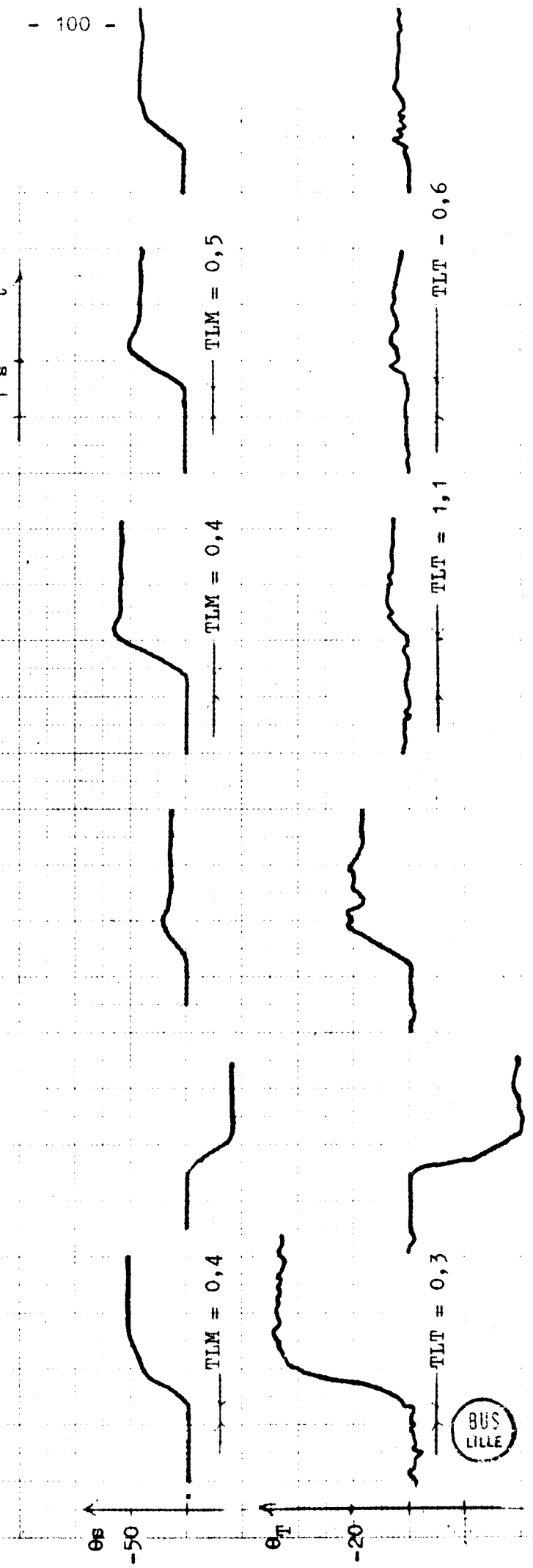


FIGURE IV - 2 : Enregistrements (expérience 2). Stimulus auditifs. "tête libre, boucle fermée".

I - ANALYSE DES RESULTATS DES EXPERIENCES " TETE LIBRE - BOUCLE FERMEE "
(Expérience 2) (cf. Enregistrement, figure IV - 2)

Rappelons que dans ces expériences l'opérateur peut être renseigné sur la validité de son pointage manuel (cf. chapitre II § II) lorsque l'erreur de celui-ci devient nulle, par "l'extinction" du stimulus sonore.

I.1 - Etude des temps de latence manuels (TLM) et céphaliques (TLT), figure IV - 3

Les résultats exposés figure IV - 3 a font apparaître qu'en "moyenne" la réaction manuelle débute avant la réaction céphalique ; cette constatation concerne tous les sujets ; cependant l'observation du tableau, figure IV - 3 b, donnant le pourcentage de valeurs positives ou nulles de l'écart entre les temps de latence (cf. chapitre II § V) révèle que :

- la dispersion inter-individuelle est plus importante que celle rencontrée pour les stimulus visuels,
- l'instant d'apparition de la réaction manuelle par rapport à celui de la réaction céphalique varie selon les sujets, d'une manière importante. L'exemple du sujet CL indique que dans 92 % des pointages, la réaction céphalique s'effectue avant la réaction manuelle, ou juste en même temps ; par contre le sujet JFH ne présente ce comportement que dans une proportion de 11 % des tests de pointage manuel .

On peut alors penser que le classement de nos sujets en deux groupes selon les valeurs du paramètre S puisse permettre de caractériser davantage le comportement des opérateurs humains.

ensemble des sujets

| TL \ \bar{M} | n | \bar{M}_s | σ | v |
|----------------|-----|-------------|----------|------|
| TLM | 156 | 0,35 | 0,09 | 0,27 |
| TLT | 122 | 0,38 | 0,15 | 0,39 |

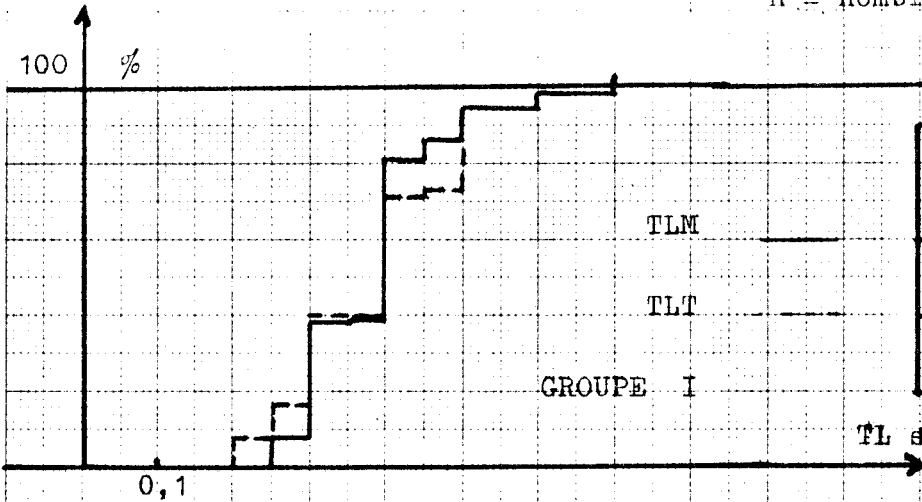
"t" → TLM ≠ TLT à 99%

(a)

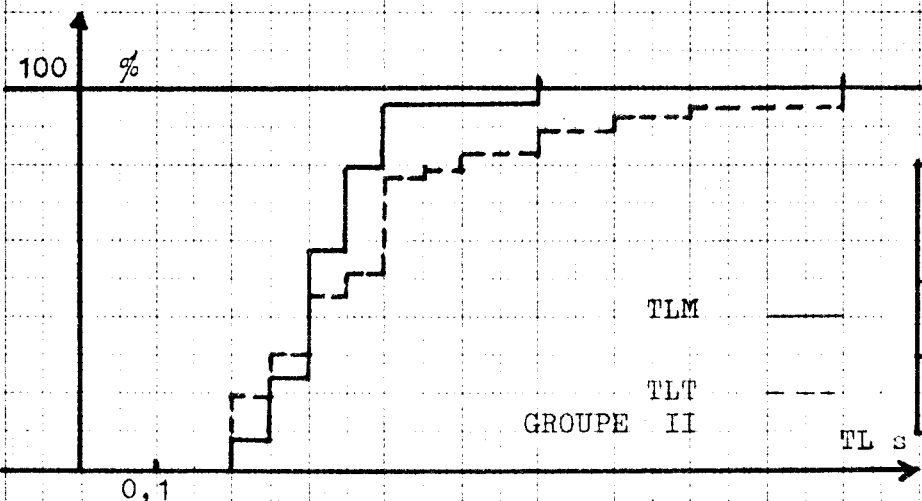
| GROUPES | I | | | II | | |
|-------------------------|-----|----|----|----|-----|----|
| SUJET | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| S% | | | | | | |
| S = $\%((TLM-TLT) > 0)$ | 73 | 92 | 60 | 8 | 11 | 42 |

(b)

n = nombre de stimulus



| GROUPES | n | \bar{M} | σ | v |
|---------|----|-----------|----------|------|
| I | | | | |
| TLM | 78 | 0,37 | 0,09 | 0,26 |
| TLT | 75 | 0,37 | 0,11 | 0,3 |



| GROUPES | n | \bar{M} | σ | v |
|---------|----|-----------|----------|------|
| II | | | | |
| TLM | 78 | 0,32 | 0,09 | 0,26 |
| TLT | 47 | 0,39 | 0,19 | 0,49 |

(c)



FIGURE IV - 3 : Courbes de fréquences cumulées et valeurs moyennes des temps de latence manuels et céphaliques globalement (a) et selon les deux groupes (c) définis par les valeurs de S (b). Expérience 2.

Si on envisage de considérer les deux groupes I et II considérant respectivement les sujets JPK, CL, MB et les sujets ID, JFH, BL, on remarque, figure IV - 3 c, que les courbes de fréquences cumulées des temps de latence manuels et céphaliques relatifs à chacun de ces deux groupes, présentent des allures différentes : pour le groupe I, la différence entre les temps de latence n'est pas significative alors que pour le groupe II, l'écart moyen de 0,07 s ($TLT > TLM$), significatif à 98 %, illustre un comportement où la réaction céphalique débute généralement après la réaction de pointage manuel (S faible implique $TLT > TLM$). Signalons également, figure IV - 3 c, que le temps de latence manuel moyen des sujets du groupe I ($\bar{TLM} = 0,37$ s) est nettement supérieur à celui des sujets du groupe II ($\bar{TLM} : 0,32$ s).

Notons enfin, que le classement en deux groupes de sujets a été choisi arbitrairement pour des valeurs de S supérieures (groupe I) ou inférieures (groupe II) à 50 %. En réalité deux sujets du groupe II sont caractérisés par une valeur de S voisine de 10 %.

Remarque : L'examen du tableau, figure IV - 4, représentatif des temps de latence (TLM et TLT) suivant l'excentricité (θ_e) du stimulus auditif ne met pas en évidence une influence significative de θ_e sur les valeurs des temps de latence ; ceci est probablement dû à la grande dispersion des résultats et à nos deux catégories de sujets définis ci-dessus.

n = nombre de stimulus

| θ_e° \ TLM _s | n | \bar{M} | σ | V | θ_e° \ TLT _s | n | \bar{M} | σ | V |
|-------------------------------------|----|-----------|----------|------|-------------------------------------|----|-----------|----------|------|
| $\pm 20^\circ$ | 48 | 0,33 | 0,1 | 0,3 | $\pm 20^\circ$ | 43 | 0,38 | 0,15 | 0,41 |
| $\pm 40^\circ$ | 48 | 0,35 | 0,08 | 0,23 | $\pm 40^\circ$ | 36 | 0,38 | 0,17 | 0,45 |
| $\pm 60^\circ$ | 60 | 0,35 | 0,1 | 0,27 | $\pm 60^\circ$ | 43 | 0,38 | 0,12 | 0,32 |

FIGURE IV - 4 : Valeurs des temps de latence manuels (TLM) et céphaliques (TLT) moyens en fonction de l'excentricité du stimulus θ_e .

I.2 - Etude du régime dynamique des réponses manuelles et céphaliques

L'analyse du régime dynamique des réponses de l'opérateur, illustrées enregistrements figure IV - 2, révèle les principaux résultats suivants :

- Le classement en types de réponses (cf. chapitre II § V) met en évidence un maximum de réponses manuelles et céphaliques

présentant un dépassement (type B), figure IV - 5.

- Le pourcentage de 24 % de "non réponses" céphaliques est élevé ; ces "non réponses", dont le nombre augmente aux faibles excentricités du stimulus, appartiennent essentiellement à la catégorie des sujets du groupe II, figure IV - 5, dont le pourcentage est de 45 %. On appelle "non réponse " le cas où le déplacement de la tête n'apparaît pas sur nos enregistrements.

- Les variations des vitesses de montée (VMM) et des temps d'ajustement (TAM) manuels en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus sont du même type que celles relevées lors des expériences effectuées avec des stimulus visuels (cf. chapitre III § III). On observe en effet que les vitesses de montée tendent vers une limite (saturation) et que les temps d'ajustement augmentent fortement aux fortes excentricités du stimulus, figure IV - 6.

- Ces mêmes vitesses de montée et temps d'ajustement manuels ont une valeur moyenne plus élevée pour les sujets du groupe II que pour ceux du groupe I, figure IV - 6 (la différence est significative à plus de 90 %).

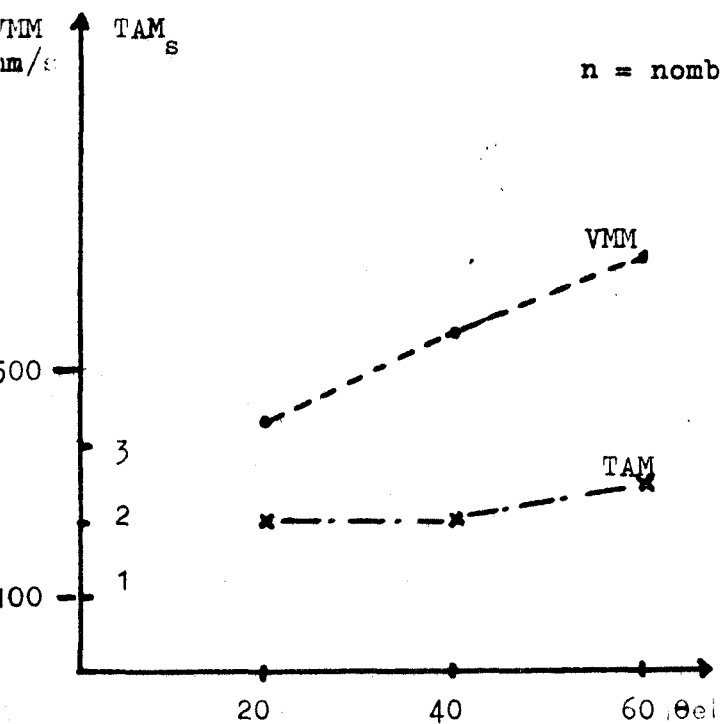
Influence de l'excentricité
du stimulus

| REponses Types \ θ_e | CORPS | | | TETE | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ± 20 | ± 40 | ± 60 | ± 20 | ± 40 | ± 60 |
| A | 15 | 19 | 15 | 33 | 33 | 33 |
| B | 78 | 63 | 63 | 63 | 67 | 60 |
| C | 2 | 8 | 9 | 2 | 0 | 2 |
| D | 5 | 10 | 6 | 2 | 0 | 5 |
| n | 60 | 48 | 46 | 40 | 33 | 40 |
| Non réponses% | 0 | 0 | 0 | 9 | 28 | 32 |

Sans distinction de
l'excentricité du stimulus

| REponses Types \ θ_e | I + II | | I | | II | |
|--------------------------------|--------|-----|----|----|----|----|
| | M | T | M | T | M | T |
| A | 16 | 33 | 18 | 30 | 14 | 37 |
| B | 69 | 63 | 69 | 66 | 69 | 58 |
| C | 6 | 1 | 4 | 1 | 8 | 3 |
| D | 6 | 3 | 9 | 3 | 9 | 2 |
| n | 154 | 113 | 77 | 70 | 77 | 35 |
| Non réponses% | 0 | 24 | 0 | 1 | 0 | 45 |

FIGURE IV - 5 : Répartition des réponses manuelles et céphaliques. EXP 2



| θ_e | n | VMM | | | n | TAM | | |
|------------|----|---------------------|----------|------|----|------------------|----------|-----|
| | | \bar{VMM} mm/s | σ | V | | \bar{TAM} s | σ | V |
| ± 20 | 29 | 310 | 90 | 0,3 | 29 | 1,8 | 0,8 | 0,4 |
| ± 40 | 24 | 430 | 160 | 0,38 | 24 | 1,9 | 0,4 | 0,2 |
| ± 60 | 23 | 490 | 150 | 0,3 | 23 | 2,2 | 0,4 | 0,2 |

| θ_e | n | VMM | | | n | TAM | | |
|------------|----|-------------|----------|------|----|-------------|----------|-----|
| | | \bar{VMM} | σ | V | | \bar{TAM} | σ | V |
| ± 20 | 29 | 365 | 100 | 0,28 | 29 | 2,2 | 1,15 | 0,5 |
| ± 40 | 24 | 470 | 185 | 0,4 | 24 | 2,2 | 0,8 | 0,4 |
| ± 60 | 24 | 595 | 185 | 0,3 | 24 | 2,7 | 1,2 | 0,4 |

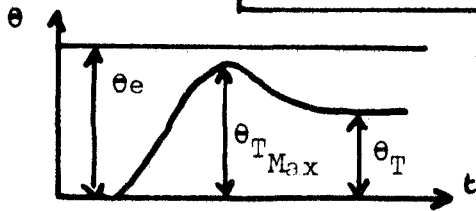
FIGURE IV - 6 : Variations des vitesses de montée (VMM) et temps d'ajustement (TAM) manuels en fonction de θ_e pour tous les sujets et tableaux des valeurs moyennes de VMM et TAM pour chacun des deux groupes de sujets. EXP 2

I.3 - Etude de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués par l'opérateur pendant la phase de recherche du stimulus auditif et lors de la stabilisation de la tête

Le sujet étant renseigné par la disparition du stimulus sonore lors du pointage correct de la main, l'amplitude du déplacement manuel correspondant est celle prise par le stimulus ($\epsilon_{PM} = 0$). Ce paragraphe ne présente alors que les variations des amplitudes des mouvements céphaliques pendant les différentes tâches de localisation du stimulus sonore.

Le calcul de D (cf. chapitre II § V) permet encore de rendre compte de l'importance de l'amplitude des mouvements céphaliques de chaque sujet, figure IV - 7.

| GROUPE | I | | | II | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| SUJET | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| D | 0,47 | 0,92 | 0,58 | 0,09 | 0,1 | 0,17 |
| D _{Max} | 0,63 | 1,16 | 0,69 | 0,09 | 0,13 | 0,23 |



$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T i}}{\theta_{e i}} \quad D_{Max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T_{Max} i}}{\theta_{e i}}$$

FIGURE IV - 7 : Valeurs du paramètre D mettant en évidence l'importance de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués par chaque sujet.

Remarquons encore la grande dispersion inter-individuelle, et plus particulièrement les faibles valeurs du paramètre D pour les sujets ID, JFH et BL, appartenant au groupe II. Ces opérateurs humains effectuent des mouvements céphaliques de très fai-

ble amplitude. On rencontre dans ce groupe des absences nombreuses de déplacement céphalique (pourcentage de "non réponses" relevées § I.2).

De plus on retrouve une différence de comportement entre les groupes I et II concernant les amplitudes maximales atteintes par la tête lors de la phase de recherche du stimulus sonore (paramètre D_{Max}). L'examen de la figure IV - 8 met en évidence une très faible excentricité du mouvement céphalique en fonction de l'amplitude du stimulus pour le groupe II et illustre le comportement signalé ci-dessus.

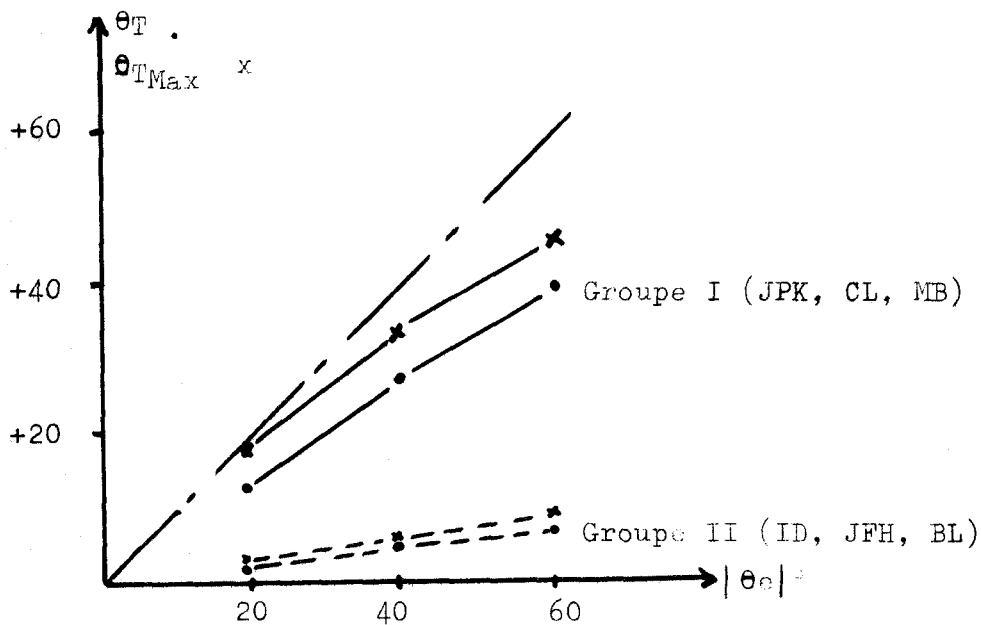
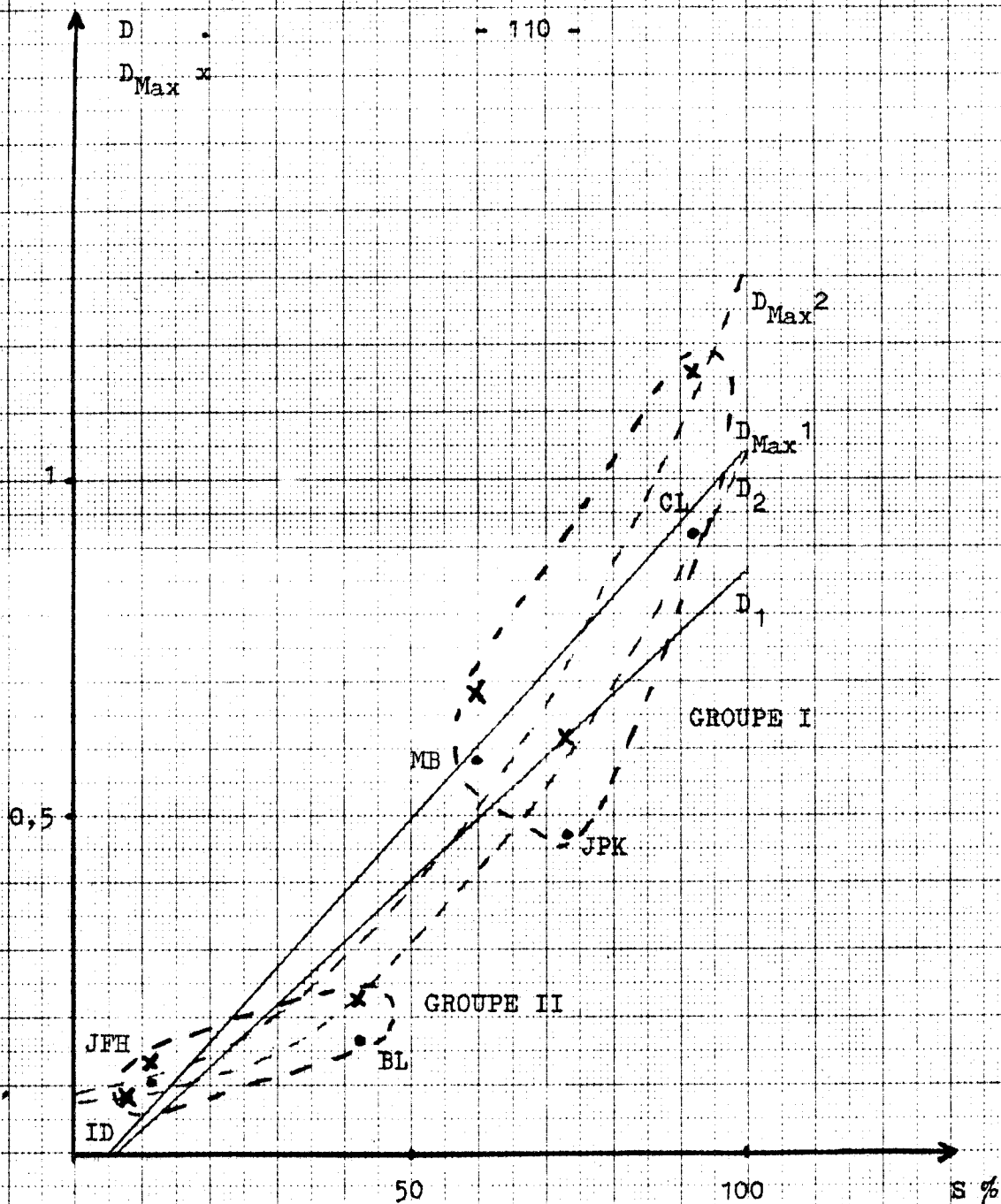


FIGURE IV - 8 : Variations de l'amplitude des mouvements céphaliques (maximale, θ_{TMax} , et à la stabilisation θ_T) en fonction de l'excentricité du stimulus sonore θ_e pour les deux groupes de sujets (Exp. 2).

Par ailleurs les variations du paramètre D (et D_{Max}) (illustrant les mouvements céphaliques de l'opérateur) en fonction du paramètre S (pourcentage de réponses manuelles apparaissant après la réaction céphalique) sont indiquées figure IV - 9. Le coefficient de corrélation ($\gamma \simeq 0,92$ à $0,94$) est élevé et les courbes de régression linéaire montrent que D augmente assez fortement en fonction de S : lorsqu'on trace la courbe $D = f(S^2)$ le coefficient de corrélation augmente ($\gamma \simeq 0,95$ à $0,97$). On remarque également figure IV - 9 la répartition des deux groupes de sujets.



$$S = \% (TLM - TIT \geq 0)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{T i}}{\theta e i}$$

$$D_1 = 0,9 \cdot 10^{-2} s - 0,04 \quad \rho = 0,92$$

$$D_{Max}^1 = 1,1 \cdot 10^{-2} s - 0,06 \quad \rho = 0,94$$

$$D_2 = 0,95 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,08 \quad \rho = 0,95$$

$$D_{Max}^2 = 1,23 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,09 \quad \rho = 0,97$$



FIGURE IV - 9 : Courbes de variations de l'amplitude des mouvements céphaliques (D et D_{Max}) en fonction de l'écart entre les temps de latence S (Exp. 2).

I.4 - Rappel des principaux résultats concernant les expériences à "Tête libre - boucle fermée" (expérience 2)

L'analyse des résultats précédents, obtenus lors des expériences dans lesquelles une information de retour est donnée à l'opérateur humain, montre que :

- la dispersion inter-individuelle est très importante, bien que l'opérateur soit renseigné sur la validité de son pointage manuel (boucle de retour),
- le processus de localisation du stimulus sonore paraît différent selon les sujets : les valeurs des paramètres S et D permettent de proposer un classement des sujets en deux groupes.

Les sujets du groupe I effectuent généralement d'abord un mouvement de tête puis pointent la main vers le stimulus (S grand) ; l'une des caractéristiques importantes réside dans l'ampleur du mouvement céphalique effectué pour localiser le stimulus sonore (D grand). Par contre les sujets du groupe II effectuent généralement leur réaction manuelle avant leur réaction céphalique, quand celle-ci existe (S faible); la réponse manuelle est rapide (VMM élevée) mais peu précise (TAM élevée) et le mouvement céphalique, quand il existe, est de faible amplitude (D faible).

Notons que dans ces expériences (existence d'une boucle de retour), l'obligation de mouvoir la tête n'est pas impérative pour l'opérateur humain effectuant une tâche de pointage. En effet celui-ci peut réaliser quand même un pointage correct en déplaçant seulement le bras jusqu'à ce qu'il "atteigne" et "éteigne" le stimulus, tout en gardant la tête immobile.

Les données mises en évidence dans les expériences, sans boucle de retour, exposées dans le paragraphe suivant, permettront d'infirmer ou de confirmer certains résultats que nous venons d'exposer.

II - ANALYSE DES RESULTATS DES EXPERIENCES " TETE LIBRE - BOUCLE OUVERTE "
(Expérience 4)

Lorsque l'information de retour est supprimée (le haut parleur reste constamment excité), la tâche de l'opérateur s'avère plus difficile ; ceci se traduit principalement par une augmentation générale du temps de recherche et de localisation du stimulus, et par la présence d'une erreur permanente manuelle, enregistrements figure IV - 10. Ces enregistrements révèlent également de grandes différences inter-individuelles concernant l'importance de l'amplitude des mouvements céphaliques sur le processus de localisation d'un stimulus auditif périphérique.

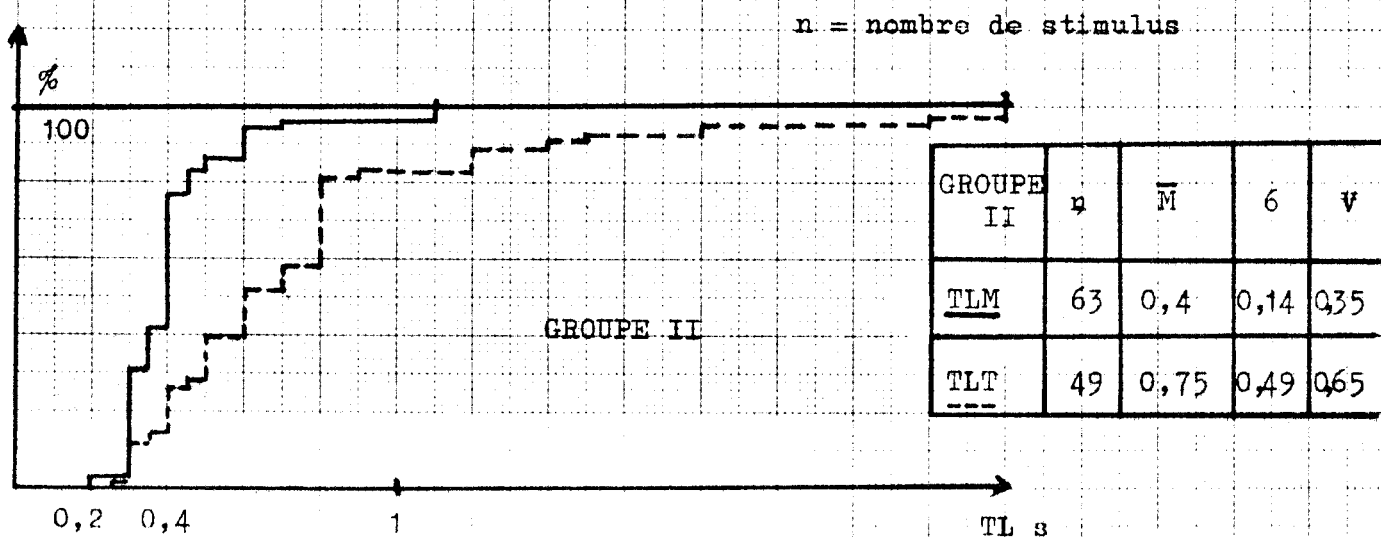
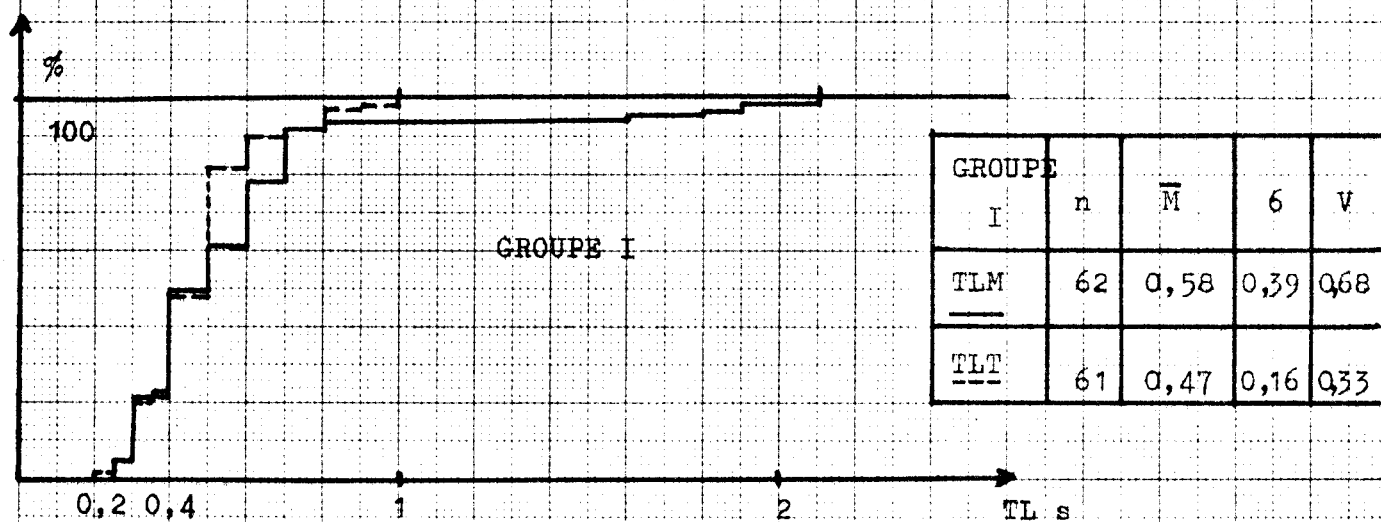
II.1 - Etude des variations des temps de latence manuels et céphaliques de l'opérateur humain (figure IV - 11)

Le tableau, figure IV - 11 a, donnant les pourcentages des écarts positifs ou nuls entre les temps de latence manuels et céphaliques (paramètre S) pour chaque sujet, révèle que :

- la dispersion inter-individuelle reste importante,
- l'examen des valeurs, prises par le paramètre S, permet de supposer un classement des sujets en deux groupes identiques à celui proposé précédemment (cf. § I.1),
- la différence constatée précédemment entre les deux groupes est accentuée (cf. § I.1) : le groupe I présente une valeur de S de 71 à 91 % au lieu 60 à 92 % précédemment, le groupe II de 5 à 33 % au lieu de 8 à 42 %.

| GROUPE | I | | | II | | |
|----------------------|-----|----|----|----|-----|----|
| S % \ SUJET | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| S = % (TLM-TLT >= 0) | 71 | 90 | 91 | 5 | 17 | 33 |

(a)



(b)



FIGURE IV - 11 : Courbes de fréquences cumulées et valeurs moyennes des temps de latence manuels et céphaliques selon les groupes (b) définis par les valeurs de S (Exp. 4).

Ces premières constatations laissent supposer que la suppression de la boucle de retour d'information ne change pas le précédent classement des sujets.

Les courbes de fréquences cumulées, figure IV - 11 b des temps de latence manuels et céphaliques pour chaque groupe confirment la répartition des sujets en deux groupes : l'écart moyen est de + 0,11 s pour le groupe I ($TLM > TLT$), il est de - 0,35 s pour le groupe II ($TLM < TLT$) ; résultats significatifs à plus de 99,9 % pour chacun des deux groupes de sujets.

En outre, si l'on considère les valeurs des temps de latence obtenus lors des expériences en "boucle fermée" (cf. § I.1, figure IV - 3) on peut remarquer une croissance importante des temps de latence TLM et TLT, due probablement à une difficulté supérieure pour l'opérateur humain à localiser le stimulus auditif en boucle ouverte, comme dans le cas des stimulus visuels (cf. chapitre III § II.2), le temps de calcul ou de décision étant plus important.

Enfin, de même que dans les expériences en "boucle fermée", l'analyse ne permet pas de déceler une variation significative des temps de latence manuels et céphaliques en fonction de l'excentricité du stimulus auditif périphérique (dispersion inter-individuelle très importante) même si l'étude est effectuée selon les groupes de sujets.

II.2 - Etude du régime dynamique des déplacements de la main et de la tête





- Classement en divers types de réponses

L'étude des différentes formes de réponses obtenues figure IV - 12, suggère les remarques suivantes :

- prépondérance des réponses manuelles avec ajustement continu (type A) pour les sujets du groupe I (50 %) pouvant être due à une approche "prudente" du stimulus (la tête

support des capteurs auditifs repérant le stimulus avant l'action manuelle),

- nombre important de réponses manuelles avec dépassement (type B (33 %) et avec palier (type C : 25 %) et (type D : 15 %) pour les sujets du groupe II, consécutif probablement à une réaction manuelle débutant avant le déplacement céphalique,
- répartition identique des réponses céphaliques (maximum de réponses de type B) à celle obtenue dans les expériences en "boucle fermée", avec toutefois un nombre un peu moins important de "non réponses" (20 % au lieu de 24 %).

| GROUPES DE SUJETS | I+II | | I | | II | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|----|----|----|----|----|
| | M | T | M | T | M | T |
|  A | 39 | 26 | 50 | 28 | 27 | 24 |
|  B | 30 | 58 | 27 | 63 | 33 | 50 |
|  C | 22 | 6 | 19 | 3 | 25 | 10 |
|  D | 9 | 10 | 4 | 6 | 15 | 16 |
| n | 122 | 95 | 62 | 57 | 60 | 28 |
| Non réponses % | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 38 |

n = nombre de stimulus

FIGURE IV - 12 : Répartition des réponses manuelles et céphaliques (Expérience 4).

- Variations des vitesses de montée et temps d'ajustement manuels

L'étude des vitesses de montée (VMM) et temps d'ajustement (TAM) manuels en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus ne peut qu'être qualitative étant donnée la présence d'erreurs manuelles permanentes importantes (cf. paragraphe suivant). Les valeurs relevées sont toutefois reliées à la valeur de θ_e mais doivent être interprétées avec circonspection étant donné l'erreur permanente importante, positive ou négative ; notamment au sujet des temps d'ajustements.

Remarquons cependant, figure IV - 13, une augmentation des temps d'ajustement manuels et une diminution importante des vitesses de montée par rapport aux résultats des expériences en "boucle fermée". Les différences relevées antérieurement entre les deux groupes de sujets (VMM et TAM plus élevés pour les sujets du groupe II, figure IV - 6) se retrouvent mais ne peuvent pas être considérées comme significatives en raison des considérations exposées plus haut (influence de l'erreur permanente manuelle).

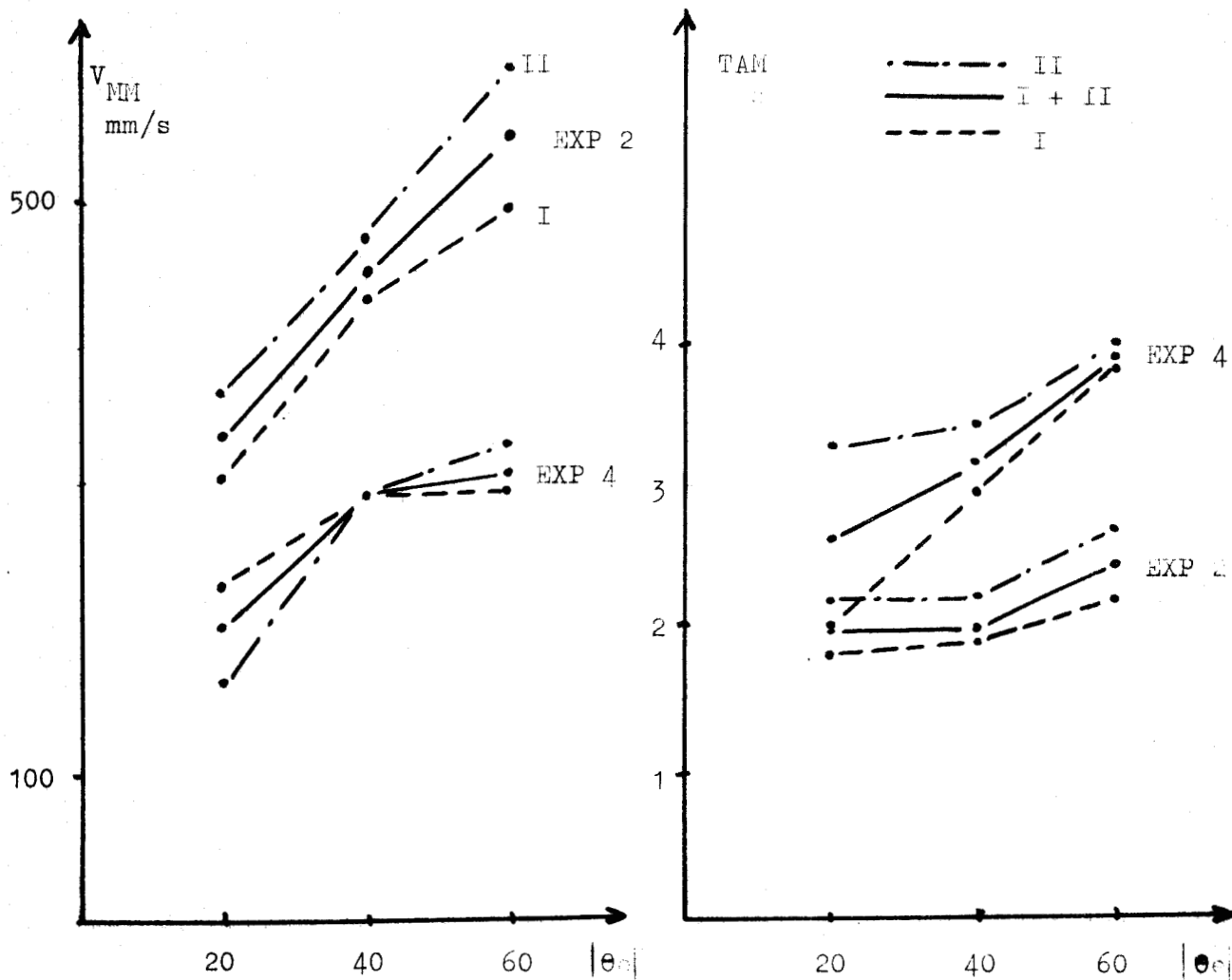


FIGURE IV - 13 : Variations des vitesses de montée (VMM) et des temps d'ajustements (TAM) manuels en fonction de l'excentricité du stimulus. Influence de la boucle de retour (Exp. 2 et Exp. 4).

Remarque : La même analyse, pour les déplacements céphaliques, n'a pas été effectuée en raison de la différence des stratégies des opérateurs déjà signalée précédemment.



II.3 - Etude des résultats relatifs à la stabilisation des réponses manuelles (pointage) et céphaliques : influence des mouvements de la tête sur les performances réalisées

Le régime permanent des réponses de l'opérateur peut

être caractérisé comme précédemment par l'amplitude atteinte par la tête à la stabilisation de celle-ci (θ_T), par les mouvements céphaliques globaux effectués par chaque sujet (paramètre D), par l'erreur permanente manuelle (ϵ_{PM}) et par le calcul des paramètres C et E représentant le pourcentage de "coups au but" et la précision du pointage manuel effectués par chaque sujet.

II.3.1 - Amplitude des mouvements céphaliques effectués par les sujets

L'étude de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués par chaque sujet (paramètre D) montre, figure IV - 14, que :

- Le classement des différents sujets en deux groupes, effectué lors de l'analyse des résultats des expériences 2 (§ I) est encore mis en évidence. On observe chez les sujets du groupe I des mouvements de tête importants et chez les sujets du groupe II des déplacements céphaliques très faibles voisins de 12 à 15 % de l'excentricité des stimulus auditifs
- Les mouvements de tête effectués, figure IV - 15, sont en général de plus grande amplitude que dans le cas précédent, en boucle fermée, figure IV - 8. Ce fait est particulièrement significatif si on relève les valeurs de D_{Max} , tableau figure IV - 14, rendant compte de l'amplitude maximale du déplacement céphalique au cours de la recherche du stimulus (cf. figure IV - 7).

| GROUPE | I | | | II | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| SUJETS | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| D % | | | | | | |
| D | 0,39 | 1,02 | 1,05 | 0,14 | 0,15 | 0,12 |
| D _{Max} | 0,63 | 1,44 | 1,33 | 0,15 | 0,36 | 0,17 |

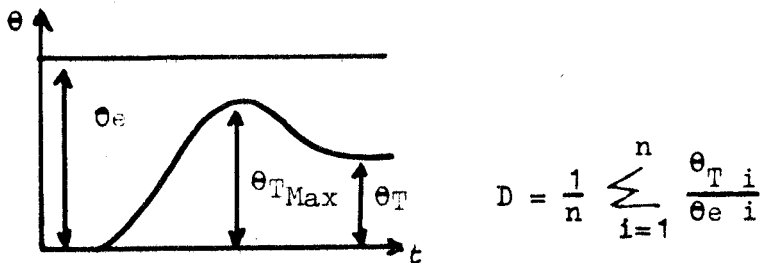


FIGURE IV - 14 : Valeurs du paramètre D mettant en évidence l'importance de l'amplitude des mouvements céphaliques pour chaque sujet.

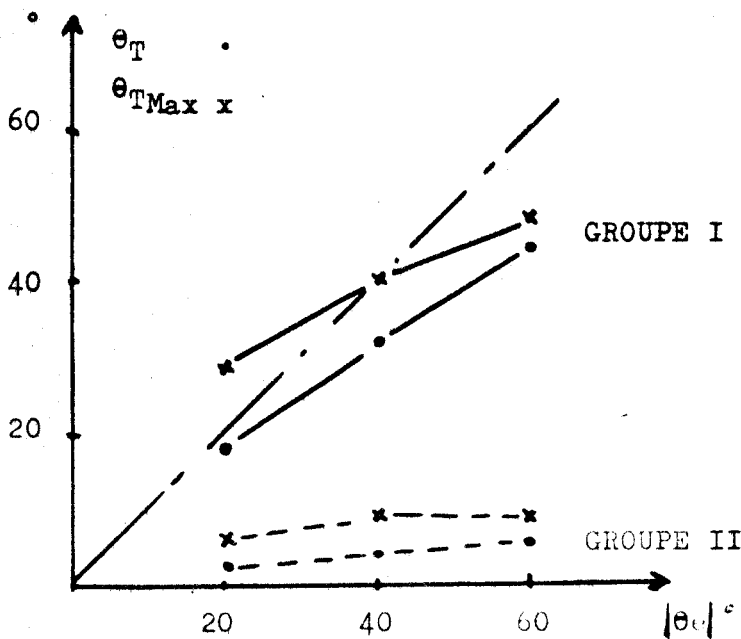
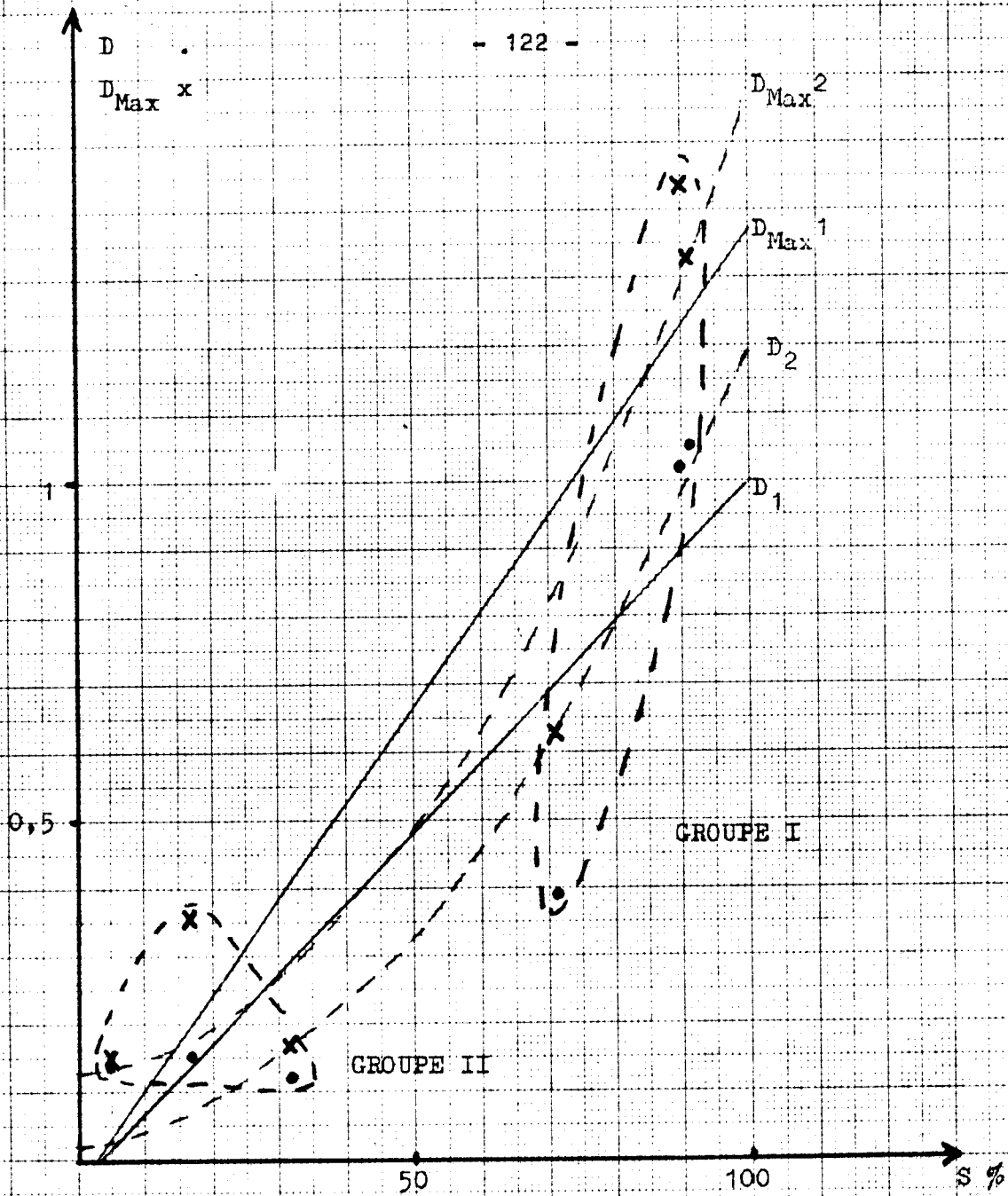


FIGURE IV - 15 : Variations de l'amplitude des mouvements céphaliques (maximale, θ_{TMax} , et à la stabilisation θ_T) en fonction de l'excentricité θ du stimulus pour les deux groupes de sujets (Exp. 4).

Les variations de D en fonction de S, figure IV - 16, sont du même type que celles relevées dans les expériences précédentes figure IV - 9 ; le coefficient de corrélation des élevé ($\rho \simeq 0,9$ à $0,93$) et surtout lorsqu'on étudie les variations de D en fonction de S^2 ($\rho \simeq 0,97$ à $0,99$). La séparation des deux groupes est très accentuée.



$$S = \% (TLM - TLT \geq 0)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{T i}}{\sigma_{e i}}$$

$$D_1 = 1,05 \cdot 10^{-2} S - 0,06$$

$$r = 0,90$$

$$D_{Max 1} = 1,4 \cdot 10^{-2} S - 0,03$$

$$r = 0,93$$

$$D^2 = 1,15 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,04$$

$$r = 0,99$$

$$D_{Max 2} = 1,45 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,13$$

$$r = 0,97$$



FIGURE IV - 16 : Courbes de variations de l'amplitude des mouvements céphaliques (D et D_{Max}) en fonction de l'écart entre les temps de latence S (Exp. 4).

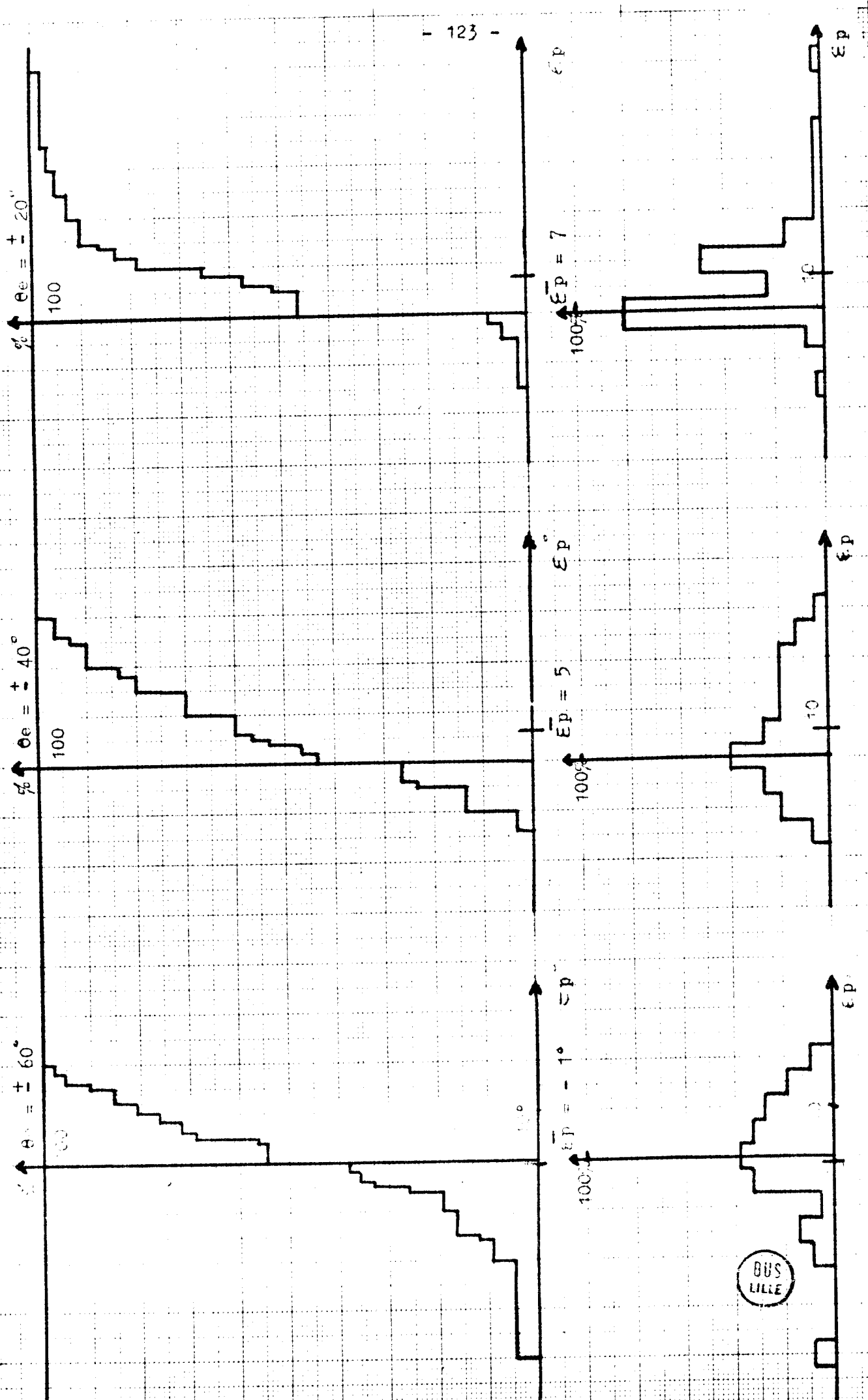


FIGURE IV - 17 : Courbes de fréquences cumulées et histogrammes de l'erreur permanente (ϵ_p) en fonction de l'excentricité ϵ_e du stimulus (Exp. 4). Ensemble des sujets.

II.3.2 - Analyse de l'erreur permanente manuelle (ϵ_{pM}) en fonction de l'excentricité du stimulus et selon les sujets

L'examen de la répartition des erreurs manuelles permanentes (ϵ_{pM}) en fonction de l'excentricité (θ_e) du stimulus, courbes de fréquences cumulées et histogrammes figure IV - 17, met en relief que :

- les erreurs manuelles, en général, sont positives aux faibles excentricités du stimulus ($\epsilon_{pM} =$ valeur moyenne $= + 7^\circ$ pour $\theta_e = \pm 20^\circ$, $+ 5^\circ$ pour $\theta_e = \pm 40^\circ$) et légèrement négatives aux fortes excentricités du stimulus ($\epsilon_{pM} = - 1^\circ$ pour $\theta_e = \pm 60^\circ$),
- la dispersion est importante, masquant d'éventuelles différences entre les erreurs commises lors du pointage manuel de l'opérateur vers des stimulus situés à des excentricités symétriques, $+ 20$ et $- 20^\circ$ par exemple.

Le calcul des valeurs du paramètre C, donnant les pourcentages de "coups au but" (erreur permanente pratiquement nulle) réalisés par chaque sujet (cf. chapitre II § V), révèle une grande dispersion inter-individuelle, figure IV - 18 ; on observe, en effet, des valeurs de C compris entre 33 % (sujet ID par exemple) et 62 % (sujet CL).

| GROUPE | I | | | II | | |
|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| PARAMETRES | | | | | | |
| C = % ($\epsilon_{pM} \leq 5^\circ$) | 52,5 | 62 | 52,5 | 33 | 42 | 33 |
| $E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_{pM i}}{\theta_{e i}}$ | 0,22 | 0,12 | 0,3 | 0,49 | 0,21 | 0,33 |

FIGURE IV - 18 : Valeurs du pourcentage de "coups au but" (paramètre C) et de la précision du pointage (paramètre E) mettant en évidence les performances réalisées par les différents sujets lors du pointage manuel (Exp. 4).

La dispersion apparaît également dans les valeurs du paramètre E, figure IV - 18 (moyenne des rapports de la valeur absolue de l'erreur permanente manuelle sur la valeur absolue de l'excentricité du stimulus, cf. chapitre II § V) rendant compte de la performance moyenne de l'opérateur au cours de l'expérience, complétant celle du pourcentage du nombre de "coups au but".

L'observation du tableau, figure IV - 18, fait remarquer en outre que l'on peut classer encore les sujets en

deux groupes identiques à ceux proposés précédemment ; les meilleurs pointages manuels sont réalisés par les sujets du groupe I ($C > 52 \%$), alors que pour les sujets du groupe II, le pourcentage de "coups au but" est moins élevé ($C \leq 42 \%$).

Les courbes, figure IV - 19, confirment ces résultats en mettant en évidence une erreur moins importante pour la catégorie de sujets appartenant au groupe I.

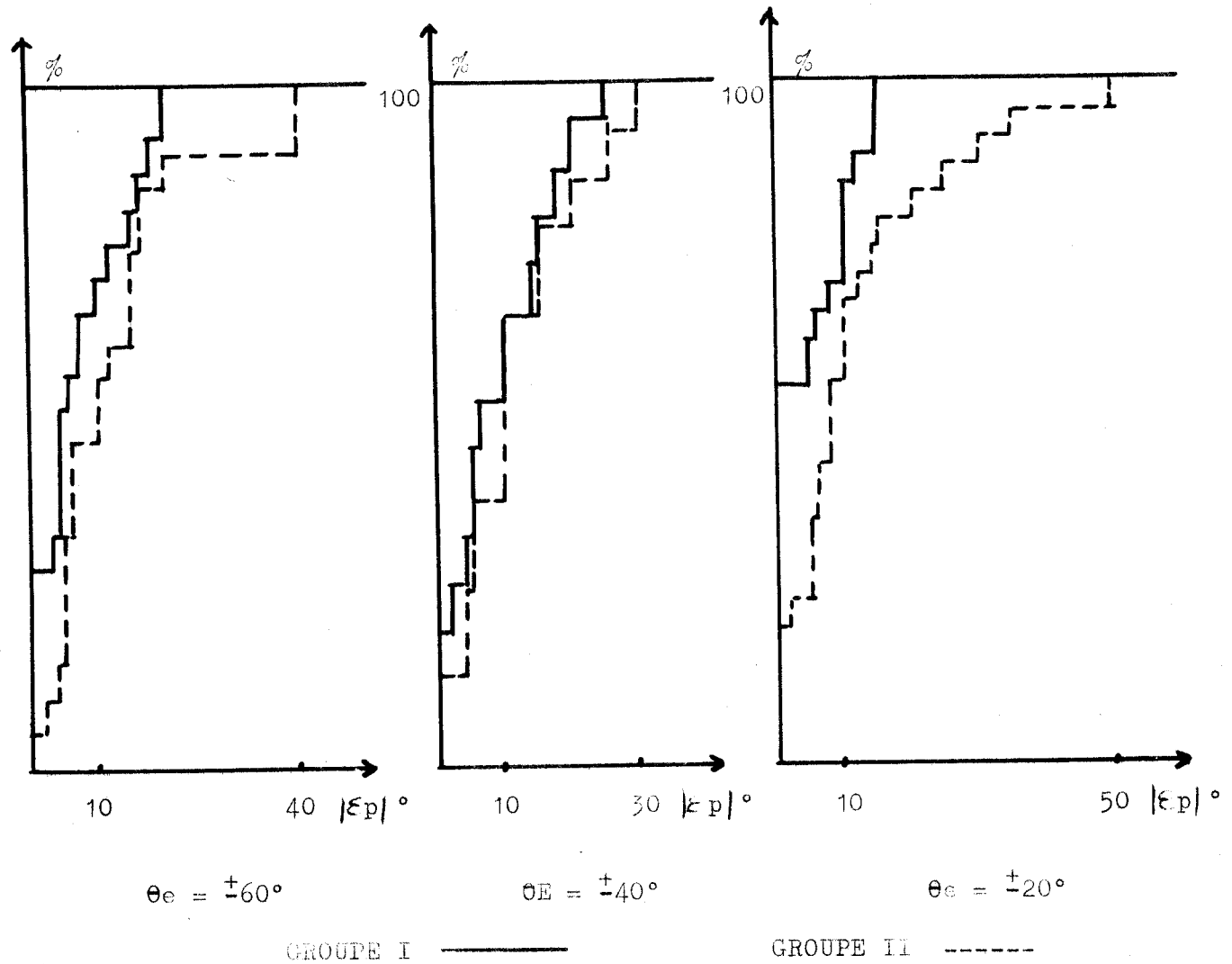


FIGURE IV - 19 : Courbes de fréquences cumulées des erreurs permanentes manuelles (ε_{pM}) pour chaque groupe de sujets en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus (Exp. 4).

II.3.3 - Influence de l'amplitude des mouvements de la tête sur la précision du pointage manuel

L'observation comparative du tableau figure IV - 18 (valeurs des paramètres C et E) et de celui, figure IV - 14 (valeurs du paramètre D) permet de supposer l'existence d'une loi de variation et d'une corrélation entre l'importance de l'amplitude des mouvements de la tête, représentée par la valeur du coefficient D, et la précision du pointage manuel, représentée par les valeurs des coefficients C et E.

En effet les courbes tracées figure IV - 20, mettent en évidence que :

- La distinction proposée entre les deux groupes de sujets est significative.
- Le coefficient de corrélation entre les paramètres C et D est important ($\rho \simeq 0,85$) et plus particulièrement pour les valeurs de D_{Max} ($\rho \simeq 0,93$). Les droites de régression linéaire mettent en évidence une augmentation de la précision de la visée manuelle en fonction de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués par l'opérateur humain.
- Le coefficient de corrélation linéaire entre E et D est compris entre $\rho \simeq 0,66$ (pour D) et $\rho \simeq 0,78$ (pour D_{Max}), figure IV - 20 ; la loi de variation de la précision du pointage manuel (paramètre E) en fonction de l'amplitude des mouvements céphaliques (paramètre D) semble être de la forme $\frac{1}{x}$ (ρ compris entre 0,74 pour D et 0,94 pour D_{Max}) ; les performances diminuent très fortement si les mouvements de tête sont très faibles.

C %

100

$$C = 23 D + 35 \quad r = 0,85$$

$$C = 19 D_{Max} + 33 \quad r = 0,93$$

GROUPE I

D

D_{Max}

50

GROUPE II

0,5

1

D

D_{Max}

E

1

$$E = -0,21 D + 0,38 \quad r = 0,66$$

$$E = -0,19 D_{Max} + 0,4 \quad r = 0,78$$

$$E = 0,03 \frac{1}{D} + 0,15 \quad r = 0,74$$

$$E = 0,05 \frac{1}{D_{Max}} + 0,13 \quad r = 0,94$$

D_{Max}

D

GROUPE II

GROUPE I

0,5

0,5

1

D

D_{max}

D



Figure IV - 20 : Influence des mouvements de tête effectués (paramètres D et D_{Max}) sur la précision du pointage manuel (paramètres C et E) (Exp. 4).

II.4 - Résumé des principaux résultats obtenus

L'analyse des résultats présentés dans ce paragraphe fait apparaître que :

- L'annulation de l'information de retour augmente la difficulté du test : augmentation de TLM, TLT, TAM, θ_T et $\theta_{T \text{ Max}}$, diminution de VMM.

- Le classement de nos sujets en deux groupes distincts semble être confirmé ; en effet les sujets du groupe II effectuent des mouvements céphaliques de faible amplitude non seulement dans les expériences en "boucle fermée" (§ I.3) mais aussi en "boucle ouverte" (§ II.3).

- L'amplitude du déplacement de la tête vers le stimulus auditif a une importance sur la qualité du pointage manuel des sujets.

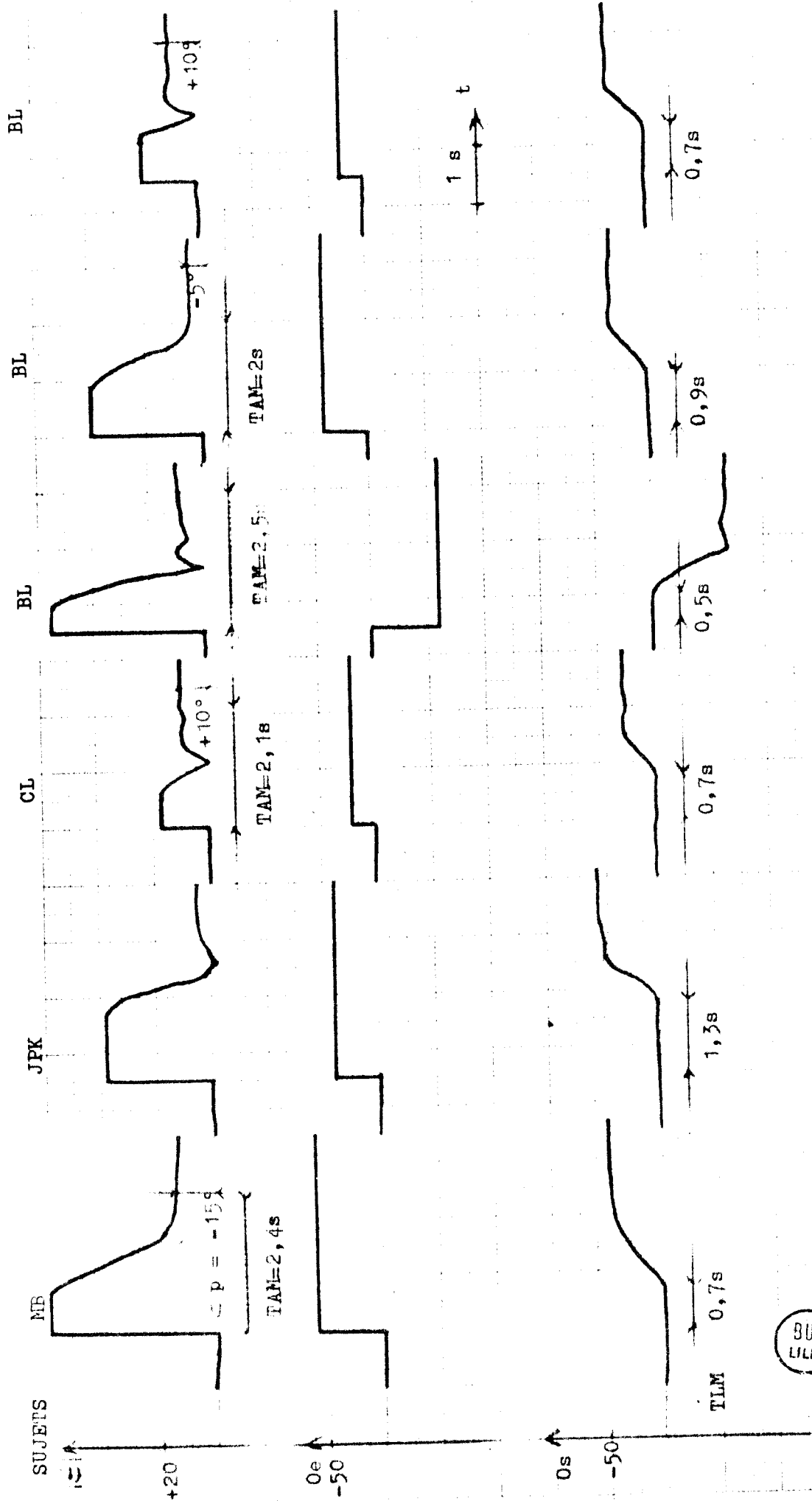


FIGURE IV - 21 : Enregistrements (Expérience 8). Stimulus auditifs. "Tête-bloquée, boucle ouverte".

III - INFLUENCE DU MAINTIEN DE LA TÊTE EN POSITION DE REPOS (EXPERIENCE 8)
SUR LES REponses MANUELLES DE L'OPERATEUR HUMAIN SANS RETOUR D'INFOR-
MATION (cf. Enregistrement figure IV - 21)

La fixation de la tête en position de repos peut modifier la stratégie de recherche du stimulus par l'opérateur humain (mise en évidence par l'étude du régime dynamique des réponses) et peut agir sur la qualité du pointage manuel. C'est ce que nous allons présenter dans ce paragraphe. Les analyses en "boucle fermée" n'ont pas apporté des différences significatives.

III.1 - Influence du blocage de la tête, en position de repos face au sti-
mulus central, sur les caractéristiques de la réponse manuelle

L'analyse des temps de latence manuels, illustrée figure IV - 22, révèle, en comparaison avec celle relative aux expériences "tête libre" (expérience 4) que la différence entre les temps de latence manuels obtenus chez les deux groupes de sujets précédents est conservée : le temps de latence moyen du groupe I (0,6 s) est nettement supérieur à celui du groupe II (0,5 s) ; toutefois celui-ci est plus important que le temps de latence détecté dans l'expérience avec la "tête libre" (0,4 s). Le pourcentage de types de réponses, figure IV - 23, avec ajustement continu (type A) est plus important que dans les expériences avec tête libre ($> 50 \%$), notamment pour les sujets du groupe I (68 %).

Les courbes, figure IV - 24, mettent en évidence par ailleurs une diminution globale des vitesses de montée manuelle par rapport à celles relevées dans les expériences "tête libre". On ne peut plus déceler par contre de variation significative des

temps d'ajustement manuels (TAM) en fonction de l'excentricité (θ_e) du stimulus, en raison de l'existence d'une erreur permanente variable dans les réponses manuelles de l'opérateur humain.

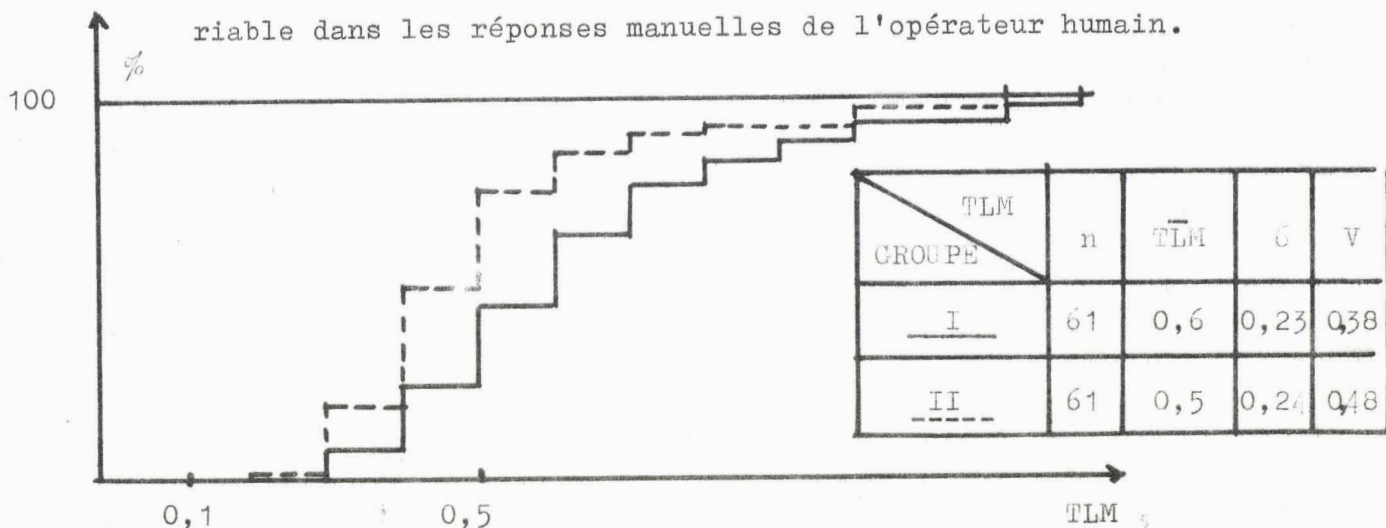






FIGURE IV - 22 : Courbes de fréquences cumulées et valeurs moyennes des temps de latence manuels (TLM) selon les groupes de sujets (Exp. 8).

| GROUPE DE SUJETS | | I+II | I | II |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---|------|----|----|
| Réponses | | | | |
| Types % | | M | M | M |
|  | A | 59 | 68 | 50 |
|  | B | 22 | 11 | 32 |
|  | C | 15 | 13 | 18 |
|  | D | 4 | 8 | 0 |
| n | | 0 | 0 | 0 |

n = nombre de stimulus



FIGURE IV - 23 : Répartition des réponses manuelles de l'opérateur (Exp. 8).

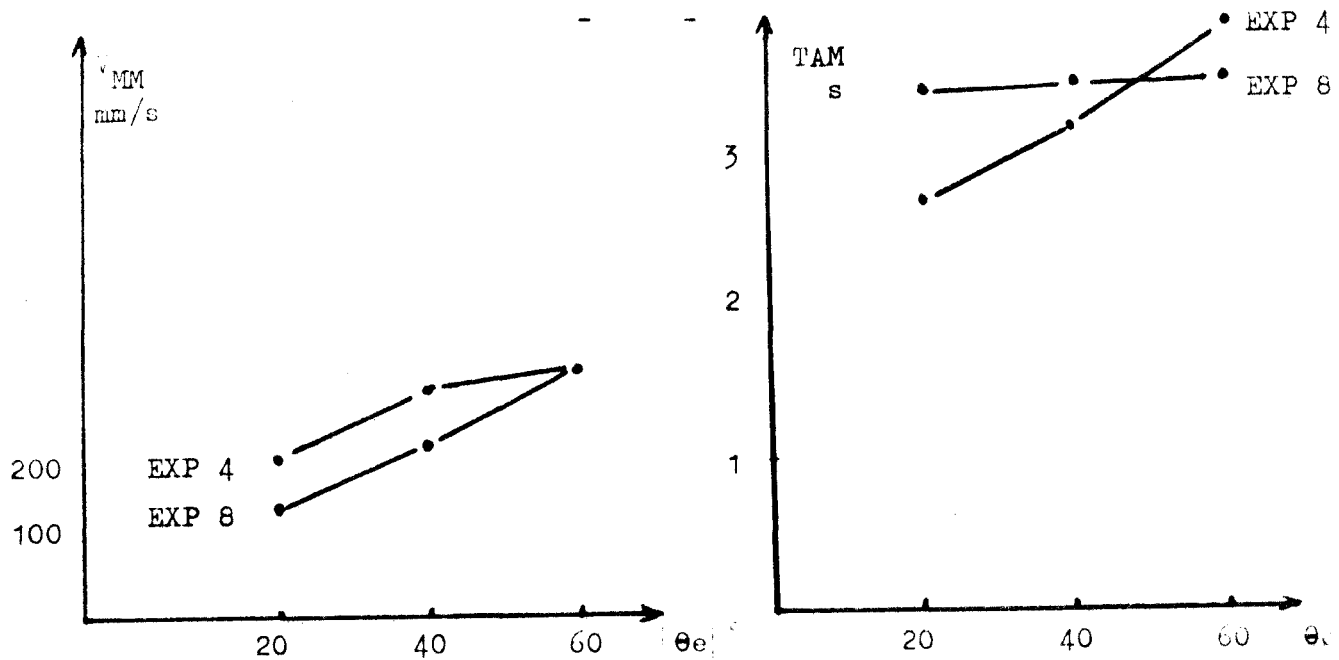


FIGURE IV - 24 : Variations des vitesses de montée et temps d'ajustement manuels en fonction de l'excentricité du stimulus (Exp. 8) ou sans (Exp. 4) fixation de la tête.

III.2 - Influence de la fixation de la tête sur les paramètres de précision du pointage manuel

Bien que les erreurs permanentes manuelles soient importantes, elles dépendent de l'amplitude de l'excentricité du stimulus : positives à $\theta_e = \pm 20^\circ$ ($\bar{p}_M = 10^\circ$) ; à $\theta_e = \pm 40^\circ$ ($\bar{p}_M = 2,5^\circ$) ; et négatives à $\theta_e = \pm 60^\circ$ ($\bar{p}_M = -7^\circ$), figure IV - 25

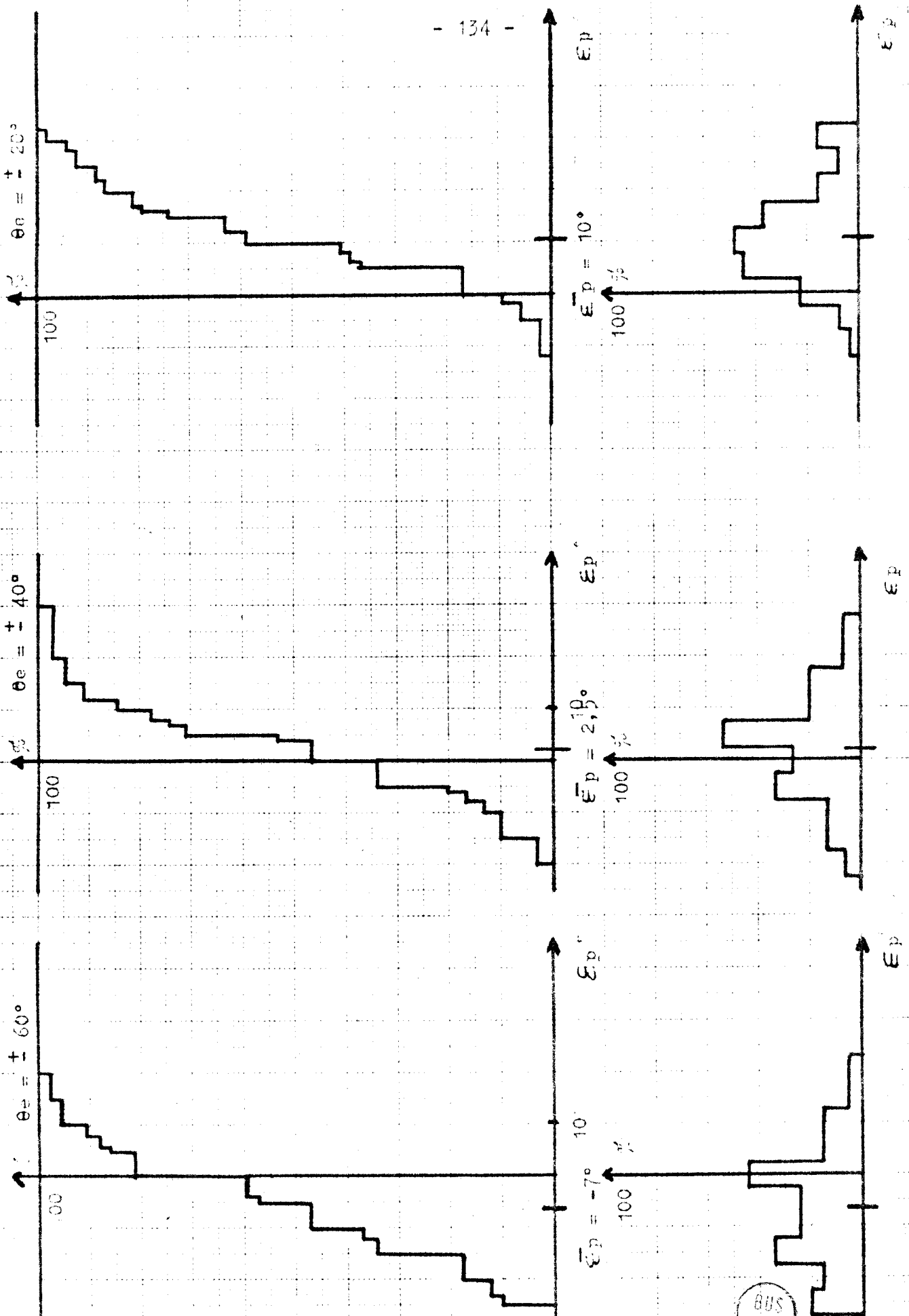


FIGURE IV - 25 : Courbes de fréquences cumulées et histogrammes de l'erreur permanente manuelle (ϵ_p) en fonction de l'excentricité du stimulus (Exp. 8).

Les performances réalisées sont représentées par les valeurs des coefficients C et E et indiquées sur le tableau figure IV - 26.

| GROUPE | I | | | II | | |
|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|
| SUJETS | JPK | CL | MB | ID | JFH | BL |
| PARAMETRES | | | | | | |
| $C = \% (\epsilon_{PM} \leq 5^\circ)$ | 38 | 45 | 38 | 15 | 57 | 48 |
| $E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_{PM i}}{\theta_{e i}}$ | 0,48 | 0,36 | 0,53 | 0,54 | 0,27 | 0,3 |

FIGURE IV - 26 : Valeurs du pourcentage de "coups au but" (paramètre C) et de la précision du pointage (paramètre E) mettant en évidence les performances réalisées par les différents sujets lors du pointage manuel (Exp. 8).

Observons, figure IV - 26, que les sujets du groupe I effectuent des pointages beaucoup moins précis que dans le cas où la tête est libre (cf. figure IV - 18). En ce qui concerne les sujets du groupe II, l'un réalise de meilleures performances (sujet BL); un autre de moins bonnes (sujet ID) et le troisième (sujet JFH) améliore légèrement sa visée manuelle (paramètre C) tout en commettant des erreurs plus importantes (paramètre E).

III.3 - Résumé des résultats obtenus lorsque la tête est fixée en position de repos

Les données précédentes permettent de suggérer les

propriétés ci-dessous :

- La "stratégie" de localisation du stimulus par l'opérateur humain est modifiée ; quand le sujet croit avoir localiser le stimulus, il effectue une réponse manuelle généralement continue du type A (§ III.2.1) car il n'a aucun moyen (tête fixe) de contrôler, à l'aide de mouvements céphaliques, la validité de son pointage.

- Les performances réalisées par les sujets des deux groupes sont différentes : les sujets qui n'effectuaient que de faibles mouvements céphaliques (expérience 4) paraissent ici moins gênés par le blocage de la tête que ceux du groupe I où l'amplitude des mouvements de tête était importante (§ III.2.2).

CONCLUSION

Les résultats que nous venons de présenter dans ce chapitre mettent en évidence l'importance du rôle des mouvements de la tête dans une tâche de localisation de stimulus auditifs périphériques.

L'amplitude des mouvements céphaliques effectués par l'opérateur humain peut être envisagée comme un critère important, influant sur la précision du pointage manuel et permettant de proposer un classement des sujets en deux groupes distincts :

- Les uns effectuent leur réaction céphalique avant de commencer leur réponse manuelle. Pour localiser le stimulus ils pointent la tête dans la direction de celui-ci et leurs performances manuelles sont assez bonnes.
- Les autres débutent leur réaction manuelle puis effectuent des mouvements céphaliques de faible amplitude, leurs performances sont généralement moins bonnes.

Le chapitre suivant tente de dégager la synthèse des résultats exposés chapitre III et IV en vue d'une modélisation du processus de localisation spatiale de stimulus visuels et auditifs.

CHAPITRE V

SYNTHESE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

RELATIFS A LA LOCALISATION SPATIALE

DE STIMULUS VISUELS ET AUDITIFS

---ooOoo---

INTRODUCTION

Ce chapitre tente de dégager la synthèse des résultats expérimentaux, présentés précédemment, relatifs à la localisation spatiale par l'opérateur humain de stimulus visuels (cf. chapitre III) et auditifs (cf. chapitre IV), à l'aide d'un pointage manuel.

Nous comparons tout d'abord, à l'aide de tableaux récapitulatifs, le processus de localisation, par l'opérateur humain, de stimulus visuels à celui de stimulus auditifs ; rappelons en effet que le dispositif expérimental (cf. chapitre I) a été mis en place de telle façon que le protocole (cf. chapitre II) soit identique quelle que soit l'entrée appréhendée par le sujet (visuelle ou sonore).

Cette comparaison tout d'abord globale (concernant tous les sujets) est ensuite particularisée à nos deux groupes de sujets. Après avoir mis en évidence l'importance du rôle des mouvements de tête sur le processus de localisation d'un stimulus périphérique, qu'il soit visuel ou auditif, nous définissons les deux stratégies observées chez nos sujets, lors de la localisation d'un stimulus auditif.

I - ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS RELATIFS AUX STIMULUS VISUELS ET AUDITIFS

Le dispositif expérimental mis en place (cf. chapitre I) avait pour but de permettre une étude comparative du processus de localisation spatiale de stimulus visuels et auditifs. A cet effet le protocole d'expérience utilisé (chapitre II) est le même quelle que soit l'entrée appréhendée par le sujet.

Cette étude comparative peut être effectuée à deux niveaux considérant :

- d'une part, les réponses moyennes concernant tous les sujets,
- d'autre part, les réponses moyennes relatives à chacun des deux groupes de sujets définis au chapitre précédent.

I.1 - Analyse comparative globale des réponses de l'opérateur humain à des stimulus visuels et auditifs (Tableau figure V - 1)

Le tableau récapitulatif figure V - 1 donne les valeurs moyennes des temps de latence manuels et céphaliques, des vitesses de montée et temps d'ajustement manuels, des types de réponses de la main et de la tête observées et des erreurs permanentes, selon les diverses expériences réalisées et suivant la nature du stimulus appréhendée par le sujet.

| Nature du stimulus | STIMULUS VISUEL | | | | | STIMULUS AUDITIF | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-----------|--------|------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| Position de la tête | T L | | | T B | | T L | | | T B | | | |
| Boucle de retour | B F | | B O | | B O | B F | | B O | | B O | | |
| Expérience | I | | III | | VII | II | | IV | | VIII | | |
| Réponses céphaliques (T) | T | M | T | M | M | T | M | T | M | M | | |
| Réponses manuelles (M) | | | | | | | | | | | | |
| Temps de latence TL s | 0,37 | 0,41 | 0,45 | | 0,44 | 0,46 | 0,47 | 0,38 | 0,35 | 0,6 | 0,5 | 0,55 |
| Temps de latence en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | TLM > TLT | | | | | | | | | |
| | 40 | 0,36 | 0,39 | à 77 % | | | 0,38 | 0,35 | 0,6 | 0,5 | 0,55 | |
| | 60 | 0,4 | 0,45 | 0,45 | | | | | | | | |
| Vitesses de montée manuelles (VMM mm/s) en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | 380 | | 335 | 265 | | 335 | | 200 | 150 | |
| | 40 | | 565 | | 485 | 360 | | 450 | | 300 | 215 | |
| | 60 | | 665 | | 550 | 440 | | 540 | | 320 | | |
| Temps d'ajustement manuels (TAM s) en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | 1,30 | | 1,70 | | | | | 2,6 | 3 | |
| | 40 | | 1,60 | | 2 | 2,7 | | 2 | | 3,1 | | |
| | 60 | | 2 | | 2,5 | 3,1 | | 2,5 | | 3,9 | 3,5 | |
| Types de réponses obtenues en % | A | 39 | 50 | 53 | 48 | 45 | 33 | 16 | 26 | 39 | 59 | |
| | B | 56 | 36 | 40 | 41 | 41 | 63 | 69 | 58 | 30 | 22 | |
| | C | 4 | 5 | 4 | 6 | 11 | 1 | 6 | 6 | 22 | 15 | |
| | D | 1 | 9 | 3 | 5 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 4 | |
| | O | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 | 20 | 0 | 0 |
| Erreur permanente en valeur absolue en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | 10 | 0 | 9 | 1 | 1,5 | 12 | 0 | 9 | 7 | 11 | |
| | 40 | 17 | 0 | 18 | 2 | 2,5 | 24 | 0 | 22 | 10 | 9 | |
| | 60 | 20 | 0 | 24 | 3 | 3 | 37 | 0 | 35 | 10 | 11 | |

FIGURE V - 1 : Tableau récapitulatif des paramètres des réponses manuelles et céphaliques. Valeurs moyennes concernant tous les sujets.



Lors des expériences avec boucle de retour (Exp. I et II), on observe que le temps de latence manuel moyen est plus important pour les stimulus visuels (0,41 s) que pour les stimulus auditifs (0,35 s). Ce résultat est en accord avec de nombreux travaux antérieurs (24) ; il apparaît cependant qu'on ne peut conclure en ce qui concerne le temps de latence céphalique moyen en raison essentiellement de la dispersion importante observée provenant (comme nous le verrons plus loin) des différences de "stratégies" adoptées par les sujets et du fait qu'il ne leur est donné aucune consigne concernant les mouvements céphaliques.

Lors des expériences sans boucle de retour (Exp. III et IV), on observe au contraire des temps de latence manuels et céphaliques moyens beaucoup plus importants pour les stimulus auditifs (0,5 et 0,6 s) que pour les stimulus visuels (0,45 s). Cette différence importante constatée, qui peut être reliée à une augmentation très importante du temps de calcul ou de décision de l'opérateur, met en évidence la plus grande difficulté des expériences soumises aux sujets, surtout en ce qui concerne les stimulus auditifs. La réponse manuelle de l'opérateur est beaucoup moins rapide lorsqu'il doit localiser un stimulus auditif (les vitesses moyennes sont plus faibles), et son temps d'ajustement manuel est plus élevé même lorsque la boucle de retour d'information est fermée. Cet aspect plus "prudent" des réponses manuelles aux stimulus auditifs semble être dû à une moins grande quantité d'information fournie à l'opérateur sur la position du stimulus.

L'opérateur a au départ une connaissance de la position de la cible par son "image" spatiale : "image" visuelle sur la rétine de chaque oeil, "image" auditive due aux différences de phase et d'intensité du son arrivant à chacune des deux oreilles ; il peut effectuer des mouvements de tête (retour proprioceptif), enfin pour les stimulus visuels il peut effectuer des mouvements des yeux (retour oculo-moteur) afin de positionner la cible sur la région fovéale de la rétine ; cette dernière information, très importante, n'a pas de réel équivalent pour la perception auditive.

Le rôle des mouvements de la tête semble alors moins important dans le processus de localisation des stimulus visuels, ces mouvements étant étroitement liés aux mouvements des yeux alors que, dans le cas des stimulus auditifs, ces mouvements céphaliques interviennent directement dans la détection du stimulus.

Les différences relevées dans les types de réponses céphaliques corroborent ces remarques ; en effet dans le cas de stimulus visuels, la forme des réponses céphaliques est liée aux conditions expérimentales (cf. chapitre III) alors que pour les stimulus auditifs, la répartition de ces réponses reste sensiblement la même quelle que soit l'expérience effectuée.

Remarquons enfin les grandes différences constatées entre les valeurs de l'erreur permanente manuelle relative aux stimulus visuels et celle relative aux stimulus auditifs.

Les comparaisons que nous venons d'effectuer concernent les résultats obtenus pour un sujet "idéal" synthétique de tous nos sujets ; or il est apparu (cf. chapitre IV) que l'on pouvait classer nos sujets en deux groupes différents ; la caractérisation de ces deux groupes étant déterminée essentiellement par les amplitudes des mouvements céphaliques effectués.

I.2 - Analyse comparative des réponses manuelles et céphaliques pour chaque groupe de sujets

Rappelons que nos deux groupes de sujets sont caractérisés lors de leurs réponses à des stimulus auditifs par :

- le pourcentage de valeurs positives ou nulles de l'écart entre les temps de latence manuels et céphaliques (paramètre S) (pour le groupe I, S est grand),
- le rapport moyen de l'amplitude des mouvements céphaliques sur l'excentricité du stimulus (paramètre D) (pour le grou-

pe I, D est grand).

Cette caractérisation a fait apparaître des différences sensibles dans les valeurs moyennes des paramètres des réponses manuelles et céphaliques à des stimulus auditifs. Le tableau, figure V - 2, donne ces valeurs moyennes calculées non seulement pour les stimulus auditifs mais aussi pour les stimulus visuels.

FIGURE V - 2 : Tableau récapitulatif des paramètres des réponses manuelles et céphaliques pour les deux groupes de sujets.

| Nature du stimulus | STIMULUS VISUEL | | | | | | | | | | | | STIMULUS AUDITIF | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|--|--|
| | C L | | | | | | B O | | | | | | L | | | | | | B O | | | | | |
| | I | | II | | III | | T | | M | | VII | | I | | II | | III | | IV | | VIII | | | |
| Position de la tête | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Boucle de retour | B F | | | | | | | | | | | | B O | | | | | | | | | | | |
| Expérience | I | | | | | | | | | | | | VII | | | | | | | | | | | |
| Réponses céphaliques (T) | T | | M | | T | | M | | T | | M | | I | | II | | III | | IV | | VIII | | | |
| Groupes de sujets | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II | | |
| Temps de latence TL s | 0,4 | 0,34 | 0,43 | 0,39 | 0,49 | 0,39 | 0,51 | 0,42 | 0,46 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,32 | 0,47 | 0,75 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | | |
| Temps de latence en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 40 | 0,39 | 0,33 | 0,41 | 0,37 | 0,49 | 0,51 | 0,42 | 0,46 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,32 | 0,47 | 0,75 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | | | |
| | 60 | 0,42 | 0,37 | 0,46 | 0,43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vitesse de montée manuelles (VNM mm/s) en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | 335 | 425 | | | 305 | 365 | 330 | 210 | | | | 310 | 365 | | | | | 230 | 170 | 115 | | |
| | 40 | | 450 | 675 | | | 420 | 550 | 360 | | | | | 450 | | | | | | 300 | 260 | 170 | | |
| | 60 | | 565 | 760 | | | 465 | 640 | 440 | | | | | 590 | 595 | | | | | | 370 | 270 | | |
| Temps d'ajustement manuels (TAM s) en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | | 1,2 | 1,4 | | | 1,7 | 1,7 | 1,4 | 2,05 | | | | | | | | | | 2 | 3 | | | |
| | 40 | | | 1,6 | | | 1,7 | 2,4 | 1,85 | 3,55 | | | | 1,8 | 2,2 | | | | | | | | | |
| | 60 | | 1,75 | 2,3 | | | 2,1 | 2,9 | 2,25 | 3,85 | | | | 2,2 | 2,7 | | | | | | | 4 | | |
| Types de réponses obtenues en % | A | 51 | 27 | 61 | 36 | 65 | 40 | 72 | 24 | 49 | 40 | 30 | 37 | 18 | 14 | 28 | 24 | 50 | 27 | 68 | 50 | | | |
| | B | 44 | 68 | 30 | 41 | 30 | 50 | 20 | 62 | 36 | 46 | 60 | 58 | 69 | | 63 | 50 | 27 | 33 | 11 | 32 | | | |
| | C | 4 | 4 | 8 | 3 | 3 | 5 | 5 | 7 | 15 | 8 | 1 | 3 | 4 | 8 | 3 | 10 | 19 | 25 | 12 | 18 | | | |
| | D | 1 | 1 | 1 | 18 | 2 | 5 | 5 | 7 | 0 | 6 | 3 | 3 | 9 | 9 | 6 | 17 | 2 | 15 | 8 | 0 | | | |
| | 0 | | | | | | | | | | | 1 | 45 | 0 | 0 | 0 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Erreur permanente en valeur absolue en fonction de l'excentricité θ_e du stimulus | 20 | 10 | 10 | 0 | 0 | 6 | 11 | 1 | 1 | 1,4 | 1,5 | 7 | 18 | 0 | 0 | 2 | 16 | 4 | 11 | 11 | 12 | | | |
| | 40 | 17 | 18 | 0 | 0 | 15 | 20 | 2,5 | 1,75 | 3 | 2,25 | 13 | 35 | 0 | 0 | 8 | 36 | 9 | 11 | 11 | 6 | | | |
| | 60 | 20 | 21 | 0 | 0 | 22 | 26 | 2,9 | 2,5 | 2,8 | 2,9 | 14 | 37 | 0 | 0 | 16 | 55 | 8 | 12 | 6 | 12 | | | |



Les différences inter-groupes constatées, dans le chapitre précédent, pour les stimulus auditifs se retrouvent pour les stimulus visuels ; en effet, par rapport à celles des sujets du groupe II (qui effectuaient des mouvements de tête de faible amplitude) les réponses des sujets du groupe I (mouvements céphaliques de forte amplitude) présentent :

- des temps de latence manuels plus importants,
- des vitesses de montée manuelles plus faibles,
- des temps d'ajustement manuels plus faibles,
- moins de paliers et de dépassements,
- des erreurs céphaliques permanentes légèrement inférieures.

Par contre les temps de latence céphaliques des sujets du groupe I sont supérieures à ceux du groupe II (contrairement aux résultats relatifs aux stimulus auditifs) et on ne peut déceler de différences significatives en ce qui concerne les erreurs manuelles permanentes.

La réaction manuelle des sujets de chacun des deux groupes paraît être bien différenciée quelle que soit la nature du stimulus :

- Certains sujets (appartenant au groupe I) présentent une réponse manuelle "réfléchie" ; la mise en oeuvre de leur réaction manuelle est "prudente" et apparaît presque toujours après leur réaction céphalique ; la stabilisation de leur mouvement est rapide et sans "à coups".
- Les autres (appartenant au groupe II) présentent une réponse manuelle moins "réfléchie", leur réaction manuelle est "rapide" et presque "réflexe", elle intervient après leur réaction céphalique pour les stimulus visuels (cette réaction est elle aussi très rapide : nombreux dépassements) et avant pour les stimulus auditifs ; la stabilisation de leur mouvement manuel est "désordonnée".

Les différences de comportement constatées pour la détection de stimulus auditifs, et qui apparaissent également dans la

localisation de stimulus visuels, proviennent de "stratégies" différentes adoptées par les sujets, "stratégies" étroitement liées aux mouvements de tête effectués.

II - ROLE DES MOUVEMENTS DE LA TETE ET " STRATEGIES "

Le rôle des mouvements de la tête dans ces tâches de localisation spatiale de stimulus visuels et auditifs est très important ; en effet l'amplitude des mouvements céphaliques effectués d'une part semble fonction de l'ordre de succession dans le temps des réponses manuelles et céphaliques de l'opérateur humain et d'autre part semble jouer un rôle très important sur la précision du pointage manuel.

La "stratégie" de recherche d'un stimulus par l'opérateur paraît être caractérisée essentiellement par la nature de sa réaction céphalique.

II.1 - Rôle des mouvements de tête

Le tableau figure V - 3 donne les valeurs des paramètres comportementaux (cf. chapitre II § V) propres à chaque sujet pour les diverses expériences réalisées relatives aux stimulus visuels et auditifs.

| | | STIMULUS VISUELS | | | | | | | | | | STIMULUS AUDITIFS | | | | | | | | | |
|------------|---|------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|---|----|-------------------|-----|----|------|-----|------|-----|----|-----|--|
| TETE | | T L | | | | | T B | | | | | L | | | | | T B | | | | |
| BOUCLE | | B F | | B O | | | B O | | | | | B O | | | | | B O | | | | |
| EXPERIENCE | | 1 | | 3 | | | 7 | | | | | 4 | | | | | 8 | | | | |
| REPONSES | | TETE | | | | | MAIN | | | | | TETE | | | | | MAIN | | | | |
| PARAMETRES | | S | F | D | S | D | C | E | C | E | S | E | S | E | C | E | S | E | C | E | |
| JPK | | 84 | 047 | 059 | 58 | 012 | 032 | 81 | 011 | | 73 | 047 | 062 | 71 | 059 | 063 | 525 | 022 | 38 | 048 | |
| CL | 1 | 92 | 0,6 | 065 | 100 | 082 | 084 | 96 | 007 | | 92 | 092 | 016 | 90 | 102 | 144 | 62 | 012 | 43 | 056 | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | | 90 | 084 | 125 | 43 | 0,3 | | | |
| MB | | 89 | 066 | 071 | 89 | 089 | 091 | 100 | 003 | | 60 | 056 | 069 | 91 | 1,05 | 133 | 525 | 023 | 38 | 0,3 | |
| ID | 1 | 98 | 068 | 076 | 72 | 057 | 063 | 92 | 006 | | 8 | 009 | 009 | 5 | 014 | 015 | 33 | 049 | 15 | 054 | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | | 10 | 065 | 078 | 29 | 0,8 | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | | 0 | 0,8 | 105 | 19 | 1 | | | |
| JFH | 1 | 81 | 045 | 056 | 95 | 045 | 059 | 100 | 008 | | 11 | 0,1 | 013 | 17 | 015 | 036 | 42 | 021 | 57 | 026 | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | | 19 | 018 | 051 | 43 | 056 | | | |
| BL | | 100 | 057 | 073 | 100 | 048 | 0,6 | 95 | 003 | | 42 | 017 | 021 | 33 | 012 | 017 | 33 | 019 | 48 | 0,3 | |

FIGURE V - 3 : Tableau récapitulatif donnant les valeurs des paramètres comportementaux globaux pour chaque sujet.



On observe que, en moyenne quelles que soient la nature du stimulus et l'expérience considérée (avec ou sans boucle de retour), plus le pourcentage de réponses céphaliques intervenant avant la réponse manuelle (paramètre S) est important, plus l'amplitude des mouvements de tête effectués (paramètre D) est importante. Ces résultats donnés dans les chapitres précédents, figure III - 14 et figures IV - 9 et IV - 16, sont repris figure V - 4 qui présente les variations de D en fonction de S, en confondant les expériences effectuées avec ou sans boucle de retour.

$D_1 = 0,95 \cdot 10^{-2} S - 0,04 ; r = 0,93$
 $D_2 = 1,24 \cdot 10^{-2} S - 0,03 ; r = 0,93$
 $D_{Max} = 1,05 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,06 ; r = 0,96$
 $D_{Max} = 1,36 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,1 ; r = 0,96$

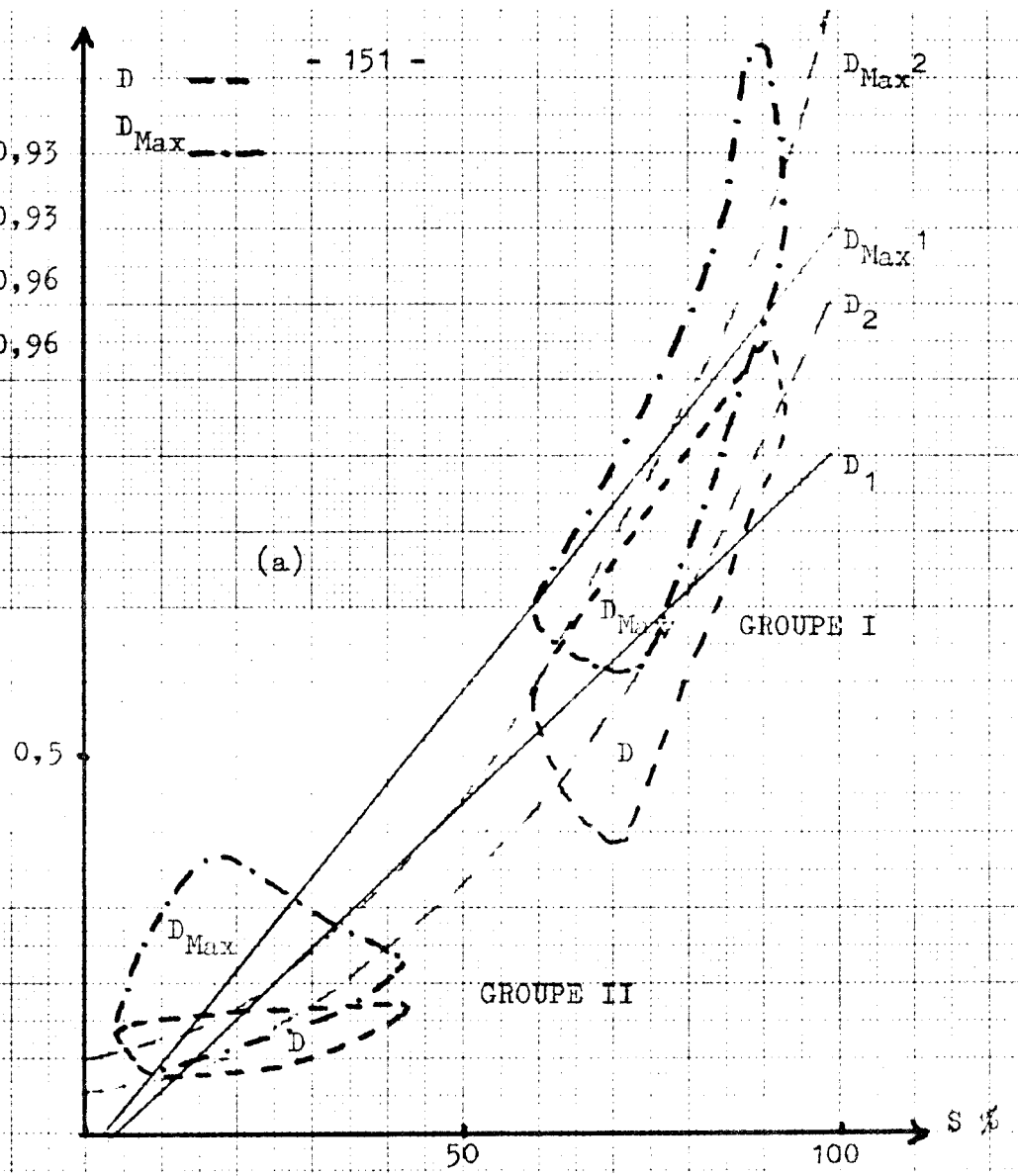
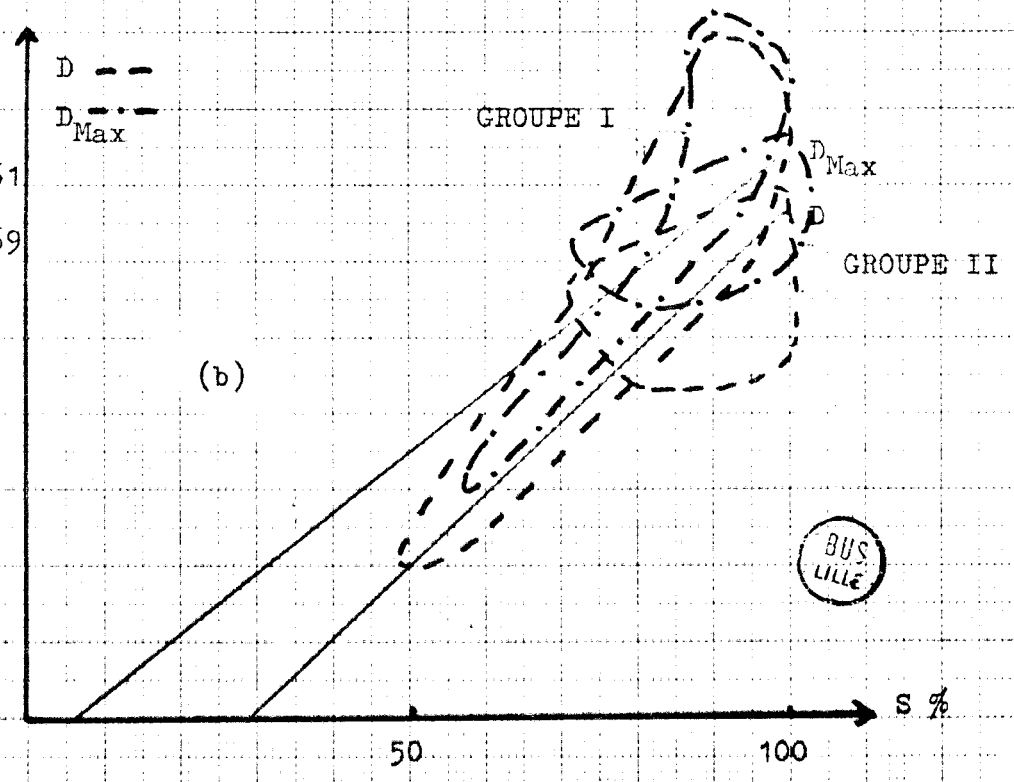


FIGURE V - 4 : Variations de l'amplitude des mouvements céphalique (D, D_{Max}) en fonction de l'écart entre les temps de latence (S) ; stimulus auditifs (a) et visuels (b).

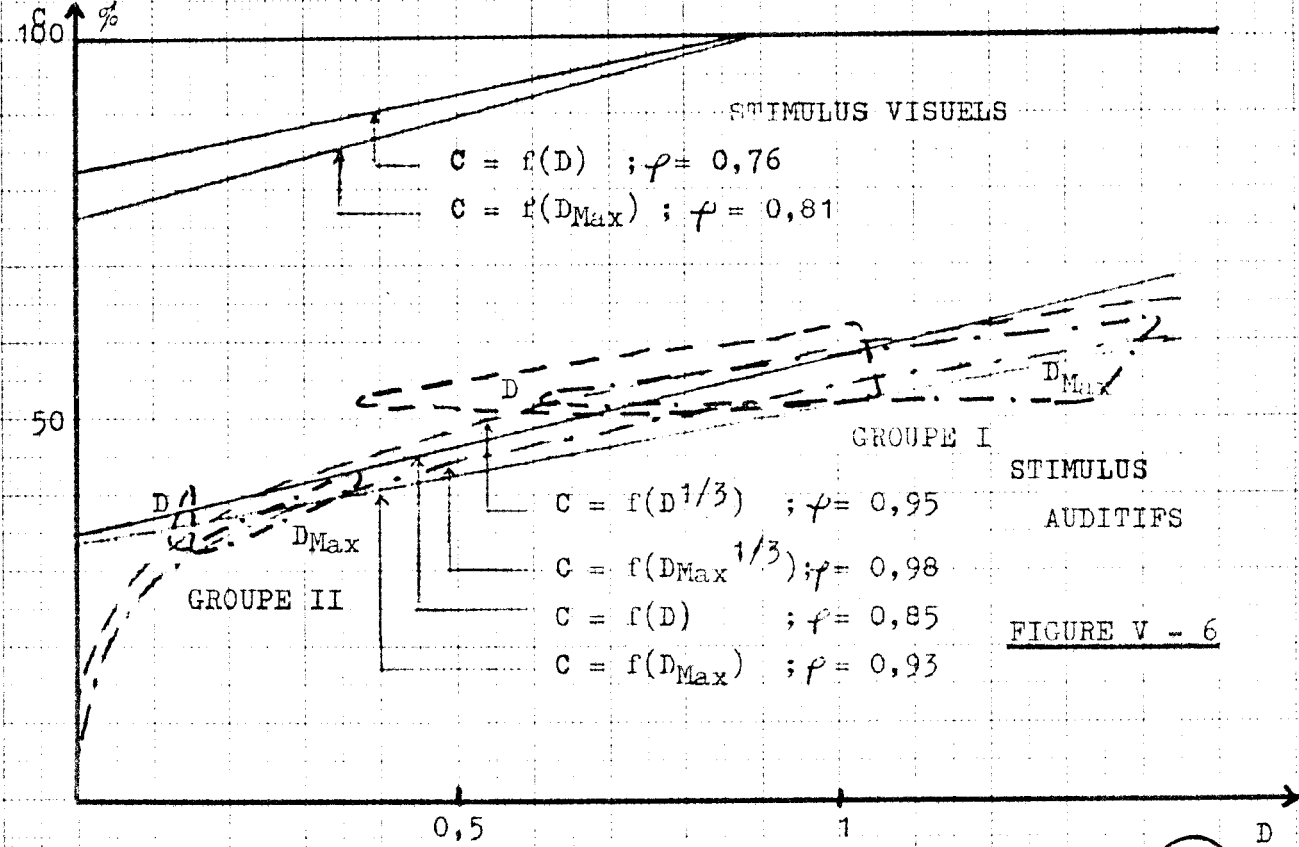
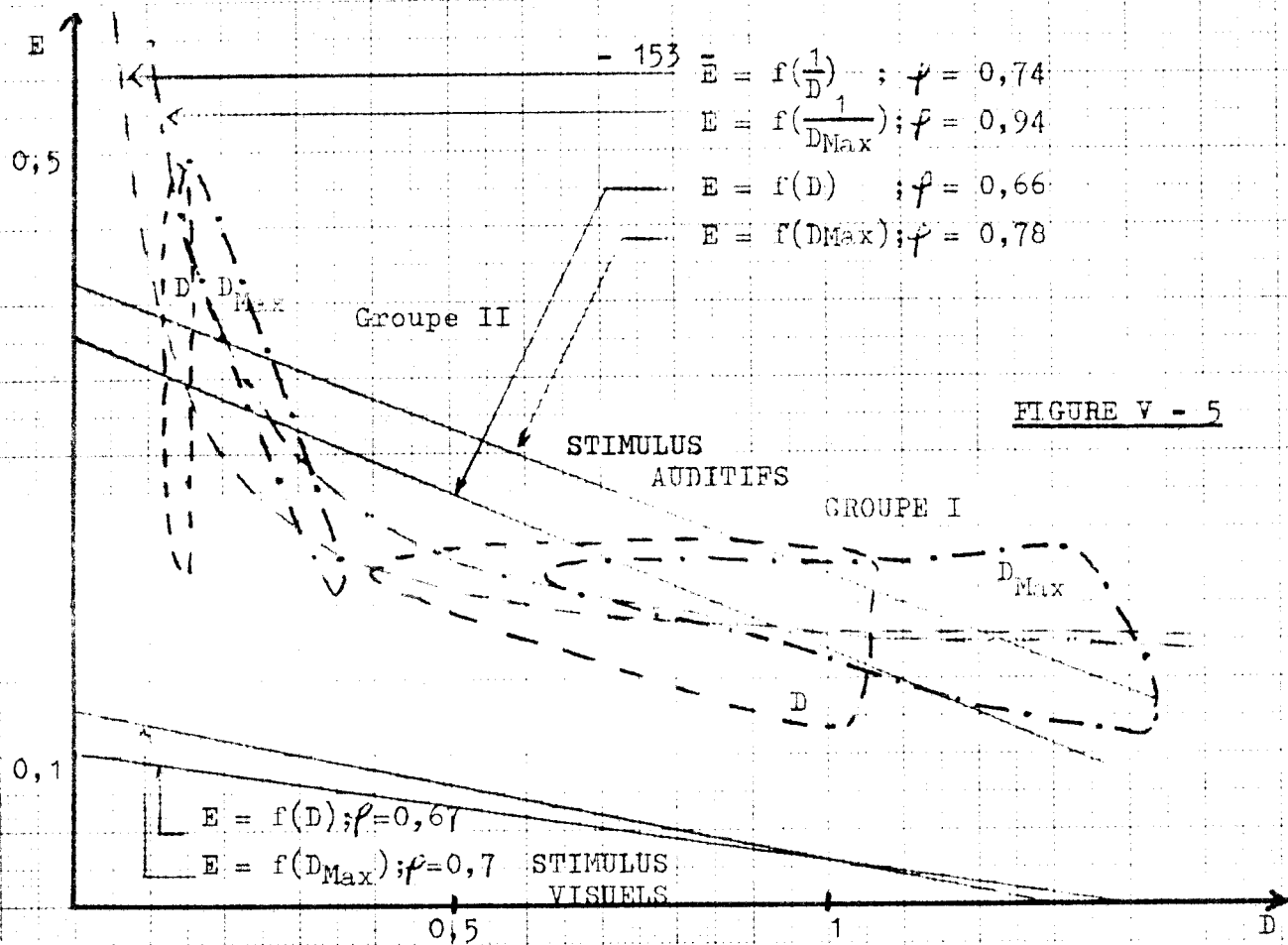
$D = 0,94 \cdot 10^{-2} S - 0,27 ; r = 0,61$
 $D_{Max} = 0,8 \cdot 10^{-2} S - 0,05 ; r = 0,69$



On observe que :

- L'influence du paramètre S sur l'amplitude des mouvements de tête est moins prépondérante pour les stimulus visuels que pour les stimulus auditifs (allure des courbes et valeurs des coefficients de corrélation).
- Le rôle du paramètre S sur l'amplitude maximale des mouvements céphaliques (paramètre D_{Max}) effectués au cours de la recherche est très important (amélioration du coefficient de corrélation).

L'observation du tableau figure V - 3 montre également l'influence de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués (paramètres D et D_{Max}) sur la précision du pointage manuel (paramètre C et E) : plus les mouvements céphaliques sont importants, meilleur est le pointage manuel. Ces résultats illustrés figure III - 17 et figure IV - 2 sont repris figures V - 5 et V - 6.



Influence de l'amplitude des mouvements céphaliques (D et D_{Max}) sur la précision du pointage manuel (E), figure V - 5, et sur le pourcentage de "coups au but" (C), figure V - 6 ; stimulus visuels et auditifs.



L'observation de ces courbes de régression linéaire et du tableau figure V - 3 révèle que :

- L'opérateur humain localise avec plus de précision un stimulus visuel qu'un stimulus auditif.
- L'influence de l'amplitude des mouvements céphaliques sur la précision du pointage est moins importante pour les stimulus visuels que pour les stimulus auditifs (allure des courbes et valeurs des coefficients de corrélation).
- L'amplitude maximale atteinte par la tête au cours de la recherche du stimulus est fortement corrélée à la précision du pointage et joue un rôle important dans le processus de localisation du stimulus.

L'allure non linéaire des courbes de régression, concernant les stimulus sonores, tracées figures V - 4, V - 5 et V - 6, est à relier aux différences des valeurs des paramètres comportementaux individuels, figure V - 3, relevées selon les groupes de sujets. Ces différences importantes (D est ainsi toujours $< 0,18$ pour les sujets du groupe II et toujours $> 0,39$ pour les sujets du groupe I) permettent de proposer deux "stratégies" différentes adoptées par les sujets.

II.2 - "Stratégies" adoptées par les sujets de chaque groupe

Les résultats concernant les réponses manuelles et céphaliques des différents sujets permettent de proposer deux "stratégies" différentes dans le processus de localisation d'un stimulus sonore périphérique.

Le comportement moyen d'un sujet du groupe I, illustré figure V - 7, semble être le suivant :

L'opérateur n'effectue sa réaction manuelle qu'après avoir commencé à localiser le stimulus. Cette localisation est réalisée à l'aide de mouvements céphaliques de grande amplitude ; l'opérateur pour cela cherche peut-être à annuler les différences d'intensité et surtout de phase des ondes sonores arrivant dans chacune des oreilles. Sa réponse manuelle "prudente" au départ se stabilise néanmoins rapidement (il n'existe pas ou très peu de dépassements) avec une erreur permanente relativement faible.

Le comportement moyen d'un sujet du groupe II, figure V - 8, apparaît tout différent :

A l'apparition du stimulus l'opérateur "lance" le bras dans la direction du stimulus (sa réaction manuelle est très rapide) puis, ne disposant pas d'information suffisante sur la position du stimulus, il effectue alors un mouvement céphalique rapide de faible amplitude, ce mouvement étant peut-être destiné à provoquer, au niveau de la perception auditive, des différences artificielles supplémentaires de phase ou d'intensité sonore. Sa réponse manuelle, très rapide au départ, présente très souvent des oscillations et se stabilise lentement avec une erreur permanente assez importante.

Remarques :

- Tous nos sujets, dès l'apparition du stimulus, localisent la région de l'espace (droite ou gauche) où apparaît ce stimulus.
- Aucun de nos sujets ne "tend l'oreille" pour localiser le stimulus.

Ces constatations résultent du fait qu'aucun départ manuel ou céphalique inversé (départ à gauche pour un stimulus apparaissant à droite, par exemple) n'a été observé sur nos enregistrements.

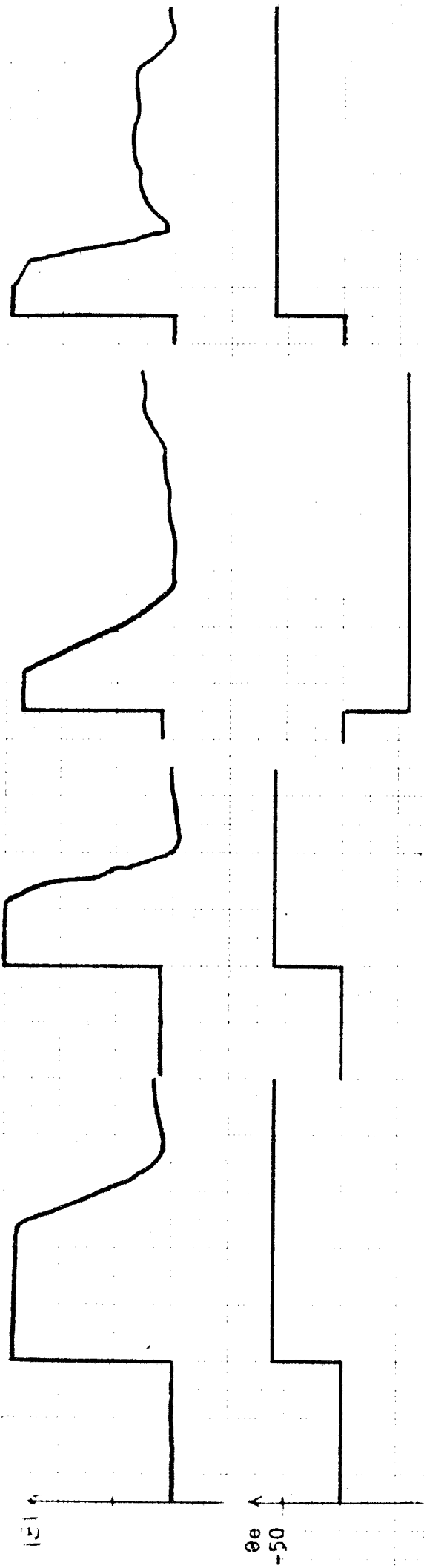
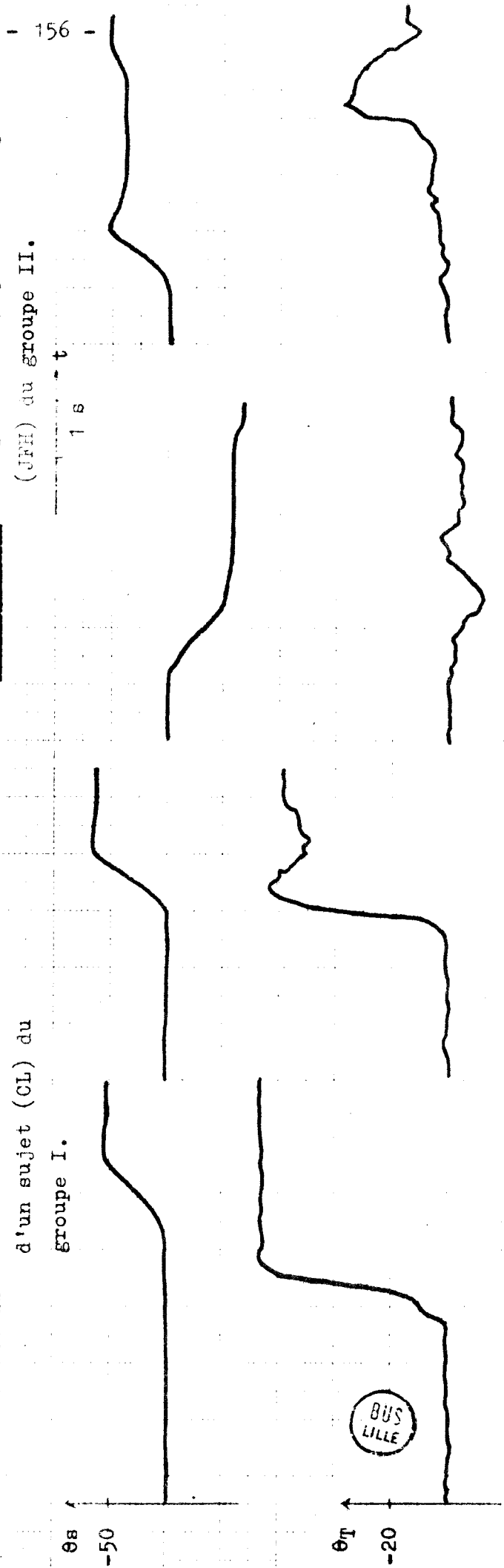


FIGURE V - 7 : Comportement moyen
à'un sujet (CL) du
groupe I.

FIGURE V - 8 : Comportement moyen d'un sujet
(JFH) du groupe II.



Afin de vérifier le comportement de nos sujets et l'influence des mouvements de la tête sur la précision du pointage manuel nous avons effectué quelques expériences complémentaires concernant la localisation de stimulus auditifs sans information de retour.

Deux sujets, un de chaque groupe, ont recommencé le test (Expérience IV) après un repos d'une journée ; les mêmes consignes que précédemment leur ayant été données.

L'observation du tableau figure V - 3 révèle que le sujet CL (noté CL₂ dans le deuxième test) à la même stratégie de réponse que lors du premier test (noté CL₁). On remarque qu'à une diminution du paramètre S (80 % au lieu de 90 % de réactions céphaliques intervenant avant la réaction manuelle) correspond une diminution de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués et que cette diminution ($D = 0,84$ au lieu de $1,02$) lors du deuxième test entraîne des erreurs permanentes beaucoup plus importantes ($E = 0,3$ au lieu de $0,12$) et un pourcentage de "coups au but" très inférieur ($C = 43$ % au lieu de 62 %).

Pour le sujet JFH appartenant au groupe II (noté JFH₂ dans le deuxième test) une légère diminution de l'amplitude maximale des mouvements de tête ($D_{Max} = 0,31$ au lieu de $0,36$) entraîne une diminution sensible de la précision du pointage ($E = 0,36$ au lieu de $0,21$); notons cependant que le pourcentage de coups au but reste le même.

Ces résultats confirment les résultats donnés par les courbes, figure V - 6, et ne révèlent pas de modifications de stratégie pour chacun de ces deux sujets.

Un sujet du groupe II (sujet ID) a été soumis trois fois au même test ; les deux tests supplémentaires (notés ID₂ et ID₃) ont été effectués consécutivement, 24 heures après le premier test. A ce sujet qui effectuait, lors de la première expérience, des erreurs manuelles très importantes et des mouvements céphaliques très faibles, la consigne lui a été donnée, pour les deux tests supplémentaires, de s'aider de mouvements de tête pour localiser le stimulus. L'observation du tableau figure V - 3 révèle que si les

mouvements céphaliques sont effectivement de grande amplitude ($D = 0,65$ et $0,8$), les valeurs du paramètre S sont toujours très faibles, voire nulles. De plus la précision du pointage manuel est devenue de plus en plus faible ($C = 29\%$ puis 19% de "coups au but") confirmée par les valeurs de E très importante ($E = 0,8$ puis 1). Il apparaît donc que ce sujet n'a pas changé sa "stratégie" de recherche du stimulus, sa réaction manuelle intervient encore avant sa réaction céphalique ; les mouvements céphaliques de grande amplitude (imposés par la consigne) se sont révélés, pour ce sujet, beaucoup plus comme une gêne qu'une aide supplémentaire pour la localisation du stimulus.

CONCLUSION

La synthèse des résultats expérimentaux obtenus révèle qu'il est possible de comparer certains résultats relatifs aux stimulus visuels aux résultats correspondant concernant les stimulus auditifs, surtout si on considère les réponses manuelles et céphaliques propres à chacun de nos deux groupes de sujets.

Il apparaît également que le rôle des mouvements de la tête, dans le processus de localisation d'un stimulus, est important (très important pour les stimulus auditifs et à un degré moindre pour les stimulus visuels), l'amplitude des mouvements céphaliques effectués conditionnant la précision du pointage manuel.

La stratégie de recherche des stimulus visuels paraît identique quel que soit le groupe de sujet considéré (la réaction céphalique intervient avant la réaction manuelle, les mouvements de tête sont de grande amplitude). Cependant il apparaît des différences concernant en particulier les réponses manuelles (réponse "réfléchie" pour certains sujets, "réflexe" pour d'autres), différences que l'on retrouve accentuées dans le comportement des sujets de chacun de nos deux groupes lors de la localisation de stimulus auditifs, pour lesquels on observe deux stratégies différentes.

C O N C L U S I O N

---oo0oo---

Les résultats obtenus dans les chapitres précédents mettent en évidence l'importance du rôle des mouvements de la tête dans ces tâches de localisation spatiale de stimulus visuels et auditifs ; il apparaît cependant que le rôle des mouvements céphaliques qui varie selon la nature du stimulus (conception différente des capteurs oculaire et auditif), varie également beaucoup selon les sujets. En effet, en ce qui concerne les stimulus auditifs, si globalement l'influence de l'amplitude des mouvements céphaliques sur la précision du pointage manuel paraît importante, il faut remarquer cependant que la nature de ces mouvements dépend de la stratégie adoptée par les différents sujets = mouvements céphaliques de grande amplitude et stabilisation de la tête en direction du stimulus, suivis de la réaction manuelle pour certains; mouvements céphaliques rapides de faible amplitude intervenant après le début de la réaction manuelle pour d'autres. La classification de nos sujets en deux groupes, selon la stratégie adoptée, repose sur l'étude de paramètres comportementaux globaux que nous avons été amenés à définir en raison de la grande dispersion inter-individuelle des résultats. Ces dispersions inter et intra-individuelles observées semblent être dues également à la difficulté des tests soumis aux sujets ; il semble en effet, notamment lors des expériences sans boucle de retour, que "l'aspect cortical" des réponses de l'opérateur soit prépondérant, "aspect cortical" mis en outre en relief par les différentes stratégies.

Le but de nos expériences était d'aborder les phénomènes de la perception auditive chez l'homme en les comparant aux résultats obtenus lors de l'étude de la perception visuelle. Il semble alors prématuré, à la suite de ces expériences, qui ne peuvent constituer qu'une approche de

l'étude du comportement de l'opérateur humain dans un environnement lumineux et sonore, de proposer un modèle, modèle global du comportement du sujet soumis à des entrées sonores et visuelles, ou même modèle particulier relatif à un stimulus et une expérience donnés.

L'étude du comportement de l'opérateur, dans un test de localisation spatiale de stimulus visuels, ne peut déboucher sur un modèle valable qui si on peut enregistrer simultanément les mouvements céphaliques et les mouvements oculaires. Nous disposons d'un capteur des mouvements des yeux (27), basé sur la mesure du reflet cornéen, mais ce capteur est fixe ; une version portative et très légère, permettant la mesure des mouvements oculaires lors de nos expériences, sera disponible prochainement, et nous permettra d'entreprendre de nouvelles expériences destinées à approfondir le processus de localisation par l'opérateur humain de stimulus visuels périphériques.

Les expériences concernant les stimulus auditifs, qui ont permis de proposer des stratégies de recherche du stimulus par l'opérateur, sont essentiellement celles dans lesquelles l'information de retour était supprimée (les stratégies sont moins apparentes lorsque la "boucle de retour est fermée", car dans ce cas les mouvements céphaliques ne paraissent pas nécessaires pour réaliser un pointage manuel correct) ; ces tests, sans "boucle de retour", paraissent alors les plus adaptés à l'étude du processus de localisation spatiale de stimulus auditifs par l'opérateur, cependant ils sont "difficiles" et font appel aux "facultés" de réflexion et de décision de l'opérateur. Deux axes de recherches ultérieures, concernant les stimulus sonores, peuvent être définis :

- Soumettre une série d'expériences identiques aux précédentes (Exp. 4, Tête libre, boucle ouverte) à un grand nombre de sujets afin d'infirmer ou de confirmer les hypothèses émises, concernant notamment les deux stratégies différentes observées.
- Soumettre les mêmes expériences (Exp. 4) à nos six sujets, mais dans lesquelles l'entrée appréhendée varierait non seulement "spatialement" (influence de l'excentricité du stimulus sur les réponses de l'opérateur) mais aussi "énergétiquement" (influen-

ce de la nature et de la forme du stimulus-timbre, intensité, fréquence etc...).

L'élaboration d'un modèle pourrait alors être entreprise et permettrait de mieux comprendre, dans une perspective ergonomique, le processus de la détection et de la localisation par l'opérateur humain d'un stimulus auditif apparaissant dans son environnement.

B I B L I O G R A P H I E

---ooOoo---

1 - M. LECLERCQ

"Dispositif d'étude et modèle analogique du système oculo-moteur chez l'homme".

Thèse D.I. Lille, janvier 1969

2 - N. MALVACHE

"Analyse corrélative des systèmes visuel et manuel et identification de l'opérateur humain.

Thèse D.I. Lille, avril 1970

3 - G. MILBLED, N. MALVACHE, J.M. JACQUESSON, R. HIRTZ

"Perception de l'opérateur humain : réponse manuelle en fonction de la localisation du stimulus sur la rétine".

Conf. I.R.I.A., Journées d'Informatique Médicale, pp 409-430, 1971

4 - N. MALVACHE, J.M. JACQUESSON

"Aspect multivariable de l'opérateur humain. Dispositif expérimental d'analyse".

Brest A.F.A.S., juillet 1970

5 - N. MALVACHE, J.M. JACQUESSON

"Sur les propriétés auto-adaptatives de l'opérateur humain".

Symposium I.F.A.C., Bruxelles, pp 127-129, 1971

6 - E.W. VINJE, E.T. PITKIN

"Human Operator Dynamics for Aural Compensatory Tracking".

I.E.E.E. Trans. Syst., Man., Cybern., vol. SMC-2, n° 4, sept. 1972

7 - P.B. MIRCHANDINI

"An Auditory Display in Dual-Axis Tracking Task".

I.E.E.E. Trans. Syst., Man., Cybern., vol. SMC-2, N° 3, juillet 1972

8 - E. LEIPP

"L'audition stéréophonique". Stéréoscopie et stéréophonie.

Bulletin du G.A.M., juillet 1972

- 9 - G.M. JONES, J.M. MILSUM
"Spatial and dynamics aspects of visual fixation".
I.E.E.E. Trans. Bio. Med. Eng., vol. BME-12, pp 54-62, avril
1965
- 10 - L.C. VON RENNER
"Extravehicular attitude control by use of head motions".
S.M. Thesis, Dep. Aeronaut. Astronaut. M.I.T., Cambridge,
Mass., juin 1970
- 11 - B.A. CHOUET, L.R. YOUNG
"Tracking with head position using an electro-optical monitor".
I.E.E.E. Trans. Syst., Man., Cybern., vol. SMC 4, n° 2, mars 74
- 12 - D.C.A.N. TOULON C.E.R.T.S.M.
Notice technique du système MUREX.
- 13 - WHITTFIELD
"The auditory pathway". 1967
LONDON, E. ARNOLD (Publishers) LTD
- 14 - S.S. STEVENS, H. DAVIS
"Hearing - Its Psychology and Physiology".
NEW-YORK, 1938, WILLEY ed.
- 15 - CONTRAT D.R.M.E. 73/724
"Identification des mouvements de la tête".
- 16 - M.R. SPIEGEL
"Theory and problems of statistics".
Mc Graw-Hill Inc. NEW-YORK, 1972
- 17 - R. CHOCHOLLE
"Les temps de réaction" dans "Traité de psychologie expéri-
mentale". Tome II
"Sensation et Motricité". P.U.F. 1969

18 - F. DUPAS

"Contribution à la détermination d'un modèle d'opérateur humain effectuant une tâche principale et une tâche secondaire".
Thèse D.I. Lille, décembre 1973

19 - CONTRAT D.R.M.E. 72/435

"Etude paramétrique de la fonction visuelle en vision latérale".

20 - N. MALVACHE

"Analyse des systèmes visuel et manuel en vision frontale et périphérique chez l'homme".
Thèse Docteur es Sciences, Lille, 1973

21 - J.M. JACQUESSON, G. MILBLED

"Analyse des composantes initiales du tracking d'échelons de position aléatoire".
Lille Médical, tome 16, n° 4, 1971

22 - N. MALVACHE, F. DUPAS

"Etude paramétrique de la fonction visuelle en vision latérale chez l'homme effectuant deux tâches manuelles de travail".
Symposium sur la perception visuelle et les systèmes homme-machine, Lille, mai 1973

23 - Y. LEGRAND

"Optique Physiologique". Tome I
"La dioptrique de l'oeil et sa correction".
Ed. La Revue d'Optique, 1952

24 - H.W. SINAIKO, ed

"Selectal papers on human factors in the design and use of control systems".
NEW-YORK DOVER, 1961

25 - J.L. BLATT

"Identification des principaux paramètres du mouvement de la tête dans une tâche de recherche visuelle."

Symposium sur l'identification des processus dynamiques humains dans les systèmes homme-machine. Lille mai 1975

26 - E.G. WEVER

"Theory of hearing".

NEW-YORK, WILLEY ed., 1949

27 - D. MASSE

"Oculomètre".

Note technique LETI/MCTE n° 1004

C.E.A. - C.E.N., Grenoble 1974

S O M M A I R E

---ooOoo---

INTRODUCTION

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>CHAPITRE I : DISPOSITIF EXPERIMENTAL</u> | 8 |
| INTRODUCTION | 9 |
| I - CABINE EXPERIMENTALE | 10 |
| II - CAPTEUR DES MOUVEMENTS DE TETE | 12 |
| III - DISPOSITIF DE PRESENTATION DES STIMULUS VISUELS ET SONORES | 13 |
| III - 1. Implantation des stimulus dans la cabine | |
| III - 2. Caractéristiques des stimulus | |
| III - 3. Vérification de l'acoustique de la cabine | |
| IV - DISPOSITIF DE POINTAGE MANUEL | 22 |
| IV - 1. Choix du dispositif de pointage | |
| IV - 2. Description du dispositif de pointage manuel | |
| IV - 3. Implantation du levier dans la cabine | |
| V - APPAREILLAGE | 29 |
| V - 1. Signaux d'entrée | |
| V - 2. Signaux de sortie | |
| V - 3. Enregistrement des données | |
| CONCLUSION | 35 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>CHAPITRE II : PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET DEFINITION DES PARAMETRES</u> | |
| <u>COMPORTEMENTAUX</u> | 36 |
| INTRODUCTION | 37 |
| I - PROTOCOLE EXPERIMENTAL | 38 |
| I - 1. Tests préliminaires | |
| I - 2. Installation du sujet dans la cabine | |
| I - 3. Déroulement des expériences | |
| II - ELABORATION DE LA BOUCLE DE RETOUR ET CARACTERISATION DES INFORMATIONS APPREHENDÉES PAR L'OPERATEUR LORS DU POINTAGE | 43 |
| II - 1. Choix de l'information de retour | |
| II - 2. Caractéristiques de la boucle de retour | |
| II - 3. Problèmes relatifs à la localisation de stimulus visuels | |
| III - NATURE DES TESTS EFFECTUES PAR LES OPERATEURS HUMAINS .. | 49 |
| IV - CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DES SUJETS EXPERIMENTES | 51 |
| V - DEPOUILLEMENT DES RESULTATS - DEFINITION DES PARAMETRES COMPORTEMENTAUX | 52 |
| CONCLUSION | 57 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>CHAPITRE III : ANALYSE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES DE</u> | |
| <u>L'OPERATEUR HUMAIN DANS UNE TACHE DE LOCALISATION</u> | |
| <u>SPATIALE DE STIMULUS VISUELS</u> | 58 |
| INTRODUCTION | 59 |
| I - ANALYSE DES DONNEES RELEVÉES SUR LES ENREGISTREMENTS ... | 63 |
| II - ETUDE DES TEMPS DE LATENCE MANUELS ET CEPHALIQUES | 65 |
| II - 1. Analyse des temps de latence dans les conditions de l'expérience 1 "TL - BF" | |
| II - 2. Influence de la suppression de la boucle de retour sur les temps de latence manuels et céphaliques (Expérience 3) | |

| | | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II - 3. | Influence de la fixation de la tête en position de repos sur les temps de latence manuels (boucle de retour fermée et ouverte) | |
| II - 4. | Rappel des principaux résultats relatifs aux temps de latence manuels et céphaliques | |
| III - | ANALYSE DU REGIME DYNAMIQUE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES DE L'OPERATEUR HUMAIN | 74 |
| III - 1. | Analyse de la répartition des types de réponses obtenues | |
| III - 1.1. | Expériences avec boucle de retour (Exp. 1) | |
| III - 1.2. | Expériences sans boucle de retour (Exp. 3) | |
| III - 1.3. | Expériences avec fixation de la tête (Exp. 7) | |
| III - 2. | Etude des vitesses de montée et des temps d'ajustements manuels en fonction de l'excentricité du stimulus | |
| III - 3. | Rappel des principaux résultats relatifs au régime dynamique des réponses manuelles et céphaliques | |
| IV - | ETUDE DES RESULTATS RELATIFS A LA STABILISATION DES REPONSES MANUELLES (POINTAGE) ET CEPHALIQUES | 83 |
| IV - 1. | Etude de la position de la tête de la stabilisation par rapport au stimulus d'entrée θ_e | |
| IV - 2. | Etude des variations de l'erreur permanente manuelle (ϵ_{PM}) en fonction de l'excentricité du stimulus | |
| IV - 3. | Rappel des principaux résultats concernant les erreurs permanentes manuelles et céphaliques | |
| | CONCLUSION | 95 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>CHAPITRE IV : ANALYSE DES REPONSES MANUELLES ET CEPHALIQUES DE</u> | |
| <u>L'OPERATEUR HUMAIN DANS UNE TACHE DE LOCALISATION</u> | |
| <u>SPATIALE DE STIMULUS AUDITIFS</u> | 96 |
| INTRODUCTION | 97 |
| I - ANALYSE DES RESULTATS DES EXPERIENCES "TL - BF" (EXP.2). | 101 |
| I - 1. Etude des temps de latence manuels et céphaliques | |
| I - 2. Etude du régime dynamique des réponses manuelles et céphaliques | |
| I - 3. Etude de l'amplitude des mouvements céphaliques effectués par l'opérateur pendant la phase de recherche du stimulus auditif et lors de la stabilisation de la tête | |
| I - 4. Rappel des principaux résultats concernant les expériences "Tête libre-Boucle fermée" (Exp. 2) | |
| II - ANALYSE DES RESULTATS DES EXPERIENCES "TL - BO" (EXP.4). | 113 |
| II - 1. Etude des variations des temps de latence manuels et céphaliques de l'opérateur humain | |
| II - 2. Etude du régime dynamique des déplacements de la main et de la tête | |
| II - 3. Etude des résultats relatifs à la stabilisation des réponses manuelles (pointage) et céphaliques : influence des mouvements de tête sur les performances réalisées | |
| II - 3.1. Amplitude des mouvements céphaliques effectués par les sujets | |
| II - 3.2. Analyse de l'erreur permanente manuelle (ϵ_{PM}) en fonction de l'excentricité du stimulus et selon les sujets | |
| II - 3.3. Influence de l'amplitude des mouvements de la tête sur la précision du pointage manuel | |
| II - 4. Résumé des principaux résultats obtenus | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III - INFLUENCE DU MAINTIEN DE LA TETE EN POSITION DE REPOS (EXP. 8) SUR LES REPONSES MANUELLES DE L'OPERATEUR HUMAIN SANS RETOUR D'INFORMATION | 131 |
| III - 1. Influence du blocage de la tête, en position de repos face au stimulus central, sur les caractéristiques de la réponse manuelle | |
| III - 2. Influence de la fixation de la tête sur les paramètres de précision du pointage manuel | |
| III - 3. Résumé des résultats obtenus lorsque la la tête est fixe en position de repos | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>CHAPITRE V : SYNTHESE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX RELATIFS A LA LOCALISATION SPATIALE DE STIMULUS VISUELS ET AUDITIFS ..</u> | 138 |
| INTRODUCTION | 139 |
| I - ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS RELATIFS AUX STIMULUS VISUELS ET AUDITIFS | 140 |
| I - 1. Analyse comparative globale des réponses de l'opérateur humain à des stimulus visuels et auditifs | |
| I - 2. Analyse comparative des réponses manuelles et céphaliques pour chaque groupe de sujets | |
| II - ROLE DES MOUVEMENTS DE LA TETE ET "STRATEGIES" | 148 |
| II - 1. Rôle des mouvements de tête | |
| II - 2. "Stratégies" adoptées par les sujets de chaque groupe | |
| CONCLUSION | 160 |
| <u>CONCLUSION</u> | 160 |

A N N E X E S

---oo0oo---

DISPOSITIF DE DETECTION DES MOUVEMENTS DE LA TETE (Système MUREX)

I.1. Présentation du capteur (fig.1)

Le système MUREX, conçu pour la mesure des déplacements de la tête en rotation (3 degrés de liberté) et en translation (3 degrés de liberté) est placé sur un casque porté par l'opérateur humain. Ce système mécanique à six degrés de liberté solidaire de potentiomètres capteurs, engendre des tensions électriques proportionnelles aux déplacements de la tête par rapport à une référence indépendante de la position de l'opérateur humain (figure 1).

Ce dispositif est réalisé à l'aide d'un ensemble électromécanique à six voies de détection destinées à renseigner un ensemble d'exploitation des mesures. Celui-ci affiche numériquement en degrés les déplacements captés sur chaque voie, (indicateurs de tableaux digitaux). Par ailleurs, six sorties analogiques, branchées en parallèle sur les afficheurs numériques, sont également disponibles pour l'enregistrement analogique des données.

I.2. Etalonnage

I.2.1. Préliminaires

Une vérification de la linéarité du système a été réalisée sur chacune des six voies.

La linéarité et l'étalonnage des trois composantes X, Y et Z ont été vérifiés à l'aide d'un jeu de cales métalliques de 20° et de 45° (cales calibrées sur un support gradué).

La voie X_3 a été étalonnée en mesurant les déplacements angulaires obtenus en faisant pivoter le système MUREX autour de son point fixe.

Les composantes X_1 et X_2 ont été calibrées en utilisant un système de cales et de repères (fig.2) transformant un déplacement angulaire en un déplacement rectiligne.

Lors de ce premier étalonnage, il est apparu des difficultés au niveau de l'électronique d'exploitation.

Ces difficultés dues à un échauffement anormal des étages de sortie avaient pour effets de dérégler le gain des différentes voies (afficheurs numériques et sorties analogiques). Nous avons été amenés à remplacer certains composants.

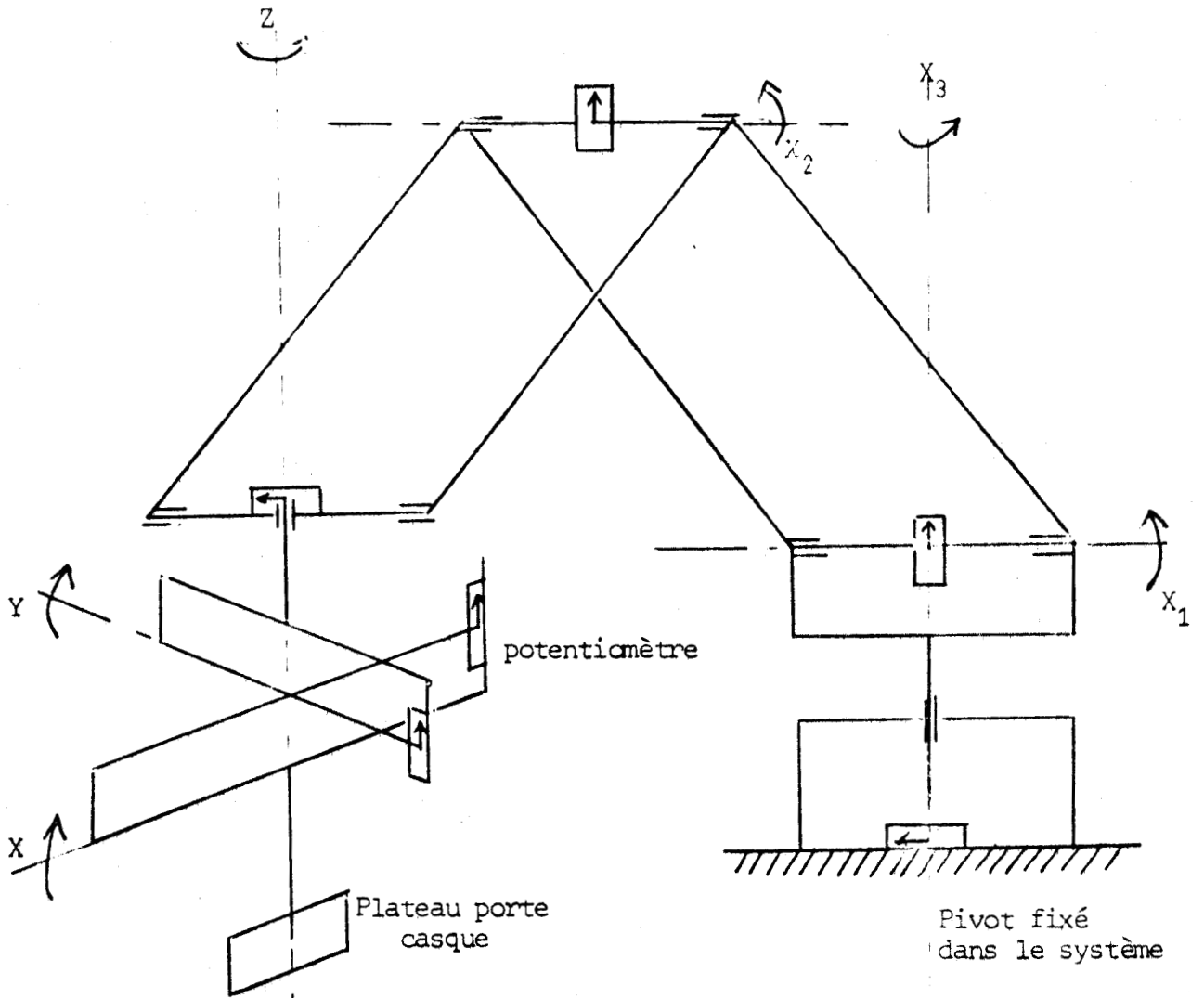


Figure 1 : Schéma du système MUREX

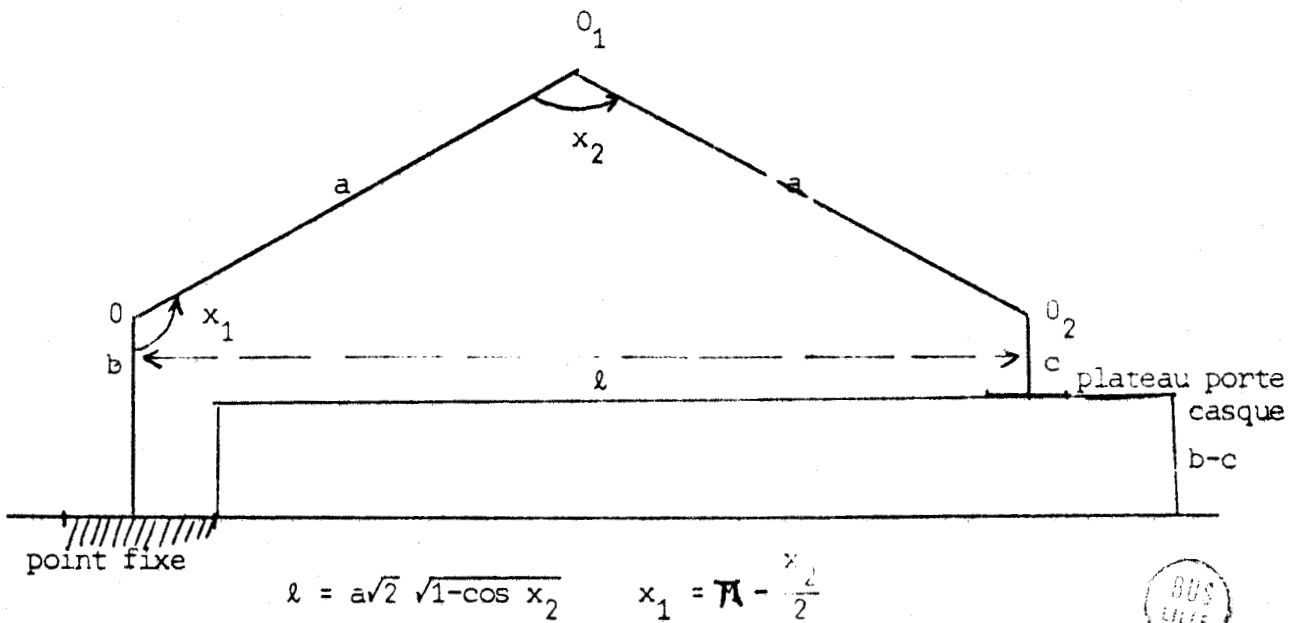


Figure 2 : Etalonnage des voies X_1 et X_2



I.2.2. Dispositif fixe d'étalonnage

Le système MUREX est placé dans la cabine expérimentale ; il est alors nécessaire de prévoir à l'intérieur un dispositif d'étalonnage ne nécessitant pas des déplacements du système.

Une plate-forme rigide adaptable au support du MUREX est actuellement en construction. Ceci nous permettra de vérifier entre deux expériences l'étalonnage des différentes voies.

I.3. Etude du mode de fixation du système MUREX sur la tête

Plusieurs procédés ont été envisagés afin de réaliser l'interface entre le plateau porte casque du MUREX et la tête de l'opérateur : un dispositif de sangles élastiques, un casque moulé en plâtre et un casque moulé en résine de polyester.

I.3.1. Dispositif de sangles élastiques (fig.3)

Un réseau de sangles est utilisé afin de rendre le plateau solidaire de la tête du sujet. Ce système est très souple car il peut être adapté au mieux à chaque sujet, mais il ne permet pas un réglage précis du plateau sur la tête de l'opérateur. C'est principalement pour cette raison que nous avons abandonné cette solution.

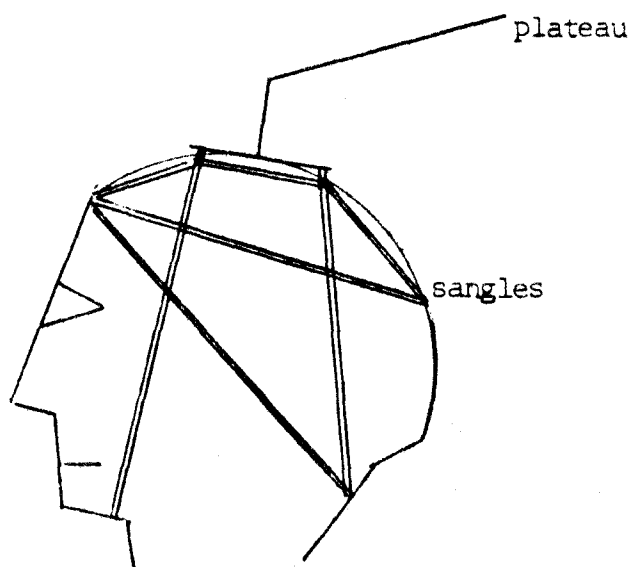


Figure 3 : Dispositif de sangles élastiques

I.3.2. Casque moulé en plâtre

Ce casque réalisé au moyen de bandes chirurgicales plâtrées est moulé directement sur la tête du sujet.

De ce fait les glissements entre le casque et la tête sont très réduits mais ce système nécessite de prévoir un casque par sujet. Etant donné l'aspect analytique statistique exigé de cette étude, nous avons alors préféré la solution suivante.

I.3.3. Casque en résine de polyester (fig.4)

Ce casque est composé de deux parties symétriques réunies par des tiges filetées ; sa face intérieure est garnie de mousse pour assurer une meilleure adhérence avec la tête et sa fixation sur la tête est renforcée par une mentonnière moulée réglable par des sangles.

Ce procédé a l'avantage d'être très léger et de pouvoir être adaptable à la tête de chaque sujet. De plus il élimine pratiquement les glissements pouvant éventuellement se produire lors de mouvements rapides par exemple.

La partie supérieure du casque (fig.4) permet une fixation correcte du plateau porte-casque. Cette fixation est constituée d'une plaquette de résine solidaire de ce plateau porte-casque.

A l'aide d'un jeu de glissières la fixation est réglable dans deux directions : avant arrière (longitudinale) et gauche-droite (latérale).

En résumé, il est alors possible de procéder comme suit :

- . Adaptation du casque sur la tête du sujet
- . Mise en place de la plaquette
- . Réglage de l'azimut

I.4. Réglages de la position du MUREX par rapport au casque

Les deux réglages de positions du MUREX et du plateau par rapport au casque ont été effectués simultanément.

I.4.1. Positionnement du MUREX dans l'espace

Le point fixe (bati) du MUREX est situé en arrière de l'opérateur. Son emplacement est positionné dans le but d'obtenir les plus grands déplacements angulaires possibles et de minimiser le poids du capteur rapporté sur le casque.

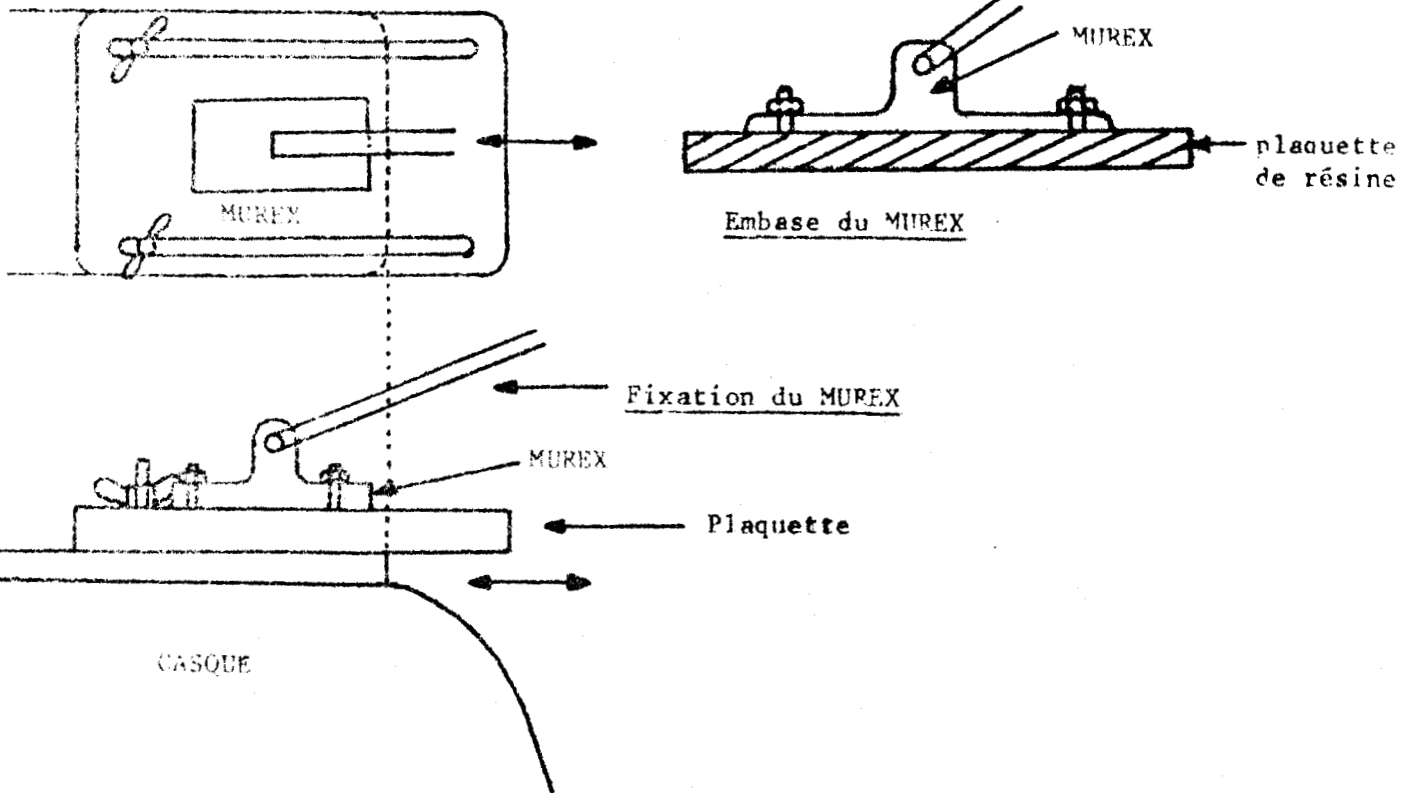
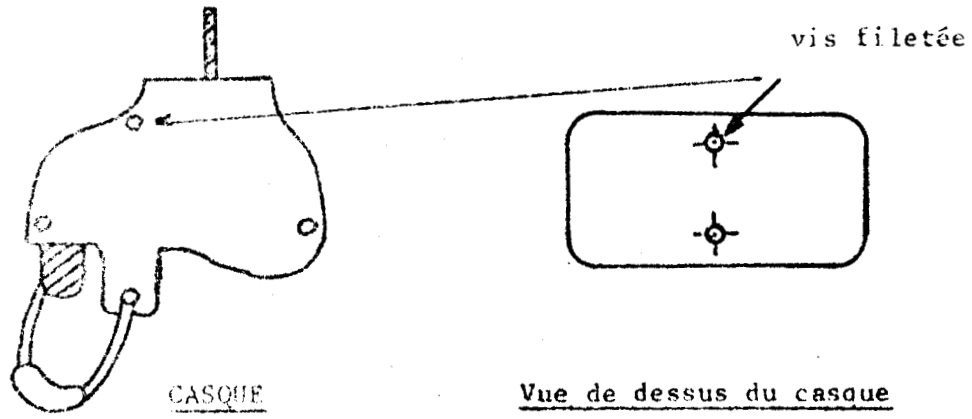


Figure 4 : Casque et fixation du "plateau" sur le casque

La configuration retenue est présentée figure 5.

Lorsque le sujet est au repos l'axe O_1 est situé à la verticale passant par l'axe O et l'angle $\widehat{O O_1 O_2}$ est de 60° . Au repos on peut estimer que seule la partie $O_1 O_2$ du système MUREX contribue au poids rapporté sur le casque. De plus les déplacements angulaires demandés sont facilement respectés.

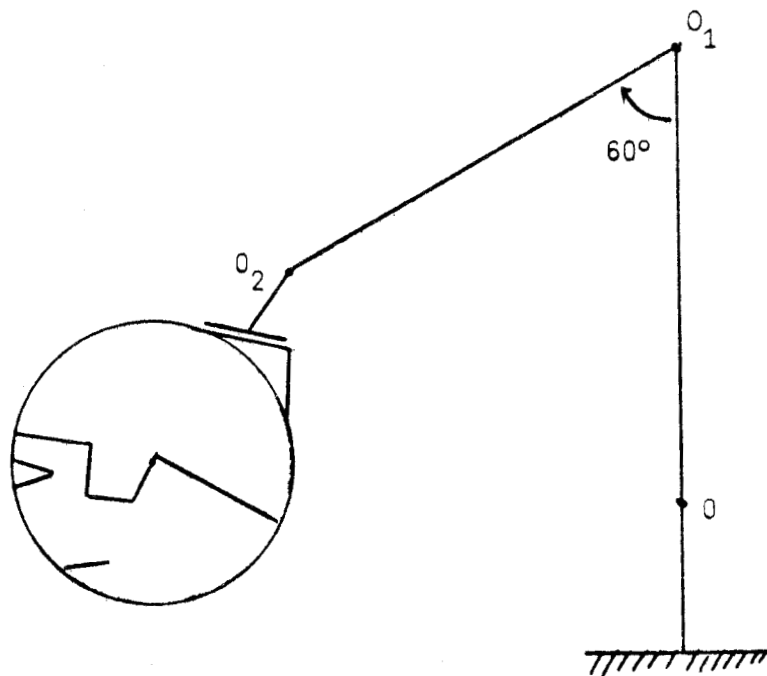


Figure 5 : Positionnement du MUREX dans l'espace

Remarque :

D'après la notice technique du MUREX la plaquette rectangulaire du plateau porte casque est placée comme le montre la figure 6. Mais il est apparu dans cette position et ceci quelles que soient les positions respectives MUREX-casque, une impossibilité d'obtenir de grands déplacements angulaires dans le sens vertical. Lorsque l'on fait tourner ce plateau de 90° , (échange des voies X et Y) ces déplacements sont alors conformes aux spécifications.

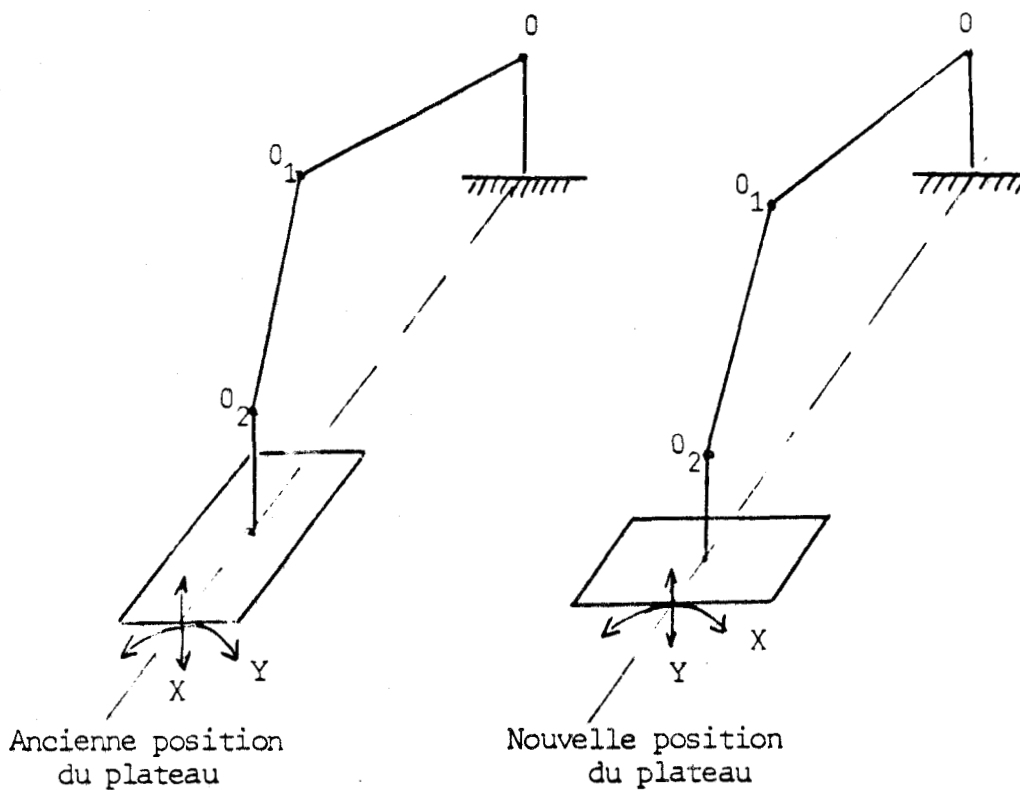


Figure 6

I.4.2. Positionnement du "plateau" du capteur sur le casque

a) "Axe de rotation" de la tête (fig.7)

La position actuellement retenue est basée sur une considération anatomique simplifiée. En effet on peut admettre comme axe élémentaire de rotation du crâne l'articulation de l'atlas avec l'apophyse odontoïde de l'axis. Dans le plan sagittal les mouvements de flexion et d'extension s'effectuent au niveau de l'articulation occipito-atloïdienne. Il est bien entendu qu'en pratique les mouvements du rachis cervical complètent ces deux rotations simples.

En première approximation on peut alors prendre comme "référence" le point d'intersection de ces deux axes d'articulation. Ce point est situé dans le plan sagittal médian sur une ligne joignant les bords antérieurs des apophyses mastoïdes. Cette ligne est aisément repérable extérieurement et nous pouvons ainsi placer facilement cette "référence" sur l'axe du demi-cylindre de la cabine

b) Positionnement du plateau (fig.7)

Le poids rapporté sur la voûte crânienne à la verticale de cette articulation n'aura pas d'effet sensible en position de repos, mais sera ressenti de façon plus importante au cours des mouvements de flexion qu'au cours des extensions et ceci d'autant plus que l'amplitude de ces mouvements sera plus grande en antérieur (45°) qu'en postérieur (25°).

Ces considérations anatomo-physiologiques ont amené le choix d'un positionnement du capteur tel que l'axe de rotation antéro-postérieur du capteur soit situé sur une ligne passant par notre référence et faisant un angle d'environ -15° avec la verticale ; le point d'application se trouve alors dans la région pariéto-occipitale de la voûte crânienne.

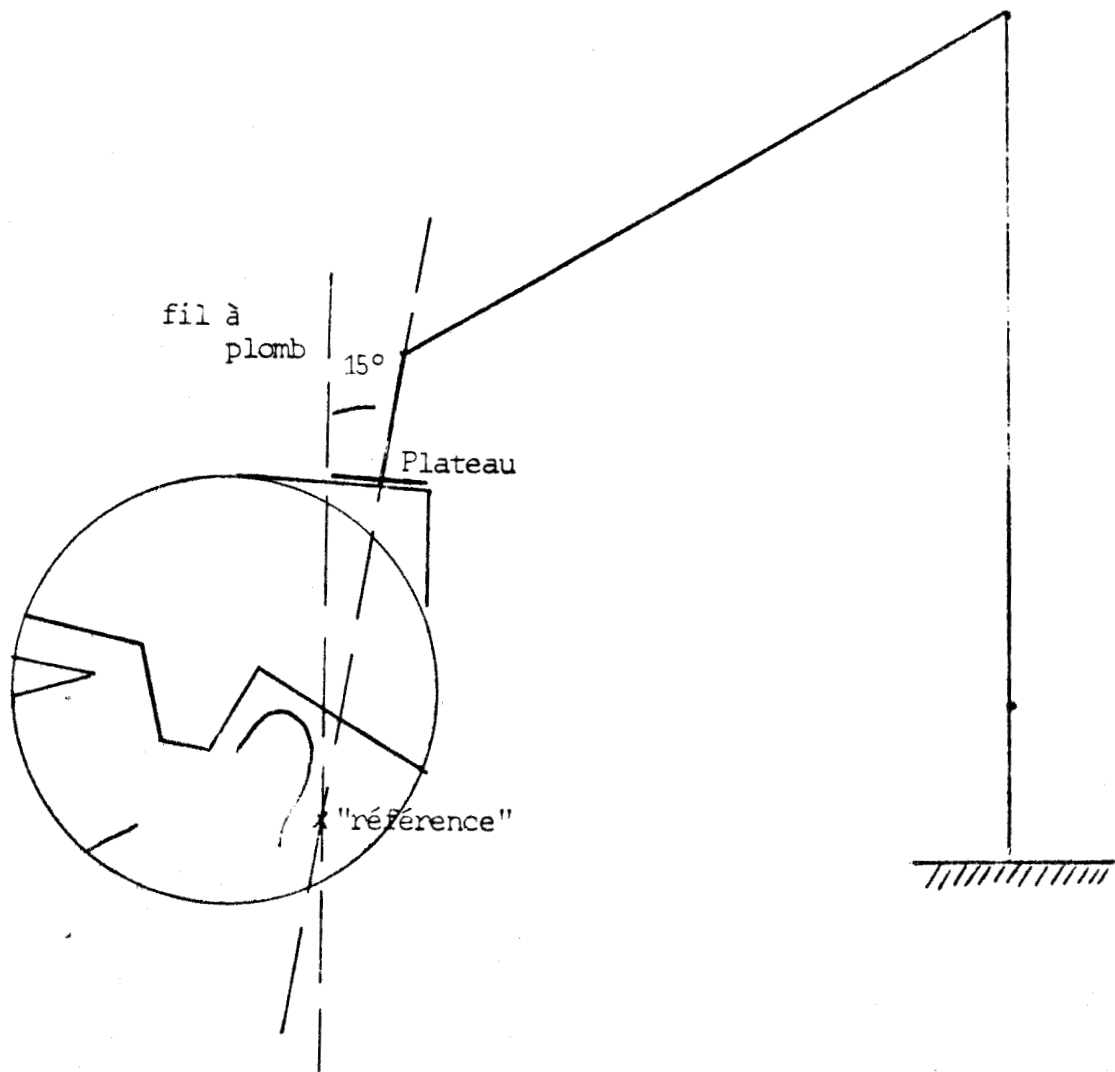


Figure 7 : Positionnement du plateau sur le casque

La mise en place du dispositif MUREX sur la tête du sujet se fait de la manière suivante :

. Le sujet est assis et regarde devant lui (il fixe une lampe témoin), la hauteur du siège est réglée de telle façon que le plan horizontal passant par les yeux du sujet soit à 1 m 80 du sol.

. A l'aide d'un fil de plomb (et ultérieurement à l'aide d'un système de réglage plus élaboré) on positionne par l'intermédiaire de l'inclinaison du dossier la tête de l'opérateur de façon que l'axe du demi-cylindre de la cabine passe par l'axe de rotation" défini plus haut.

. On adapte le casque sur la tête du sujet et on positionne le plateau de façon à obtenir le résultat signalé au paragraphe précédent.

I.4.3. Equilibration (fig.8)

Les divers réglages précédents ne suppriment pas la totalité de la gêne de l'opérateur due au poids du capteur rapporté sur le casque.

Remarquons que ce poids rapporté varie avec les mouvements effectués par l'opérateur .

Afin d'atténuer ces effets un premier dispositif simple constitué de sangles élastiques, figure 8, est proposé comme moyen d'équilibration.

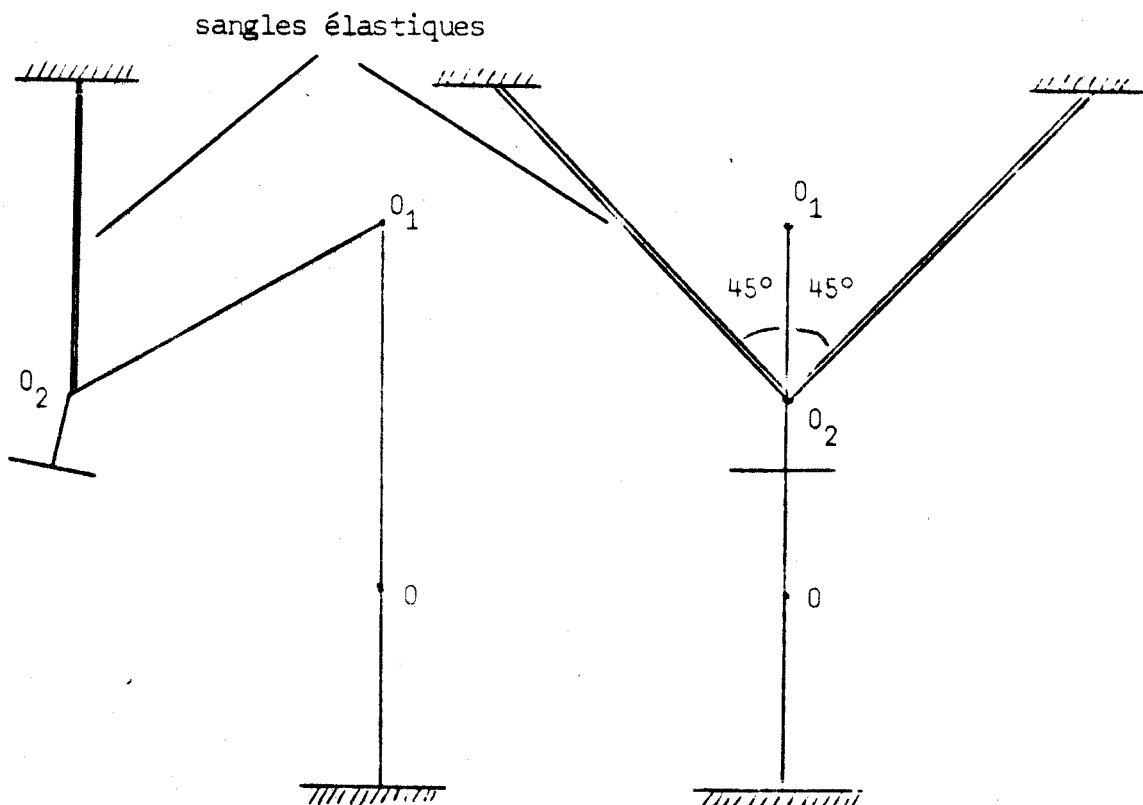


Figure 8 : Equilibration du MUREX à l'aide de sangles élastiques.

Ce montage réalisé de façon empirique améliore les résultats et diminue fortement la gêne du sujet.

Les premiers enregistrements (fig. 9) de mouvements rapides et de grandes amplitudes de la tête (supérieures à 60°) montrent qu'en absence d'équilibration les phénomènes "parasites" dus à l'inertie du système ne sont pas négligeables sur de nombreuses voies. Lorsque le système est équilibré ces phénomènes sont fortement atténués (figure 9).

SANS EQUILIBRATION

BAS DROITE

BAS GAUCHE

DROITE

GAUCHE

1s

AVEC EQUILIBRATION

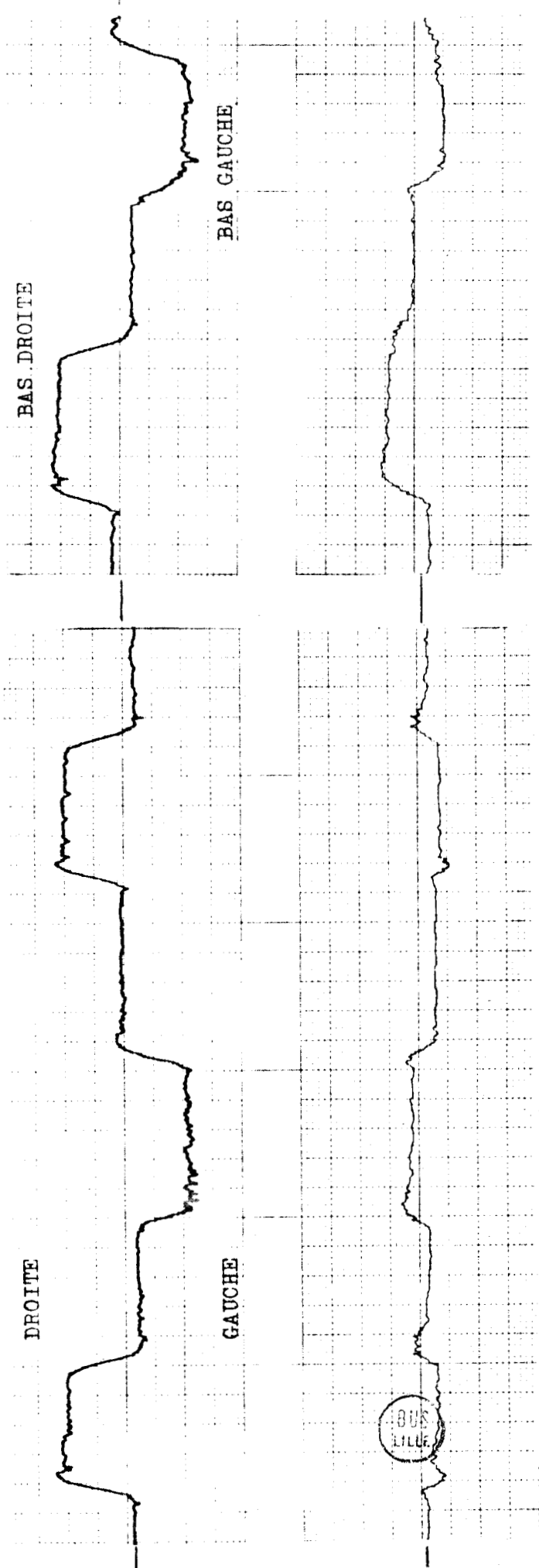
BAS DROITE

BAS GAUCHE

DROITE

GAUCHE

BOUS
LILLE



DISPOSITIF DE POINTAGE MANUELPotentiomètre :

- Caractéristiques : - résistance totale : 10 K Ω
 - nombre de spires : 2 220
 - couple de rotation 5 cm.g.
 - linéarité : 0,2 %
 - masse : 80 g

Montage du potentiomètre : figure A. II - 1

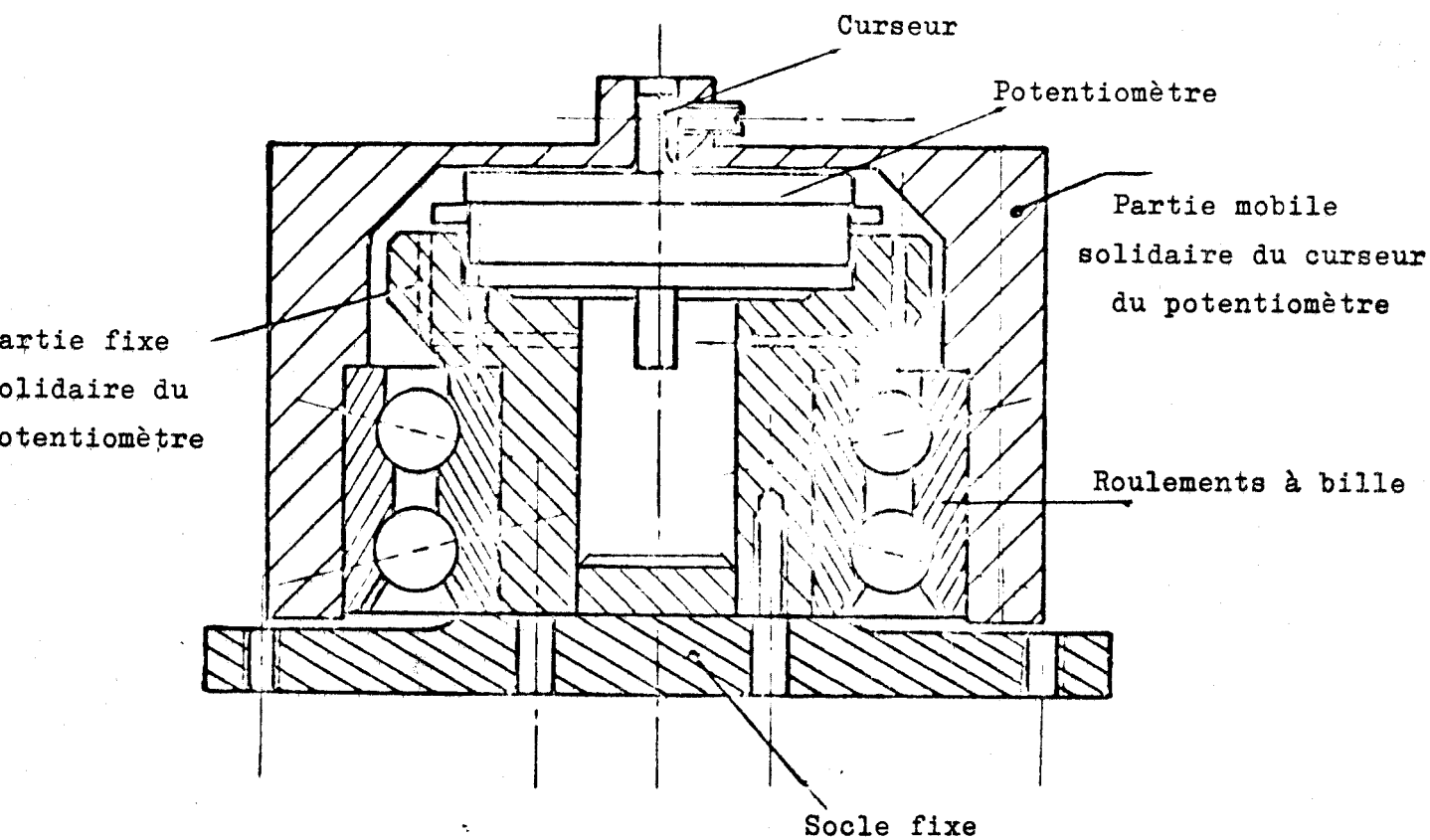
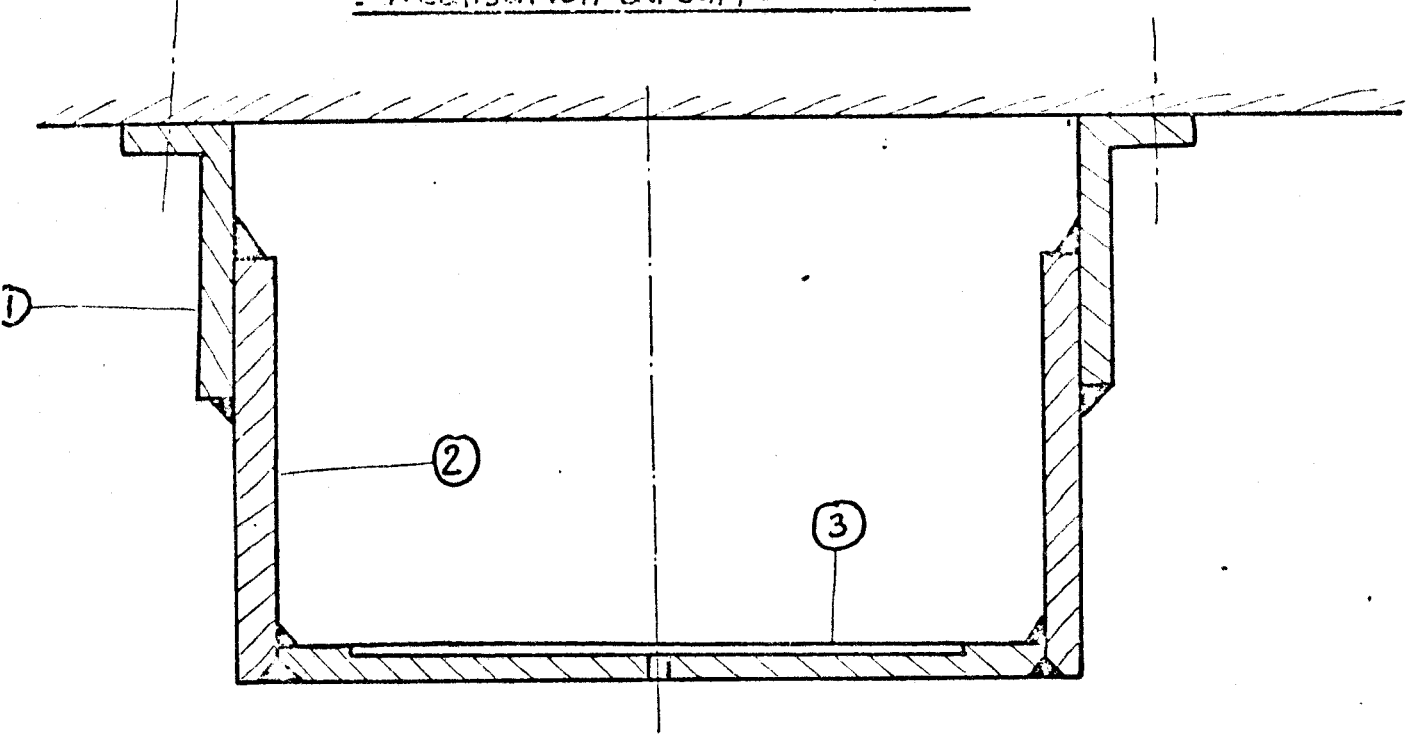


Figure A. II - 1

- Réalisation du support seul -

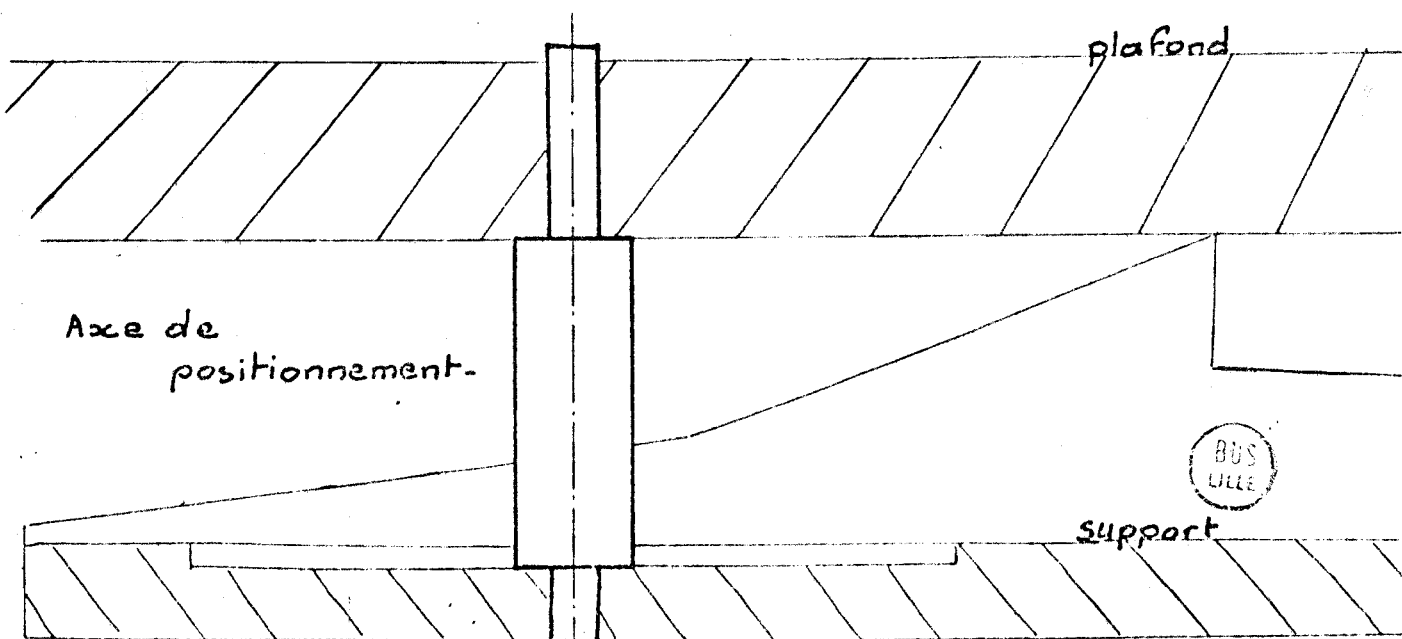


① - 2 Cornières: 30x50 $l=70$

② - 2 Plats 10: 80x200

③ - 1 Plat 20: 150x200

- Montage du support -



A. III

PR : Programmateur

PO : Pondération. Potentiomètres 10 tours 5 K Ω .

R : Relais

A : Amplificateurs

Al : Alimentation

LA : Lampes

HP : Haut-parleurs

GTBF : Générateur très basse fréquence

Une tension supérieure à 2 V appliquée sur la porte P annule la sortie S.

La fréquence de la tension de sortie est modulée (MF) de 1 000 Hz à 800 Hz.

Les haut-parleurs sont alimentés sous une tension de 200 mV crête à crête.

Ref. : Tension de référence du calculateur analogique Ref. = 20 V.

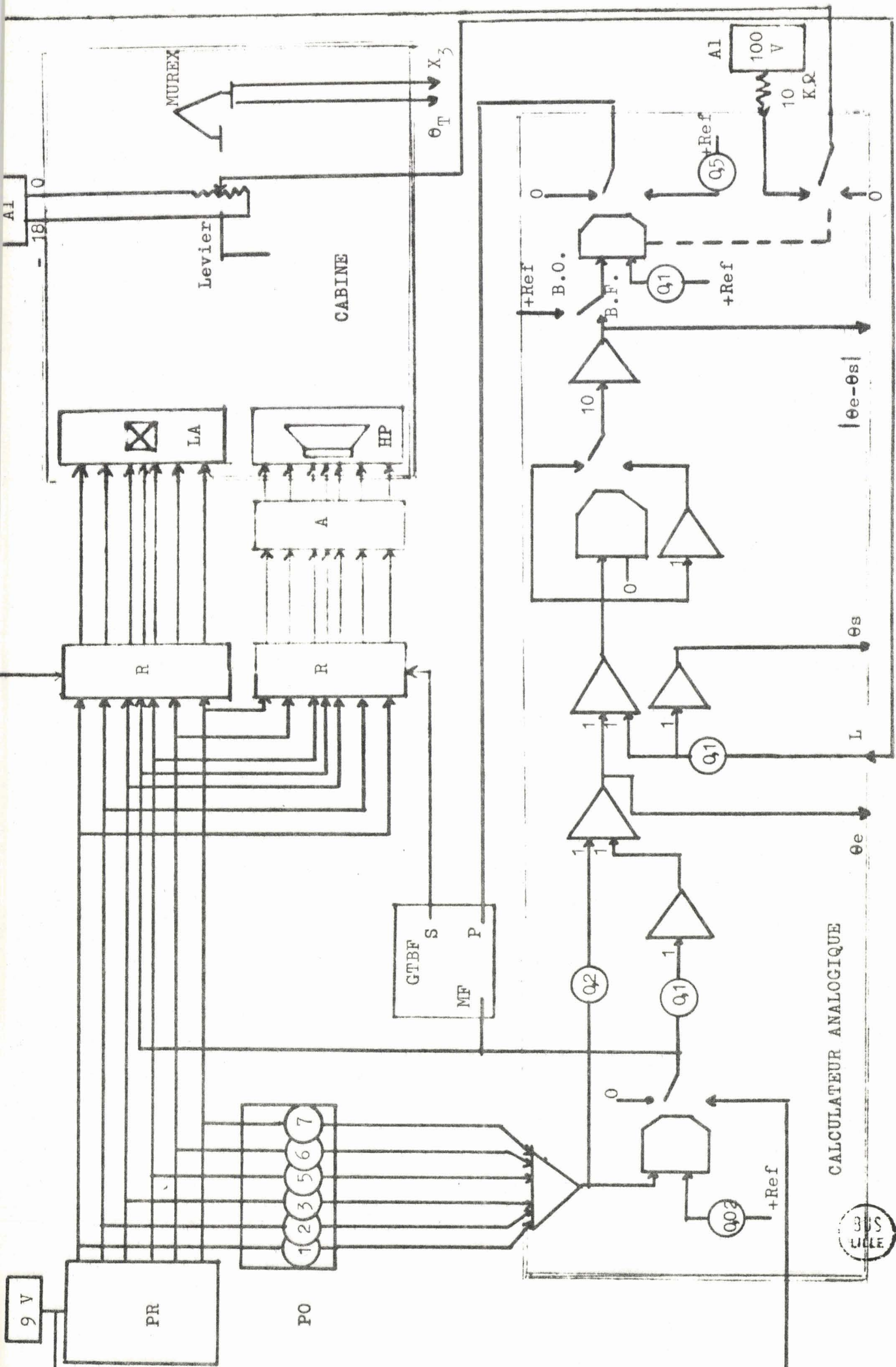


Figure A. III - 1 : Schéma détaillé de l'appareillage.

TEMPS = 4 mn 52 s

AVEC INFORMATION DE RETOUR

| N° HP | 7 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 5 | 1 | 3 | 1 | 7 | 5 | 7 | 3 | 6 | 7 | 2 | 3 | 5 | 3 | 6 | 1 | 5 | 2 | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | | | | 5,5 | 5,5 | | | 5,4 | | 5,3 | | | | | | | | | | | | 4,7 | | | |
| 2 | | | | | 4,7 | 5,3 | | | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | 3,9 | 3,3 |
| 3 | | | | 5,5 | | | | | 4,3 | | | | | | 4,9 | | | | 4,5 | | 4,9 | | | | | |
| 4 | 6,5 | 6,7 | 6,5 | 6,8 | 6,4 | 8,6 | 7,1 | 7,7 | 6,7 | 9,5 | 5,7 | 7 | 4,7 | 6,5 | 6,2 | 7,5 | 6,8 | 6 | 7,1 | 8,1 | 6,3 | 4,2 | 3,3 | 6,4 | 6,6 | |
| 5 | | | | | 5,1 | | | 5,1 | | | | 5,2 | | | | | | | | 6 | | | | 5,9 | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | 4,3 | | | | | | | 4,6 | | | | |
| 7 | 5,5 | | | | | | | | | | 5,1 | | | 4,5 | | | 4,2 | | | | | | | | | |

TEMPS = 5 mn 45 s

SANS INFORMATION DE RETOUR

| N° HP | 7 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 5 | 1 | 3 | 1 | 7 | 5 | 7 | 3 | 6 | 7 | 2 | 3 | 5 | 3 | | | | |
|-------|-----|-----|---|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|---|-----|-----|-----|--|--|--|--|
| 1 | | | | | 10,8 | | | | 9,6 | | 7,7 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | 9,3 | 11,4 | | | | | | | | | 10,1 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | 9,6 | | | | | 9,8 | | | | | | 10,2 | | | | 7,7 | | 8,2 | | | | |
| 4 | 7,1 | 7,6 | 7 | 7,6 | 9 | 7,2 | 9,7 | 6,5 | 7,2 | 6,9 | 10,2 | 7,1 | 5,8 | 5,7 | 7,3 | 8,1 | 6,2 | 8 | 8,5 | 4,2 | | | | | |
| 5 | | | | | 8,7 | | | 8,7 | | | | 8,1 | | | | | | | | 8,7 | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | 9,7 | | | | | | | | | |
| 7 | 8,6 | | | | | | | | | | 9,2 | | | 11,8 | | 10,6 | | | | | | | | | |

Figure A. III - 2 : Séquence d'apparition des stimulus.

