

50376  
1979  
164

N° d'ordre : 755

50376  
1979  
164

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR 3<sup>eme</sup> CYCLE**

MENTION AUTOMATIQUE

par

Jacques GUILBERT

**"ETUDE DES MOUVEMENTS CEPHALIQUES  
APPLICATION À LA COMMANDE D'ENGIN"**



Soutenue le 14 mai 1979, devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

MM. P. VIDAL  
N. MALVACHE  
G. MILBLED  
L. POVY  
J. GUITTET

Président et Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Invité

## AVANT PROPOS

Ce mémoire expose le travail effectué sur l'utilisation des mouvements de tête dans le cadre de l'aide aux handicapés. Il est en particulier orienté vers la réalisation puis l'utilisation d'un capteur de mouvements de tête facilement exploitable pour un handicapé tétraplégique. Il cherche à étudier les possibilités de commande d'un engin par les mouvements céphaliques et constitue une des composantes d'un projet pilote de l'IRIA (Projet Spartacus).

Le projet pilote Spartacus fut lancé au cours de l'année 1975 par l'IRIA (Institut de Recherche en Informatique et Automatique).

Il s'intéresse à la robotique médicale appliquée à l'assistance aux grands handicapés moteurs des membres supérieurs et en particulier aux tétraplégiques.

Le but final réside dans la réalisation d'un manipulateur extérieur au malade (télémanipulateur) qui soit :

- \* commandable par le malade grâce à une combinaison harmonieuse de différents signaux biologiques (langage exprimant les désirs du malade sous la forme la plus physiologique possible)
- \* muni de dispositifs automatiques prenant eux même en charge certaines actions normalement effectuées par l'homme de façon réflexe.

L'un des soucis les plus importants fut de réaliser une téléthèse adaptée au handicapé, c'est-à-dire un appareil qui n'entraîne pas un rejet psychologique.

Un tel projet, faisant appel à plusieurs disciplines (physiologie, automatique, mécanique, informatique,...) a rendu nécessaire la collaboration de nombreuses équipes de recherche réparties dans toute la France et coordonnées par l'IRIA.

Ces équipes peuvent être regroupées autour des principaux thèmes de recherche suivants :

- Etude des capteurs de signaux biologiques
- Etude des retours sensoriels
- Capteurs de proximité - Saisie automatique
- Etude des mouvements, modélisation, simulation de la cinématique et de la dynamique du manipulateur
- Informatique de commande après définition des scénarios
- Réalisation du manipulateur (MA 23)

L'aspect médical du projet Spartacus a consisté essentiellement à définir la circulation des informations du malade vers son environnement (flux de commande) et du monde extérieur vers le malade (flux de contrôle). Cette étude, complétée par une enquête nationale sur les besoins des handicapés, a défini les contraintes que doit observer la téléthèse pour être bien acceptée par le sujet et a conduit à la conception de l'environnement du malade (organisation d'un plan de travail).

L'étude des capteurs de signaux biologiques, menée par plusieurs équipes, a mis en évidence l'intérêt de la commande "principale" par les mouvements de tête, commande complétée au niveau des sécurités par un ensemble d'autres signaux biologiques spécifiques à chaque malade (EMG, restes de motricité, souffle, etc...).

Ces travaux constituent l'essentiel du contenu de ce mémoire :

Après avoir fixé les contraintes psycho et physiologiques que le capteur doit respecter, nous passons en revue les diverses options qui peuvent être retenues. Parmi ces possibilités, il est mis en évidence que le principe utilisant des jauges de contrainte se révèle intéressant (Chapitre I)

Nous définissons ensuite les caractéristiques statiques

et d'étalonnage du capteur choisi ainsi que le protocole expérimental de "test informatique" du capteur (Chapitre II).

L'étude des paramètres recueillis lors d'une tâche de commande (temps de stabilisations, erreurs de trajectoire, retards) est abordée au chapitre III.

La détermination de critères de performance permettant de chiffrer les possibilités d'une commande à l'aide du dispositif étudié est exposée au chapitre IV.

Enfin, nous envisageons, à la lumière des résultats précédents, la commande d'un engin à l'aide des mouvements céphaliques captés à l'aide de jauges de contraintes ; l'application est faite sur un fauteuil roulant électrique pour handicapé (Chapitre V).

C H A P I T R E I

ETUDE DES CAPTEURS ENVISAGEABLES

POUR LA COMMANDE A PARTIR DES

MOUVEMENTS DE TETE

## I. 1 : Intérêt et choix des composantes céphaliques adaptées à une commande

Rappelons que ce travail s'insère dans le cadre de l'aide aux handicapés tétraplégiques et que l'aspect humain de l'étude ne doit pas être négligé.

L'existence de décalages entre niveau sensitif et niveau moteur chez les tétraplégiques indique qu'il faut considérer chaque tétraplégie en particulier (↑).

Toutefois une étude plus vaste peut être entreprise en utilisant des signaux biologiques de commande en provenance de l'ensemble tête-cou, le caractère plus ou moins complet des lésions permettant d'adjoindre des commandes auxiliaires (par l'épaule par exemple).

Les signaux disponibles peuvent être recueillis au niveau :

- des muscles du cou par l'intermédiaire d'EMG (électromyographie)
- des muscles, autres que ceux du cou, les moins habituellement utilisés, afin de ne pas commander l'appareil involontairement (muscles situés derrière l'oreille, sur la calotte crânienne, au niveau des sourcils, etc...)

Toutefois l'utilisation de ces muscles, nous semble assez peu réaliste à cause de l'apprentissage difficile et aussi à cause de la trop grande visibilité (grimaces, gêne psychologique).

- de la langue, à l'aide d'une batterie de switches ou micro-contacts, ce qui implique l'existence d'un codage (ceci pose alors un problème d'apprentissage).

- de la bouche, en utilisant la phonation ou le souffle
- des restes de motricité, s'il y en a
- des mouvements de tête proprement dits
- .....

### I. 1.1 - Intérêt de la prise en compte des mouvements de tête :

Les mouvements de tête semblent très intéressants, car il y a alors :

- facilité d'apprentissage,
- retours proprioceptifs par les muscles du cou,
- transposition d'espace facile.

Les résultats obtenus sur l'analyse des réponses céphaliques à des stimulus visuels (2) semblent montrer que parmi les six degrés de liberté dont dispose la tête, les composantes les plus intéressantes par leur nature et leur indépendance, les unes vis à vis des autres sont :

- le mouvement droite gauche
- le mouvement de flexion extension (haut bas) et le mouvement de latéro-flexion (surtout si le tétraplégique est couché).

Les deux premières composantes peuvent servir à guider un engin à deux degrés de liberté (site et azimut) en ajoutant un retour visuel pour parfaire la précision du pointage.

Il faut alors adjoindre à cet outil des commandes globales complémentaires pouvant faire office de

- Mise en marche
- Arrêt d'urgence
- Développement ou rétraction d'un système télescopique
- Pince auto-serrante (peau artificielle par exemple) équipée d'un capteur de proximité, etc...

Ces commandes globales peuvent provenir des signaux inutilisés énoncés précédemment (E M G, composantes céphaliques non utilisées, restes de motricité, etc...) ou encore par l'intermédiaire d'interrupteurs situés sur un appui derrière la tête.

Il reste maintenant à définir les contraintes que doit respecter le capteur de mouvements de tête.

### I 1. 2- Contraintes du capteur

#### a) du point de vue physiologique

La partie de l'appareil portée par le sujet doit être légère, peu encombrante, le harnachement bien accepté, l'apprentissage facile ; de plus, l'intervention du sujet dans les mouvements ne doit pas être trop réduite.

Il serait d'autre part intéressant d'introduire un retour d'effort qui aiderait l'opérateur dans la conduite de l'appareil (3).

b) du point de vue psychologique

Cette partie portée par le sujet ne doit pas être trop visible de l'extérieur et ne nécessiter que des mouvements "habituels" qui n'attirent pas trop l'attention dans un groupe de sujets sains.

Il serait en outre intéressant que le malade puisse se séparer de l'appareil, vite et facilement, quand il le désirerait.

Il faut noter au passage que dans une optique de commande le signal recueilli n'a pas besoin d'avoir les qualités d'un signal de mesure (précision, linéarité, etc...). On montrera d'ailleurs par la suite que ce dernier signal peut se révéler gênant par son excès de précision (tremblements par exemple). Ce signal de commande pourra donc être notamment lissé, avoir des caractéristiques non linéaires, etc...



## I. 2 : DIVERS CAPTEURS ENVISAGES

### I.2.1 - Capteur Murex

Le dispositif est schématisé. Figure 1.1.

Les études déjà menées sur les mouvements céphaliques d'un opérateur muni de ce capteur ont permis de dégager l'intérêt de deux voies particulières en vue d'une commande (2)

- rotation droite gauche
- mouvement de flexion extension (Haut bas)

Ses avantages en vue d'une commande sont constitués par un faible apprentissage nécessaire et l'existence de retours proprioceptifs.

Ses inconvénients pour le tétraplégique sont multiples

- poids rapporté sur la tête trop important (800 grs) bien que réduit par l'utilisation de sangles et contrepoids
- sangle et mentonnière nécessaires pour éviter que le casque ne glisse sur la tête
- trop grande sensibilité

Cependant cet appareil peut se révéler intéressant parce qu'il peut fournir un modèle de comparaison et conduire à un dispositif simplifié et allégé que nous étudierons par la suite.

Nous avons étudié à partir de cet appareil le pilotage du marqueur d'une table traçante avec deux interfaces différents

- en simulant une transmittance du second ordre identifiée à celle d'un moteur,
- en filtrant le signal, l'engin à commander étant constitué par une table traçante.

La tâche du sujet consistait à suivre à l'aide des mouvements de tête et avec le marqueur de la table traçante un contour rectangulaire préalablement tracé sur la feuille.

La distance séparant le sujet de la table traçante est de 90 cm.

#### a - Commande d'un moteur de transmittance du second ordre

Nous avons simulé une transmittance du second ordre

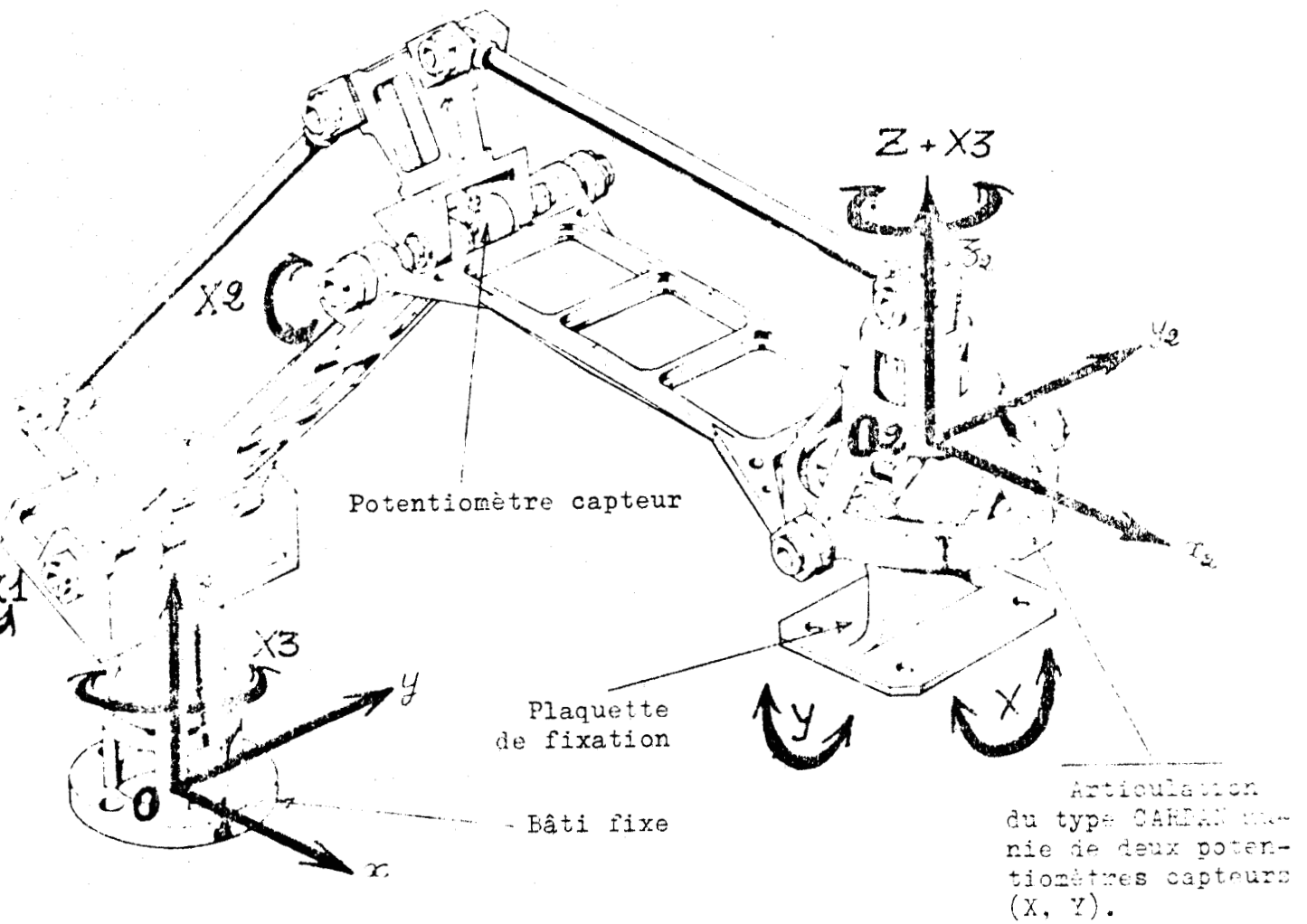


FIGURE 1.1 : Schéma de principe de MUREX.

que nous avons intercalé entre le dispositif MUREX et la table traçante (figure 1.2).

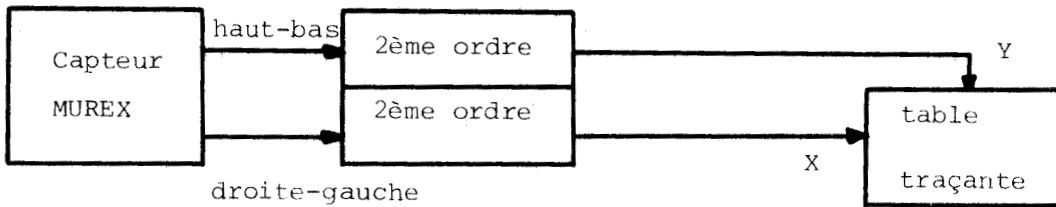


Figure 1.2

Commande d'un moteur de transmittance du second ordre

La transmittance simulée est de la forme

$$\frac{K}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2}$$

avec  $\xi = 0,75$  ( $\neq$  réponse critique)

$$\omega_n = 6 \text{ rd/s} \quad F_n \neq 0,95 \text{ Hz}$$

K : gain réglable de façon à ce que les amplitudes des mouvements de la tête soient en concordance avec celles du marqueur de la table traçante.

La courbe obtenue est représentée figure 1.3

b - Commande du moteur de la table traçante après filtrage

Nous avons ensuite intercalé entre le signal de sortie du capteur MUREX et l'entrée de la table traçante un filtre passe-bas du premier ordre de fréquence de coupure 5,3 Hz (figure 1.4).

La courbe obtenue est représentée figure 1.5

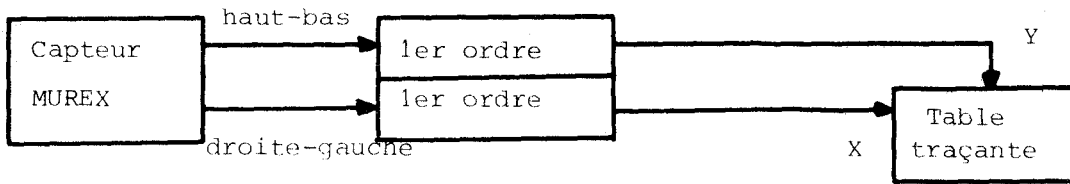


Figure 1.4

Commande du moteur de la table traçante après filtrage.

### c - Conclusions

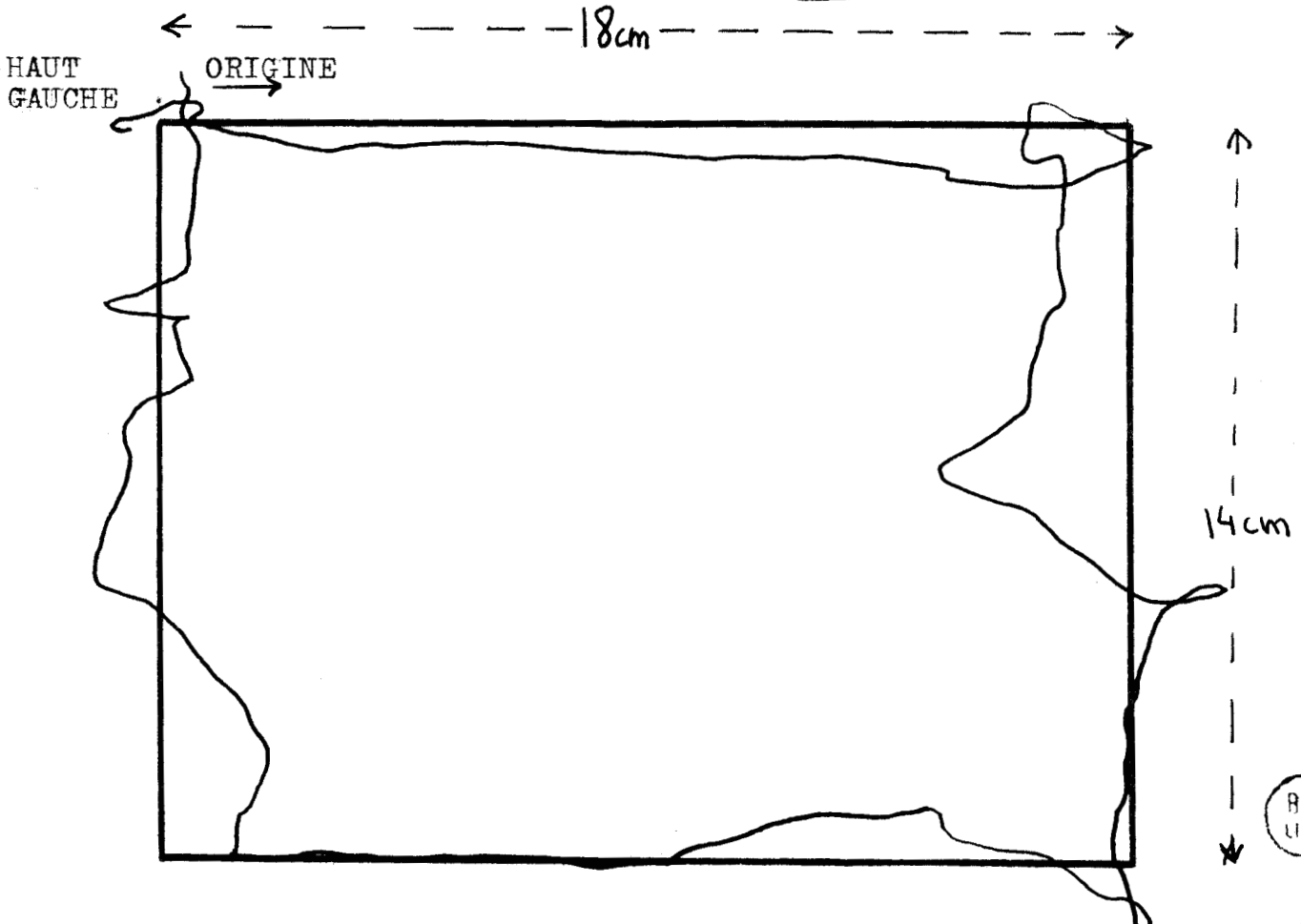
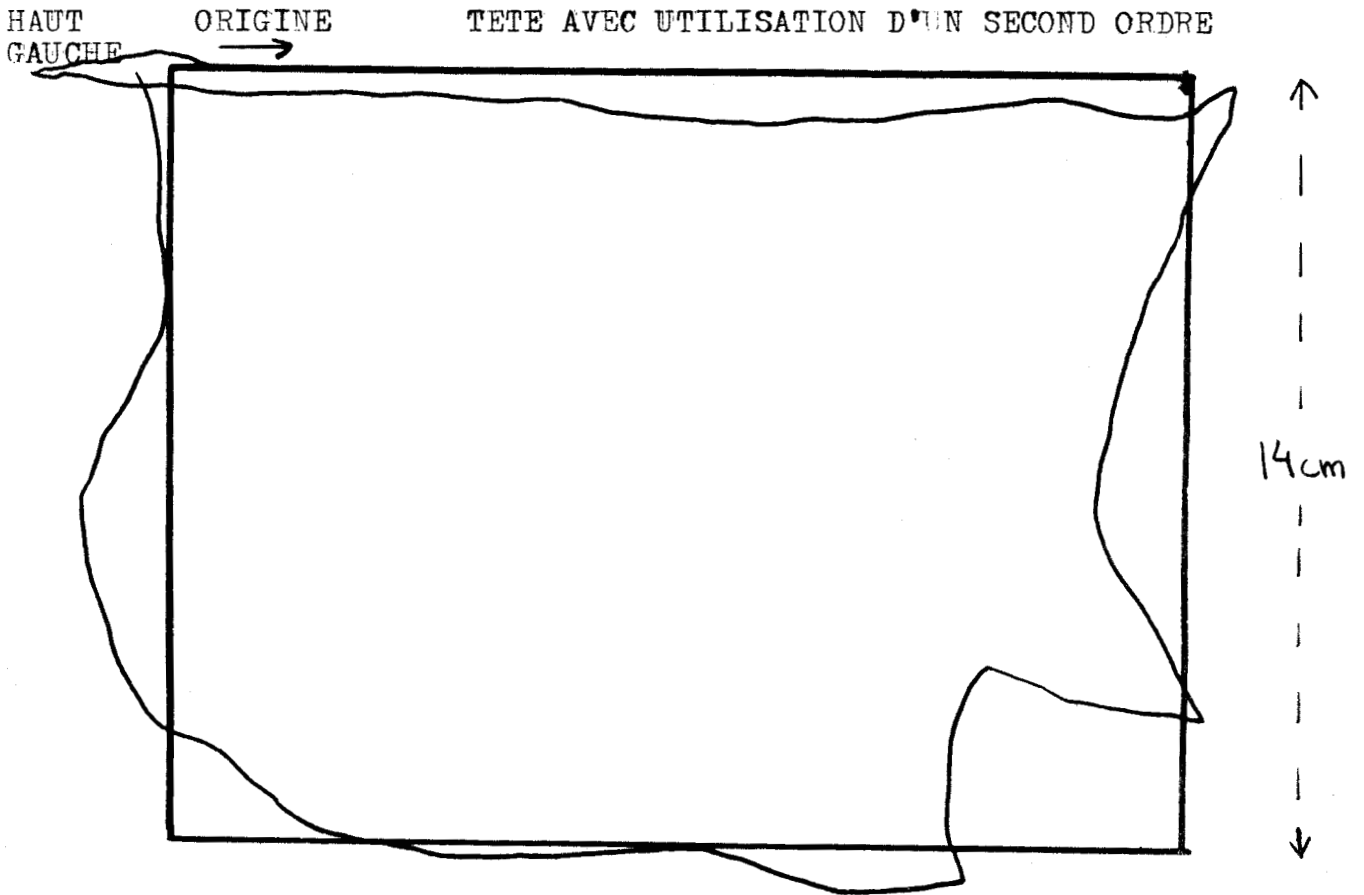
Les enregistrements, Figure 1.3 et 1.5 font apparaître que les tremblements perceptibles avec le filtre du premier ordre, figure 1.5 sont atténués par l'emploi d'un filtre (d'ordre plus élevé, figure 1.3).

Toutefois, dans les deux cas, les écarts réalisés par le sujet en suivant le contour imposé restent importants.

Il paraît donc difficile de réaliser une commande de la trajectoire d'un engin à partir d'un dispositif de mesure très précis de ce type.

En conséquence, il semble intéressant de s'orienter vers l'étude de capteurs moins précis que le dispositif MUREX mais délivrant des signaux plus adaptés à une commande (Jauges de contrainte, dispositifs électromécaniques moins performants, etc...) et respectant de plus les contraintes énoncées au I.1.2

FIG1.3: CONTOUR SUIVI A L'AIDE DES MOUVEMENTS DE TETE AVEC UTILISATION D'UN SECOND ORDRE



BUS LILLE

FIG 1.5 : CONTOUR SUIVI A L'AIDE DES MOUVEMENTS DE TETE AVEC UTILISATION D'UN PREMIER ORDRE

## I. 2.2 - Capteurs sans harnachement

### I. 2.2.a. Principe opto-électrique du capteur

Ce principe utilise une photo résistance dont la résistance varie suivant le flux de lumière qu'elle reçoit.

Une source émet des rayons infra-rouges pour que la mesure puisse être faite de jour. Ces rayons étant réfléchis par la tête, le flux reçu par la photo-résistance varie en fonction de distance tête-photo-résistance, donc en fonction des mouvements céphaliques (figure 1.6).

Cette méthode, si elle présente des avantages certains (harnachement minime, grande facilité d'apprentissage, faible encombrement) est difficilement utilisable pour capter les mouvements céphaliques (signal bruité et très faible à cause de la mauvaise réflexion sur la tête).

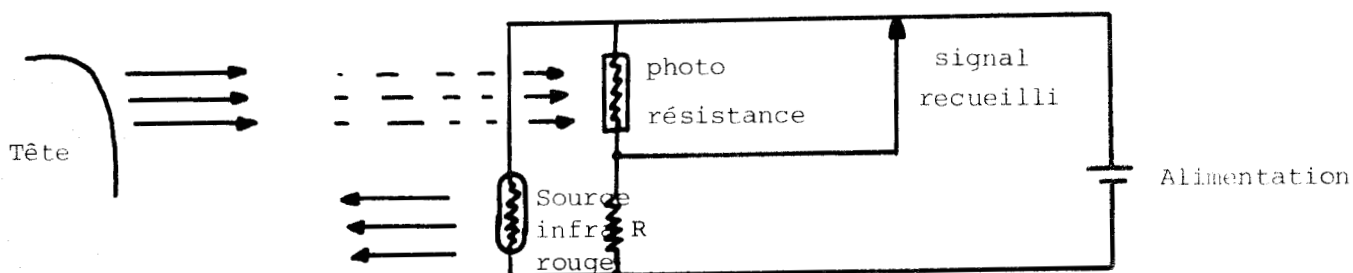


Figure 1.6

Principe d'un capteur opto-électrique des mouvements céphaliques.

### I. 2.2.b. Dispositif ultra sonore

Le signal ultra sonore émis par une source est dans ce projet réfléchi par la tête et recueilli par un récepteur. Il est alors décodé puis amplifié par un appareil de contrôle sur lequel un écho, dont l'amplitude est proportionnelle aux mouvements de tête, est mesuré.

Les essais ont été réalisés en collaboration avec la firme Escoffier (appareillage ultra-sonore).

Cependant l'exploitation du signal délivré s'est avéré difficile (Bruit de mesure, faiblesse de l'écho obtenu) par suite de l'inadaptation d'un matériel de type industriel à notre problème.

Néanmoins la construction d'un appareillage bien adapté aux mouvements céphaliques semble possible mais le repérage de la tête dans un système à trois dimensions nécessite alors un traitement informatique de signaux issus de plusieurs récepteurs dans l'espace, ce qui alourdit considérablement la souplesse, le prix de prototype.

### I. 2.3- Capturs necessitant peu de harnachement

#### a - Utilisation des signaux E M G

Cette methode est basée sur le recueil à la surface de la peau des signaux électriques émis par les muscles.

Les muscles qui nous intéressent ici sont les muscles responsables des mouvements céphaliques (sterno-cleido-mastoidien et muscles du cou notamment).

Ce procédé a déjà été utilisé par L.V Renner (4).

La tâche de l'opérateur consiste ici à piloter une chaise mobile autour d'un axe vertical (un seul degré de liberté : rotation droite-gauche) figure 1.7

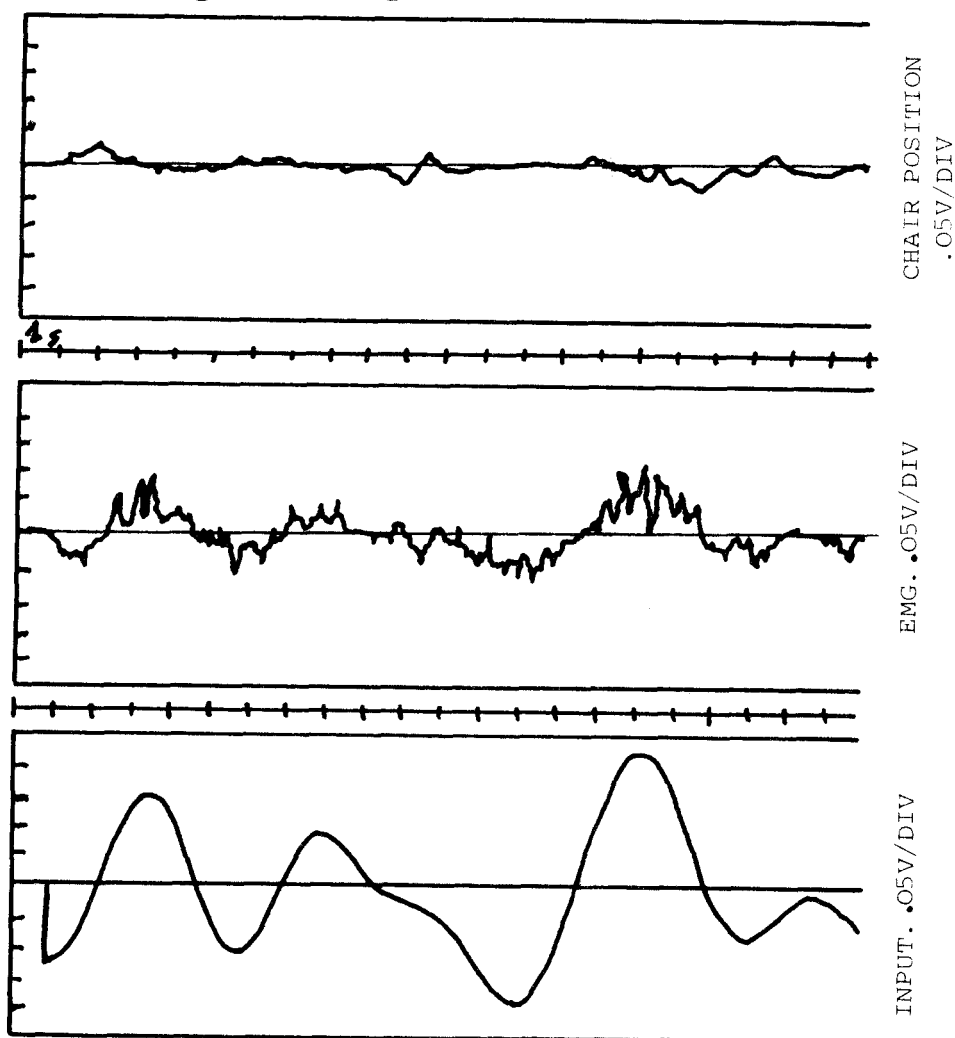


Figure 1.7: Utilisation des signaux E M G dans une tâche de pilotage. L'opérateur est assis sur une chaise soumise à des perturbations de rotation droite-gauche (Input). A l'aide des mouvements de tête (EMG), il doit ramener sa chaise à une position fixe (Chair position).



L'intérêt de ce dispositif réside essentiellement dans le fait des faibles contraintes occasionnées par l'appareillage et de sa légèreté. En effet, en utilisant des électrodes de surface, il n'est pas besoin de percer la peau, de plus l'appareil est très peu visible.

Mais cette méthode présente certains inconvénients :

- existence d'une zone morte d'inactivité électrique de  $\pm 45^\circ$  probablement due au mauvais choix des muscles.
- nécessité d'une mise en forme importante du signal soit analogique, soit digitale.

En conclusion, malgré le faible harnachement offert par ce dispositif, son utilisation nous a semblé difficile.

#### b - Principe opto-électronique envisageable

Une source lumineuse A est disposée au centre d'une cage sphérique (figure 1.8) solidaire de la tête et émet un flux recueilli en S.

Au cours d'un mouvement de la tête, le faisceau envoyé vers S est interrompu un certain nombre de fois par les "méridiens" de la cage sphérique. Un système de comptage en S totalise alors le nombre d'interruptions et après étalonnage, on obtient ainsi une mesure de l'angle de rotation de la tête.

Ce principe, utilisé au LAAS pour le repérage des segments de bras articulé, s'il nécessite un faible harnachement, n'est vraiment utilisable que pour la rotation droite-gauche : en effet pour les autres mouvements céphaliques, le débattement est trop grand.

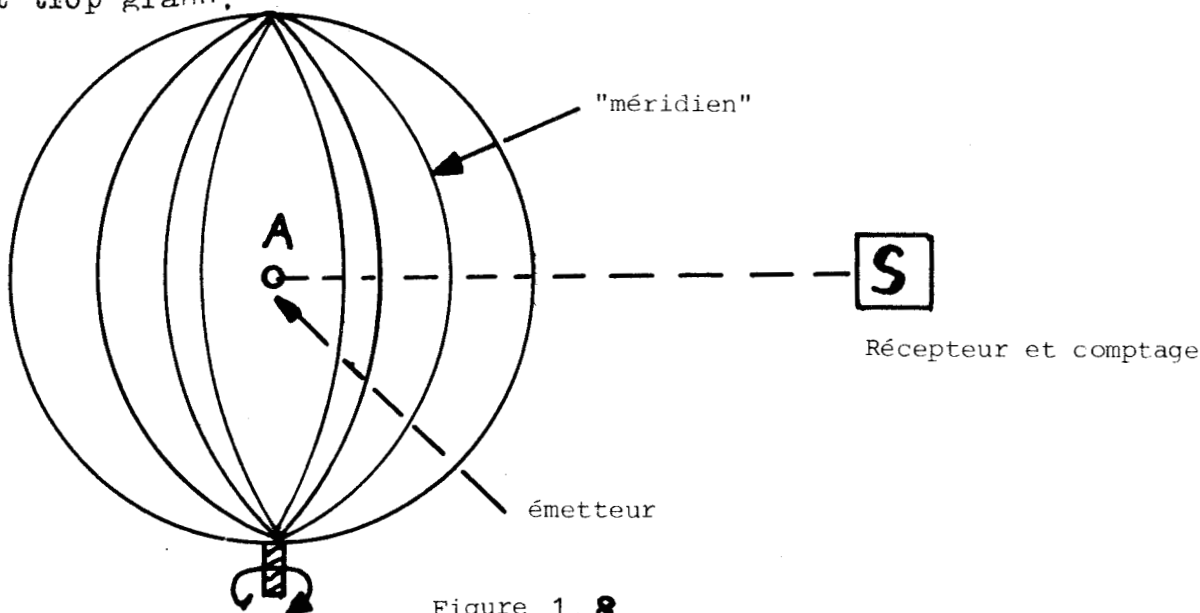


Figure 1.8

Principe de la mesure opto-électronique.

c - Procédé électromagnétique. Bobine dans un champ magnétique

Cette méthode, utilisée par Outerbridge et M. Jones (5), nécessite une petite bobine fixée sur la tête décelant les variations de l'angle que forme son axe avec un champ magnétique produit par deux bobines fixes situées de part et d'autre de la tête du sujet.

Après rectification et filtrage, la tension fournie est proportionnelle au sinus de l'angle formé par le champ magnétique et la bobine céphalique.

En utilisant alors un générateur de fonction "arc sinus" on obtient directement un signal proportionnel à la rotation de la tête correspondante.

La précision est inférieure à 3 % sur une gamme de  $\pm 80^\circ$  et la bande passante s'étale de 0 à 100 Hz.

La linéarité est de 1 % dans une sphère de 15 cm de diamètre centrée autour de la petite bobine (rayon 1 cm). Les bobines magnétiques utilisées ont un rayon de 25 cm.

Les tracés obtenus par Outerbridge et M. Jones font apparaître (figure 1.9) une absence de bruit dans le signal recueilli. Ce procédé paraît très intéressant car le seul dispositif fixé sur la tête est une petite bobine très légère ; toutefois, il présente plusieurs inconvénients :

- il ne peut capter qu'une seule composante céphalique pour une direction du champ magnétique fixée

- la visibilité des grandes bobines est très importante

- l'alimentation nécessaire à la création d'un tel champ magnétique est assez volumineuse.

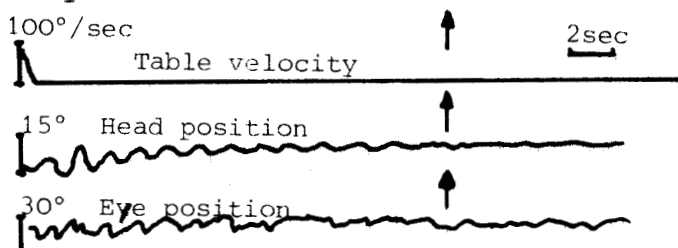


Figure 1.9: Response to angular velocity step in man

. Le reflexovar

Le reflexovar est un appareil utilisé en médecine pour détecter la réponse motrice d'un sujet dans un acte réflexe. Il mesure le flux émis par une pastille magnétique située sur le sujet.

Nous avons testé cet appareil pour détecter des mouvements céphaliques de flexion extension (haut-bas). Seule la forme du signal obtenu nous intéresse, aucune contrainte n'a été demandée au sujet (amplitude de l'ordre de 20 degrés). La courbe obtenue est représentée Figure 1.10.

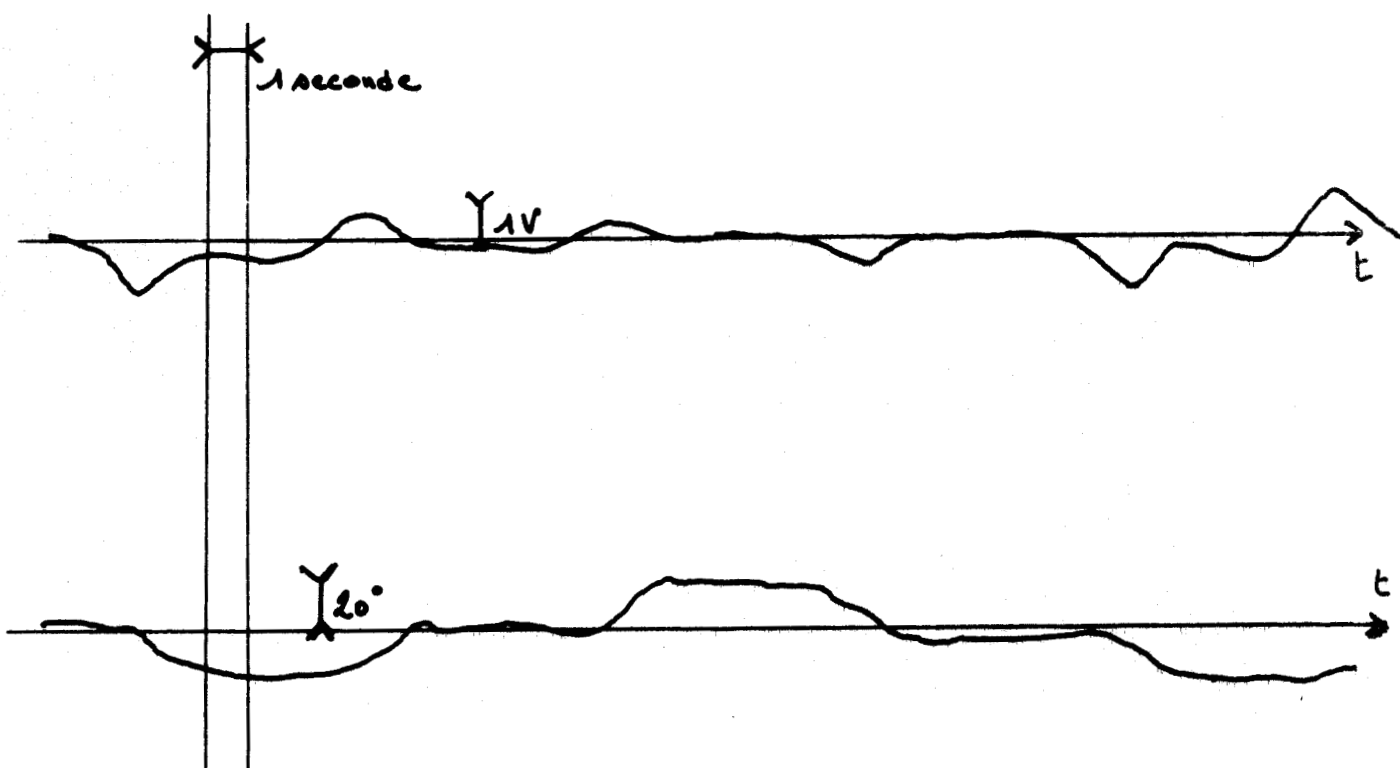


Fig. 1.10 : Enregistrement du mouvement céphalique haut-bas à l'aide du réflexovar

Figure du haut : Enregistrement à l'aide du réflexovar

Figure du bas : Enregistrement à l'aide du capteur MUREX

1 division = 20 degrés.

Les courbes obtenues (figure 1.10) mettent en évidence le peu de corrélation entre le signal obtenu et l'amplitude des mouvements céphaliques donnés par le capteur MUREX.

Le signal obtenu semble corrélé à la vitesse du déplacement céphalique. Malgré un faible harnachement (fixation uniquement d'une pastille magnétique sur la tête) ce dispositif ne serait donc pas utilisable pour une commande directe, mais pour une commande en vitesse.

#### d - Dispositif accélérométriques

##### . Présentation

Les accéléromètres sont des capteurs d'accélération fonctionnant le plus souvent suivant deux principes :

- piezoélectricité : une masse mise en mouvement par l'accélération communique une force à un quartz piézoélectrique et la transforme en charge électrique suivant la loi de Curie.

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{S'}{S} F$$

avec S aire sur laquelle s'exerce la force S' aire de la partie longitudinale,  $\frac{\pi}{4}$  coefficient de Curie

- jauge de contrainte : le mouvement de la masse entraîne ici une variation de longueur d'un fil, provoquant elle-même une variation de sa résistance électrique.

Les accéléromètres à jauge de contrainte présentent sur les accéléromètres piezoélectriques l'avantage d'une meilleure tenue aux basses fréquences tout en étant aussi légers.

Un autre type d'accéléromètre, l'accéléromètre angulaire utilise la mesure du couple d'inertie  $J\ddot{\theta}$  à partir de la connaissance du moment d'inertie J. Il est réalisé à partir de

- jauges de contraintes (Robustes et faible encombrement)
- quartz piezoélectriques
- systèmes électromagnétiques

Barnes et Rance d'une part (6) Gresty d'autre part (7) ont obtenu des tracés en utilisant ce dernier type d'accéléromètre (figure 1.11) mais leur prix est toutefois beaucoup plus élevé que celui des accéléromètres linéaires.

Les essais que nous avons réalisés portent sur des accéléromètres linéaires (Bruel et Kjaer type 4334).

. Problèmes apparus

- l'influence de l'accélération de pesanteur n'est pas constante et dépend de la position de la tête (fig.1.12)

- une référence identique pour chaque expérience est nécessaire

- l'influence de l'accélération de pesanteur entraîne l'existence d'une composante continue qui amène après les opérations d'intégration (vitesse, déplacement) la présence d'une dérive importante ; de plus ces intégrations se révèlent très difficiles pour les mouvements basse fréquence que sont les mouvements céphaliques.

. Expériences réalisées

L'étude des signaux fournis par deux accéléromètres a été faite en les comparant avec ceux très précis fournis par le dispositif MUREX.

- Dispositif expérimental

Les deux accéléromètres identiques ont été placés sur le casque utilisé avec le capteur MUREX de façon à étudier les mouvements de rotation haut bas et droite gauche.

L'expérience se déroule dans une cabine semi-cylindrique de rayon 1,20 m dont les parois sont garnies de lampes au néon (Figure 1.13).

L'expérience se fait en boucle fermée grâce à un retour visuel obtenu avec un projecteur solidaire du casque du capteur MUREX (Figure 1.14)

La tâche du sujet consiste à pointer le spot solidaire de la tête sur le stimulus lumineux ponctuel détecté.

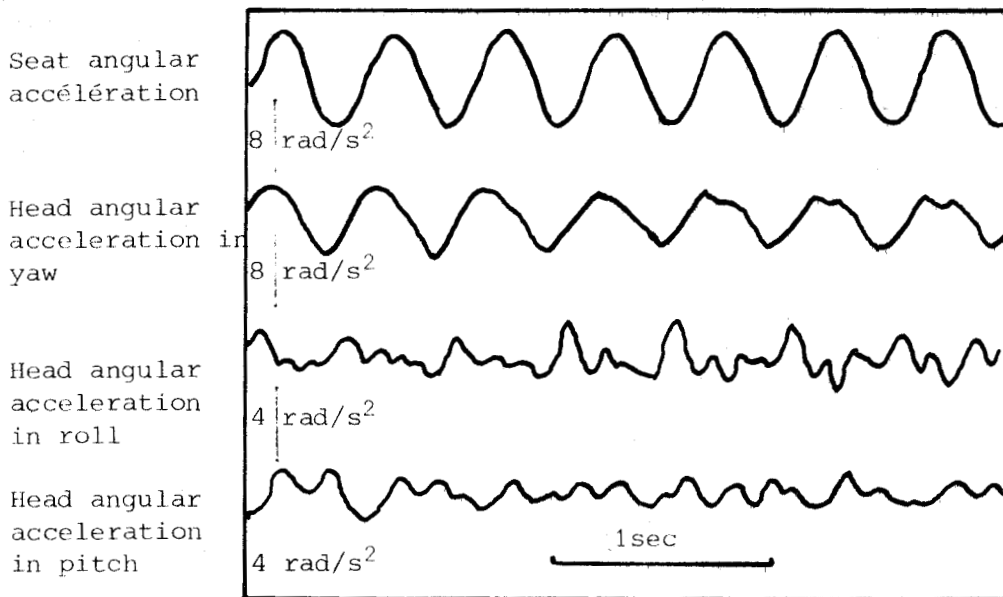


Figure 1.11 : Tracés obtenus avec des accéléromètres angulaires

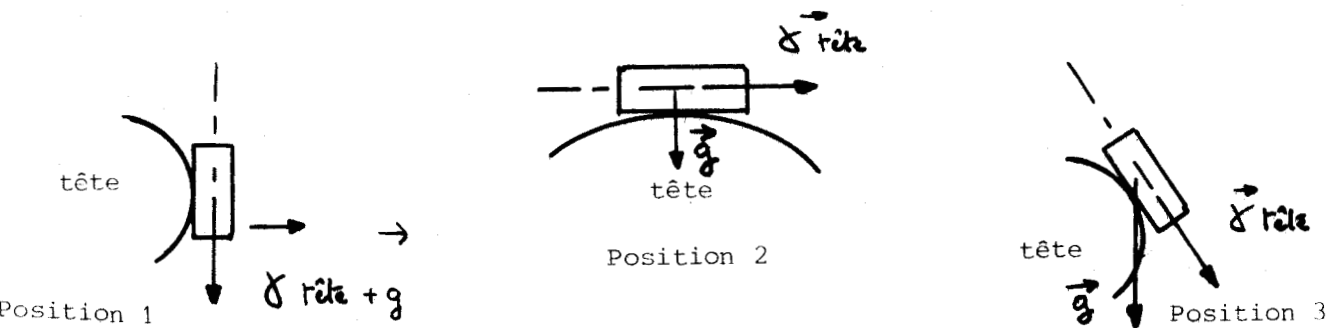
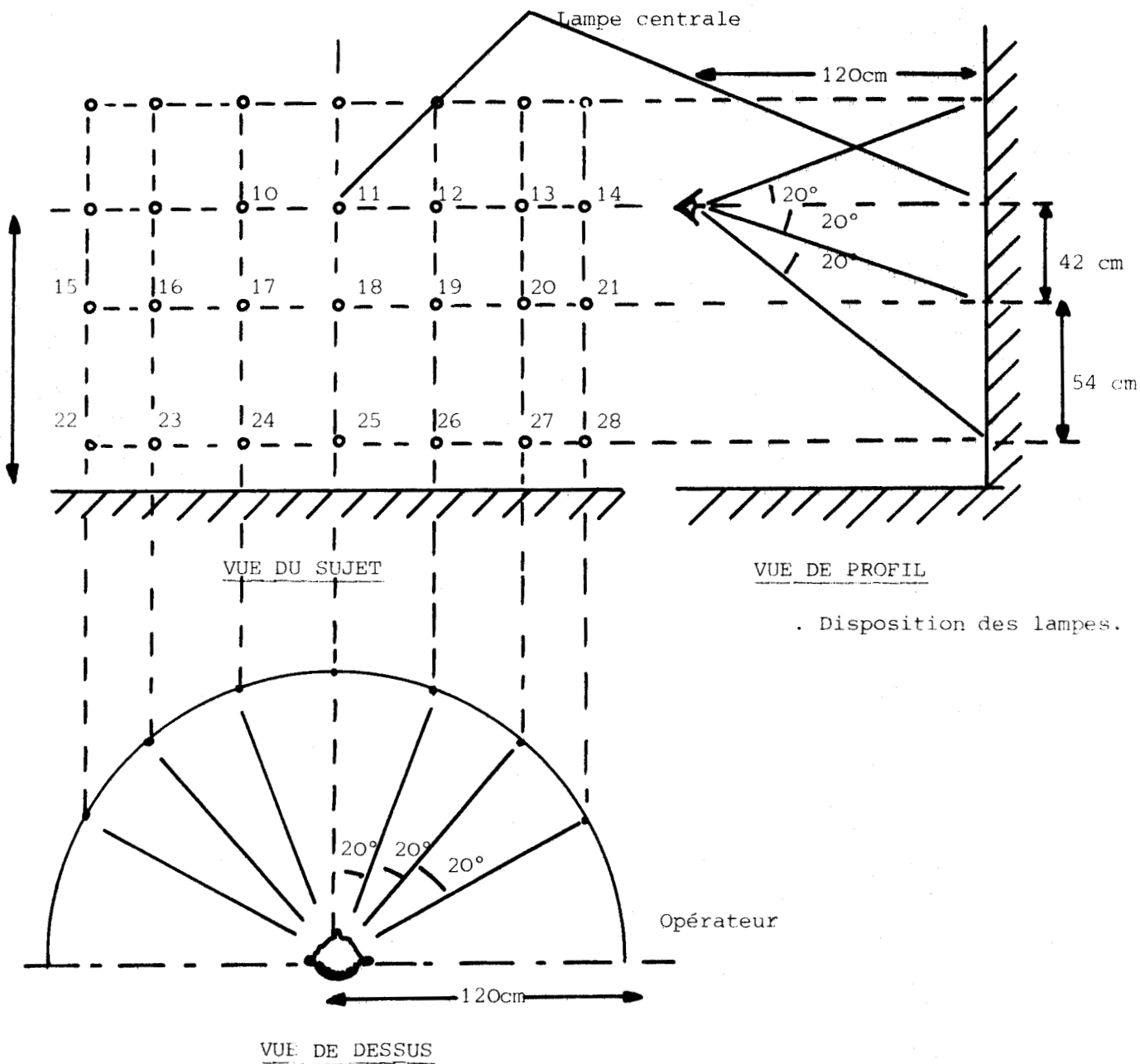


Figure 1.12 : Influence de la composante de l'accélération de la pesanteur

I-18



. Disposition des lampes.

Figure 1.13: La cabine expérimentale vue de dessus.

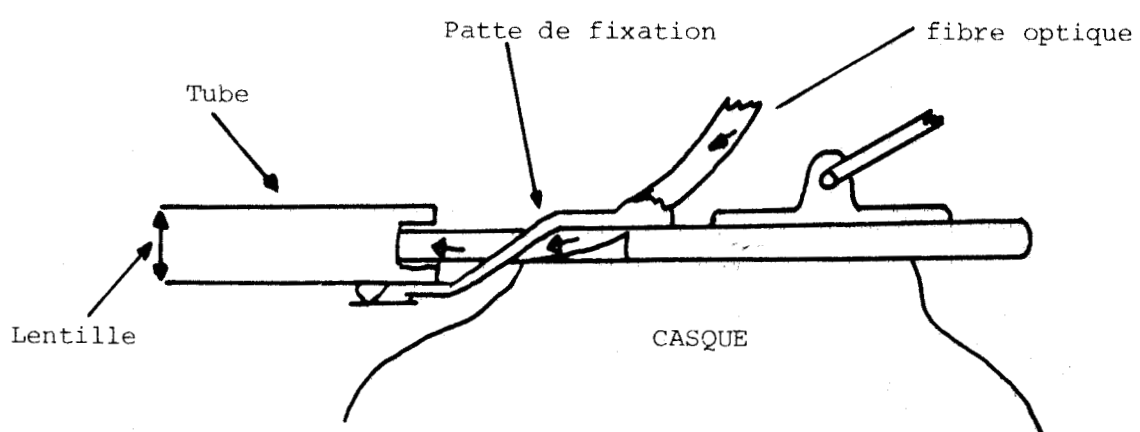


Figure 1.14: Le projecteur du casque.

. Résultats expérimentaux

Les courbes obtenues sont représentées (fig. 1.15)

Accélération : les signaux délivrés par les accéléromètres sont en corrélation avec ceux donnés par le dispositif MUREX ; un pic d'accélération apparaît à chaque mouvement de la tête.

Vitesse : les signaux de vitesse sont également en corrélation avec ceux du MUREX.

Déplacement : les courbes représentant le déplacement ne correspondent que peu à celles données par le MUREX. En effet quand la tête pointe dans une direction donnée, le signal de l'accéléromètre revient au zéro (au lieu de rester autour de la valeur prise).

. Conclusions

Les propriétés que nous venons d'exposer permettent de penser que les signaux de position délivrés par un accéléromètre linéaire sont difficilement exploitables.

Toutefois les signaux d'accélération et de vitesse peuvent être utilisés pour :

- la réalisation d'un interrupteur : on utilise des signaux d'accélération munis d'un seuil, afin d'éliminer les tremblements possibles
- la réalisation d'une commande en vitesse : en utilisant les signaux de vitesse.

En résumé, malgré leurs avantages au point de vue

- Poids (ils sont très légers : 10 à 30 grs)

- Fixation (très facile)

- Harnachement (seuls les fils électriques de liaison sont visibles)

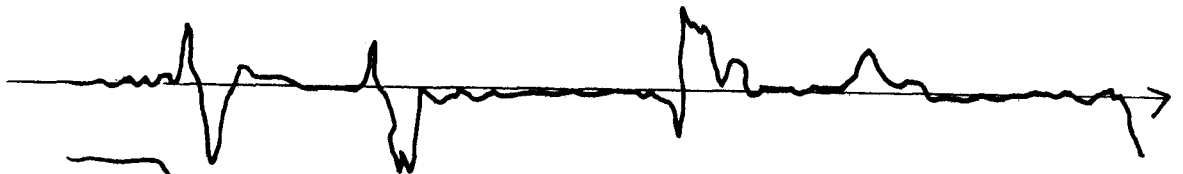
Les accéléromètres ne semblent pas indiqués pour capter les mouvements de la tête à cause des inconvénients suivants :



- Influence de la pesanteur
- Intégration difficile
- Compromis volume-performances, en effet les mouvements céphaliques se font généralement en basse fréquence sans dépasser une accélération de 1,5 g, il faudrait alors utiliser des capteurs plus volumineux et plus lourd, difficiles à porter sur la tête.

Seuls les accéléromètres angulaires pourraient être utilisés, mais leur coût reste assez élevé.

accélération  
horizontale



rotation  
droite-gauche



mouvement  
haut-bas

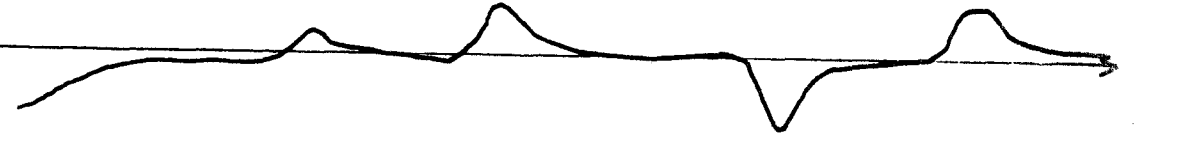


apparition  
stimulus



Fig. 1.15 a

vitesse  
verticale



rotation  
droite-gauche



mouvement  
haut-bas



apparition  
stimulus



Fig. 1.15 b

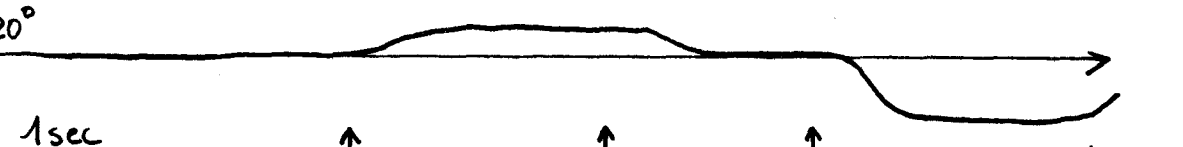
déplacement  
vertical



rotation  
droite-gauche



mouvement  
haut-bas



apparition  
stimulus



Fig. 1.15 c

I. 2. 4 - Capteurs nécessitant un harnachement importantI. 2. 4.a. Capteurs potentiométriques. Dispositif

Du capteur MUREX qui présente de multiples inconvénients pour le projet SPARTACUS nous avons déduit un modèle simplifié qui réduit les problèmes de poids rapporté sur la tête du sujet.

Une première version simplifiée de ce capteur utilise un casque très souple qui épouse la forme de la calotte crânienne. Sur ce casque sont fixés deux potentiomètres dont les axes sont perpendiculaires (articulation type Cardan). La position de ceux-ci est telle que les mouvements haut-bas et droite gauche sont pris en compte.

Ces potentiomètres sont reliés à une tige coulissant dans un anneau fixe de façon à éviter toute gêne dans les mouvements du sujet.

Ce casque est fixé à la tête par l'intermédiaire d'une sangle et d'une mentonnière (Figure 1.16)

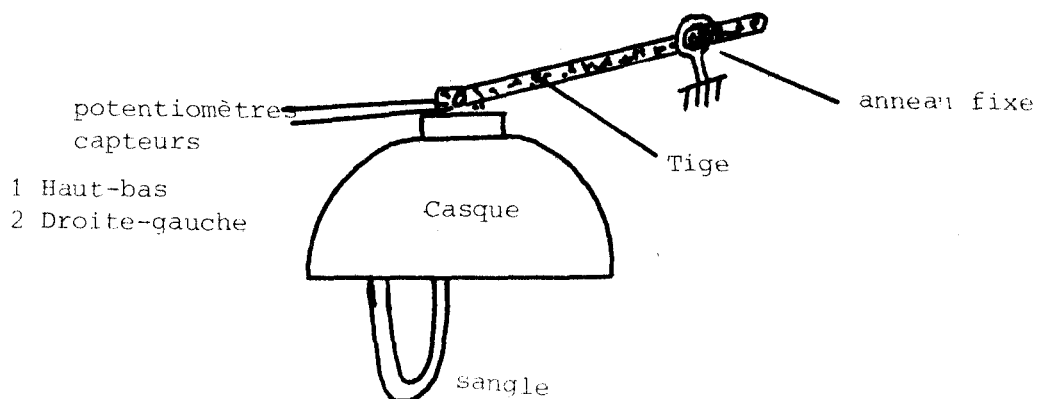


Figure 1.16

Capteur potentiométrique des mouvements céphaliques  
(modèle simplifié du MUREX)

Le poids rapporté sur la tête du sujet est beaucoup plus faible que celui du MUREX et de plus les frottements dûs aux potentiomètres ont l'avantage d'apporter au sujet des informations de retours proprioceptifs.

#### . Relevés expérimentaux

La tâche du sujet, comme avec le dispositif MUREX, consiste à suivre un contour imposé à l'aide du marqueur d'une table traçante située horizontalement devant lui à 80 cm ; le gain étant réglé de façon à obtenir une corrélation entre l'amplitude des mouvements céphaliques et le marqueur.

Le relevé présenté figure 1.17 met en évidence le bon contrôle qu'a l'opérateur de l'appareil à commander. En effet, si l'on compare aux relevés du "MUREX" (figure 1.3 et 1.5) il y a beaucoup moins de tremblements et aussi moins d'écart dans la tâche.

Les signaux paraissent donc facilement utilisables pour la commande d'un engin (peu de tremblements, apprentissage réduit et retours proprioceptifs).

Néanmoins le harnachement nécessaire (casque, sangle), afin d'éviter le glissement de la tête, constitue un inconvénient certain.

Ce type de capteur potentiométrique a été utilisé par de nombreux auteurs (8-9-10)

#### I. 2. 4.b. Dispositif opto-électrique

Ce dispositif, étudié par Chouet et Young (11) permet la mesure de trois composantes du mouvement céphalique

- rotation droite gauche
- mouvement haut bas
- mouvement de latéro-flexion

L'équipement utilisé comprend deux diodes photo-émisives et huit éléments photo-récepteurs.

Les diodes photo-émisives sont placées sur un casque intérieur solidaire de la tête du sujet, les éléments photo-récepteurs étant situés sur un casque extérieur reposant sur les épaules

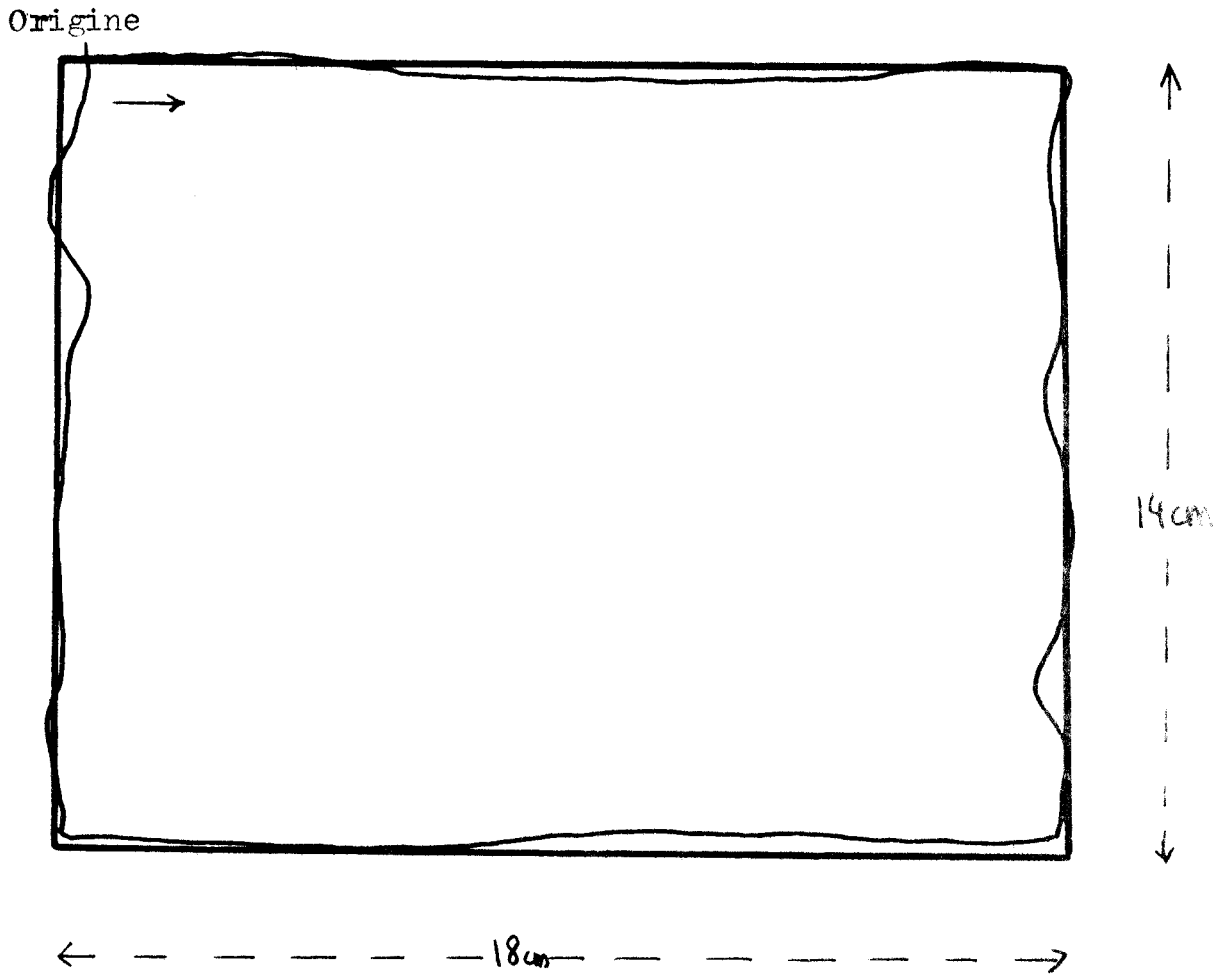


FIGURE 1.17 : CONTOUR SUIVI A L'AIDE DES MOUVEMENTS DE TETE  
EN UTILISANT UN CAPTEUR POTENTIOMETRIQUE  
(MODELE SIMPLIFIE DU MUREX)

du sujet (Figure 1.18).

Le principal avantage de cette méthode est de permettre des mouvements libres de la tête à l'intérieur du casque, mais ses inconvénients sont multiples :

- lourdeur et importante visibilité de l'appareillage
- couplage important entre les trois voies nécessitant l'utilisation d'un mini-calculateur en ligne.

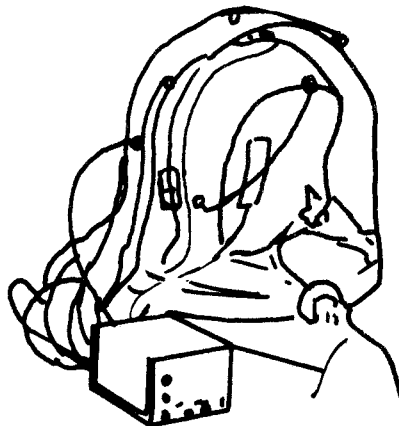


Fig 1.18 : Dispositif opto-électronique de Chouet et Young.

#### I. 2. 4.c. Le clinomètre

Le principe du clinomètre (12) utilise un certain nombre de contacts, disposés régulièrement le long d'un conduit demi-circulaire.

Une bille de mercure mobile ferme, selon sa position dans ce conduit un des contacts et permet l'allumage de la lampe correspondante.

Ce dispositif permet donc un codage digital de l'inclinaison de la tête ; il peut être adapté sur des branches de lunettes

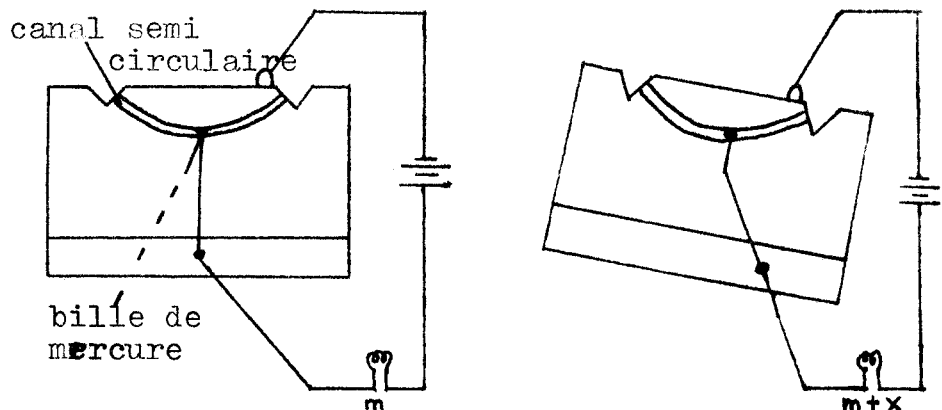


fig 1.19: principe du clinometre

Ce capteur présente les inconvénients suivants :

- très mauvaises performances en dynamique (oscillation de la bille)
- le principe utilisé ne peut pas permettre la mesure de la composante de rotation droite-gauche.

### I. 2. 5 - Dispositif à jauge de contrainte

#### I. 2. 5.a. Présentation du dispositif

La jauge de contrainte est collée sur une tige en fibre de verre reliée à la tête. Les mouvements céphaliques en actionnant la tige permettent donc d'agir sur la jauge et d'obtenir ainsi un signal de réponse.

Dans une première version, les tiges correspondent aux deux mouvements haut-bas et droite-gauche, et peuvent coulisser dans un anneau fixé dans une couronne solidaire de la tête par l'intermédiaire d'une sangle et d'une montonnière (Figure 1.20)

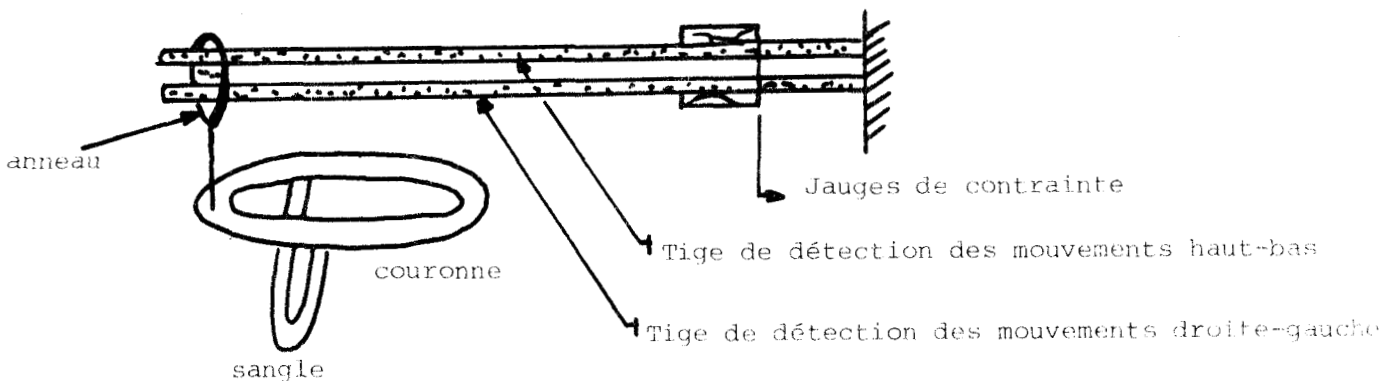


Figure **1.20**

Capteurs des mouvements céphaliques avec jauges de contrainte.  
( dispositif n°1 )

### I. 2. 5.b. Expérience

La tâche de l'opérateur consiste à suivre, à l'aide des mouvements de la tête et au moyen du marqueur d'une table traçante située à 80 cm de la tête, un contour rectangulaire imposé. Aucun retour visuel n'est utilisé (boucle ouverte) et le sujet n'a aucune contrainte de rapidité de tâche. Les mouvements céphaliques sont corrélés aux déplacements du marqueur.

### I. 2. 5.c. Relevés expérimentaux

L'enregistrement, figure 1.21 met en évidence le peu de tremblement du tracé et l'écart faible par rapport au contour imposé, ce qui montre l'avantage de ce dispositif sur le dispositif MUREX au point de vue commande.

Il faut noter sur le tracé, la présence d'un seuil dans les mouvements haut-bas. Ceci est dû à la position de la tige dans l'anneau (la tige n'est pas fléchie par l'anneau quand le sujet regarde devant lui). Il est d'ailleurs possible de supprimer ce défaut facilement par une soudure tige-anneau, par exemple.

La commande d'un engin, à partir des mouvements céphaliques et d'un dispositif utilisant des jauges de contrainte, paraît donc une voie intéressante de par la nature des signaux obtenus ainsi que par l'apprentissage réduit de l'opérateur.

Toutefois le harnachement nécessaire à ce premier dispositif étant très important, il est apparu nécessaire d'étudier d'autres possibilités.

### I. 2. 5.d. Autres axes de recherche envisagés

La méthode précédente (jauge de contrainte sur tige flexible) a le gros désavantage de nécessiter un harnachement important. C'est la raison pour laquelle nous avons envisagé d'autres méthodes moins contraignantes pour le sujet.

#### - utilisation d'une empreinte dentaire

En appuyant avec la tête sur un contact situé



derrière lui, le sujet commande un dispositif lui amenant à portée de la bouche une empreinte dentaire fixée à une extrémité de la tige. En prenant cette empreinte dans la bouche, il a ainsi la possibilité d'actionner la tige souple et donc les jauges de contrainte. Un autre contact permet l'éloignement de l'empreinte.

Dans cette version, le sujet est dégagé de tout harnachement, quand il ne désire pas commander son engin.

Ce dispositif à empreinte dentaire a été utilisé par Smith, Durgo, Ramana (13)

- Jauges de contrainte placées derrière la tête

Les mouvements droite-gauche sont détectés à l'aide de deux lames perpendiculaires à un appui-tête et enserrant la partie postérieure de la tête. Ces lames sont munies de jauges montées en différentiel (Figure 1.22).

Pour les mouvements haut-bas une troisième lame est fixée à l'appui tête, son autre extrémité restant en contact avec la partie supérieure de la tête (Figure 1.22).

Un contact situé sur l'appui-tête peut permettre l'arrêt ou la mise en service de l'appareil.

Tous les avantages dûs aux jauges sont conservés tout en réduisant le harnachement nécessaire.

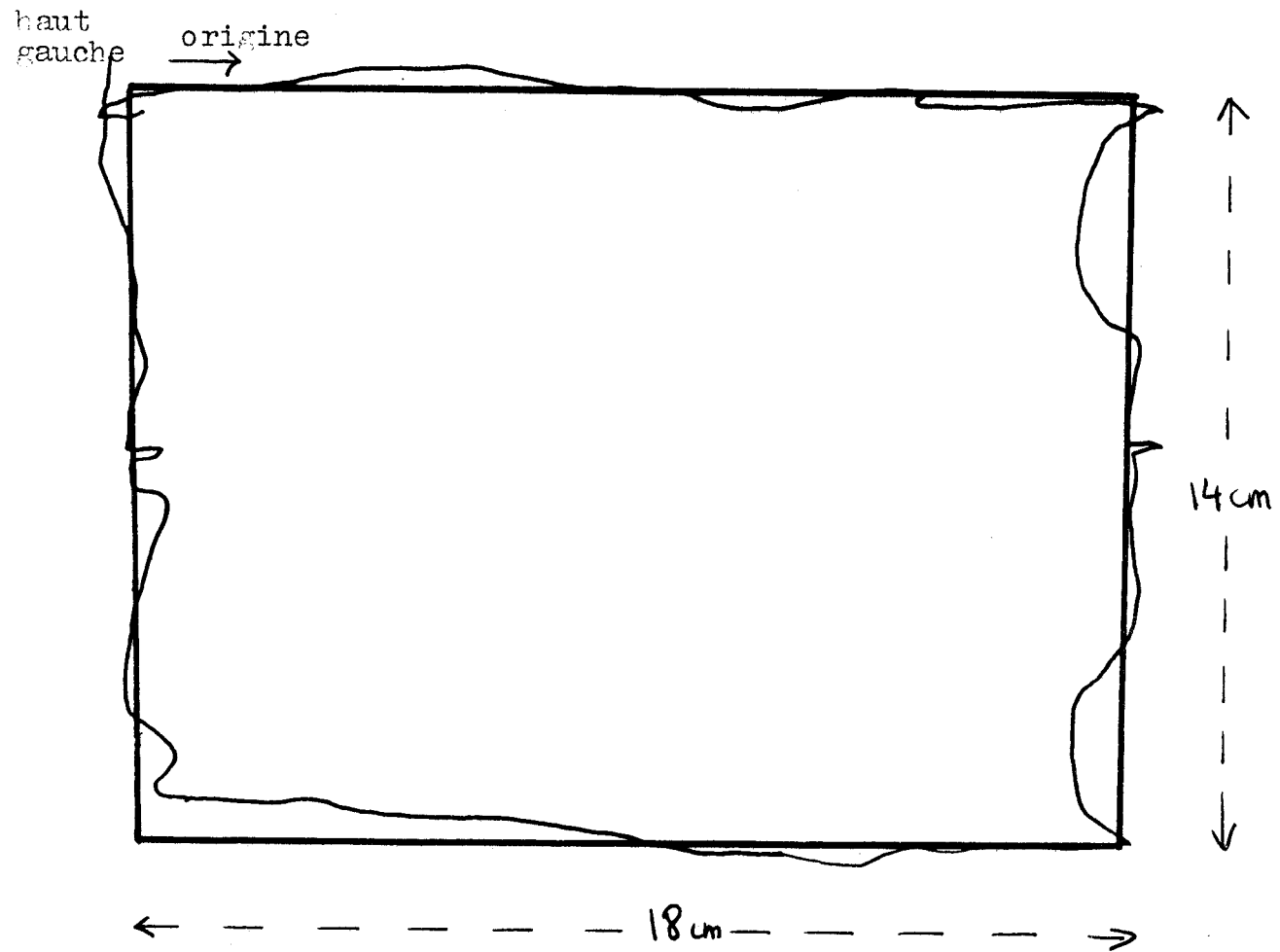


fig 1.21: contour suivi a l'aide des mouvements de tete en utilisant un capteur a jauges de contrainte

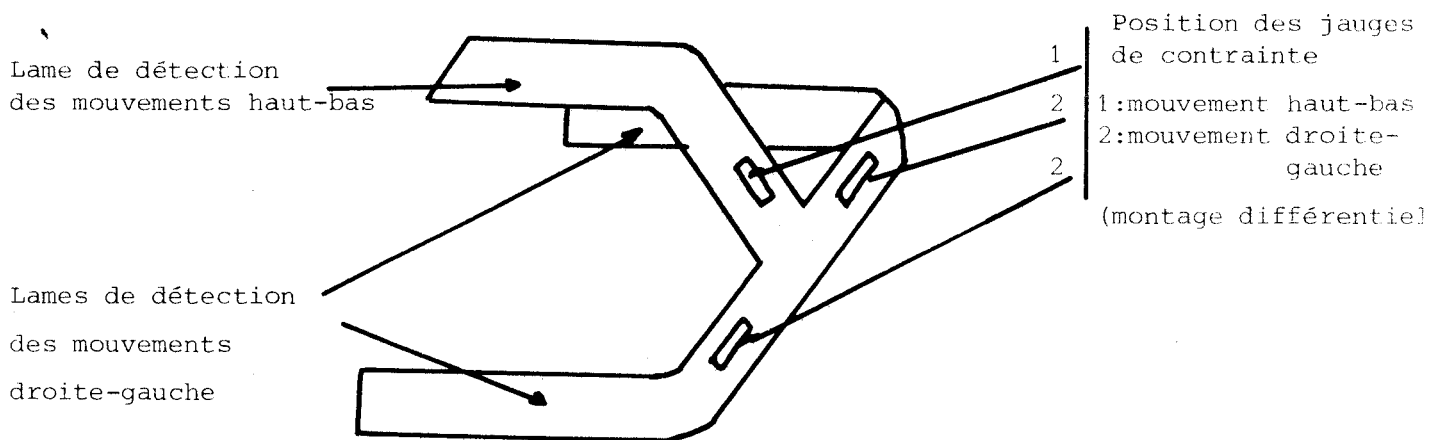


Figure 1.22

Capteur des mouvements céphaliques à jauges de contrainte  
(dispositif n° 2)



### I. 3 : DISPOSITIF RETENU ET CONCLUSION

L'étude qui vient d'être brièvement résumée sur les diverses options de capteurs a permis de retenir le principe utilisant les jauges de contraintes.

Bien qu'il nécessite une liaison matérielle entre la tête et l'appareillage, l'option "appui-tête" rend cette liaison peu contraignante.

De plus ce choix permet de satisfaire aux exigences demandées au I. 1. 2. :

- peu de visibilité de l'extérieur
- apprentissage facile
- transposition d'espace totale
- faible harnachement
- peu d'encombrement
- retours d'effort dû à la flexion des lames
- légèreté.

En outre l'enregistrement, présenté fig.1.21 met en évidence, dans le pilotage d'un engin, la stabilité de la commande effectuée à l'aide d'un tel dispositif.

Néanmoins, à partir de ce principe, il est maintenant nécessaire de réaliser un prototype plus élaboré comportant des réglages permettant l'adaptation de ce capteur à n'importe quel type de morphologie crânienne.

De plus, il convient dès à présent d'étudier la mise en forme et l'amplification des signaux délivrés par les jauges (jusqu'à présent nous nous servions des amplificateurs de la table traçante).

Ces deux derniers points seront entre autres abordés au cours du chapitre suivant.

C H A P I T R E I I

ETUDE DU CAPTEUR A JAUGES DE CONTRAINTE

ET DE SES CARACTERISTIQUES

PROTOCOLE EXPERIMENTAL UTILISE

Dans cette partie, nous nous proposons de définir les caractéristiques statiques du capteur employé puis d'étalonner ce dernier.

Il est ensuite envisagé plusieurs dispositifs expérimentaux permettant de connaître les caractéristiques de l'ensemble tête capteur lors d'une tâche de commande d'engin.

Nous proposons enfin un protocole expérimental définissant une série de tests permettant de chiffrer rigoureusement les performances du capteur et donc ses possibilités en commande. Ces tests seront traités sur ordinateur par l'intermédiaire d'une console de visualisation.

## II. 1 : NECESSITE ET ELABORATION D'UN CAPTEUR REGLABLE

Le capteur à jauges de contrainte étudié au I. 2. 5. a permis de mettre en évidence les avantages de ce principe (nature des signaux obtenus, apprentissage réduit,...).

Cependant la forme figée du capteur en "appui-tête" présenté fig. 1.22 ne permet pas d'obtenir un optimum de confort pour chaque sujet. Il faut noter que cette notion de confort est étroitement liée à la qualité et aux performances réussies lors d'une tâche de commande (

Le sujet ne devant pas ressentir le capteur comme une gêne, un nouveau prototype en forme d'appui tête a été réalisé (figure 2.1).

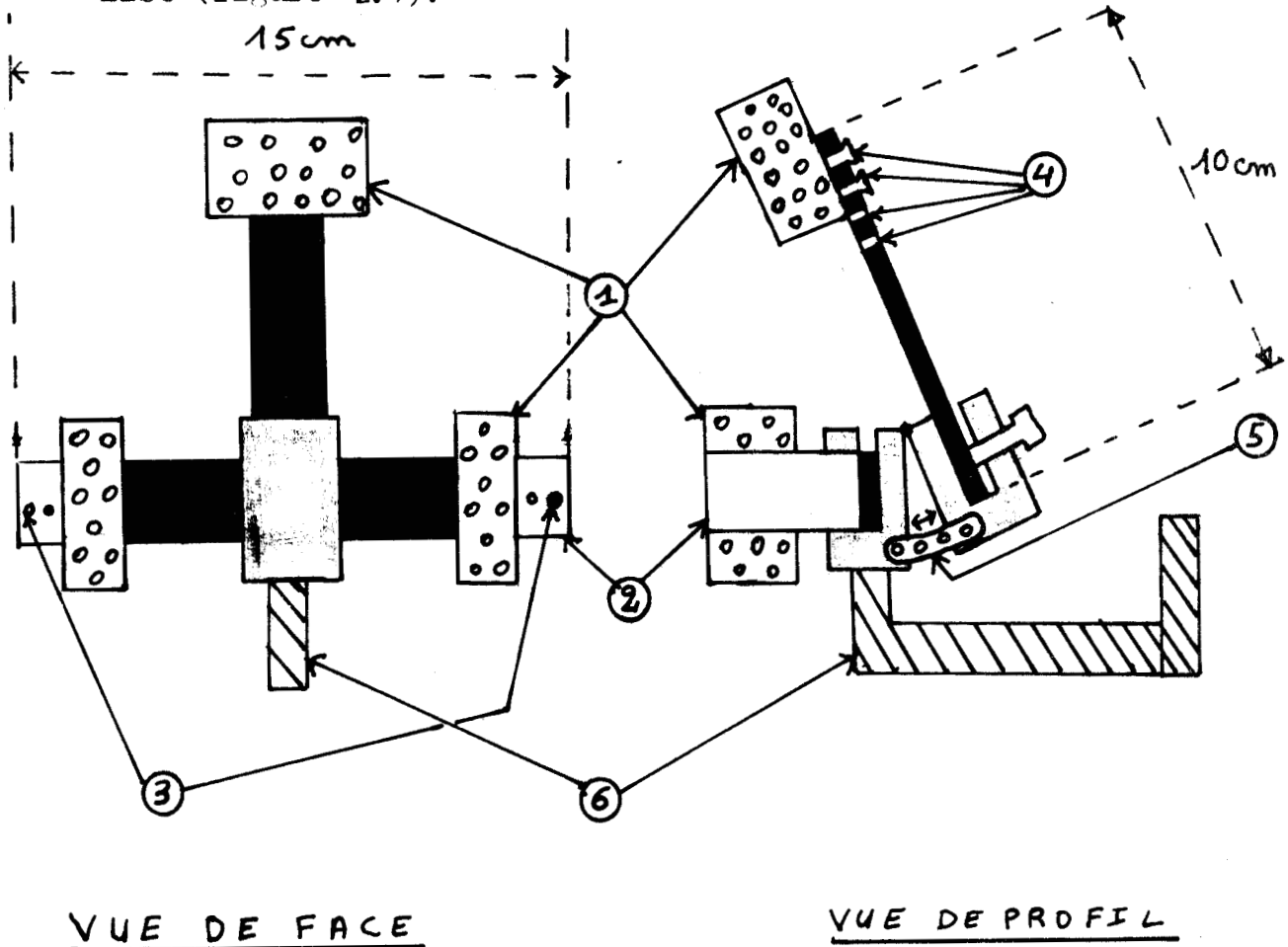


Fig. 2.1 Schéma du capteur à jauge de contrainte

- (1) : Coussinets de mousse
- (2) : Lame rigide reliant coussinet et lame flexible
- (3) : Réglages de l'écartement des coussinets ( droite gauche )
- (4) : Réglages de la position du coussinet ( haut bas )
- (5) : Arceau de réglage de la pré-contrainte
- (6) : Barre rigide de fixation du capteur à un bâti.

Rappelons que la flexion des deux lames permet de détecter divers mouvements céphaliques :

- la lame horizontale est sensible aux mouvements de rotation droite gauche et de latéro-flexion vers les épaules
- la lame verticale capte les mouvements de rotation haut-bas et avant-arrière de la tête.

Les plaques de mousse permettent, outre un confort certain, de mieux répartir les efforts sur les lames, et leur position réglable le long des lames présente l'avantage de pouvoir adapter au mieux l'appareil aux diverses morphologies crâniennes(14).

La pré-contrainte de la lame haut bas est réglable par l'intermédiaire de l'arceau visible sur la figure 2.1 (vue de profil).

Différentes études ont été menées afin de déterminer le choix de la matière constituant les lames flexibles.

Ces lames ne doivent être en effet ni trop souples ni trop rigides (sensation du retour d'effort par le sujet). Elles doivent ne présenter que peu de phénomène d'hystérésis.

Nous avons dégagé de cette pré étude deux constituants principaux.

\* plastique

\* epoxy

Une étude plus poussée des caractéristiques "statiques" de ces capteurs est présentée au II.3

Les jauges de contrainte sont collées sur ces lames flexibles, leurs variations de résistance sont transformées, par l'intermédiaire de ponts de mesure en variation de tension qui rendent compte des efforts exercés sur les lames.

## II. 2 - Mise en forme et amplification des signaux : ponts d'extensiométrie

Les signaux délivrés par les jauges de contrainte sont mis en forme et amplifiés par l'intermédiaire d'un pont de mesure.

Il s'agit d'un pont Philipps PR 9872/00 se présentant sous la forme d'une carte enfichable. Il permet d'effectuer des mesures statiques et dynamiques en combinaison avec des jauges de contraintes montées en demi-pont. Un coffret étanche (PR 9870) permet d'isoler le convertisseur des effets extérieurs (poussière, etc...).

### II. 3 - Caractéristiques statiques des capteurs

Une procédure d'étude a été développée afin d'estimer les efforts exercés sur les lames par la tête du sujet : pour cela, des forces sont appliquées, par l'intermédiaire de poids à l'endroit même où s'exercerait l'effort de la tête.

Les courbes, présentées fig 2.2 montrent que :  
 \* la relation entre tension de sortie et force appliquée est quasi-linéaire

\* à force égale, le signal délivré pour les composantes haut-bas est supérieur à celui de la composante droite-gauche (à peu près dans un rapport de 2)

Ce dernier point peut s'expliquer par la position différente des jauges sur les lames.

En effet, pour détecter le mouvement haut-bas, deux jauges sont collées (1 sur chaque face de la lame) ; elles travaillent simultanément et leurs efforts s'ajoutent.

De même les deux jauges de détection des mouvements droite gauche sont placées symétriquement de part et d'autre du milieu de la lame. Un mouvement vers la gauche ne fait donc agir que la jauge gauche.

Après avoir remarqué la linéarité du capteur seul et en avoir révélé ses caractéristiques propres nous allons maintenant aborder l'étude des caractéristiques de l'ensemble tête-capteur.



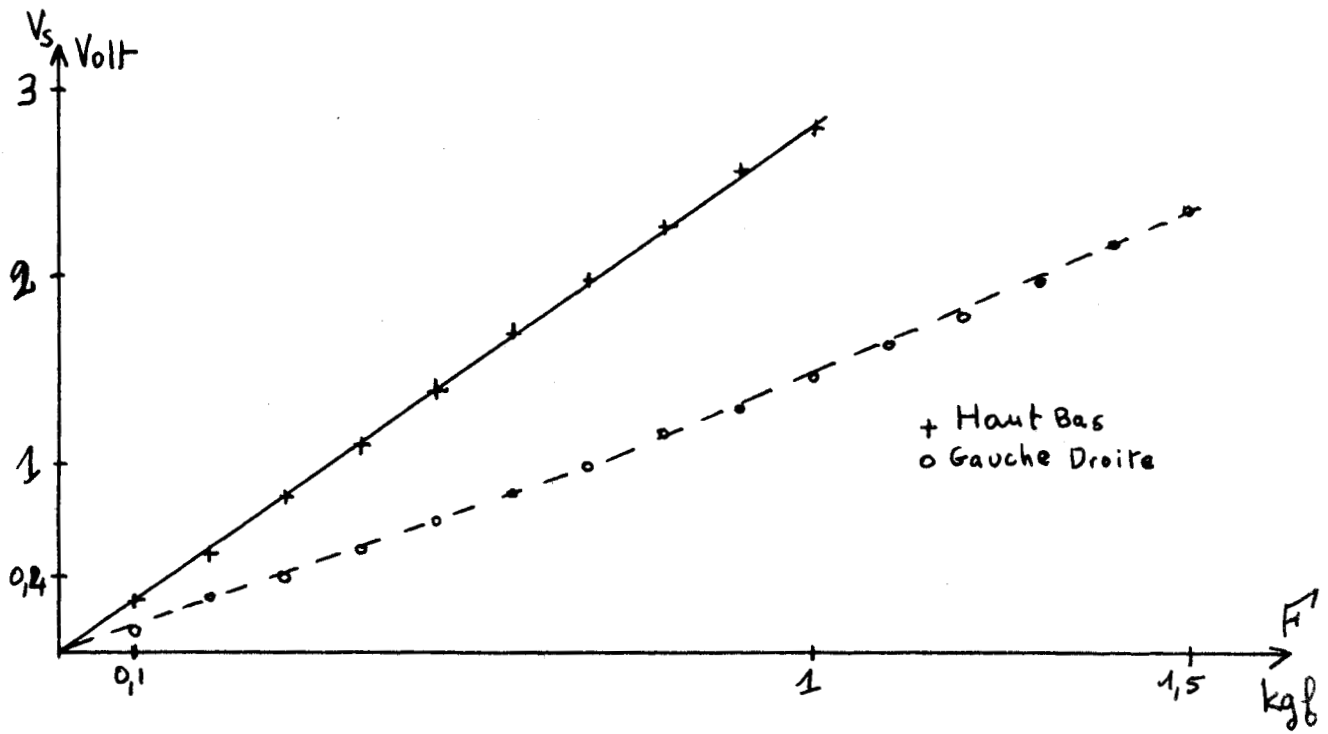


Fig 2.2 : Courbes V/sortie en fonction de la force appliquée sur le capteur

### II. 3 : CARACTERISTIQUES D'ETALONNAGE DE L'ENSEMBLE TETE-CAPTEUR

Les expériences décrites dans ce chapitre utilisent le capteur en temps que détecteur. Contrairement au cas de la commande, le sujet doit, pour pointer un stimulus d'azimut  $\theta$  degrés, effectuer une rotation de sa tête de  $\theta$  degrés.

Tous nous proposons dans ce paragraphe de définir certaines caractéristiques de l'ensemble tête capteur :

- dissymétrie
- hystérésis
- couplages

#### a) Dispositif expérimental

Les stimulus de présentation sont disposés sur un écran ainsi que la figure 2.3 le met en évidence

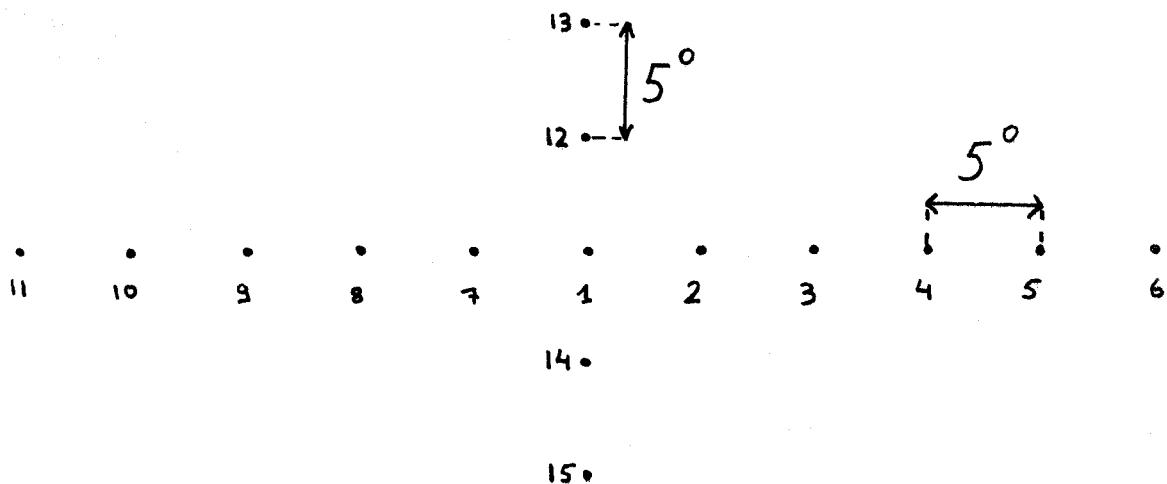


Fig. 2.3 - Damier de présentation des stimulus dans une tâche de détection

Chaque stimulus est séparé du stimulus adjacent par un angle de  $5^\circ$ , vue de l'opérateur. Le champ visuel en détection est donc de  $\pm 25$  degrés en horizontal et de  $\pm 10$  degrés en vertical.

Le sujet est muni d'un viseur mécanique permettant un alignement précis de l'axe visuel, du réticule du viseur et du stimulus. Cette disposition oblige de plus le sujet à effectuer

des mouvements de rotation "purs", ce qui peut ne plus être le cas pour une tâche de commande d'engin. Ce protocole d'expérience est nécessaire afin d'éviter une trop grande dispersion des résultats lors de ces tâches de détection.

L'opérateur est assis, la tête placée dans le capteur (fig. 2.4 ), l'écran de présentation des stimulus disposé à 1 m de la partie postérieure du capteur. Un enregistreur graphique multi-voies permet de prélever les signaux issus des jauges.

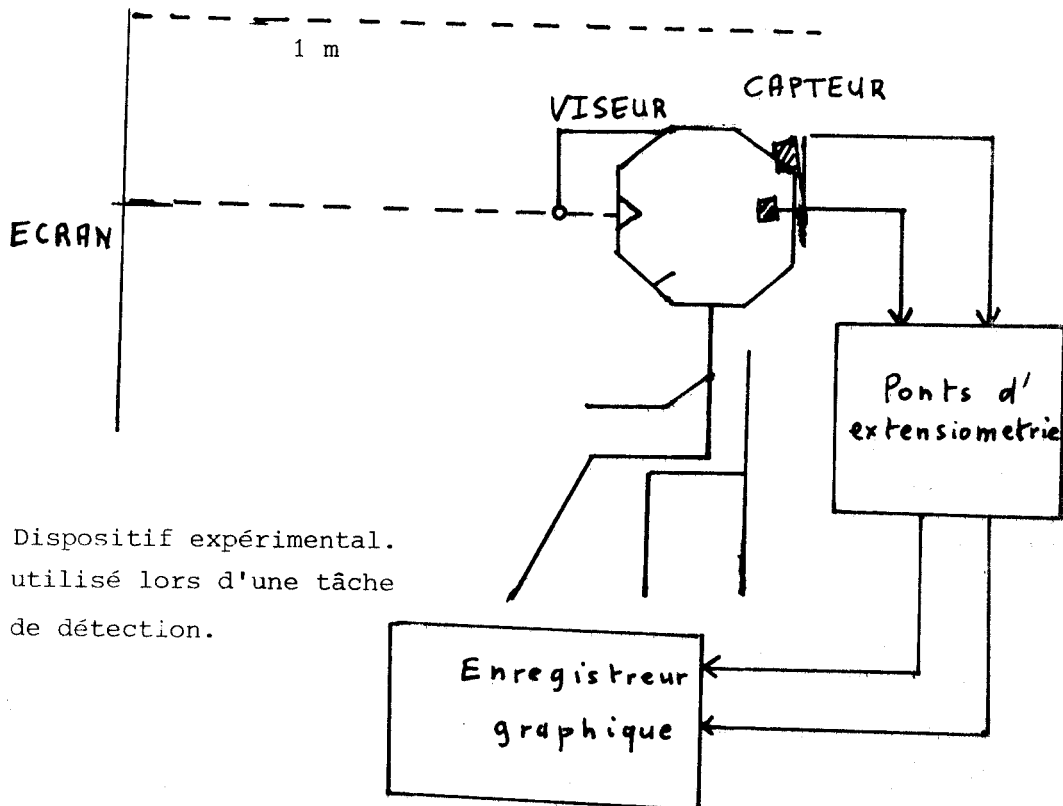


Fig. 2.4 - Dispositif expérimental. utilisé lors d'une tâche de détection.

Le sujet a pour tâche de faire coïncider le viseur avec les points cibles décrits plus haut. L'information à suivre est indiquée fig. 2.3 ; après stabilisation sur le stimulus visé, il doit passer au numéro suivant sans revenir au stimulus central "1". Le sujet effectue ainsi plusieurs aller retour (1-2-3-4-5-6-5-4-3-2-1-7-8 etc...).

Les courbes  $V_s = f(\theta_T)$  avec  $V_s$  tension de sortie du capteur et  $\theta_T$  position de la tête sont présentées fig II. 5. et II. 6.

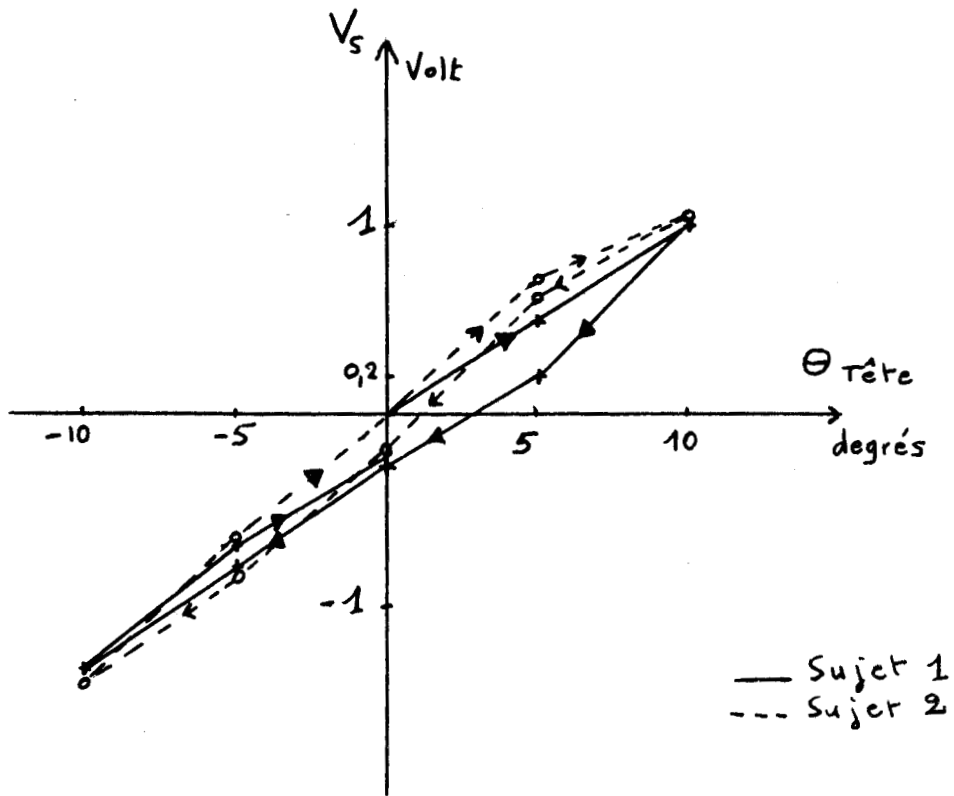


Fig 2.5: Courbes  $V_s = f(\theta_r)$  en détection haut-bas relevées pour deux sujets.

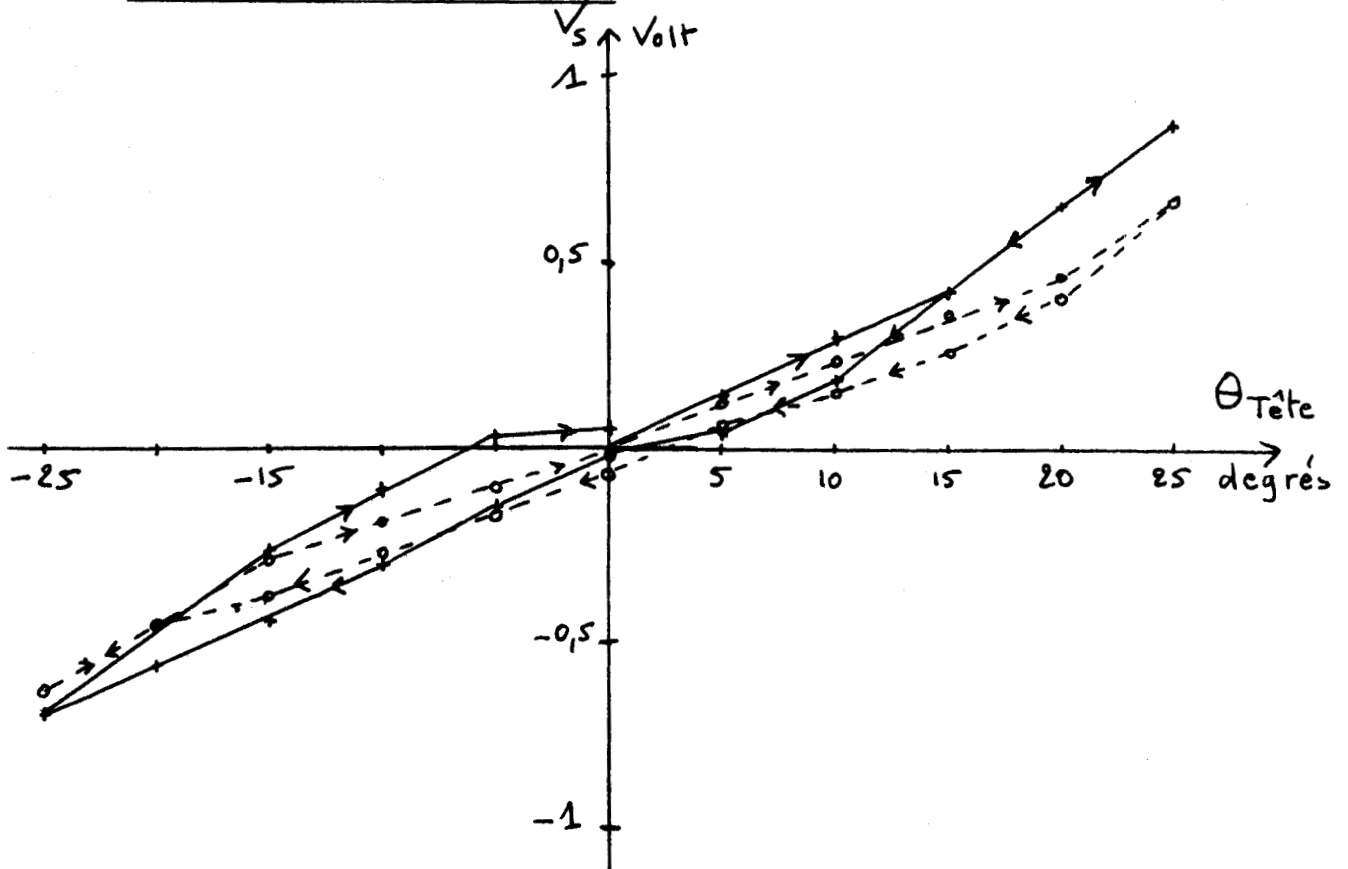


Fig. 2.6 : Courbes  $V_s = f(\theta_r)$  en détection droite-gauche relevées pour deux sujets.

Les expériences ont été réalisées par deux sujets ayant effectué 10 fois chacun les tests de détection. Chaque point des courbes représente donc la moyenne de 10 valeurs relevées.

Afin de pouvoir étudier l'importance des phénomènes d'hystérésis, nous allons maintenant voir si les valeurs relevées pour un même stimulus ( $x_a$  valeur lors d'un mouvement aller,  $x_r$  lors d'un retour) sont significativement différentes

Le nombre  $n$  d'expériences réalisées pour ces pointages ( $n_a = n_r = 10$ ) nous place dans le cas des petits échantillons. La différence  $d = \bar{x}_a - \bar{x}_r$  n'est donc pas normalement distribuée.

On notera dans cette étude :

- $\bar{x}_a$  : moyenne de 10 valeurs  $x_a$  (mouvements aller)
- $\bar{x}_r$  : " " "  $x_r$  (mouvements retour)
- $\sigma_a$  : écarttype de l'effectif  $x_a$
- $\sigma_r$  : " " "  $x_r$
- $d$  : différence des moyennes  $\bar{x}_a - \bar{x}_r$
- $n_a = n_r$  : nombre d'expériences réalisées (ici 10)
- $\sigma_d$  : écart type de l'effectif  $x_a - x_r$

Dans le cas des petits échantillons le degré de significativité d'une différence peut être évalué en utilisant le test du  $t$  de Student (15).

Il faut étudier la valeur du paramètre  $t$  donné par  $t = \frac{d}{\sigma_d}$  dans lequel  $\sigma_d$  est tel que

$$\sigma_d^2 = \frac{n_a \sigma_a^2 + n_r \sigma_r^2}{n_a - 1 + n_r - 1} \cdot \left( \frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_r} \right)$$

c.a.d. dans le cas étudié ( $n_a = n_r = 10$ ) :  $\sigma_d^2 = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_r^2}{9}$

$$\implies t = \frac{3 \cdot (\bar{x}_a - \bar{x}_r)}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_r^2}}$$

Nous avons opté pour une marge de sécurité de 95%. Pour les valeurs de  $t$  inférieures à 2,1 (valeur relevée dans la table de Student), les deux valeurs  $x_a$  et  $x_r$  ne sont donc pas significativement différentes.

C'est ainsi que nous avons pu confondre :

sur la courbe droite gauche : - 25° et + 25 ° pour le sujet 1  
 : - 25 °, + 15°, + 20°, + 25°  
 pour le sujet 2

sur la courbe haut bas : - 10° et + 10° pour le sujet 1  
 : - 10° et + 10° pour le sujet 2

Les courbes relevées, fig II. 5 et II. 6, amènent certaines remarques :

\* Il apparaît un phénomène d'hystérésis dû vraisemblablement aux mouvements de l'opérateur (glissement du crâne sur les coussinets de mousse)

\* la dissymétrie, surtout visible pour le mouvement haut-bas est due à la position du point de contact lame-tête (glissement de la tête sur la mousse lors de l'effort plus important en haut qu'en bas dû à la pré-contrainte).

\* les enregistrements de la fig 2.7 permettent de mettre en évidence et de chiffrer les couplages existants entre les deux voies.

Lors d'un mouvement haut bas il n'apparaît pas de signal sur la voie gauche droite : ceci est dû à la conception même du capteur (symétrie du positionnement des jauges sur la lame, montage différentiel) ; par contre lors de mouvements gauche droite, il existe un signal issu de la voie haut bas ; ce couplage, qui provient de la précontrainte établie sur cette voie, introduit des perturbations ne dépassant pas 3 degrés (en fin d'expérience).

Ces caractéristiques relevées dans une tâche de détection montrent que le capteur est un médiocre appareil de mesure des mouvements céphaliques. Ces performances sont toutefois intéressantes à approfondir, puisqu'elles n'ont plus la même signification dans une tâche de commande.

L'étude précédente permet de connaître la valeur du gain entre tension de sortie délivrée par les ponts d'extensiométrie

et angle de rotation de la tête :  $K = \frac{\text{Tension de sortie}}{\text{Angle tête}}$

Cette valeur qui sera calculée pour chaque sujet est très importante ; elle fixe en effet le gain de la chaîne lors des essais de commande d'engin (en particulier du spot sur console de visualisation cf chap. III).

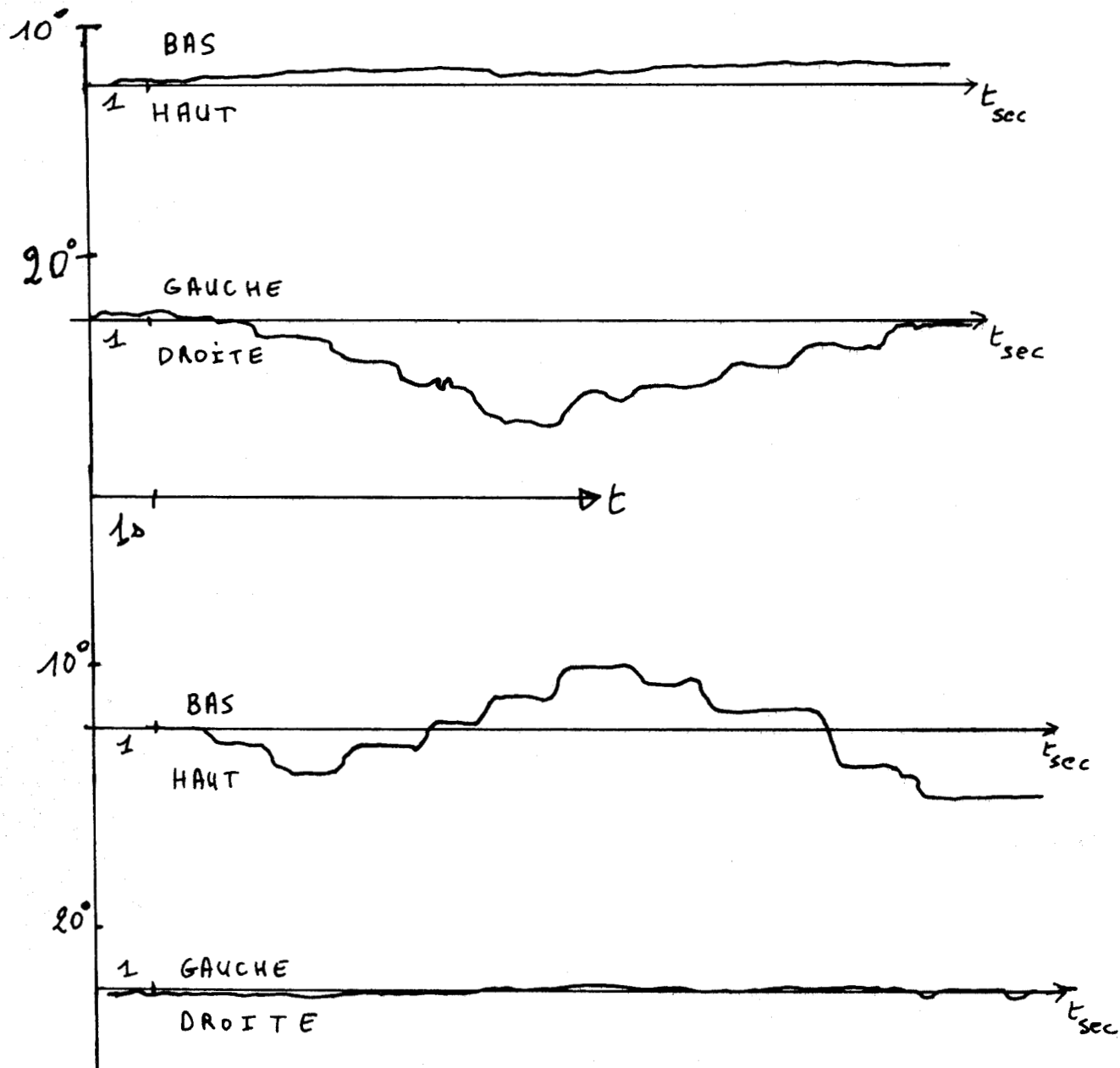


Fig. 2.7 - Enregistrement des couplages entre les voies D G et H B lors d'une tâche de détection.



## II. 4 : ESSAIS DE COMMANDE AVEC TABLE TRACANTE

### II. 4. 1 - Caractéristiques de la table traçante

Lors des expériences décrites ci-après, les filtres passe bas de la table traçante sont toujours connectés.

Les courbes relevées représentent :

- l'affaiblissement en fonction de la fréquence (fig. 2.8)
- la réponse indicielle (fig. 2.9)

Les mouvements de tête se font à très basse fréquence (16), (Max 2 Hz) et dans cette bande de fréquence, les courbes 2.8 et 2.9 montrent que la transmittance de la table traçante peut être assimilée à un premier ordre :

$$H(p) = \frac{1}{1+Tp} \quad \text{avec } T = 0,8 \text{ sec}$$

Les courbes 2.8 et 2.9 sont identiques pour les balayages X et Y du marqueur (prédominance des filtres dans la chaîne d'asservissement).

### II. 4. 2 - Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté fig 2.10 il convient dès à présent de noter que l'opérateur ne dispose plus du retour fourni par le viseur. De plus les signaux issus des ponts de mesure peuvent être facilement traités par un calculateur analogique (élaboration de la commande en "vitesse").

### II. 4. 3 - Commande en position dans un test de pointage

L'opérateur est assis en position de repos et pointe la tête vers la cible centrale, le marqueur de la table traçante (engin à commander) étant au centre de la cible. Avant de commencer la série de pointage l'opérateur a appris à situer la position des divers points entourant la cible (fig. 2.11)

#### \* Expérience 1

La tâche demandée consiste à faire coïncider le marqueur de la table avec le point visé de façon la plus précise possible (aucune consigne n'est donnée concernant la vitesse d'exécution),



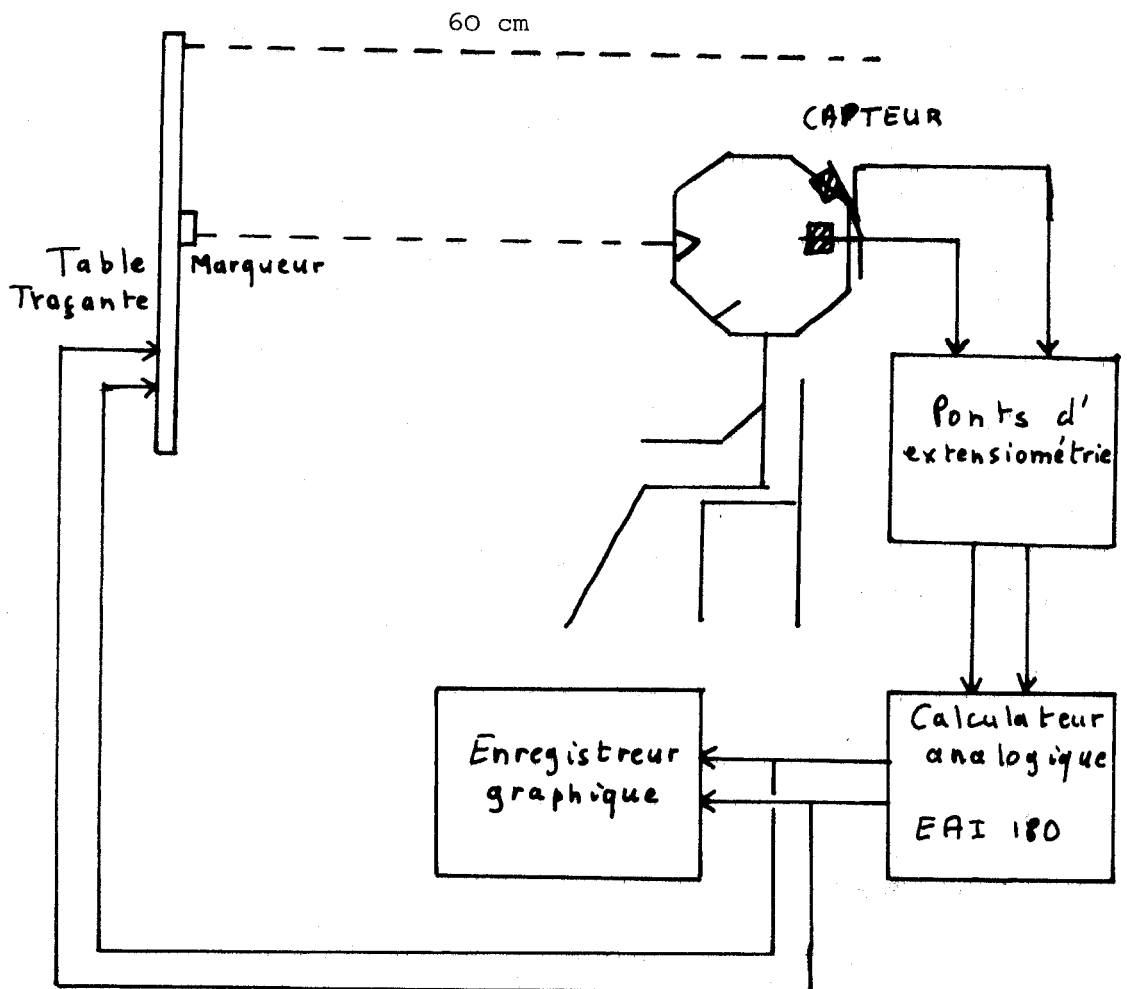
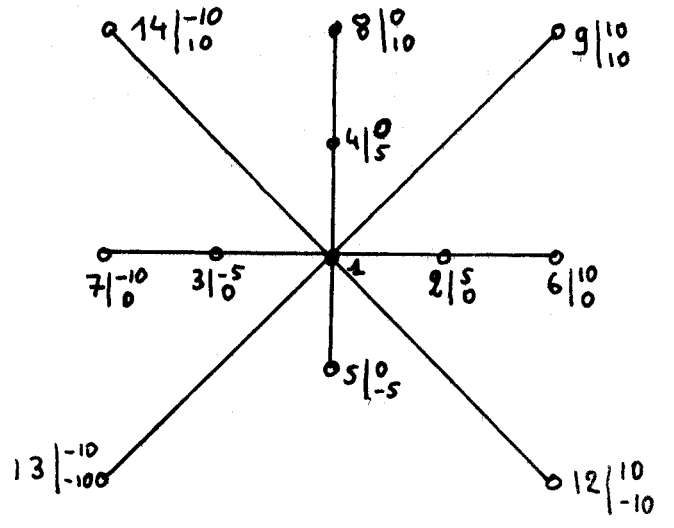
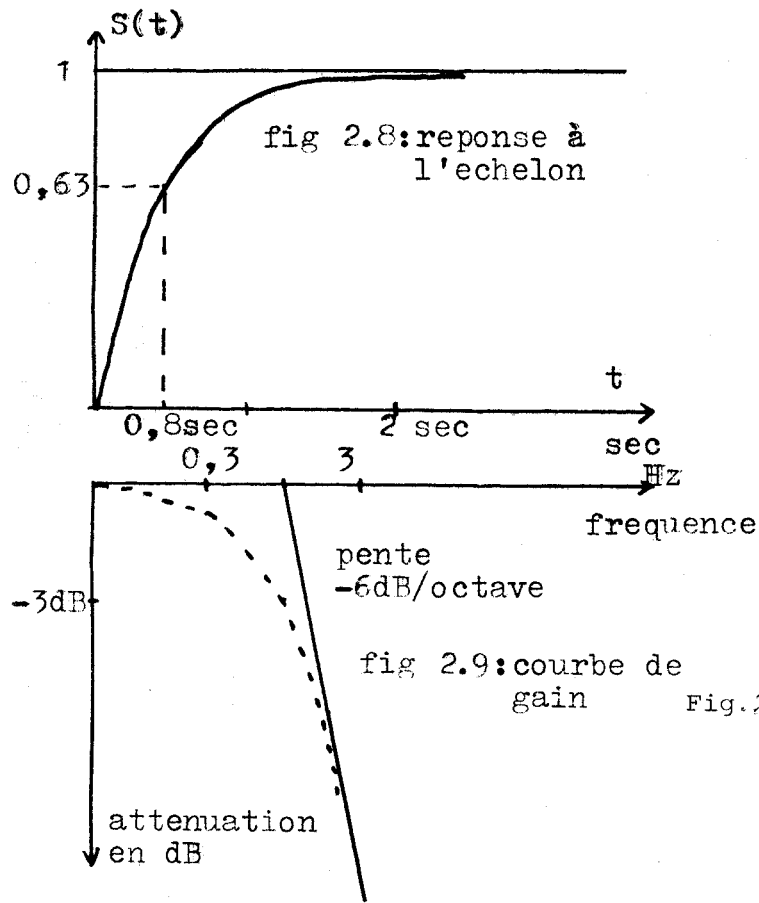


Figure . 2.10 - Dispositif expérimental utilisé lors d'une tâche de commande

puis après stabilisation sur la cible, de revenir au centre en position de repos ; l'expérience comprend 11 pointages successifs. La commande est "en position", le gain entre les mouvements de tête ( $\theta_r$ ) et les mouvements ( $\theta_e$ ) de l'engin (assimilés à des rotations compte tenu de la distance capteur-marqueur) est unitaire.

Les résultats sont donnés sous deux formes : un enregistrement XY des pointages effectués (fig 2.12 ) puis un enregistrement graphique de chacun des deux mouvements (gauche droite et haut bas) en fonction du temps (fig 2.13)

Les tracés montrent que :

- les couplages entre voies apparaissent très faibles, sinon nuls
- la précision atteinte est très bonne (de l'ordre de 30')

#### \* Expérience II

Les excentricités des stimulus présentés dans les expériences 1 étant limitées ( $\pm 10^\circ$ ), une série de tests possédant de grandes excentricités de stimulus a été présentée au sujet (la tâche du sujet est la même que précédemment).

Les résultats fig. 2.14 et 2.15 montrent que

- quels que soient les mouvements effectués la précision est bonne même pour des déplacements de  $30^\circ$
- un changement de pré-contrainte (de la lame haut bas) ne modifie pas les trajectoires des diverses explorations gauche droite.

#### \* Expérience III

Les deux expériences décrites précédemment utilisent une position de repos (ou "Point de fonctionnement") située au centre du plateau de la table traçante.

Nous avons étendu cette étude à des expériences où la position de repos n'est plus située au centre de la table en demandant au sujet d'effectuer deux tâches de pointage :

- tout d'abord des mouvements droite gauche parallèlement à la ligne 8,7,12,3 de la fig. 2.11 avec comme position de repos successivement les points 1, 12, 13 le tracé est présenté fig. 2.16
- enfin des mouvements du même type haut bas avec comme position

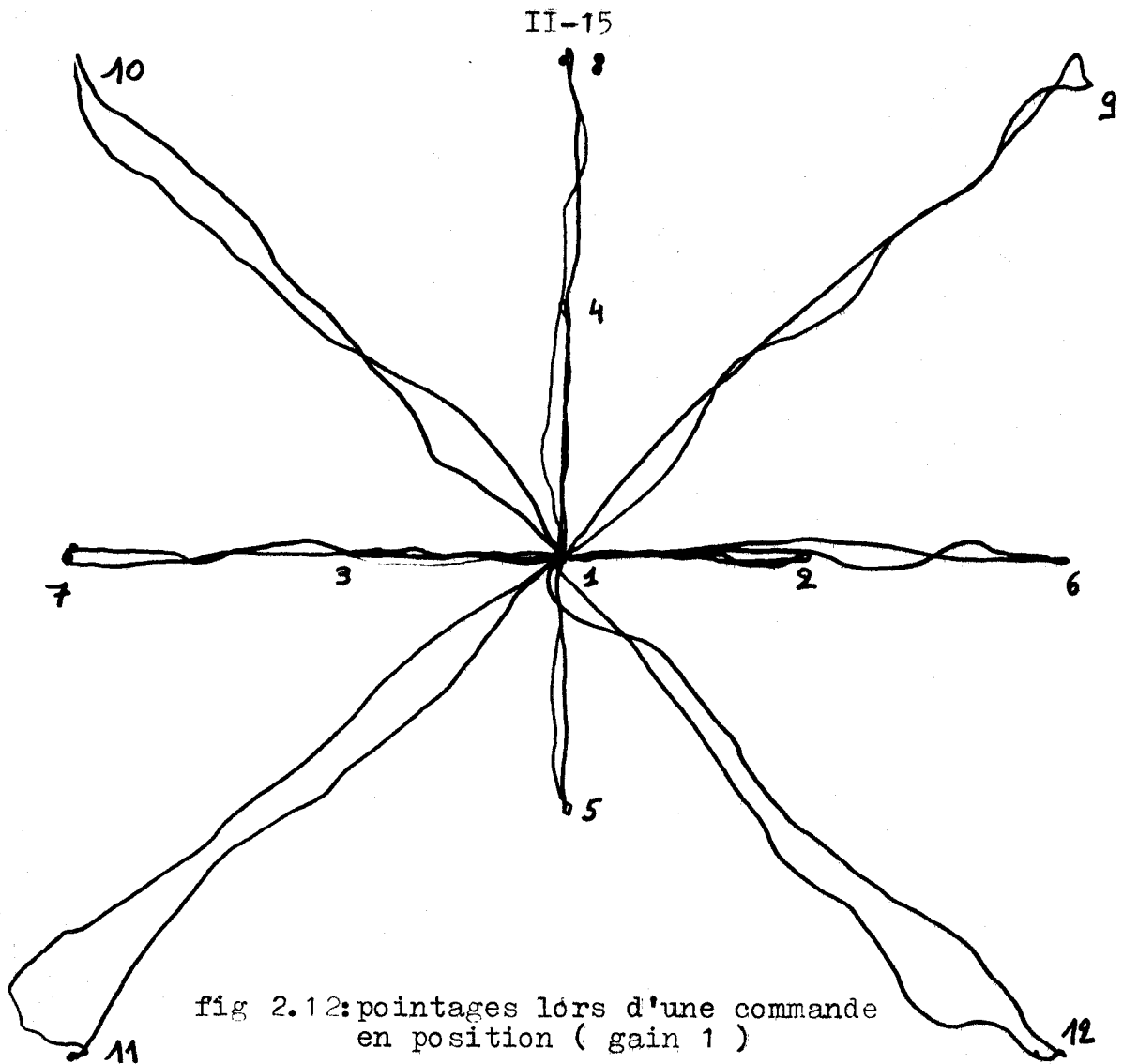


fig 2.12: pointages lors d'une commande en position ( gain 1 )

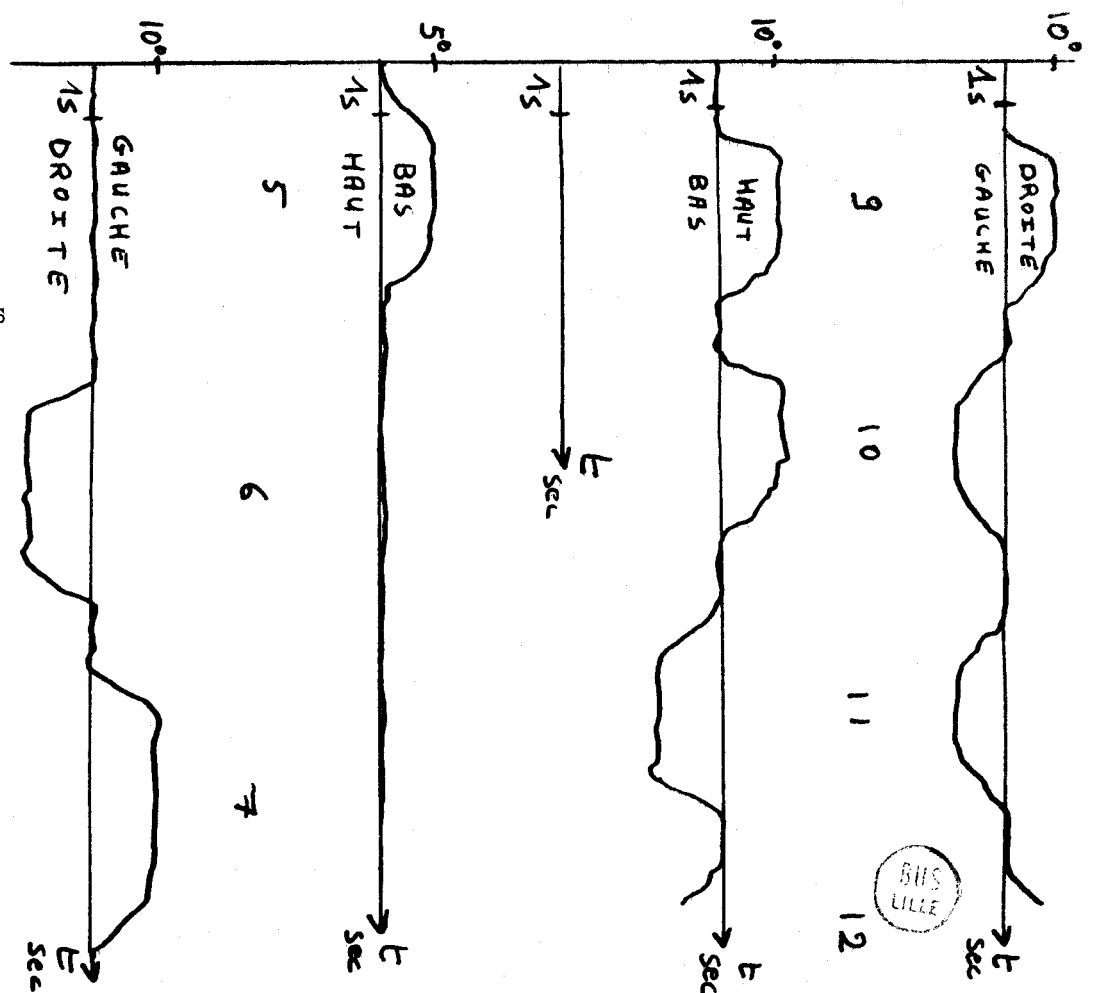


fig 2.13 : enregistrements des pointages lors d'une commande en position

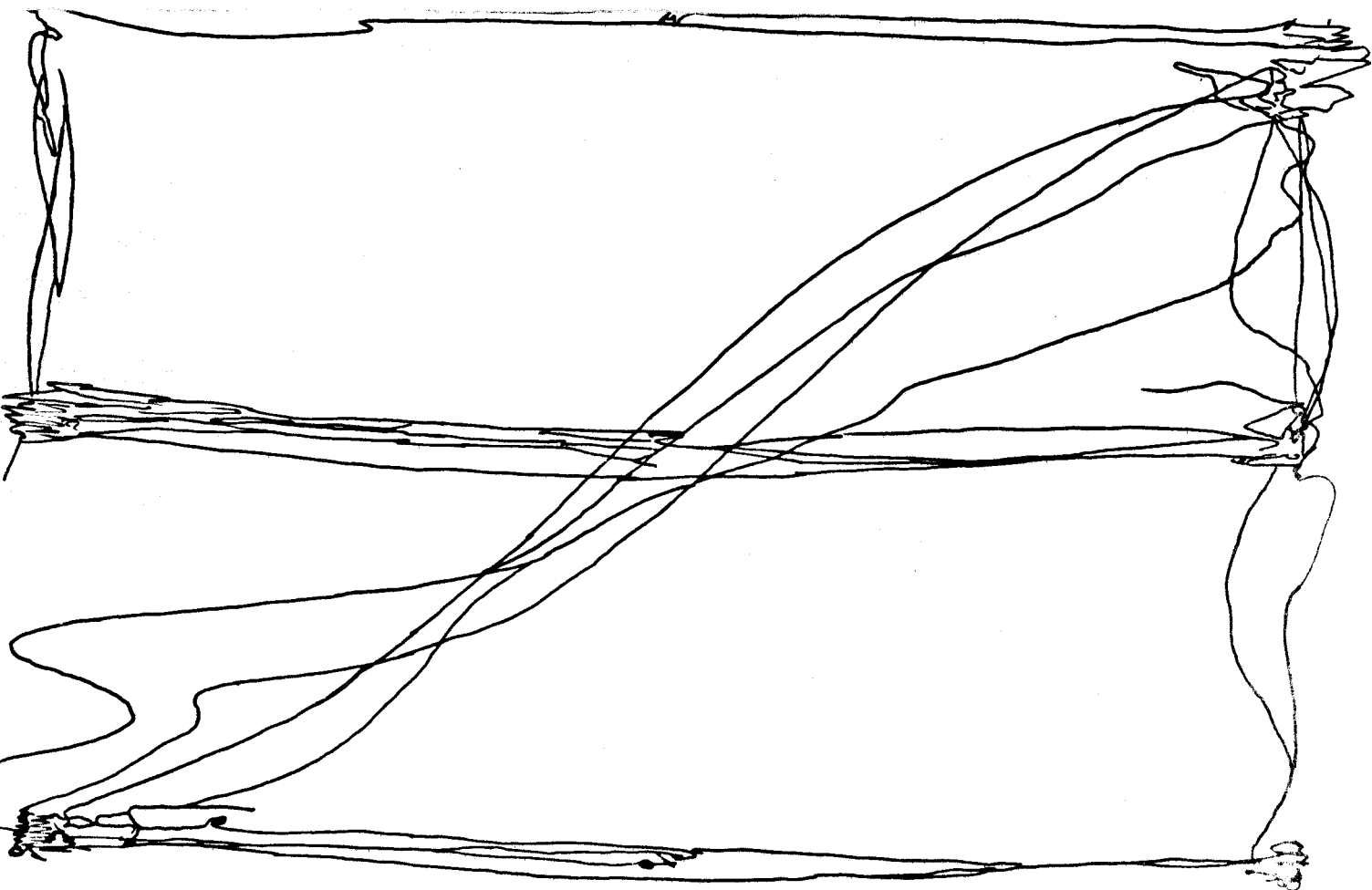


fig 2.14: pointages de stimulus de grandes excentricités (gain 1)

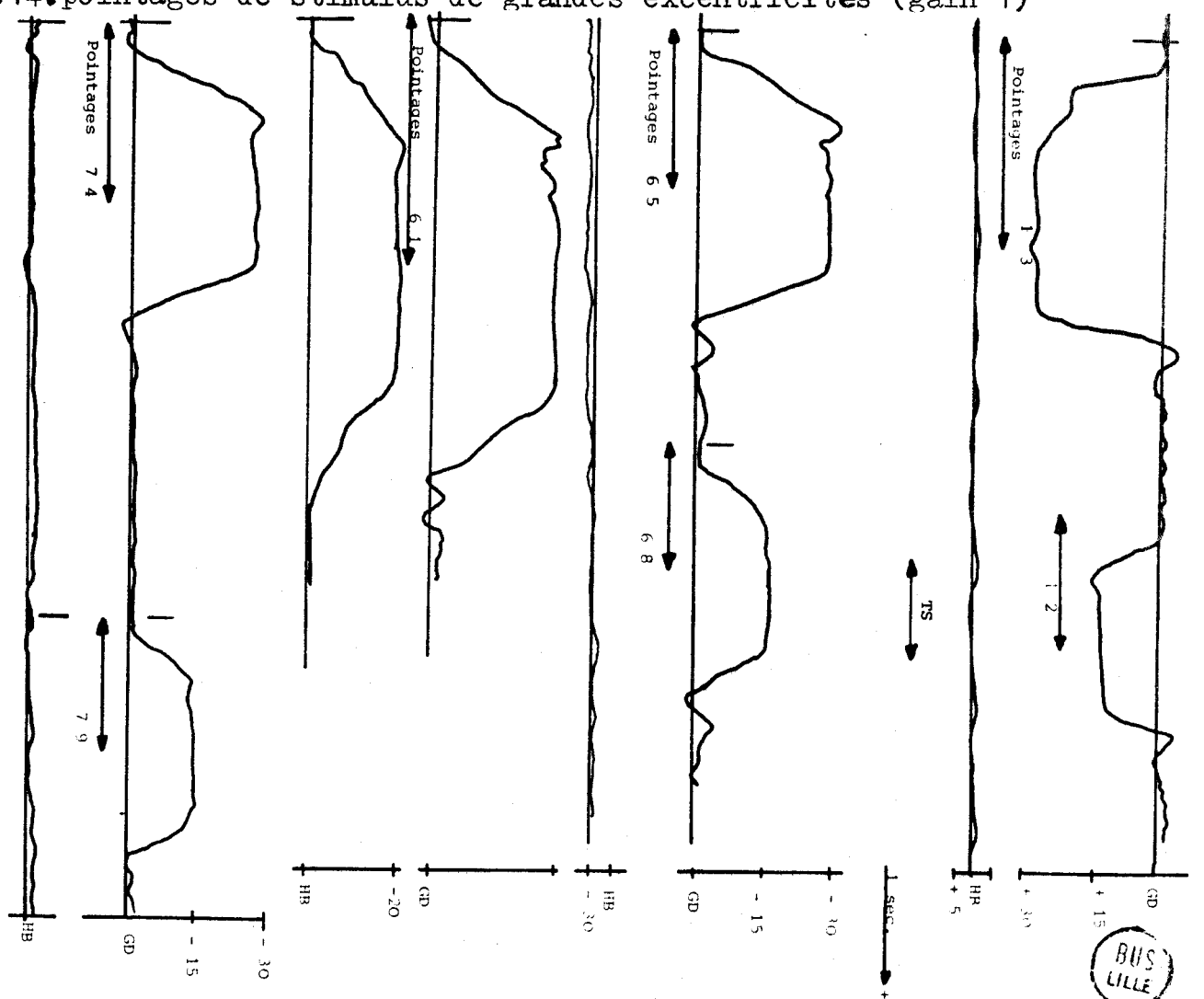


fig 2.15: pointages de stimulus de grandes excentricités  
cf tracé 2.14

de repos les points 1, 2, 3 de la fig. 2.11 le tracé est présenté fig. 2.17.

Ces enregistrements graphiques fonction du temps (fig. 2.16 et 2.17 ) montrent qu'un changement du point de repos ne diminue pas la précision atteinte dans cette tâche de commande. Ils indiquent d'autre part que ce capteur peut être aussi bien utilisé pour effectuer une commande d'engin autour de la position de repos "habituelle" du sujet qu'à la périphérie du champ.

Ces résultats, concernant des tests de pointage d'un engin commandé en position par les mouvements de tête, ne sont que partiels ; ils montrent cependant que le pointage est assez précis (imprécision  $< 1\%$  ). Cette commande, directement proportionnelle aux mouvements de tête effectués (gain unité), semble être bien adaptée à l'opérateur et facile d'emploi (la transposition d'espace effectuée étant complète) ; cependant il peut être intéressant dans certains cas (faibles mouvements de tête dus à une position couchée par exemple) d'envisager une commande en vitesse.

#### II. 4. 4.- Commande en vitesse dans un test de pointage

Le dispositif et le protocole sont identiques à ceux de l'expérience I du II.3.3 mais les signaux issus du capteur sont intégrés et multipliés par un facteur K ajustable par l'expérimentateur de sorte que la relation liant les déplacements céphaliques et les déplacements de l'engin soient de la forme :  $\theta_E = K \int_0^t \theta_T dt$

$\theta_T$  = signaux délivrés par le capteur

$\theta_E$  = signaux de commande de la table

L'enregistrement X Y présenté fig. 2.18 montre que la précision de ces pointages reste bonne (de l'ordre de 30').

L'enregistrement conjugué des mouvements de tête ( $\theta_T$ ) et des signaux de commande ( $\theta_E$ ) fig. 2.19 met en évidence que :

- le sujet effectue des mouvements  $\theta_T$  maxima pratiquement proportionnels à l'excentricité du stimulus (ceci peut provenir du fait que l'opérateur désire voir le stimulus)

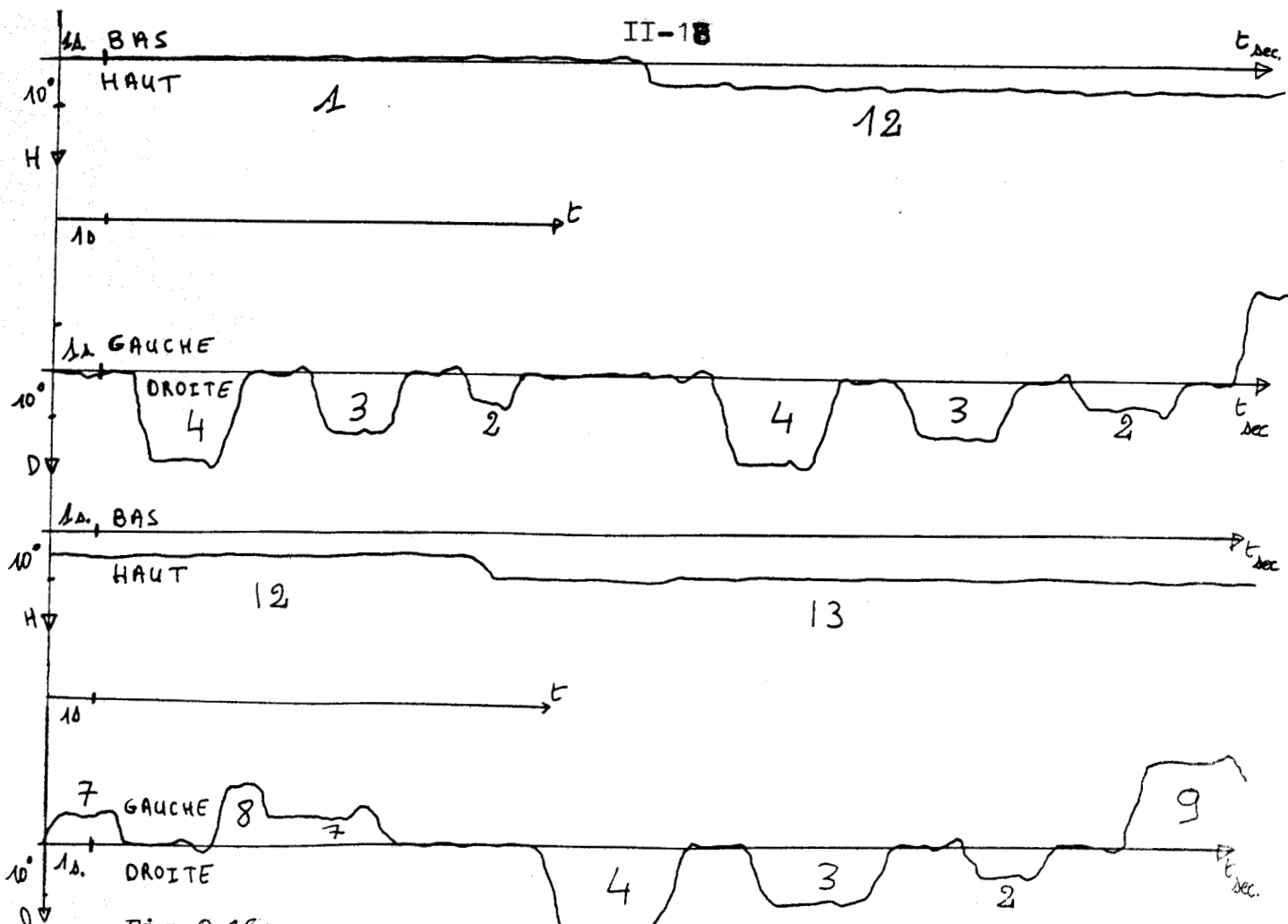


Fig 2.16: enregistrements des pointages droite-gauche lorsque le point de repos varie en haut-bas

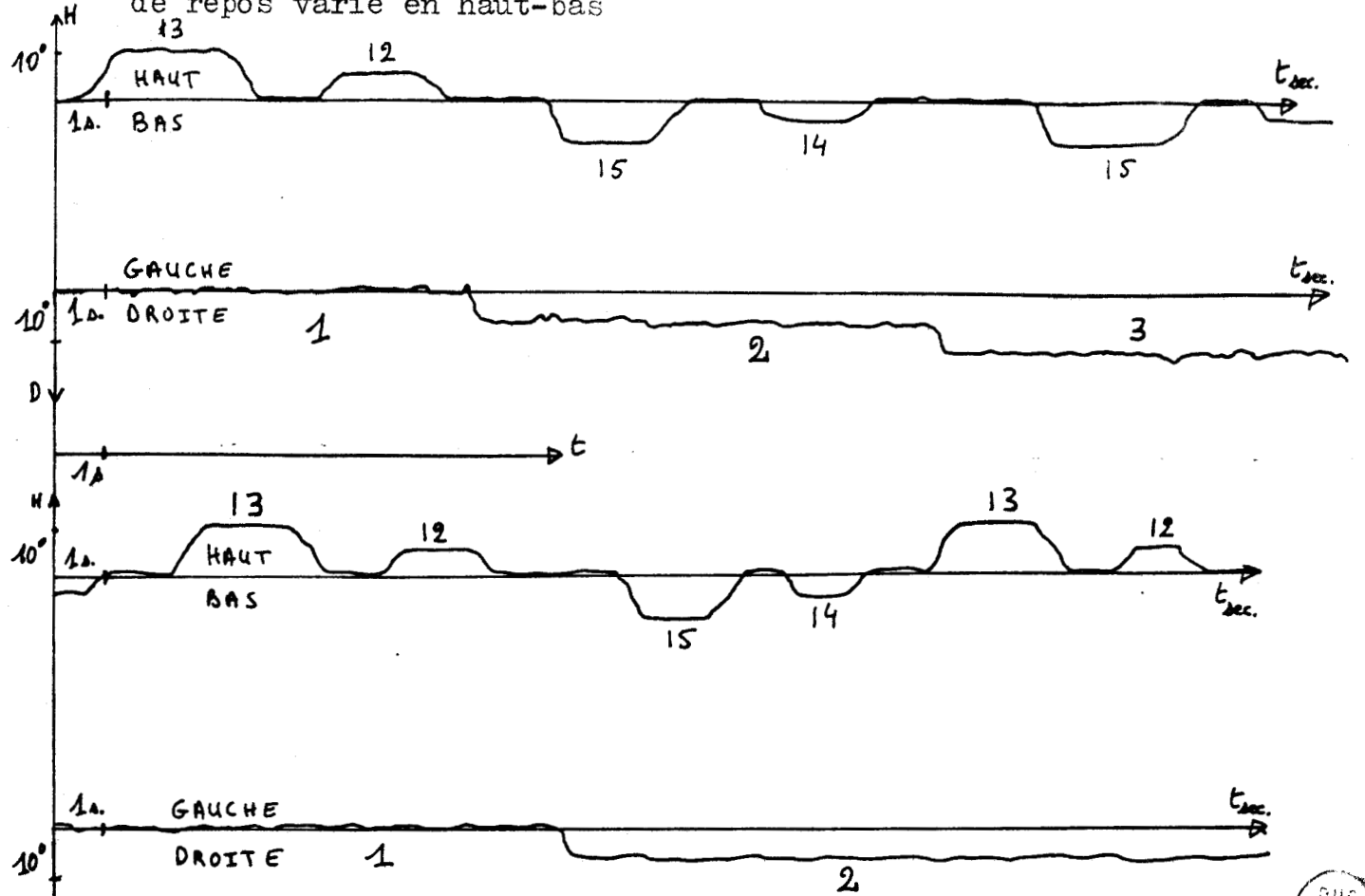


Fig 2.17: enregistrements des pointages haut-bas lorsque le point de repos varie en droite-gauche



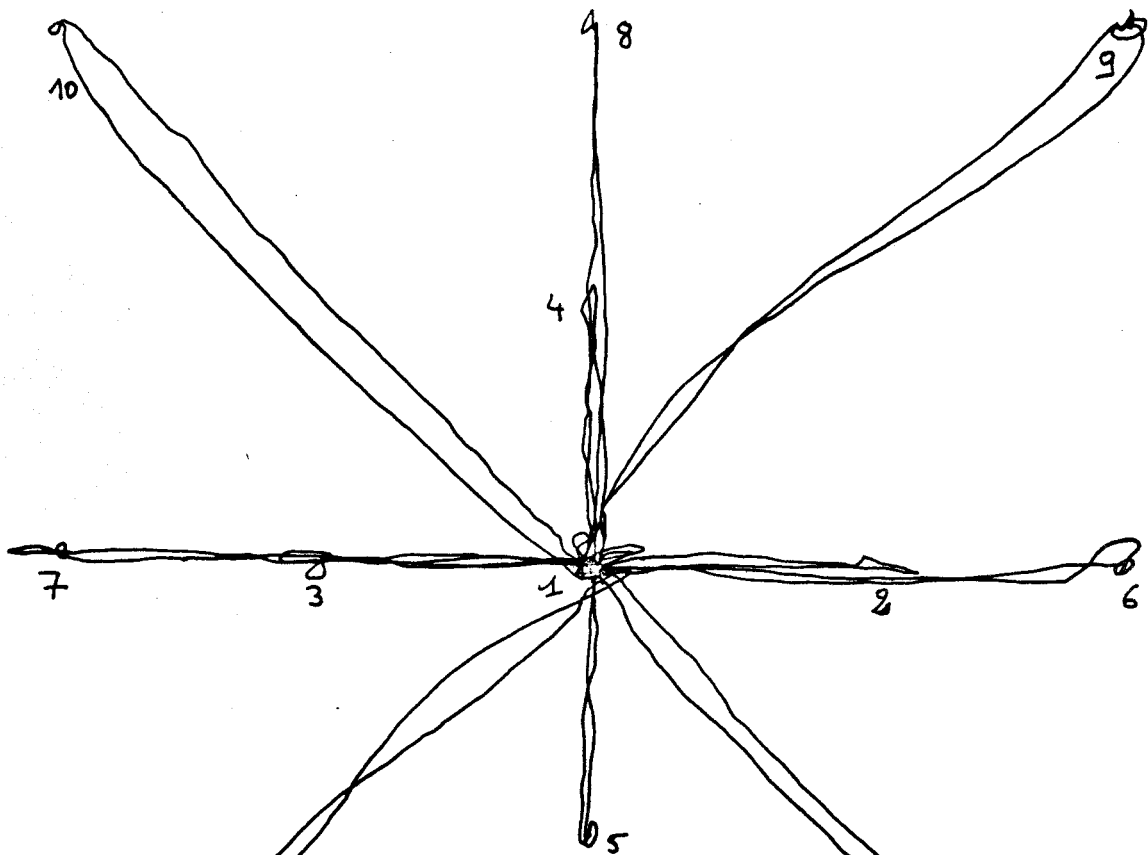


Fig 2.18: pointages effectués lors d'une commande en vitesse

Fig 2.18 : pointages effectués lors d'une commande en vitesse

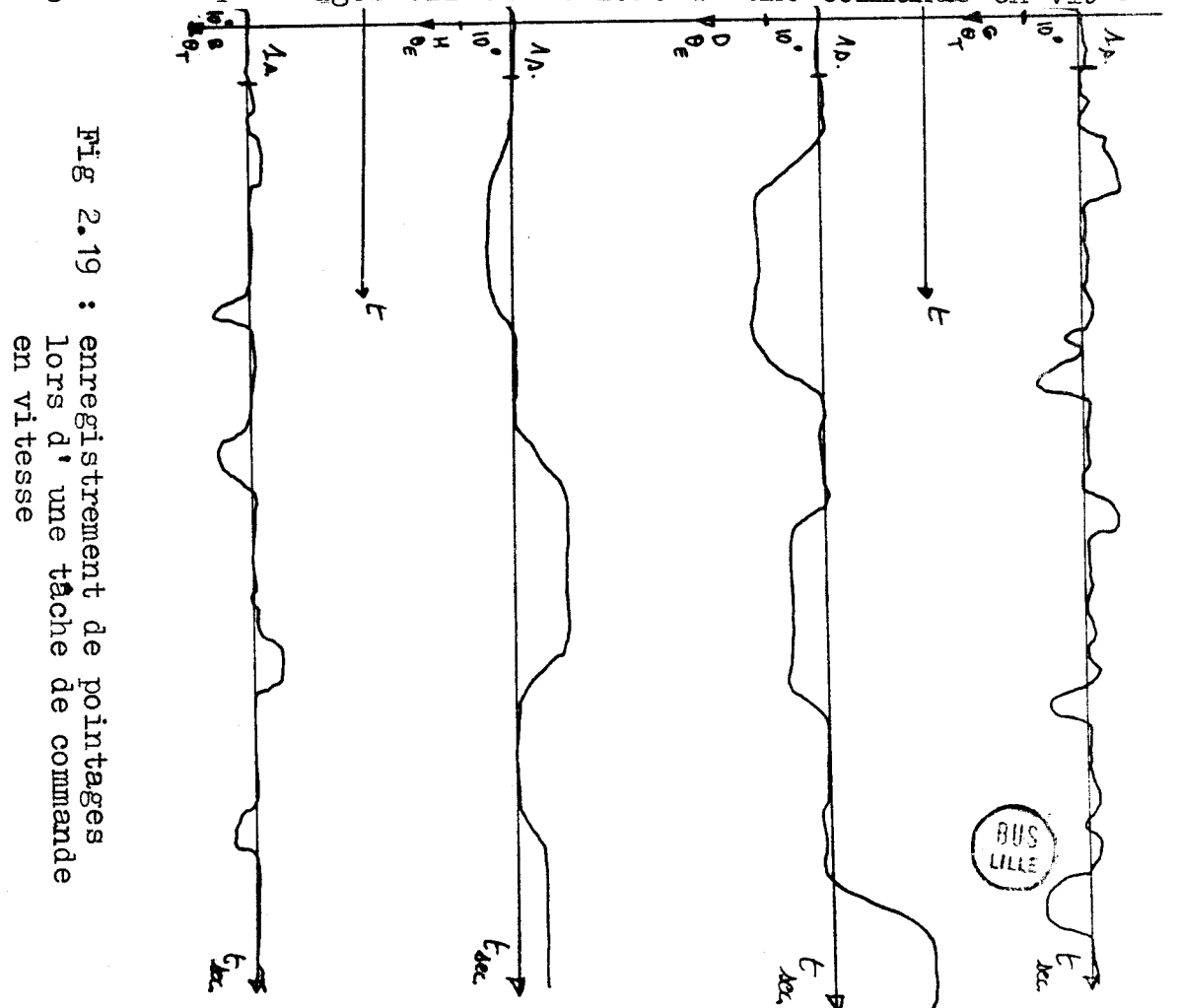


Fig 2.19 : enregistrement de pointages lors d'une tâche de commande en vitesse

- les dépassements apparaissent plus importants pour les faibles excentricités.

Ce dernier point a alors suggéré de diminuer la valeur du gain K.

Les tests effectués avec un gain plus faible ( $K = 0,5$ ) montrent, fig. 2.20, une amélioration sensible des pointages aux faibles excentricités.

Les résultats précédents nous ont amené à envisager une commande en vitesse à gain variable définie au moyen des relations suivantes :

$$\theta_T < 0,5^\circ \quad \theta_E = 0,5 \int_0^t \theta_T dt$$

$$\theta_T \geq 0,5^\circ \quad \theta_E = \int_0^t \theta_T dt$$

Il apparaît alors une amélioration globale des performances (fig. 2.21) :

- aux faibles excentricités : peu de dépassement
- aux fortes excentricités : un choix de réponse possible pour le sujet (faible vitesse - ajustement immédiat ou forte vitesse avec correction).
- la précision atteinte apparaît très bonne et du même ordre de grandeur que dans les expériences de commande en position.



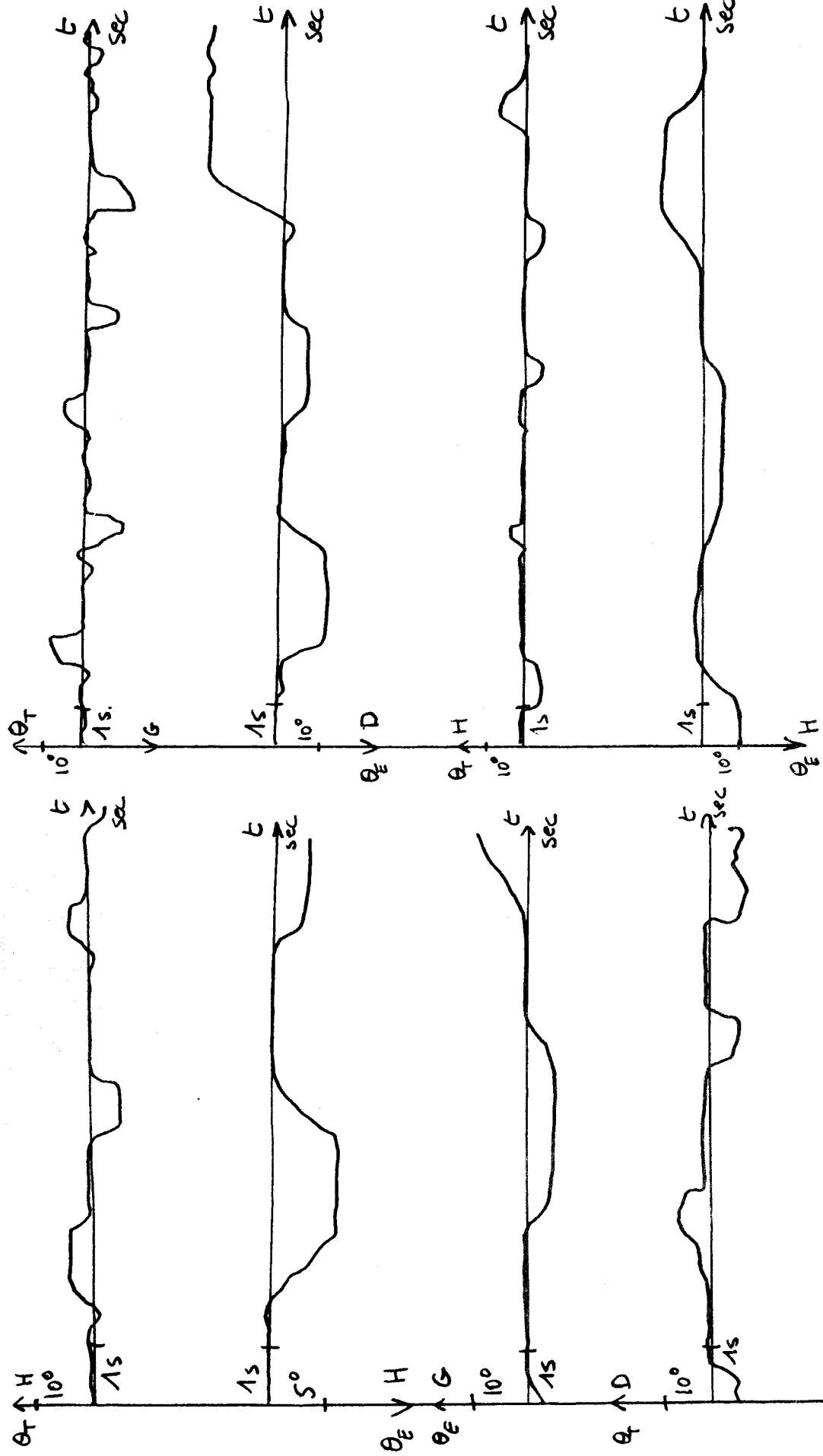


Fig 2.20 : enregistrement de pointages lors d'une tâche de commande en vitesse (gain 0,5)

Fig 2.21 : enregistrement de pointages lors d'une tâche de commande en vitesse  
 $\theta < 5^\circ$  : gain 0,5  
 $\theta > 5^\circ$  : gain 1

II-21



#### II. 4. 5. - Etude des temps de stabilisation

Les temps de stabilisation obtenus au cours d'une commande en position ou en vitesse restent comparables.

Les courbes fig. 2.22 représentent les moyennes statistiques sur les tests réalisés dans les expériences précédentes. Les tests significatifs du t de Student permettent de confondre les temps de stabilisation effectués lors de pointages de stimulus symétriques par rapport au stimulus-centre (points 1 et 6 de la fig. 2.11 par exemple).

Les temps de stabilisation augmentent proportionnellement à l'excentricité pour  $\theta_T$  faible, puis moins vite lorsque  $\theta_T$  est plus élevé (cf fig. 2.22).

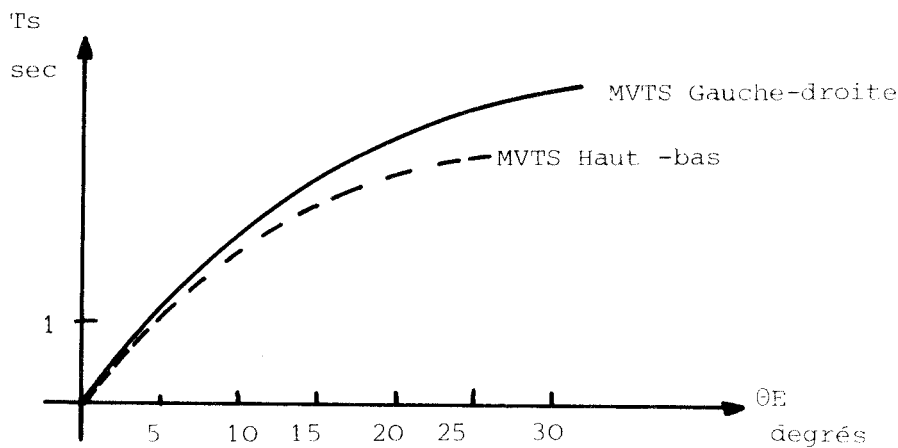


Figure 2.22 Influences des excentricités de stimulus sur les temps de stabilisation (TS) dans une commande.

## II. 5 : PROCEDURE INFORMATIQUE DE TEST DU CAPTEUR

### II. 5. 1. - But de la procédure

Les études décrites précédemment ont permis de dégager par des essais successifs plusieurs types de capteurs utilisant le principe de la déformation d'un système muni de jauges de contrainte.

Afin de pouvoir chiffrer plus rigoureusement les performances de ces dispositifs en vue d'établir entre eux une comparaison objective, nous avons été amené à définir un ensemble de tâches à effectuer par le sujet muni d'un capteur céphalique. Ces tâches ont été déterminées de façon à ce que leur réalisation par l'opérateur puisse se résumer à un certain nombre de paramètres se prêtant bien à des procédures d'acquisition, puis de traitement informatique.

Ces paramètres permettent d'une part, de chiffrer l'ensemble expérimental mis en jeu pour un capteur donné. En faisant effectuer au même groupe de sujets le même ensemble de tâches avec un capteur différent, les modifications de ces paramètres caractéristiques conduisent d'autre part à une comparaison des performances du capteur à jauges de contrainte.

### II. 5. 2. - Dispositif expérimental

Les tâches proposées au sujet consistent à déplacer à l'aide des mouvements de tête un point lumineux mobile apparaissant sur une console de visualisation placée en face de l'opérateur à 1 m de lui (figure 2.23 ). La surface utile de la console est limitée à 22 cm x 16 cm correspondant à  $\pm 8^\circ$  (droite gauche) et  $\pm 5^\circ$  (haut bas) vu des yeux du sujet.

Les signaux délivrés par le capteur étudié sont d'abord pré-traités par un calculateur analogique puis convertis par une chaîne d'acquisition analogique digitale.

La chaîne est pilotée par une unité centrale de calculateur reliée à une double unité de disques souples et gérant les entrées-sorties de la console.

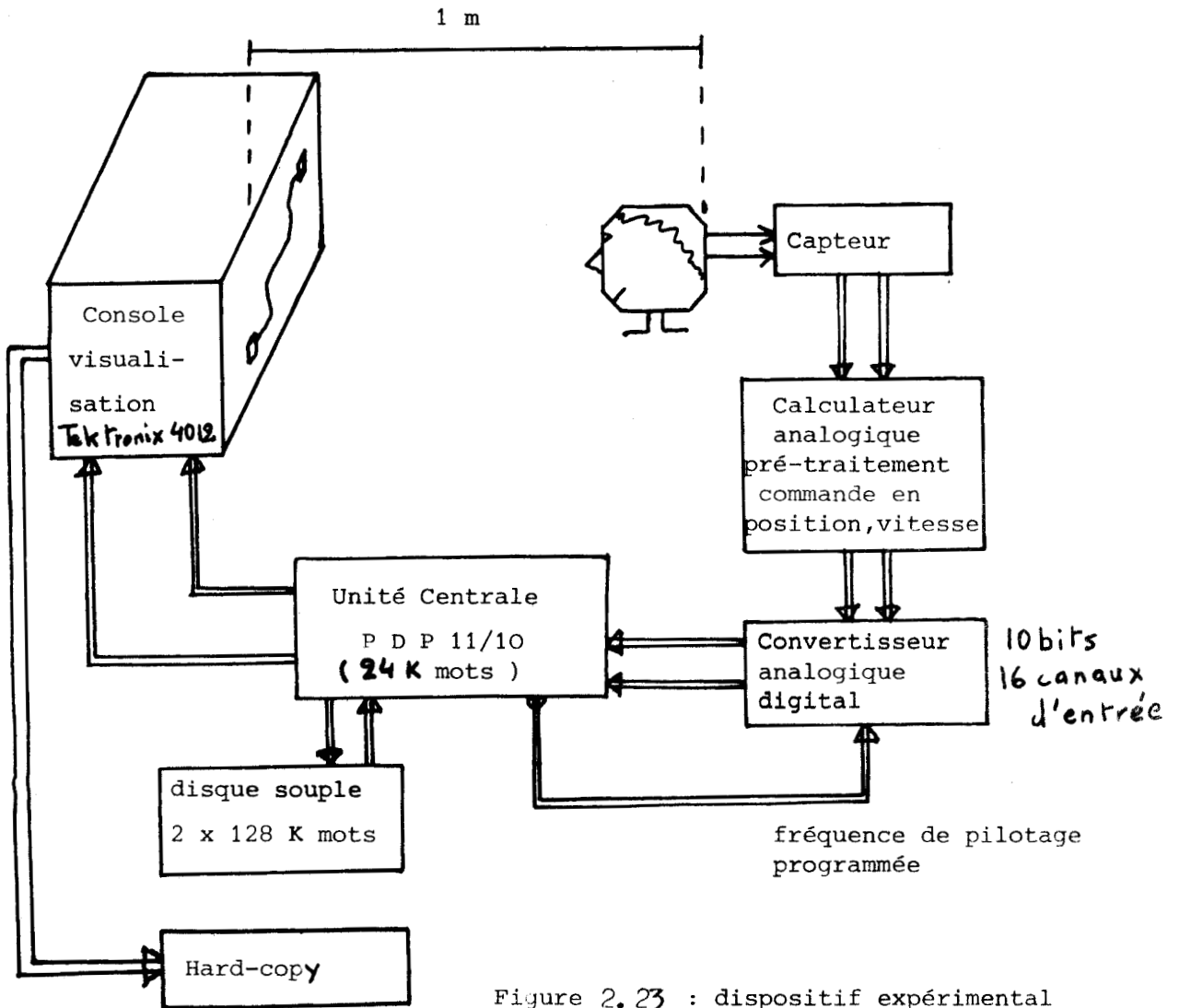


Figure 2.23 : dispositif expérimental



### II. 5. 3. - Logiciel d'acquisition des paramètres

La version actuelle du logiciel implanté sur le calculateur s'articule en deux niveaux :

- \* présentation des stimulus visuels
- \* acquisition des paramètres de réalisation de la tâche de commande (retards, erreurs, temps de stabilisation etc...)

Le premier niveau, rédigé en Fortran, permet de présenter au sujet sur la console de visualisation une "scène" (ensemble de figures géométriques) choisie parmi 3 possibilités :

- \* deux labyrinthes (l'un en tracking, l'autre en suivi de contour)
- \* apparition de cibles visuelles

Ce logiciel effectue également les appels au second niveau, la gestion des paramètres nécessaires à ce niveau, ainsi que l'impression des résultats.

Le second niveau, rédigé, sous la forme d'un sous programme en assembleur, peut être appelé par le logiciel précédent et à plusieurs buts :

- \* d'une part il pilote avec une période fixée (ITECH) la chaîne d'acquisition analogique -numérique qui permet de convertir les signaux délivrés par le capteur céphalique et éventuellement traités par le bloc de calcul analogique

- \* d'autre part il génère sur l'écran de visualisation, et avec la même période d'échantillonnage ITECH un spot lumineux ("spot suiveur") dont les déplacements horizontaux et verticaux sont liés aux voies droite-gauche et haut-bas du capteur.

Enfin, il permet, grâce à la gestion de l'horloge, de calculer le temps mis par le spot "suiveur" pour aller du carré de départ au carré cible périphérique ou pour faire un trajet imposé.

### II. 5. 4. - Caractéristiques des stimulus visuels et protocole expérimental

Le dispositif expérimental et le logiciel décrits précé-

demment permettent, dans la version actuelle, de faire apparaître au sujet un ensemble de figure géométriques ("scènes") et un point lumineux mobile dont les déplacements sont commandés par les signaux délivrés par le capteur.

#### - Tâche de pointage

Le premier type de "scène" est constitué par l'apparition successive de 10 carrés "cibles" sur l'écran de visualisation (Figure 2.24).

La tâche demandée au sujet consiste à déplacer le spot "suiveur" du carré de départ jusqu'au carré cible venant d'apparaître à la périphérie puis de revenir au centre.

Le mouvement de retour n'est pas comptabilisé mais il est nécessaire pour la réinitialisation des paramètres du programme et l'apparition du carré cible suivant.

Afin de pouvoir fixer la précision du pointage à l'aide de notre dispositif capteur, il est possible d'utiliser deux grandeurs de carrés cibles :  $\frac{1}{2}$  degré ou  $\frac{1}{4}$  degré (angle de vision de l'opérateur)

Le logiciel permet d'afficher les temps mis par le sujet pour réaliser les 10 pointages successifs et de les stocker en vue d'un traitement ultérieur (ANNEXE A 1)

#### - Tâche de suivi de contour

Un autre type de "scène" se présente sous la forme d'un contour labyrinthique que le sujet doit suivre le plus précisément possible. A la fin de l'expérience apparaît le temps mis pour effectuer ce parcours ; de plus le logiciel permet le stockage des erreurs réalisées par rapport à ce contour imposé (Figure 2.25) (ANNEXE A 2)

#### - Tracking labyrinthique

Le troisième type de tâche est constitué par un tracking de spot suivant un contour labyrinthique (Figure 2.25).

La vitesse de la cible, constante pendant toute l'expérience est programmée au début par l'expérimentateur entre 1,2 1,8 2,4 3,6 ou 7,2 degrés/seconde.

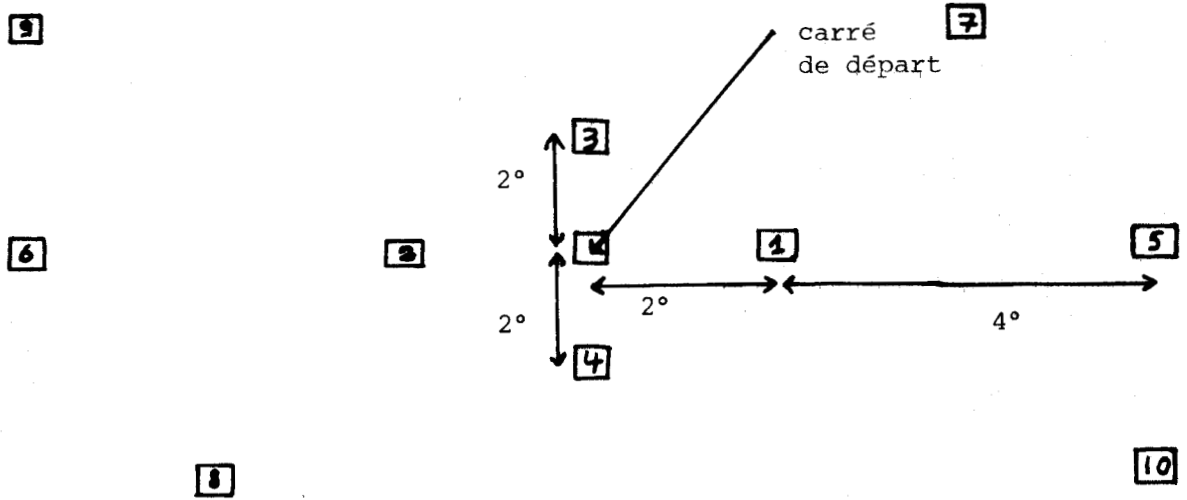


Figure 2.24 : position géométrique et ordre d'apparition des carrés cibles sur l'écran de visualisation

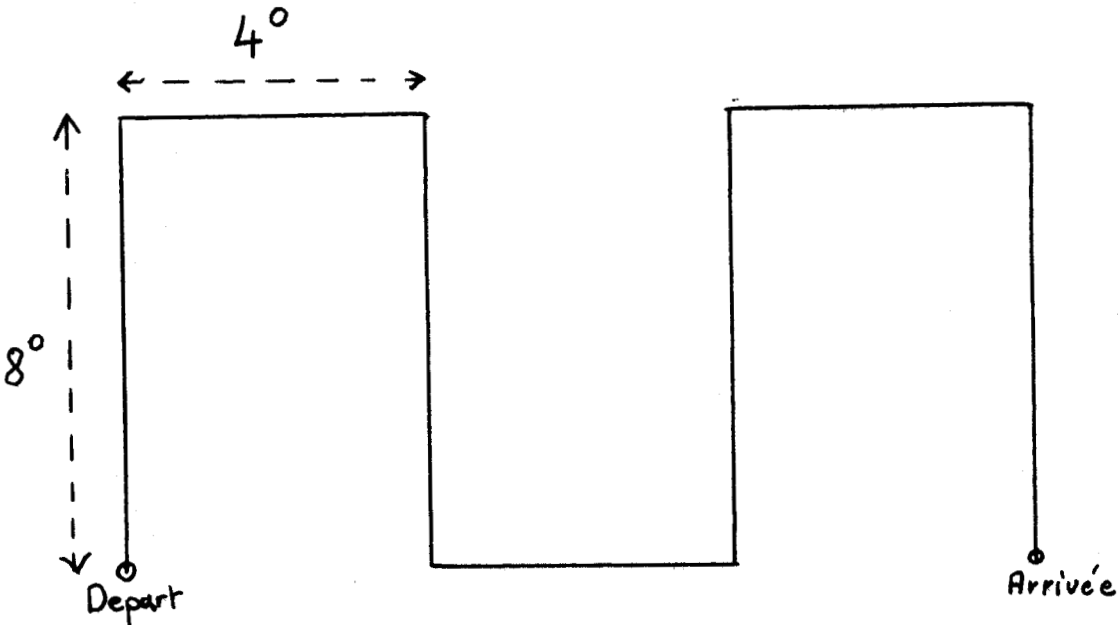


Fig. 2.25 : Contour labyrinthe

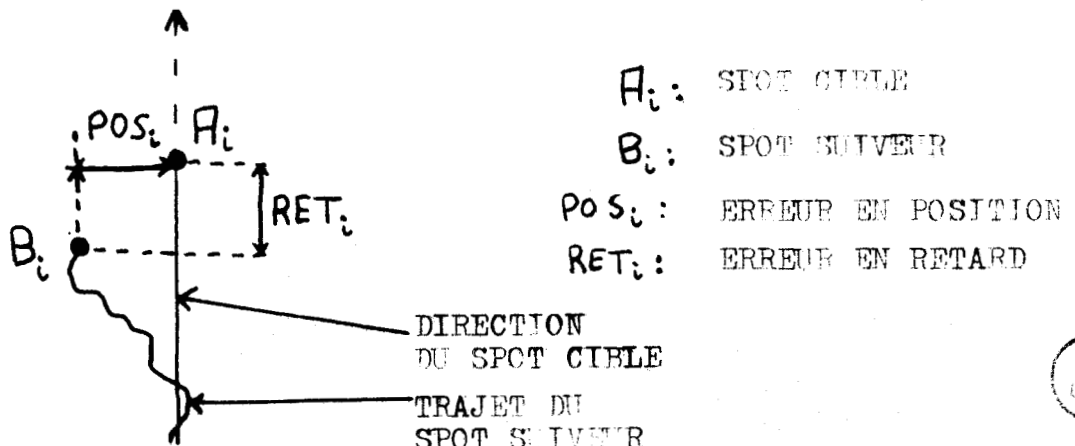


Fig 2.26 : Représentation des erreurs  $POS_i$  et  $RET_i$  durant une tâche de tracking



Le logiciel permet ici de calculer à chaque instant l'erreur en position ( $POS_i$ ) et l'erreur en retard ( $RET_i$ ), il stocke ces données en fin d'expérience (figure 2.26).

Les organigrammes de ces trois logiciels sont représentés en Annexes A 1, A 2, A3.



II. 6 : CONCLUSION

Les premiers essais, effectués en commandant le marqueur d'une table traçante, ont permis de définir quelques caractéristiques du système tête capteur engin (précision du pointage, temps de stabilisation, commande en position ou en vitesse, gain variable)(17 )

Cependant, il s'est avéré nécessaire d'introduire d'autres paramètres (erreurs, précisions,...) afin de pouvoir étudier des critères de qualité de réalisation de la tâche.

Le dépouillement long et fastidieux "à la main", nous a alors obligé à redéfinir un protocole expérimental permettant un traitement automatique des données.

L'objet du chapitre suivant est d'étudier les paramètres définis précédemment (temps de stabilisation, erreurs, retards) afin d'effectuer une première approche des critères de performance de commande d'engin à l'aide des mouvements de tête.

## CHAPITRE III

ETUDE DES PARAMETRES CARACTERISANT

UNE COMMANDE PAR LES MOUVEMENTS DE TETE

L'objet de ce chapitre consiste à définir et à étudier les paramètres permettant de caractériser les divers types de tâches que le sujet doit effectuer (pointages - suivis de contour - trackings présentés au II.5.4)

Ces paramètres permettent de donner aux performances réalisées leurs caractéristiques :

- temporelles, grâce à l'étude des temps de stabilisation lors de tâches de pointage
- spatiales, par les relevés des erreurs de position lors de tâches de suivi de contour
- spatio-temporelle, grâce à l'étude des erreurs en position et en retard (POS et RET cf II.5.4) réalisées lors des tâches de tracking labyrinthique.

La complémentarité de ces trois analyses permet ainsi la mise en évidence du type de commande le mieux adapté à la tâche proposée au sujet (gain optimal, commande en position ou en vitesse).

### III. 1 : Etude des temps de stabilisation recueillis lors d'une tâche de pointage

Rappelons que dans ce type de tâche, le sujet doit conduire le spot à l'aide de ses mouvements de tête d'un carré central vers un carré cible périphérique lui apparaissant aléatoirement dans l'espace et dans le temps (pour éviter les phénomènes d'apprentissage) puis de le faire revenir dans le carré central.

Afin d'éviter au sujet d'être surpris par l'apparition de la première cible, une temporisation a lieu en début d'expérience sur le carré central ; les résultats obtenus pour chaque carré cible sont ainsi comparables.

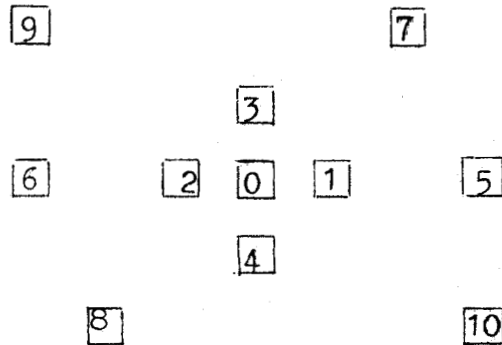
Le temps de stabilisation pour chaque carré cible est constitué par le temps qui sépare l'apparition de ce carré et l'instant où le sujet a stabilisé le spot qu'il pilote dans la cible pendant au moins  $T_0$  seconde ( $T_0$  choisi au début de l'expérience par l'expérimentateur).

L'introduction de ce paramètre  $T_0$  permet d'affirmer que le sujet s'est stabilisé sur la cible et qu'il n'y est donc pas passé sans contrôler le spot suiveur : on vérifie ainsi que le sujet maîtrise parfaitement la trajectoire du spot à l'aide de ses mouvements de tête.

Ce type d'expérience a été effectué dans les 8 configurations obtenues parmi les combinaisons des diverses commandes : position ou vitesse, gain 1 ou 1/2, carrés cibles d'1/2 degré de côté ou de 1/4 degré de côté. Les résultats ont été obtenus sur un ensemble de 5 sujets ayant passé 5 fois chacun dans chaque configuration (chaque mesure est donc la moyenne de 25 valeurs)

Chaque configuration donne lieu à un dépouillement sur 10 stimulus. Afin de rendre plus claire la présentation des résultats nous avons cherché à savoir si les performances obtenues en regroupant certains stimulus étaient comparables.

L'étude de l'ensemble des résultats a permis de regrouper la totalité des carrés cibles 1, 2, ..., 10 en 3 catégories : (1, 2, 3, 4), (5, 6, 7, 8) , (9, 10).



### Présentation des carrés-cibles

Cette étude préliminaire met en évidence un premier résultat important : lors d'une tâche de commande les performances réalisées ne semblent pas être fonction de la position géométrique des stimulus mais de la distance carré central-cible.

Dans l'étude qui suit nous conviendrons dès ce présent d'appeler l'ensemble (1,2,3,4) : PE (petites excentricités), l'ensemble (5,6,7,8) : ME (moyennes excentricités) et (9,10) : GE (grandes excentricités).

#### III. 1.1 : Influence de la nature de la commande sur les temps de stabilisation

Le but de ce paragraphe est de mettre en évidence les différences de comportement selon les commandes utilisées et de savoir dans quelle mesure on peut remplacer une commande "naturelle" (en position) par une commande en vitesse plus difficile à contrôler (sans apprentissage) mais qui présente des avantages dans certains cas.

Deux exemples de tracés obtenus sont présentés fig 3.1 (Commande en position) et fig 3.2 (Commande en vitesse). Ils montrent la bonne qualité de la commande dans les deux cas. On peut aussi noter que le tracé obtenu lors d'une commande en vitesse est nettement moins "tourmenté" que lors d'une commande en position ce qui se révèle un avantage si l'on doit contrôler parfaitement chaque point de la trajectoire.

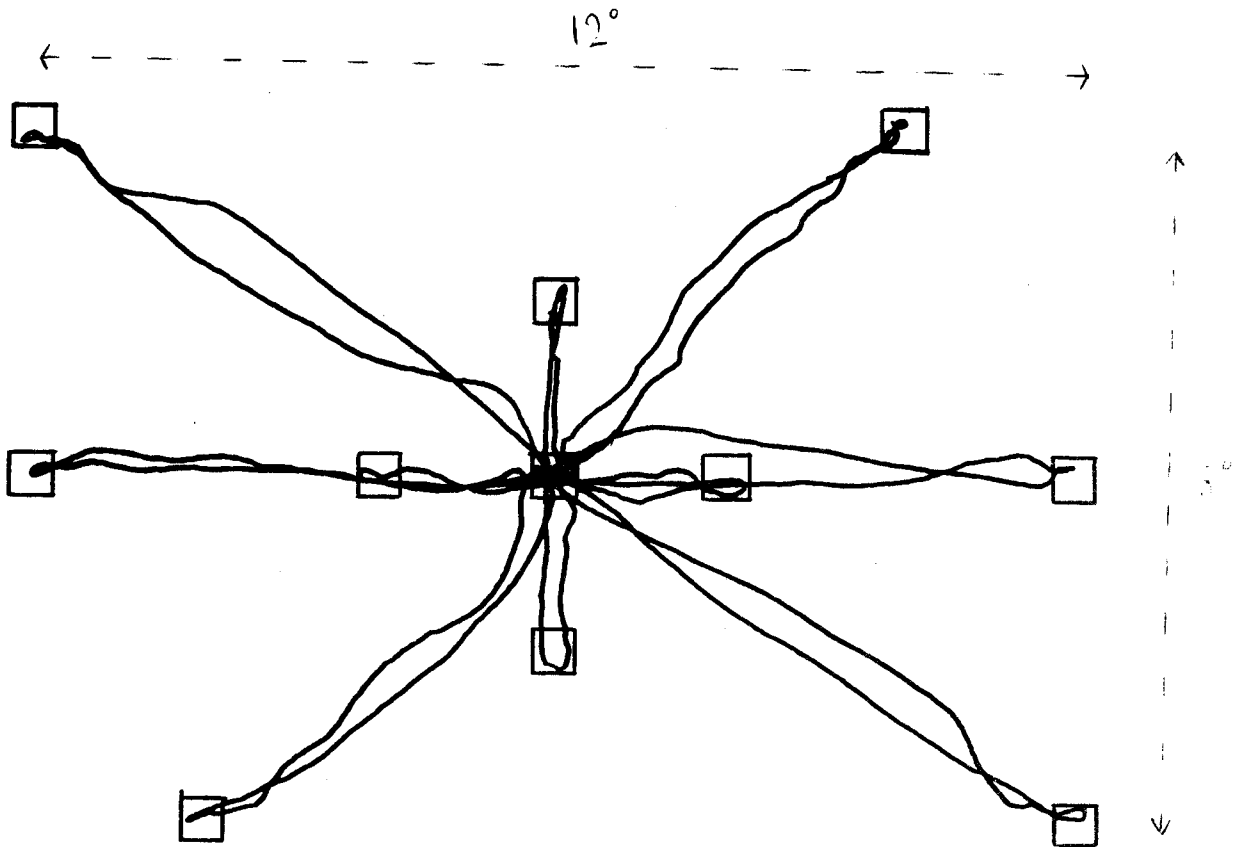


Fig 3.1 : POINTAGES DE CARRES CIBLES - COMMANDE EN POSITION  
 GAIN = 1 T MAX = 5 SEC ESSAI NUMERO 10

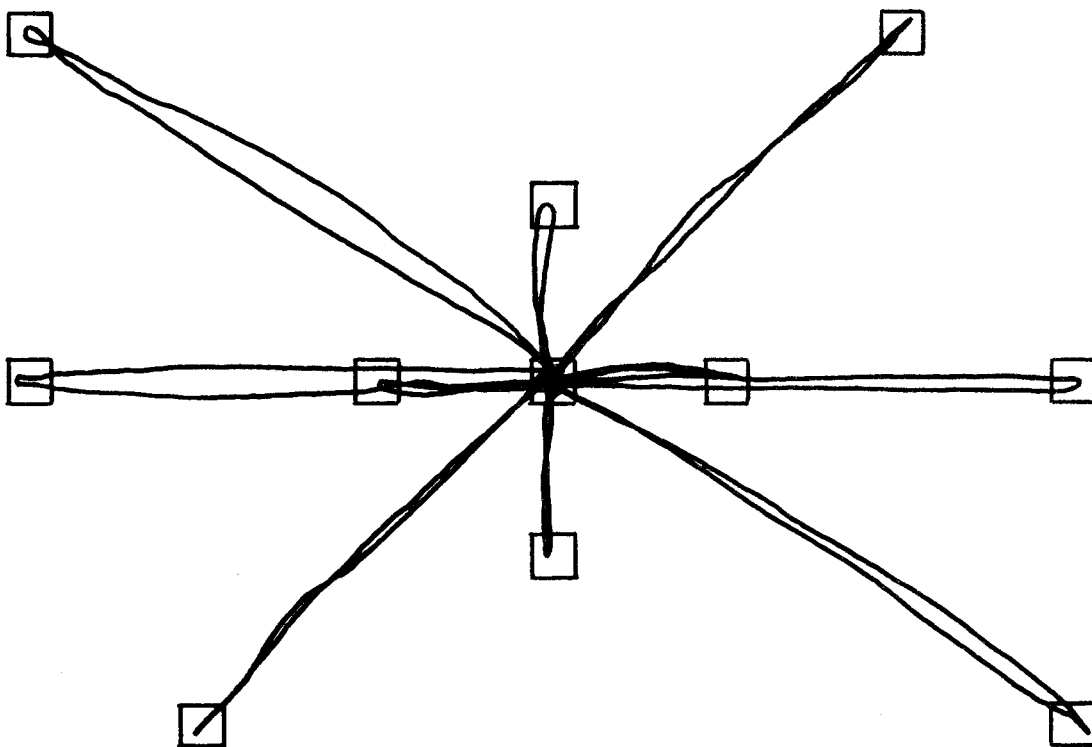


Fig 3.2 : POINTAGES DE CARRES CIBLES - COMMANDE EN VITESSE  
 GAIN = 1 T MAX = 7 SEC ESSAI NUMERO 10

Les temps de stabilisations obtenus sont présentés dans le tableau fig 3.3

	Com.en pos. Gain=1	Com.en vit. Gain=1		Com.en pos. Gain=0,5	Com.en vit. Gain=0,5
PE	675	1110		600	1200
ME	1200	1960		950	1660
GE	1290	2260		1280	2290
	millisecondes			millisecondes	

Fig 3.3: Temps de stabilisation obtenus lors des deux types de commande utilisés (en position et en vitesse).

Ces tableaux montrent que la commande en position permet un pointage plus rapide sur les cibles que la commande en vitesse mais lorsque ce facteur rapidité d'exécution de tâche n'a que peu d'importance dans la tâche demandée, elle peut être avantageusement remplacée par une commande en vitesse :

- \* pour obtenir une trajectoire plus lissée
- \* pour commander le spot en périphérie bien que les mouvements céphaliques se fassent autour de la position de repos
- \* lorsque le sujet ne dispose que de mouvements de tête de faible amplitude (cas fréquent chez les handicapés)

### III. 1. 2: Influence du gain sur les temps de stabilisation

L'étude menée au II. 4.5 sur les temps de stabilisations obtenus lors de la commande du marqueur de la table traçante a mis en évidence une amélioration des performances lorsqu'on utilisait un gain : 1 pour  $\theta_T > 5$  degrés

: 1/2 pour  $\theta_T \leq 5$  degrés

Le but de ce paragraphe est de vérifier ces résultats de manière plus systématique en tenant compte du domaine de présentation des carrés cibles ( $\pm 8^\circ$  en droite gauche,  $\pm 5^\circ$  en haut bas).

Les tracés présentés figures 3.4 (gain 1) et 3.5 (gain 1/2)

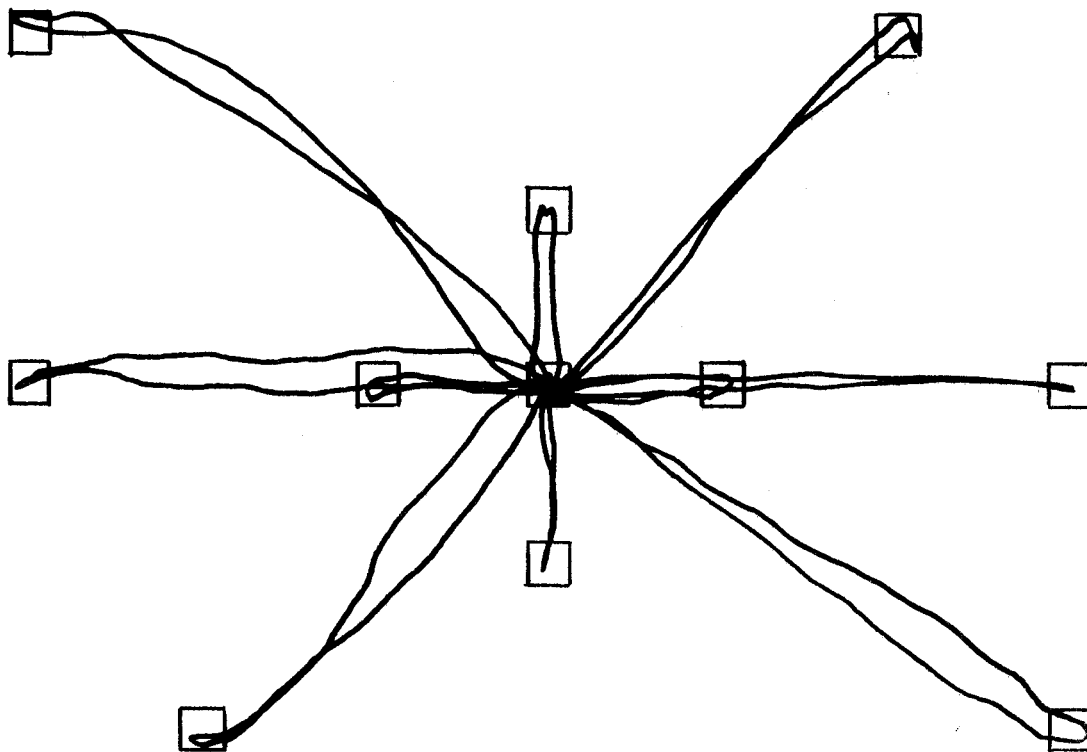


Fig 3.4 : POINTAGES CARRES CIBLES - COMMANDE EN VITESSE  
 GAIN = 1 T MAX = 7 SEC ESSAI NUMERO 10

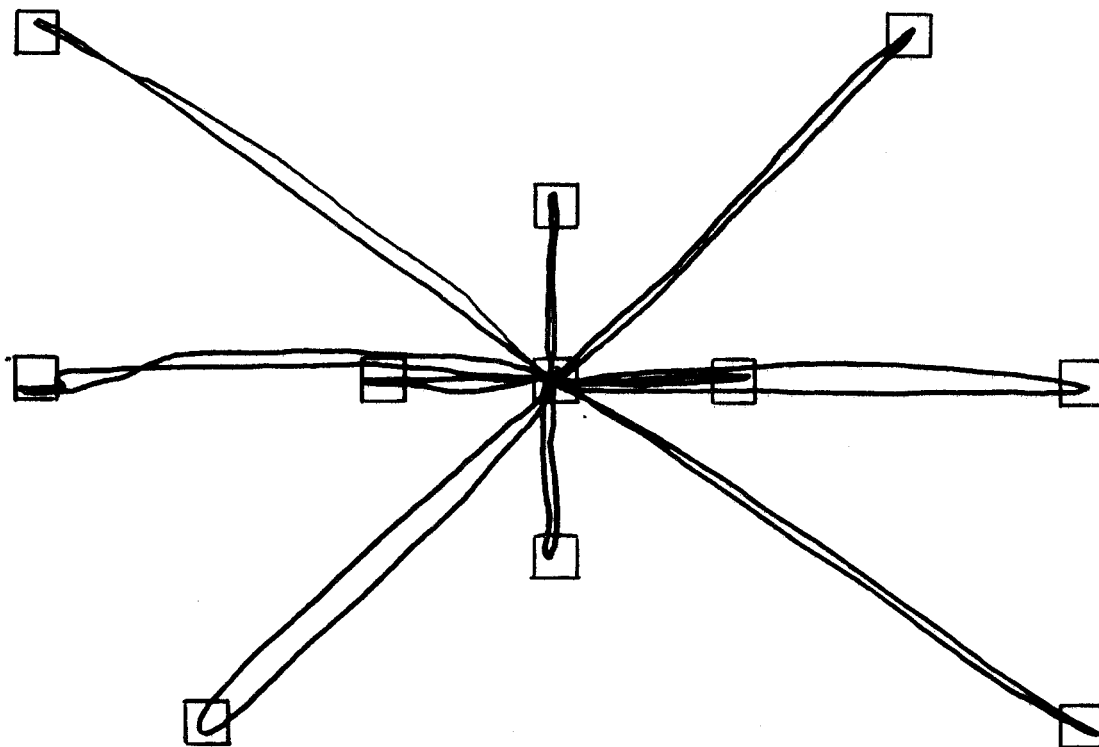


Fig 3.5 : POINTAGES CARRES CIBLES - COMMANDE EN VITESSE  
 GAIN = 0.5 T MAX = 7 SEC ESSAI NUMERO 10



montrent la bonne qualité de la commande du spot dans chacune des deux configurations.

Les Tableaux présentés fig. 3.6 exposent les moyennes statistiques des temps de stabilisation obtenus.

	Com. en pos. G=1	Com. en pos. G=0,5		Commande en vitesse G=1	Commande en vitesse G=0,5
PE	675	600	PE	1110	1200
ME	1200	950	ME	1960	1660
GE	1290	1280	GE	2260	2290
	millisecondes			millisecondes	

Fig 3.6: Temps de stabilisation obtenus lors de l'utilisation de gains différents (G= 1 et 0,5).

Ces résultats, confirmant ceux du II.4.5, semblent indiquer que les performances sont améliorées par l'utilisation d'un gain  $1/2$  pour les excentricités  $< 5^\circ$  ; cette étude sera complétée au III.3.2 où l'on mettra en évidence une zone de gain optimal pour laquelle la commande permet des erreurs de trajectoire plus faibles (cf III.3.2)

### III.1.3 : Précision de la commande par mouvements céphaliques

La précision de la commande du spot lumineux peut être étudiée en diminuant la grandeur des carrés cibles à l'intérieur desquels le sujet doit stabiliser le spot pendant un temps donné.

Les essais ont été effectués en prenant des côtés de  $1/4$  degré. Un des tracés obtenus, présenté fig.3.7 indique que la précision demandée est atteinte lors d'une commande par les mouvements de tête.

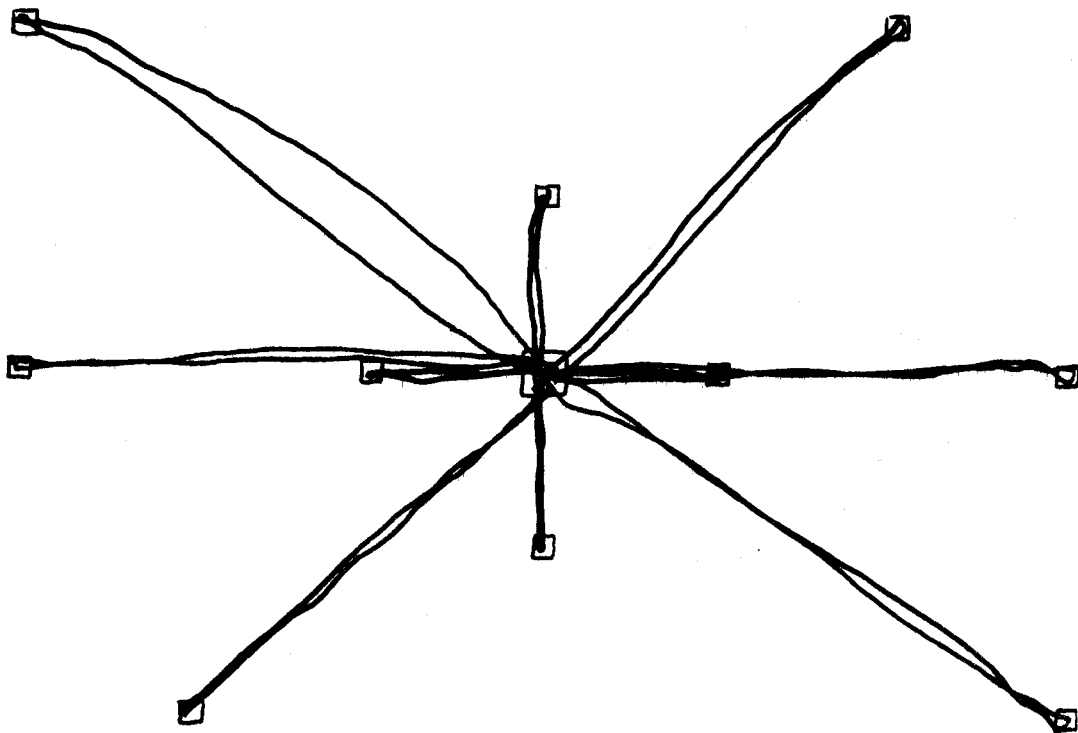


Fig : 3.7 : POINTAGES CARRÉS CIBLES - COMMANDE EN VITESSE  
GAIN 1 T MAX = 7 SEC ESSAI NUMERO 10

Cependant, l'existence de quelques non-stabilisations dans les carrés cibles (quelques un sur 1 000 stimulus) semble indiquer que la limite de précision est de l'ordre du  $1/4$  degré.

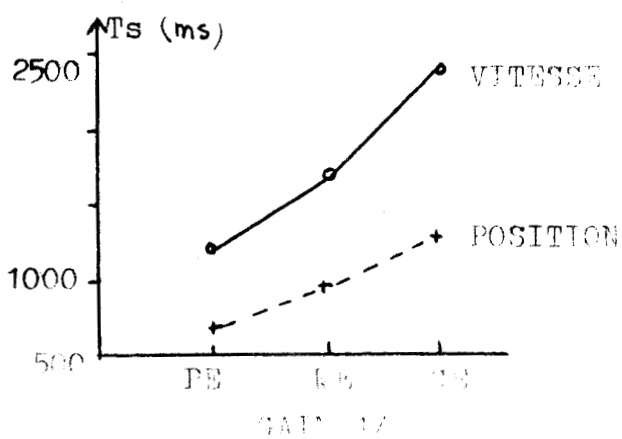
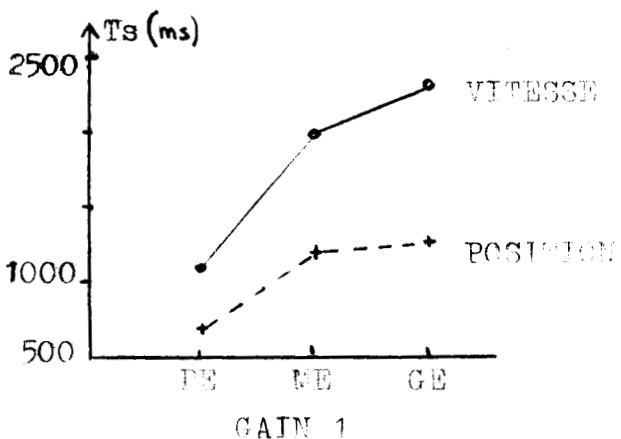
Les tableaux, présentés fig. 3.8 rendent compte des différences de performances réalisées en utilisant des côtés de  $1/2$  et de  $1/4$  degré.

	Commande en Pos. $G=0,5$		Commande en Vit. $G=0,5$	
	cible $0,5^\circ$	$0,25^\circ$	cible $0,5^\circ$	$0,25^\circ$
PE	600	780	1200	1560
ME	950	1280	1660	2030
GE	1280	1450	2290	2440
	millisecondes		millisecondes	

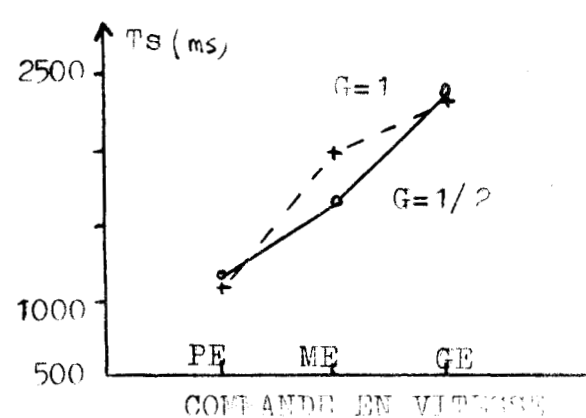
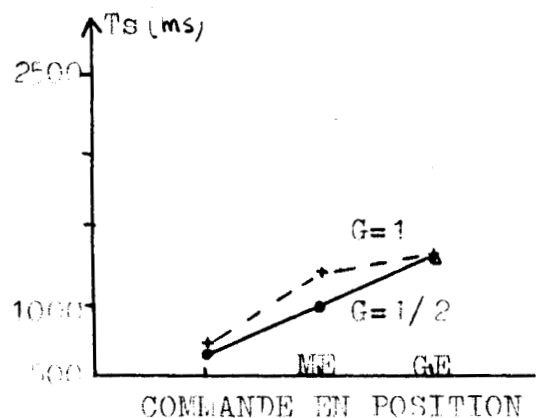
Fig 3.8: Temps de stabilisation obtenus lors de l'utilisation de grandeurs de carrés cibles différentes ( $1/2^\circ$  et  $1/4^\circ$ )

Les temps de stabilisations sont toujours plus importants pour des carrés de  $1/4$  de degré que pour ceux de  $1/2$  degré ce qui s'explique par le fait que le sujet doit commander plus longtemps le spot pour le stabiliser dans une cible plus petite.

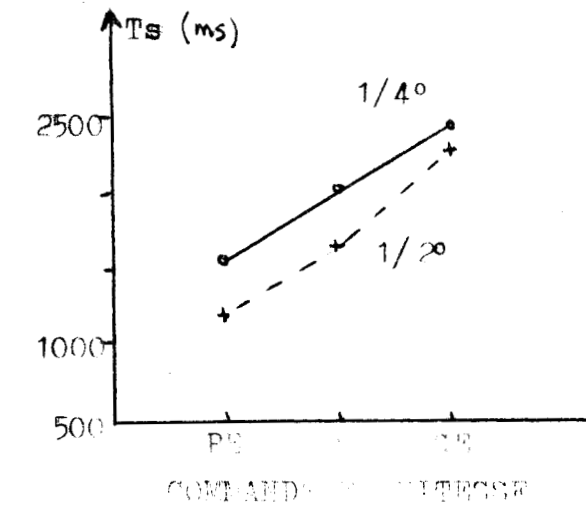
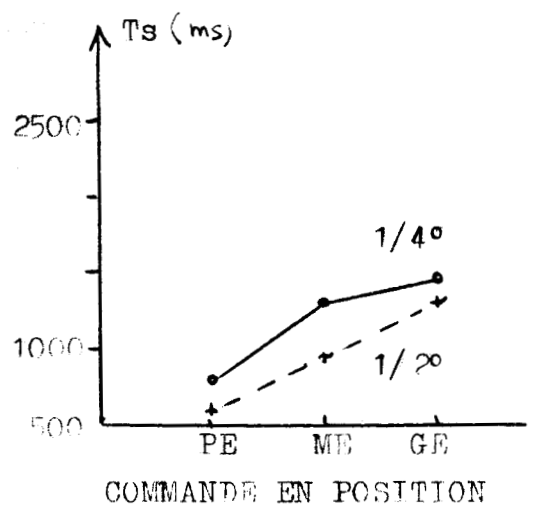
La figure 3.9 présente un ensemble de graphes récapitulatifs des résultats sur les temps de stabilisation obtenus lors de tâches de pointages(18).



COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE COMMANDE EN POSITION ET EN VITESSE



COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE UTILISATION DE GAIN 1 ET 1/2



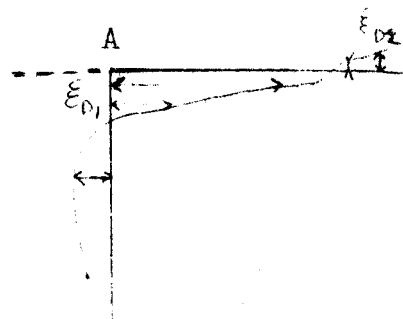
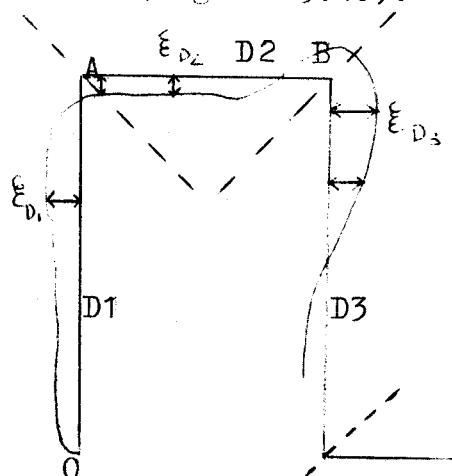
COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE CIBLES DE COTE 1/2 ET 1/4 DEGRES



### III. 2 : Etude des erreurs de trajectoire lors d'une tâche de suivi de contour imposé

La deuxième tâche proposée au sujet consiste à piloter le spot lumineux le long d'un contour labyrinthique. Aucune contrainte de rapidité d'exécution ne lui est demandée. Cependant le temps qu'il met pour effectuer le trajet est enregistré afin de permettre l'étude des relations liant les erreurs de suivi et la vitesse d'exécution (Chapitre IV).

La principale difficulté de cette étude a été de définir en tout point l'erreur réalisée. En effet la présence des points anguleux du labyrinthe oblige à changer la façon de calculer cette erreur (figure 3.10).



Imprécision apportée par le choix du dépassement du pt A pour calculer  $\bar{\epsilon}$

Fig 3.10: Calcul de l'erreur suivant la portion du contour labyrinthique

Sur la portion D1 l'erreur est la projection du suivi réalisé sur le contour imposé :  $\bar{\epsilon}_{D1}$  (de même pour D2 :  $\bar{\epsilon}_{D2}$ ) Il s'agit de savoir à quel moment il faut choisir de calculer  $\bar{\epsilon}_{D2}$  et non plus  $\bar{\epsilon}_{D1}$ . La figure 3.10 met en évidence que le choix du dépassement du point A conduirait à d'importantes imprécisions ; c'est la raison pour laquelle nous avons choisi la bissectrice de OAB comme critère. La façon de calculer l'erreur change dès que le suivi réalisé coupe la bissectrice de chacun des angles droits. (cf figure 3.10).

Les tracés, présentés fig 3.11 montrent la bonne qualité du suivi du contour effectué ; en particulier l'erreur par

rapport au contour imposé ne dépasse jamais 1 degré.

Un renseignement intéressant pouvant être fourni par la moyenne arithmétique des erreurs ; les quantités  $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_k$  sont indiquées fig 3.19 pour une commande en vitesse et en position (Gain 1)

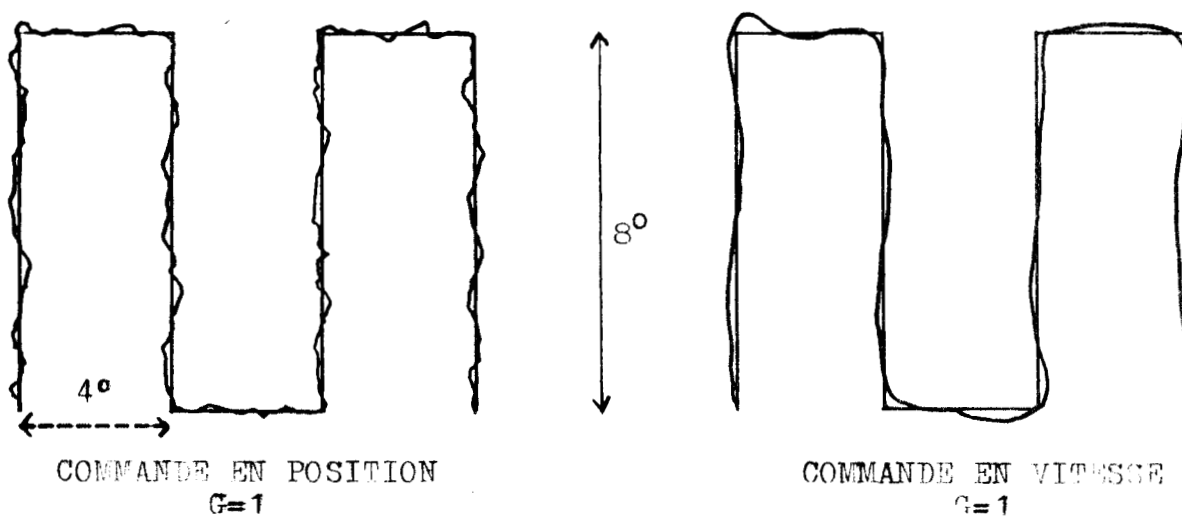


FIG 3.11 : SUIVIS DE CONTOURS LABYRINTHIQUES A L'AIDE DES MOUVEMENTS CEPHALIQUES

SUIVI N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Commande en Position	-31	-44	-24	-43	-110	+36	+9	-1	-9	-2
Commande en Vitesse	-13	-6	-23	+15	+37	-7	-7	-2	+3	-28

Fig 3.12: Moyennes des erreurs réalisées lors de 10 expériences (exprimées en millièmes de degré et définies négativement si le suivi est au dessus des portions  $D_i$ )

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'une commande en vitesse dans ce type de tâche ; les erreurs d'ajustement sont en effet plus faibles et les tracés présentés fig 3.11 indiquent que la commande en vitesse donne des suivis de contour plus lissés que lors de la commande en position.

La commande en vitesse semble donc bien adaptée lorsque la tâche à effectuer est déjà connue du sujet ( sans qu'il y ait modification brusque de l'information d'entrée ) ( 19 ).

### III. 3 : Etude des erreurs et des retards réalisés lors d'une tâche de pistage labyrinthique

De nombreuses études sur les tâches de pistage , en particulier pistage manuel ( 20, 21 ), ont consisté à modéliser le comportement de l'opérateur humain lors de tâche de commande de spot d'oscilloscope à l'aide d'un levier du type "manche à balai".

Le but est ici de caractériser les erreurs de commande réalisées dans le domaine temporel (évaluation des retards) et dans le domaine spatial (erreurs en position) en fonction des paramètres de la tâche de pistage : vitesse de la cible, gain de l'ensemble tête-capteur, nature de la commande (en position ou en vitesse).

### III. 3.1 : Domaine de variation des erreurs lorsque la vitesse de la cible varie

Rappelons que la tâche du sujet consiste à faire coïncider le plus précisément possible le spot qu'il commande par ses mouvements de tête et un spot cible se déplaçant avec une vitesse choisie en début d'expérience par un expérimentateur parmi les 5 suivantes :

1,2 degrés/seconde    1,8°/sec    2,4°/sec    3,6°/sec    7,2°/sec

La figure 3.13 présente un exemple de tracé obtenu lorsque les paramètres de la tâche sont :

vitesse cible 1,8°/sec

gain = 1

commande en position

Ce tracé indique les erreurs en position à tout instant, mais ne peut pas renseigner sur les retards réalisés à ces mêmes instants ; c'est pour résoudre ce second point que nous avons été amenés à présenter fig 3.14 les enregistrements dans le temps des différentes erreurs :

- en position fig 3.14 a
- de retard fig 3.14 b

Ainsi les figures présentées mettent en évidence que :

- \* les erreurs en position par rapport au spot cible restent faibles ( $< 1^\circ$ ) et montrent la bonne qualité de la commande
- \* les retards (fig 3.14.b) semblent indiquer que le sujet effectue à tout instant un pistage précis du spot cible (retards  $< 1$  sec).

Les tracés fig 3.15 représentent un échantillon de pistages réalisés dans les mêmes conditions (Gain 1, commande en position) lors des 5 différentes vitesses de la cible ; ceux ci renseignent sur la dégradation des performances réalisées lorsque la vitesse de la cible devient élevée (7,2°/sec) ; dans la gamme de vitesse 1,2°/sec - 3,6°/sec les résultats obtenus restent comparables et indiquent la bonne qualité de réalisation de la tâche.

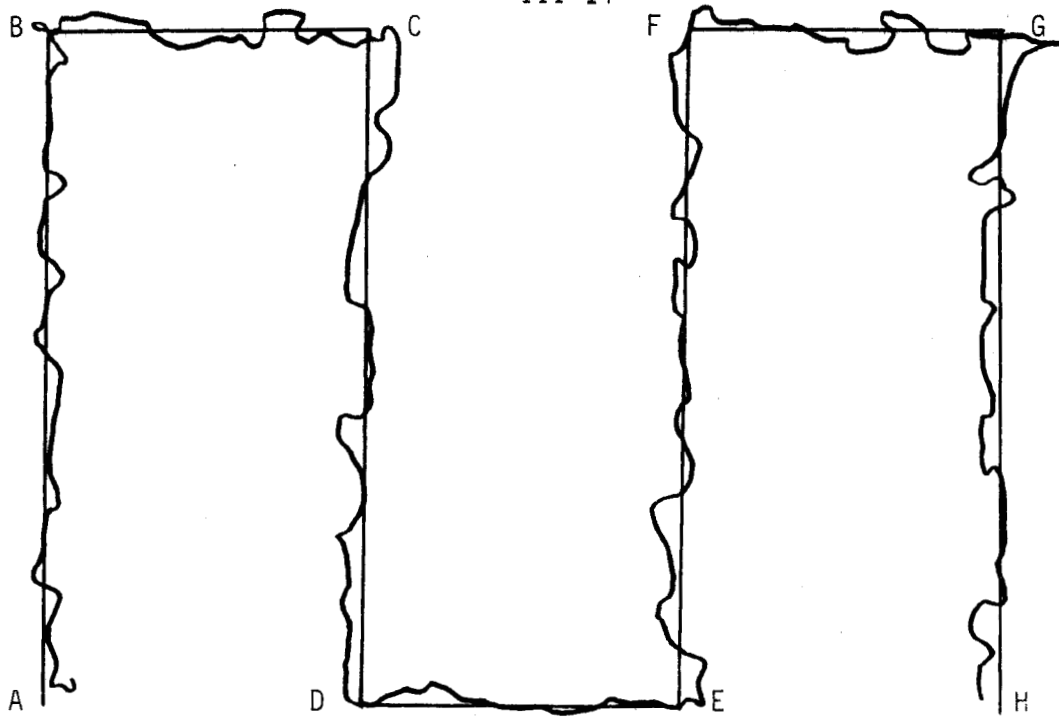


Fig 3.13 : Pistage céphalique - Commande en position

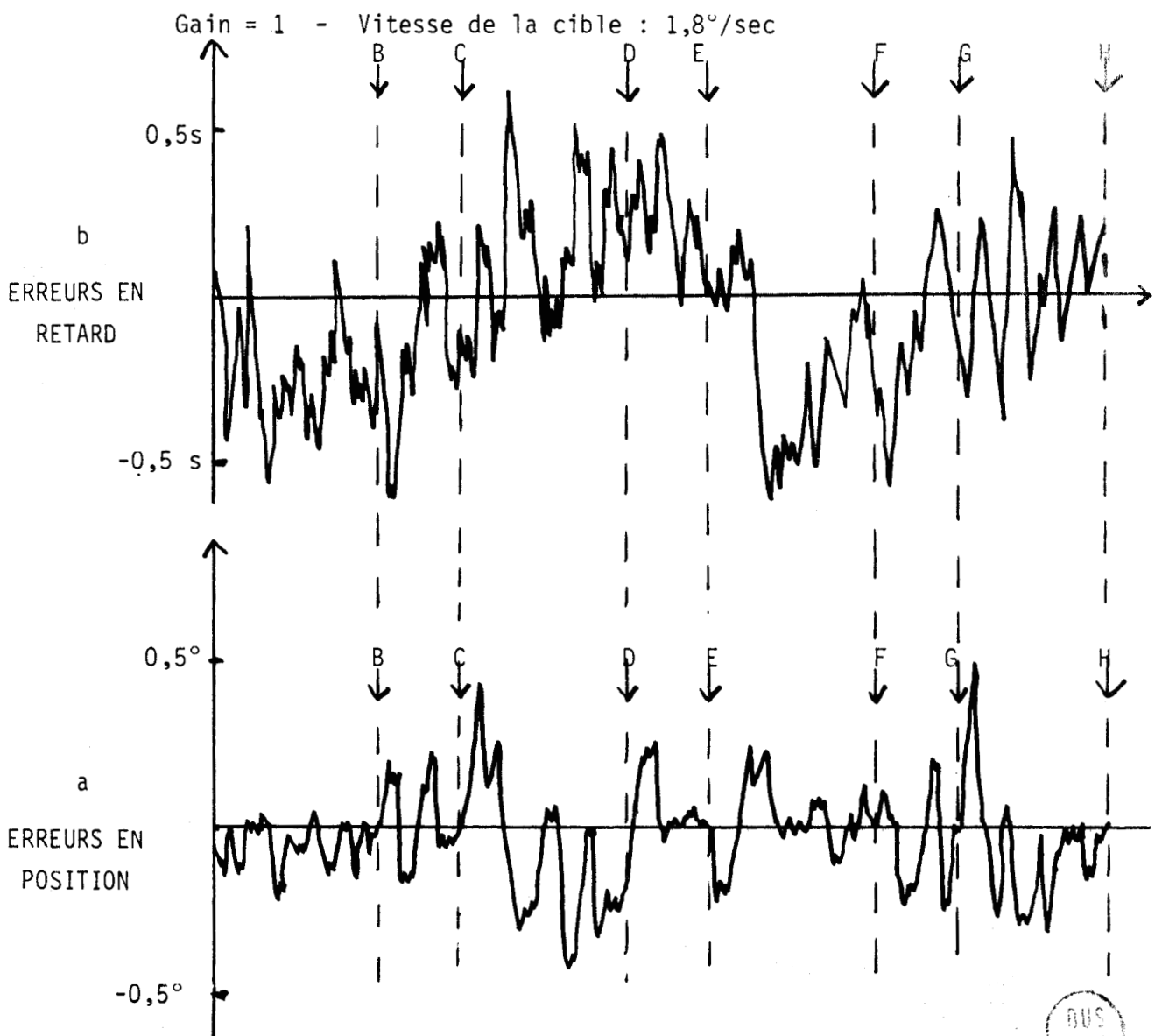
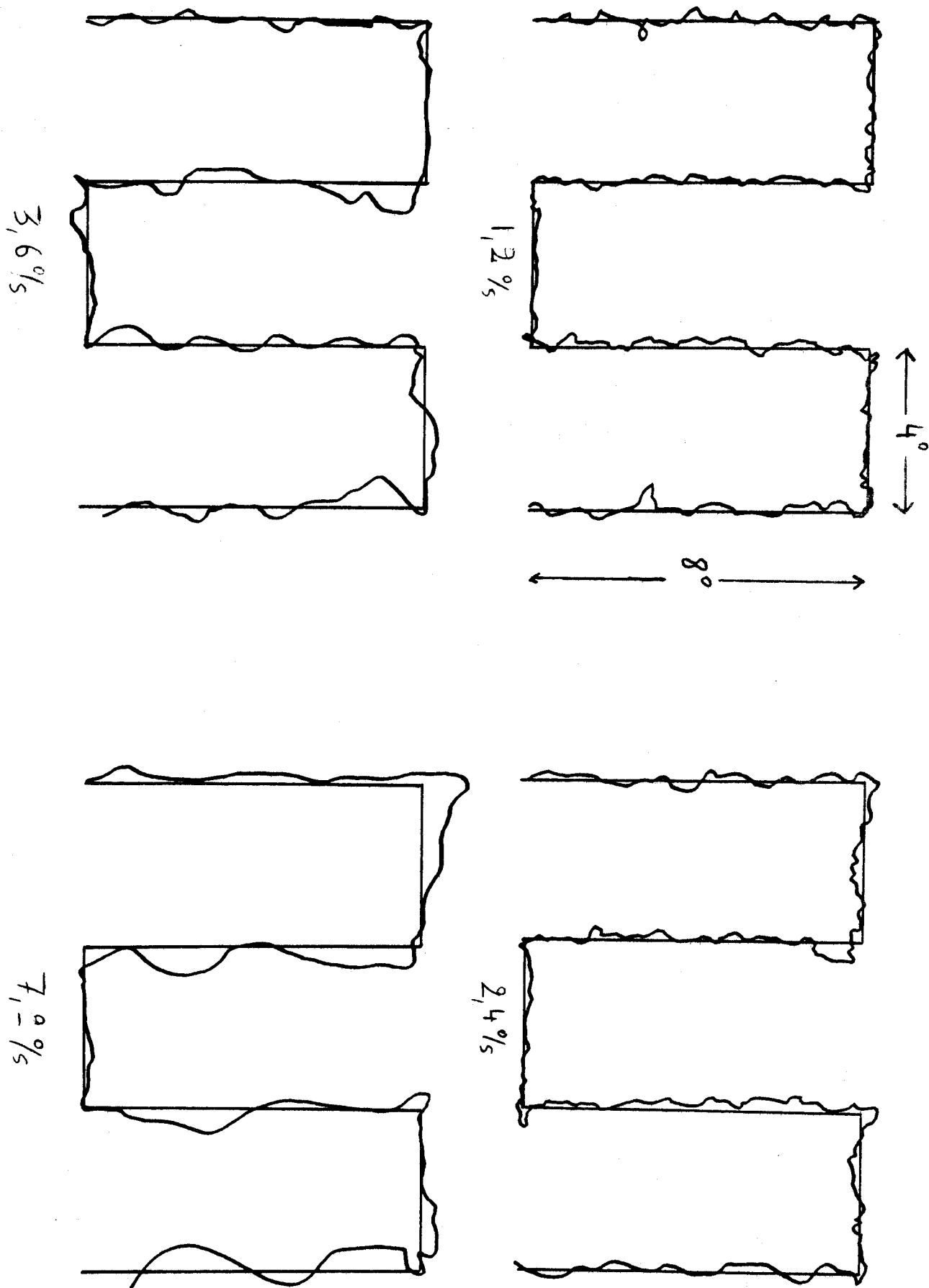


Fig 3.14 : Evolution des erreurs réalisées le long de la courbe 3.13







FIGURAS 3.15: EXEMPLES DE TRACES OBTENUS POUR DIFFERENTES VITESSES DE LA CIBIE (EN POSITION CAIN 1)



Pour rendre compte plus systématiquement des erreurs réalisées, nous avons été amenés à introduire l'écart moyen réalisé pour chaque vitesse de cible, c'est à dire la moyenne des écarts entre erreurs et erreur moyenne :  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi}) =$  écart moyen la mesure de cet écart moyen permet en particulier de nous affranchir de la composante continue de l'erreur, ce qui rend comparables les valeurs obtenues pour chaque vitesse.

L'évolution des écarts moyens en fonction de la vitesse de la cible est présentée fig. 3.16.

Les diverses courbes obtenues lors de commande en position et en vitesse mettent en évidence les résultats suivants :

- \* le paramètre retard est plus sensible que l'erreur en position à l'augmentation de la vitesse de la cible
- \* les erreurs réalisées lors d'une commande en vitesse augmentent plus vite avec la vitesse de la cible que lors d'une commande en position.

En conclusion, la commande réalisée lors d'une tâche de pistage semble peu sujette à erreur lorsque la vitesse de la cible reste faible (1,2°/sec - 3,6°/sec).

Cependant, bien que les erreurs réalisées soient plus importantes lors d'une commande en vitesse, l'utilisation de celle ci, aux faibles vitesses, présente l'avantage de donner des tracés plus lissés, ce qui peut compenser cela.

### III. 3.2 : Domaine de variation des erreurs en fonction du gain utilisé

Après avoir dégagé dans le paragraphe précédent les performances réalisées dans le cadre général d'une commande en position et en vitesse, nous nous proposons à présent d'étudier l'influence du gain sur la commande d'un spot par les mouvements de tête.

Rappelons que le gain unité est calculé pour chaque sujet après étalonnage de l'ensemble tête-capteur dans des tâches de détection (procédures d'étalonnage décrites au II.3).

L'étude présentée ici a été effectuée pour un sujet

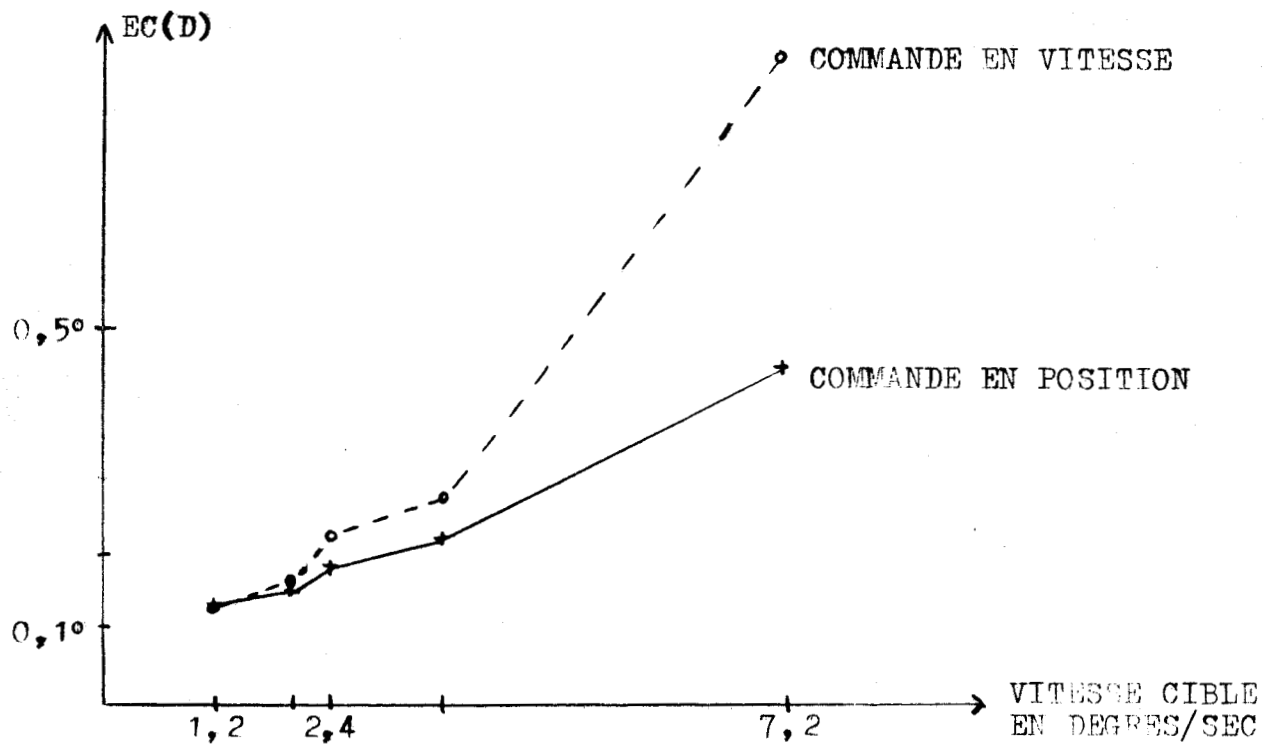


FIG 3.16.a : ECARTS MOYENS DES ERREURS EN POSITION

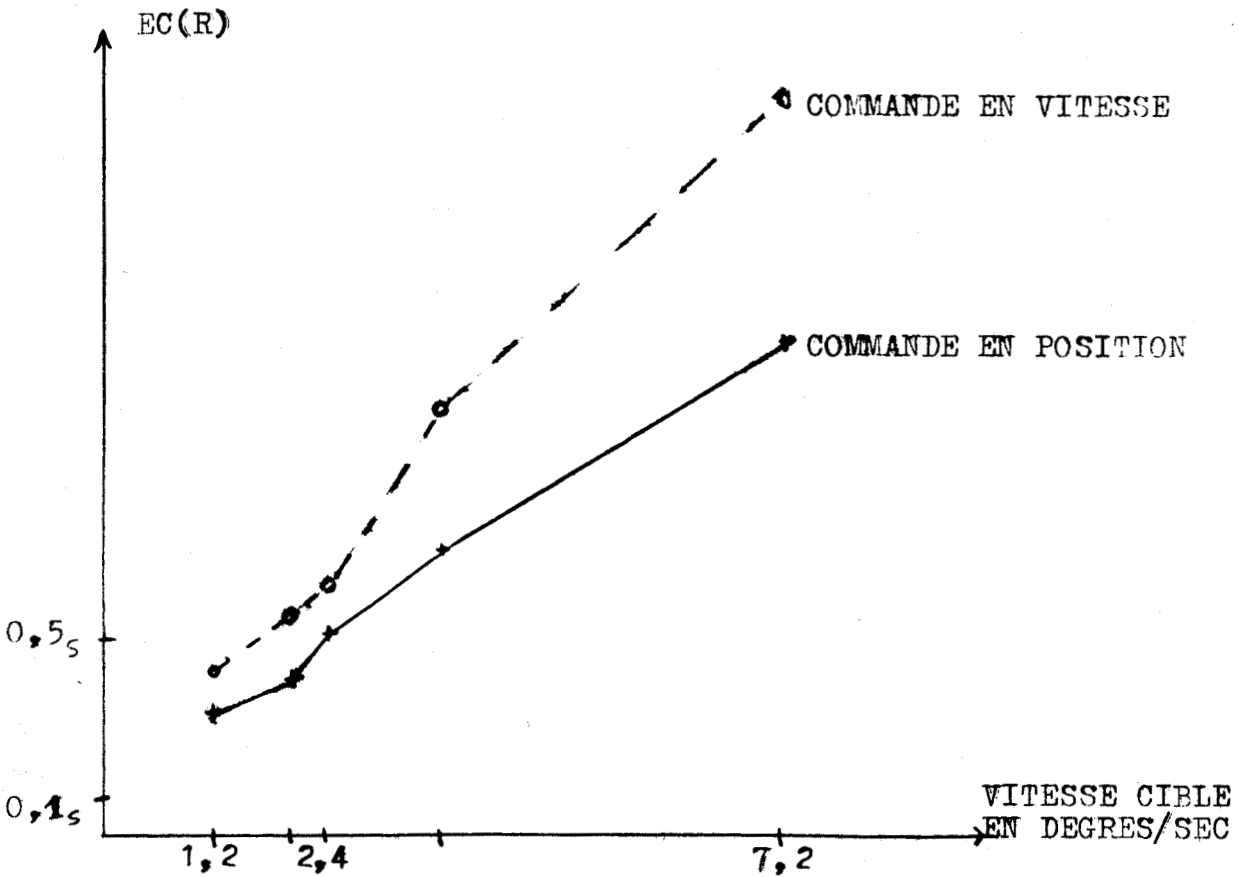


FIG 3.16.b : ECARTS MOYENS DES RETARDS



dans la configuration suivante : commande en position, vitesse de la cible  $1,2^\circ/\text{sec}$ . Cette restriction est expliquée par le souci de ne pas alourdir les résultats présentés et surtout par le fait que nous venons de montrer au paragraphe précédent que les performances restaient comparables pour les faibles vitesses de cibles (de  $1,2^\circ/\text{s}$  à  $3,6^\circ/\text{s}$ ) ; ces résultats ont d'ailleurs été confirmés par des essais complémentaires.

Les tracés, présentés fig 3.17, ont été réalisés en utilisant les gains tête-capteur-spot suivants :  $-0,25 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,5 - 2 - 4$  -

Ces tracés rendent compte des écarts moyens des erreurs en position et des retards (pour s'affranchir de la composante continue donnée par la moyenne) ; ils mettent en évidence :

- \* de très mauvaises performances lorsque le gain utilisé est faible ( $G < 0,5$ )
- \* une augmentation des erreurs lorsque le gain devient grand ( $G > 1,5$ )
- \* l'existence de zone de gain où la commande semble la meilleure ( $0,5 < G < 1,5$ )
- \* que l'erreur en position est plus sensible que le retard à l'augmentation du gain

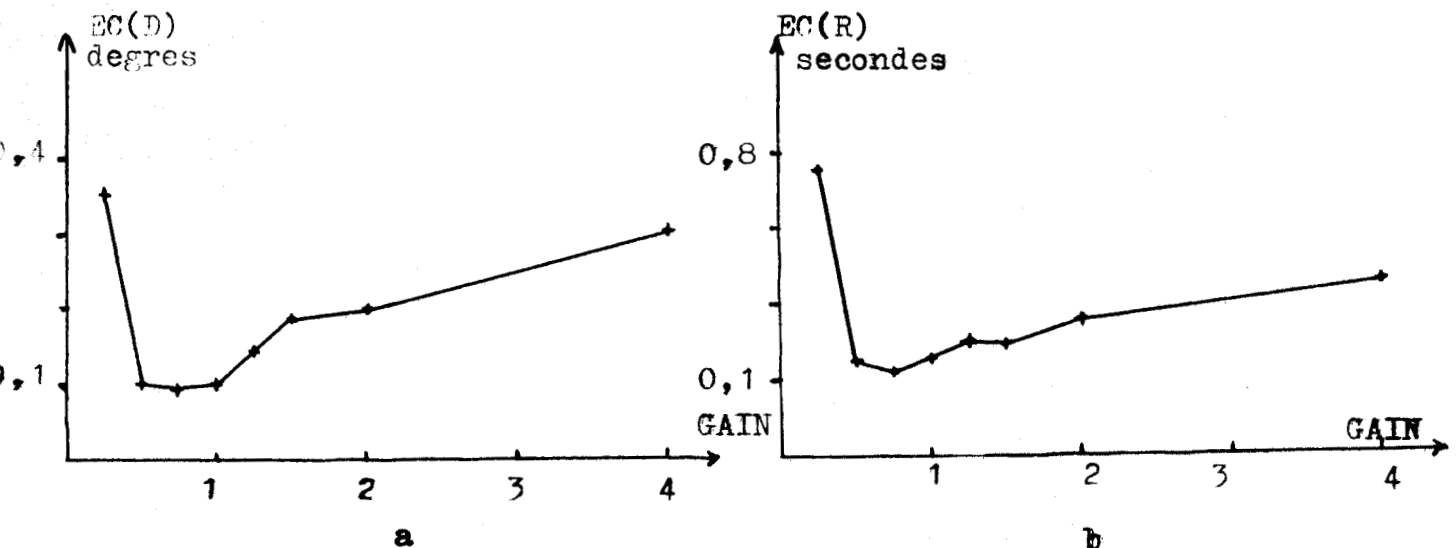


FIG 3.17 : VARIATION DES ECARTS MOYENS EN FONCTION DU GAIN

a: ERREURS EN POSITION

b: RETARDS

### III. 4 : Conclusions

Ce chapitre vient d'exposer les principaux résultats obtenus sur les erreurs en position et les retards réalisés dans diverses tâches de commande de spot à l'aide des mouvements de tête( 22 ).

Ces expériences ont permis de dégager l'influence des facteurs commande (en vitesse ou en position) et gain sur les performances de la commande.

Nous avons pu en particulier noter l'intérêt de :

- \* la commande en position pour des stratégies nécessitant la plus grande rapidité d'exécution (détection des carrés cibles)
- \* la commande en vitesse en particulier si les trajectoires de commandes doivent être lissées
- \* d'un gain qui peut être adapté à chaque stratégie pourvu qu'il reste compris entre 0,5 et 1,5 afin que la commande soit de bonne qualité.

L'objet du chapitre suivant sera de définir les critères de performances de réalisation de la commande par mouvements céphaliques ; l'élaboration de ces critères et leur identification par rapport aux paramètres de tâches permettra en particulier de chiffrer les performances du dispositif utilisé (tête-capteur à jauge) en vue de l'application à une commande d'engin.

## C H A P I T R E I V

DETERMINATION ET ETUDE DE CRITERES

DE PERFORMANCE LORS DE TACHES DE

COMMANDE PAR MOUVEMENTS CEPHALIQUES

Le chapitre précédent a mis en relief les paramètres expérimentaux recueillis lors des diverses tâches de commande proposées aux sujets (temps de stabilisation, erreurs, retards). Il s'avère maintenant nécessaire d'élaborer, à partir de ces données brutes, des critères qui peuvent rendre compte des performances réalisées et en particulier de caractériser leurs évolutions en fonction des informations d'entrée présentées aux sujets (23).

La précision du pointage peut par exemple être déterminée en faisant varier la grandeur  $d_l$  des côtés des carrés cibles à l'intérieur desquels le sujet doit stabiliser un certain temps le spot qu'il commande (cf III. 1.3). Une relation liant  $d_l$  et le nombre de non stabilisations peut ainsi constituer un critère de précision de la commande. Toutefois, le manque de bases objectives à l'élaboration d'un tel critère rend difficile son application. Rappelons cependant que les résultats présentés dans le chapitre précédent (III. 1.3) ont permis d'évaluer cette précision aux environs de  $1/4$  degré (14 non-stabilisations sur 1000 stimulus contre 0/1000 pour  $1/2$  degré).

La qualité de réalisation d'un suivi de contour et les erreurs réalisées lors de tâches de tracking se prêtent en revanche mieux à l'élaboration de tels critères. Le but de ce chapitre consiste à élaborer divers critères de performances et à évaluer leurs capacités pour représenter la qualité d'une commande à l'aide des mouvements de tête.

#### IV. 1 : Etude des critères de performance lors d'une tâche de pistage labyrinthique

Les résultats présentés au III 3 ont permis de dégager les possibilités de commande par les mouvements de tête ; l'étude des erreurs obtenues a en particulier mis en évidence l'influence des divers paramètres de commande (gain, vitesse de la cible, nature de la commande) sur les performances.

Notre étude sera entreprise pour une valeur du gain fixée arbitrairement à  $G = 1$  ; nous avons en effet montré au III.3.2 que les performances obtenues pour une zone de gain comprise entre  $G = 0,5$  et  $G = 1,5$  restaient dans ces limites comparables mais par contre devenaient très mauvaises en dehors.

##### IV. 1.1 : Elaboration et étude des critères de performance

Un des critères permettant de rendre compte des performances de la commande est constitué par la valeur de la moyenne des valeurs absolues des erreurs (24) :

$$E(|\xi|) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i \quad \text{avec: } \xi_i \text{ erreur algébrique réalisée au } i^{\text{ème}} \text{ point}$$

N nombre total de points

Bien que ce choix semble suffisant, nous avons choisi de compléter cette étude en élaborant un critère plus sensible aux variations des paramètres (25) :

la moyenne des carrés des erreurs  $E(\xi^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^2$

Les performances spatio temporelles réalisées lors de tâches de tracking sont ainsi caractérisées par deux critères :

pour les erreurs de position  $D_i$  :  $E(|D|)$  et  $E(D^2)$

pour les erreurs en retard  $R_i$  :  $E(|R|)$  et  $E(R^2)$

Les figures 4.1 et 4.2 indiquent l'évolution de la valeur du critère  $E(|D|)$  en fonction de la vitesse de la cible pour 4 sujets



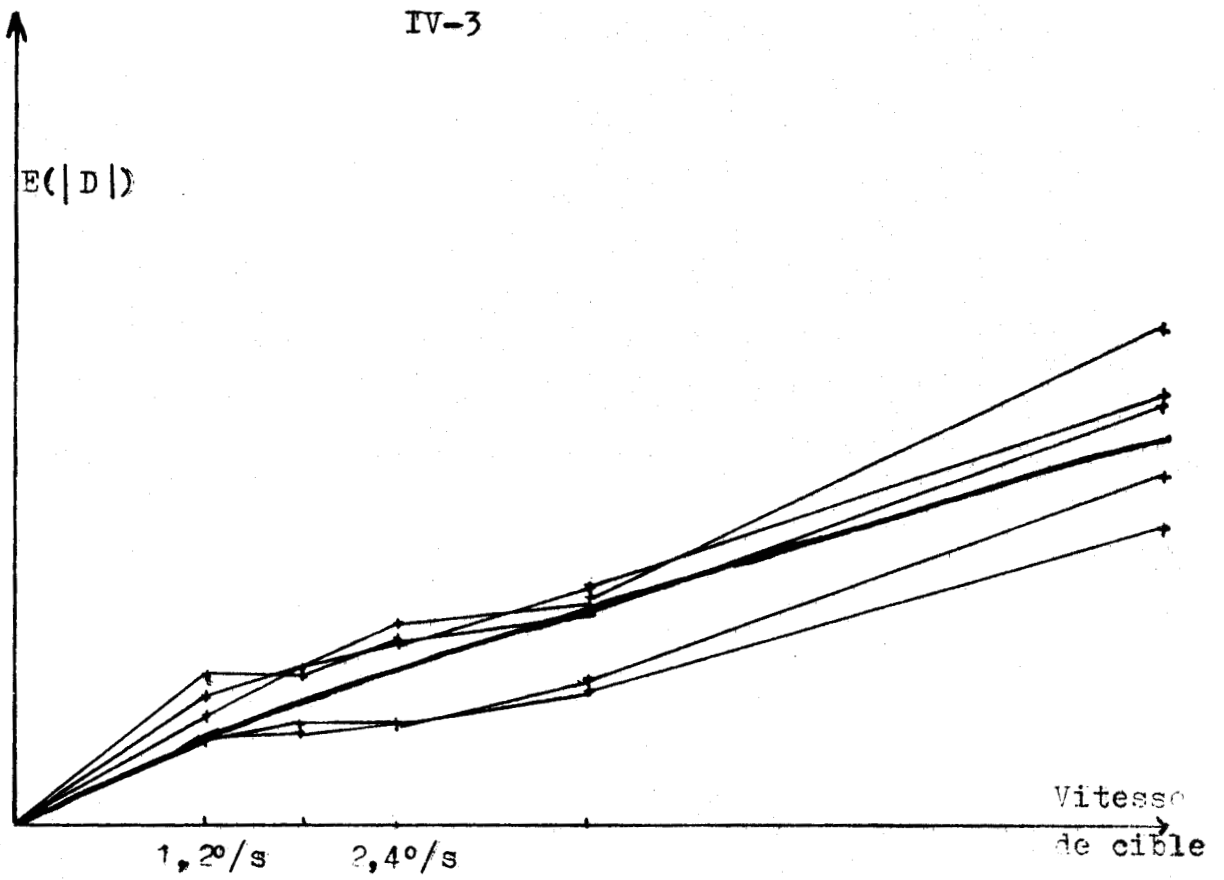


Fig 4.1: Critère  $E(|D|) = f(\text{vitesse cible})$  -Commande en position

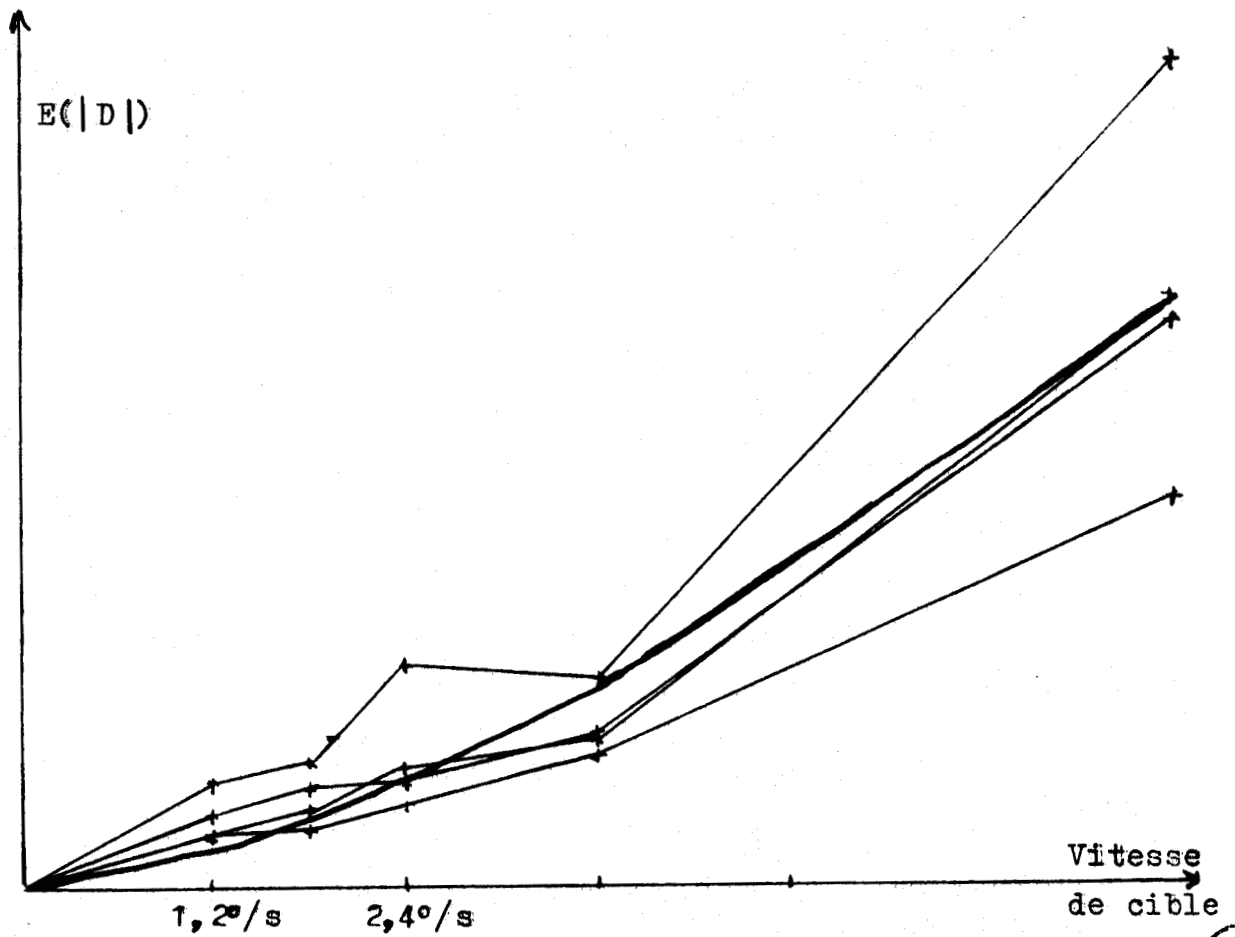


Fig 4.2: Critère  $E(|D|) = f(\text{vitesse cible})$  - Commande en vitesse

lors d'une commande en position (4.1) et en vitesse (4.2) et font apparaître :

\* une augmentation plus rapide de la valeur du critère en fonction de  $V$  cible lorsque la commande est en vitesse, ce qui rejoint les conclusions énoncées au III. 3.3

\* que la fonction  $E(|D|) = f(V \text{ cible})$  est une fonction croissante

Ce dernier point nous a conduit à essayer d'identifier cette fonction à une fonction  $a V^b$  pour les valeurs de  $V$  comprises dans l'intervalle  $[1, 2^\circ/\text{sec} ; 7, 2^\circ/\text{sec}]$

a) Méthode d'identification utilisée

Une des possibilités d'identification des paramètres  $a$  et  $b$  de la fonction modèle  $a V^b$  consiste à minimiser l'erreur quadratique fonction objet - fonction modèle (26).

on note :  $i_k$   $i^{\text{ème}}$  valeur expérimentale du  $k^{\text{ème}}$  sujet

$v_{i_k}$   $i^{\text{ème}}$  valeur de la vitesse cible du  $k^{\text{ème}}$  sujet

(  $i$  de 1 à 5 vitesses cibles possibles -  $k$  de 1 à 4 sujets)

il faut ainsi minimiser

$$\sum_{k=1}^4 \left( \sum_{i=1}^5 (Y_{ik} - a v_{ik}^b)^2 \right) =$$

$$\sum_{k=1}^4 \left( \sum_{i=1}^5 Y_{ik}^2 + \sum_{i=1}^5 a^2 v_{ik}^{2b} - \sum_{i=1}^5 2a Y_{ik} v_{ik}^b \right) \text{ minimum lorsque}$$

$$\frac{d}{da}(\text{erreur quadratique})=0 = \sum_{k=1}^4 \left( 2a \sum_{i=1}^5 v_{ik}^{2b} - \sum_{i=1}^5 Y_{ik} v_{ik}^b \right)$$

L'erreur quadratique est minimale pour :

$$a = \frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik} v_{ik}^b}{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 v_{ik}^{2b}} \quad (\text{pour un } b \text{ donné})$$

Un examen préliminaire des tracés a permis de connaître le domaine de variation maximum du paramètre  $b$ .

Sur ces bases, nous avons fait varier  $b$  de 0,5 à 4 avec un pas de 0,1 pour rechercher le minimum minimorum des erreurs quadratiques obtenues pour chaque couple  $(a_j, b_j)$  (fig 4.3)

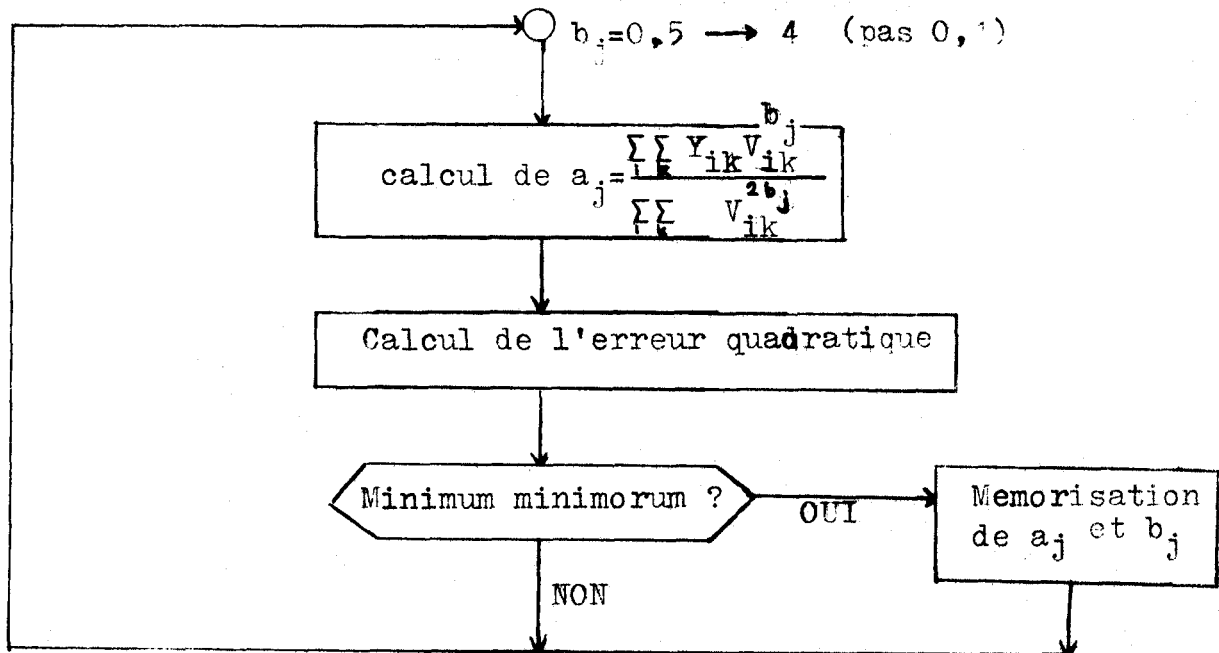


Fig 4.3: Algorithme de recherche de la fonction modèle  $y = a_j V^b_j$

Il faut noter que cet algorithme ne minimise pas le nombre de calculs mais semble se justifier de par sa simplicité et de par le faible nombre d'opérations effectuées ( $i k = 5 \times 4 = 20$ ).

De plus, il permet de rendre compte de l'évolution des minima des erreurs quadratiques en fonction du paramètre  $b_j$  (fig 4.4 et 4.5). Les figures 4.4 et 4.5 mettent en effet en évidence l'existence d'un minimum minimorum franchement marqué justifiant la méthode employée.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.6 où l'on remarquera surtout les valeurs obtenues pour  $b$  ; en effet la connaissance du  $b$  de la fonction  $a V^b$  a beaucoup plus d'intérêt que  $a$  pour

rendre compte des variations du critère en fonction de la vitesse de la cible (27).

Critère	Commande en position	Commande en vitesse
$E( R )$	$= 930 v^{0,7}$	$= 1400 v^{1,1}$
$E( D )$	$= 190 v^{0,8}$	$= 320 v^{1,5}$
$E(R^2)$	$= 1950 v^{1,4}$	$= 5770 v^2$
$E(D^2)$	$= 100 v^{1,7}$	$= 468 v^{3,4}$

Fig 4.6: Evolution des critères en fonction de la vitesse de la cible

#### b) Précision de l'identification

L'étape suivante a consisté à étudier dans quelle mesure et avec quelle précision l'identification entre courbe théorique et expérimentale était valable.

Un premier renseignement nous est fourni par le tracé des iso-distances dans le plan paramétrique (a,b).

Ces tracés (fig 4.7 et 4.8) renseignent sur la façon avec laquelle l'erreur quadratique tend vers un minimum (28).

Le tracé d'une iso-distance  $D_i$  consiste à définir tous les couples (a,b) du plan paramétrique qui impliquent la même erreur quadratique  $D_i$ :

$$\text{c.a.d } a \text{ et } b \text{ tels que : } \sum_{k=1}^4 \left( \sum_{i=1}^5 (Y_{ik} - aV_{ik})^2 \right) = D_i$$

$$\Rightarrow a^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 V_{ik}^2 - 2a \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik} V_{ik} + \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik}^2 - D_i = 0$$

ce qui a permis de conclure que pour chaque paramètre  $b_j$  il existe deux solutions  $a_{j1}$  et  $a_{j2}$ :

$$a_{j_2} = \frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik} V_{ik}^b \pm \sqrt{A}}{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 V_{ik}^{2b}}$$

dans lequel  $A = \left( \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik} V_{ik}^b \right)^2 - \left( \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik}^2 - D_i \right) \left( \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 V_{ik}^{2b} \right)$

Si l'on appelle  $D_0$  le minimum minimorum des erreurs quadratiques les iso-distances présentées fig 4.7 et 4.8 ont été calculées pour  $D_0$ ,  $D_0 + \frac{D_0}{100}$ ,  $D_0 + \frac{2D_0}{100}$ ,  $D_0 + \frac{5D_0}{100}$ ,  $D_0 + \frac{10D_0}{100}$ ,  $D_0 + \frac{25D_0}{100}$ ,  $D_0 + \frac{100D_0}{100}$ ; ces figures mettent ainsi bien en évidence la conver-

gence de l'erreur quadratique vers un minimum  $D_0$  obtenu pour un couple (a,b) compte tenu de la précision de recherche effectuée sur b (intervalle de 0,1).

La méthode des iso-distances permet ainsi d'apprécier la décroissance de l'erreur quadratique lorsque l'on approche du couple  $(a_0, b_0)$  obtenu pour D minimum. Le dernier point de cette étude consiste à chiffrer la précision de l'identification réalisée.

Une première méthode (29) réside dans le calcul du pourcentage d'écart modèle-objet P tel que

$$P = 100 \times \frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 (Y_{ik} - a_0 V_{ik}^{b_0})^2}{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 (Y_{ik} - M_{ik})^2} \quad \text{où} \quad M_{ik} = \frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^5 Y_{ik}}{ik}$$

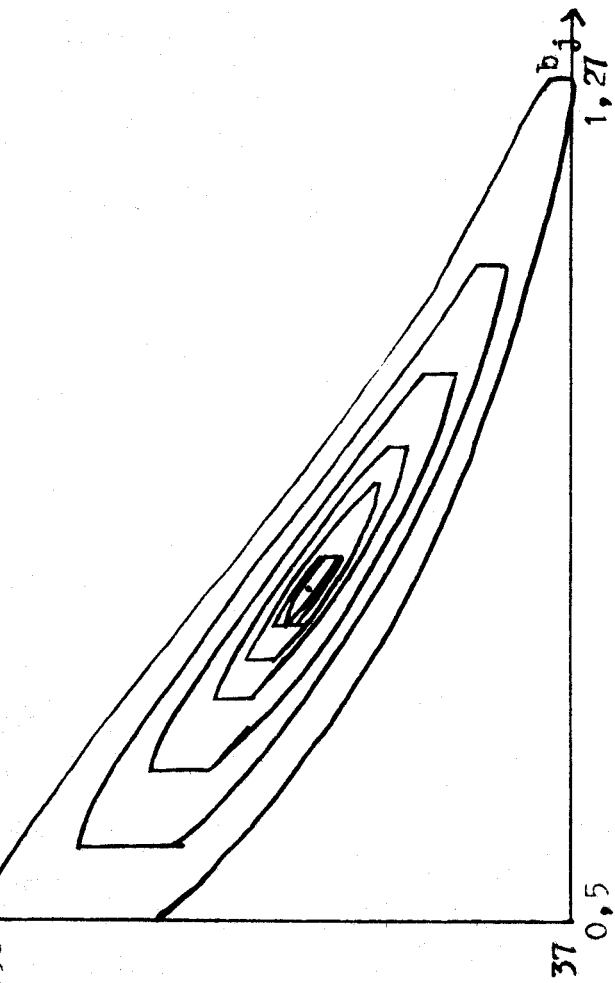


Fig 4.7: Iso-distances dans le plan  $(b_j, a_j)$   
Commande en position

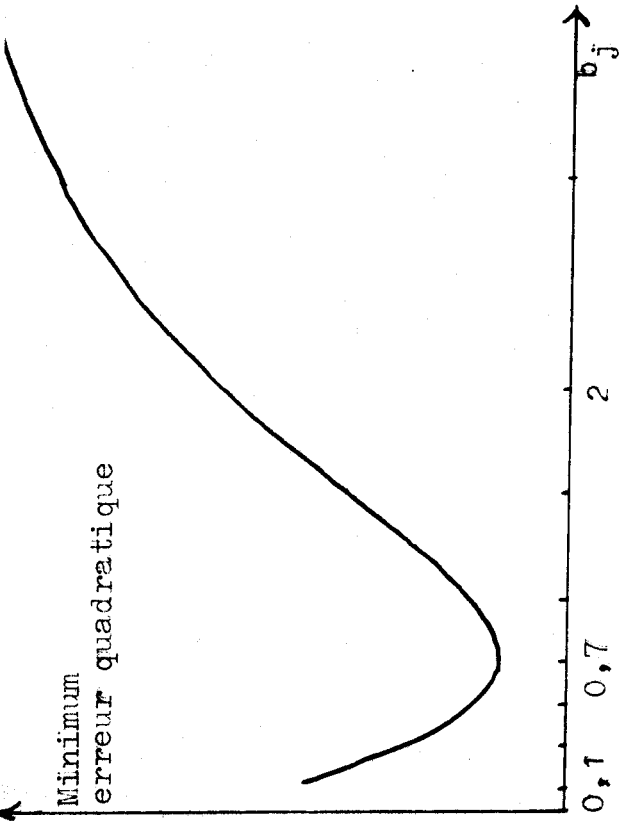


Fig 4.4: Courbe  $D_{\text{mini}} = f(b_j)$  Com. en pos.

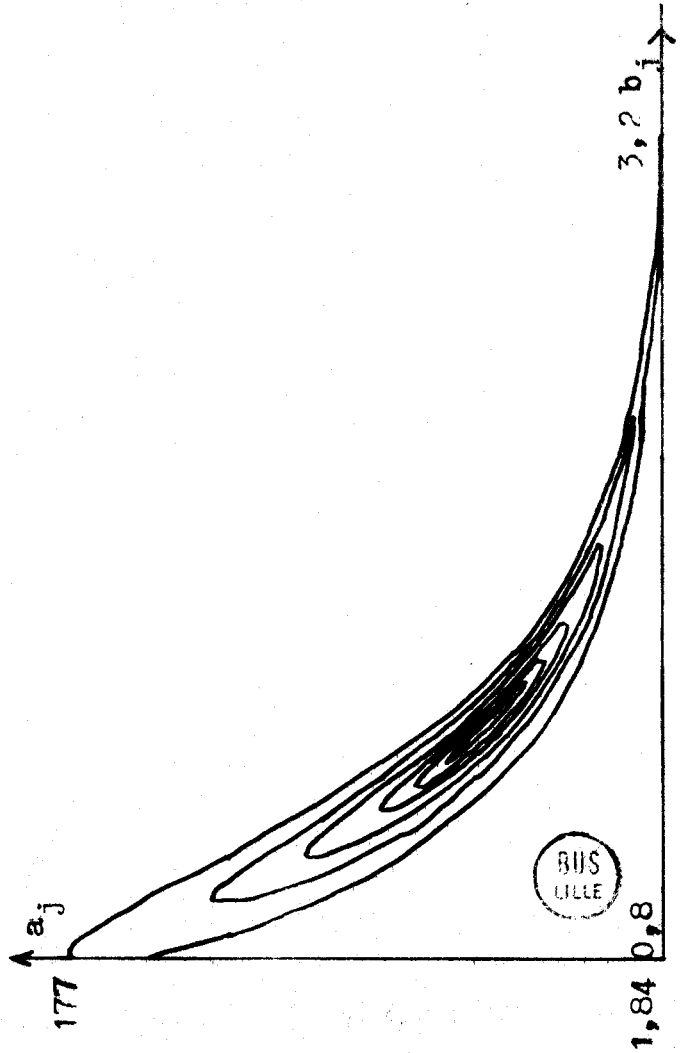


Fig 4.8: Iso-distances  $(b_j, a_j)$  Com. en vitesse

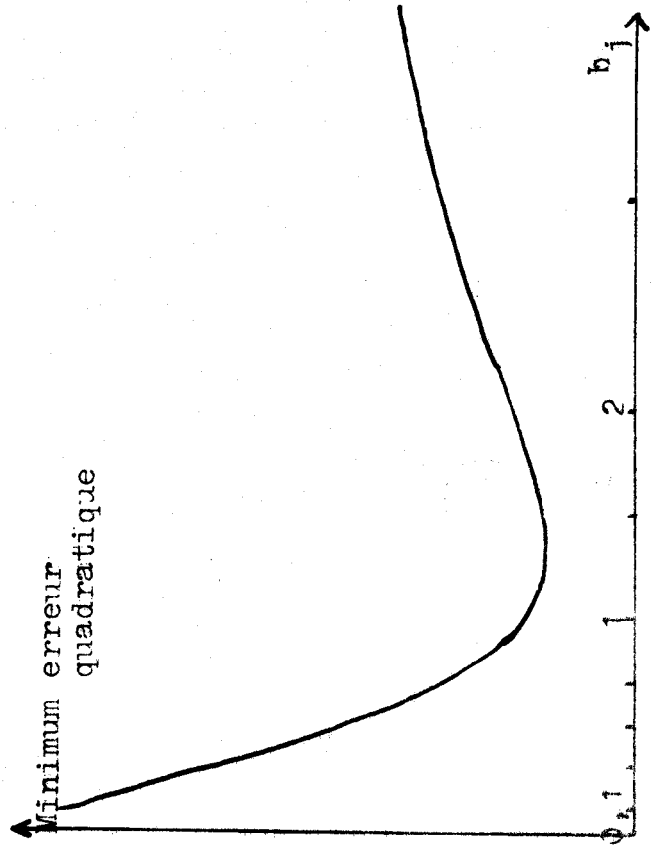


Fig 4.5: Courbe  $D_{\text{mini}} = f(b_j)$  Com. en vit.

$M_{ik}$  étant introduit pour ramener la "sortie objet" à une valeur moyenne nulle.

Le pourcentage d'écart sur l'identification de chaque critère est indiqué dans le tableau 4.9. Il faut noter que cet écart n'est jamais élevé bien qu'il s'agisse de mesures effectuées sur des performances d'opérateur humain susceptibles d'être plus ou moins dispersées.

Ces premiers résultats sont complétés par le calcul des coefficients de corrélation entre les  $Y_{ik}$  et les  $a_o V_{ik}^o$  (notés CORR : 30,31).

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{j=1}^{ik} (Y_j - M_y)(a_o V_j^o - M_v)}{N \sigma_y \sigma_v} \quad (\text{cf tableau 4.9})$$

- dans lequel
- $M_y$  : Moyenne des Sorties "objet"
  - $M_v$  : Moyenne des Sorties "modèle"
  - $N$  : Nombre total de valeurs ( = 20 )
  - $\sigma_y$  : écart type des Sorties "objet"
  - $\sigma_v$  : écart type des Sorties "modèle"

Commande en  
Position

Commande en  
Vitesse

CRITERES		P	CORR		P	CORR
E( R )	$=a_o V^{0,7}$	5%	0,88	$=a_o V^{1,1}$	3%	0,96
E( D )	$=a_o V^{0,8}$	4%	0,91	$=a_o V^{1,5}$	7%	0,92
E(R <sup>2</sup> )	$=a_o V^{1,4}$	10%	0,89	$=a_o V^2$	6%	0,96
R(D <sup>2</sup> )	$=a_o V^{1,7}$	10%	0,90	$=a_o V^{3,4}$	10%	0,92

Fig 4.9: Pourcentages d'erreurs d'identification et coefficients de corrélation objet-modèle

Les résultats consignés dans le tableau ci-dessus mettent en évidence le faible écart entre sortie modèle et sortie objet et permettent ainsi une comparaison rigoureuse entre les différents critères obtenus.

### c) Conclusion

Les divers critères de performance présentés dans cette étude mettent ainsi en évidence les caractéristiques de la commande par mouvements de tête dans une tâche de tracking. L'identification de ces critères permet en particulier la comparaison des erreurs réalisées en position et en retard : lors d'une commande en position l'erreur en position (critère  $V_{\text{cible}}^{1,7}$ ) est plus sensible aux variations de la vitesse de la cible que l'erreur en retard (critère  $V_{\text{cible}}^{1,4}$ ) ; d'autre part, on note que ces erreurs augmentent plus vite avec la vitesse de la cible lors d'une commande en vitesse (Puissance 2 contre 1,4 en position pour  $E(R^2)$  par exemple)



#### IV. 1.2 : Etude des répartitions des erreurs de pistage

L'étude précédente a permis de dégager divers critères de performances de commande obtenus à partir des caractéristiques globales des erreurs (moyenne des valeurs absolues, moyenne des carrés). Cependant, il est à craindre que ces caractéristiques globales rendent imparfaitement compte des erreurs de pistage réalisées ; l'objet de ce paragraphe est ainsi d'étudier les distributions des erreurs réalisées autour de leurs valeurs moyennes et d'essayer de les identifier à des lois classiques permettant des calculs mathématiques plus souples et surtout de donner un sens à des mesures statistiques telles que l'écart type (dispersion des mesures).

##### a) Histogrammes expérimentaux

Les histogrammes (fig 4.10) représentent les variations des fréquences absolues  $F_i$  observées pour chaque erreur de pistage  $\xi_i$  ; les deux exemples présentés ont été obtenus lors d'une commande en position, gain 1, vitesse cible 1,2°/sec ( a ) et lors d'une commande en vitesse, de mêmes paramètres ( b ).

Des essais préliminaires montrant la similitude entre les histogrammes de chaque sujet, les courbes que nous présentons ici ont été obtenues en moyennant les résultats de tous les sujets.

Le tableau 4.11 indique les domaines de variations des erreurs de pistage en fonction de la vitesse de la cible ; il permet ainsi de comparer la commande effectuée à une commande "parfaite" (Domaine d'erreurs = 0)

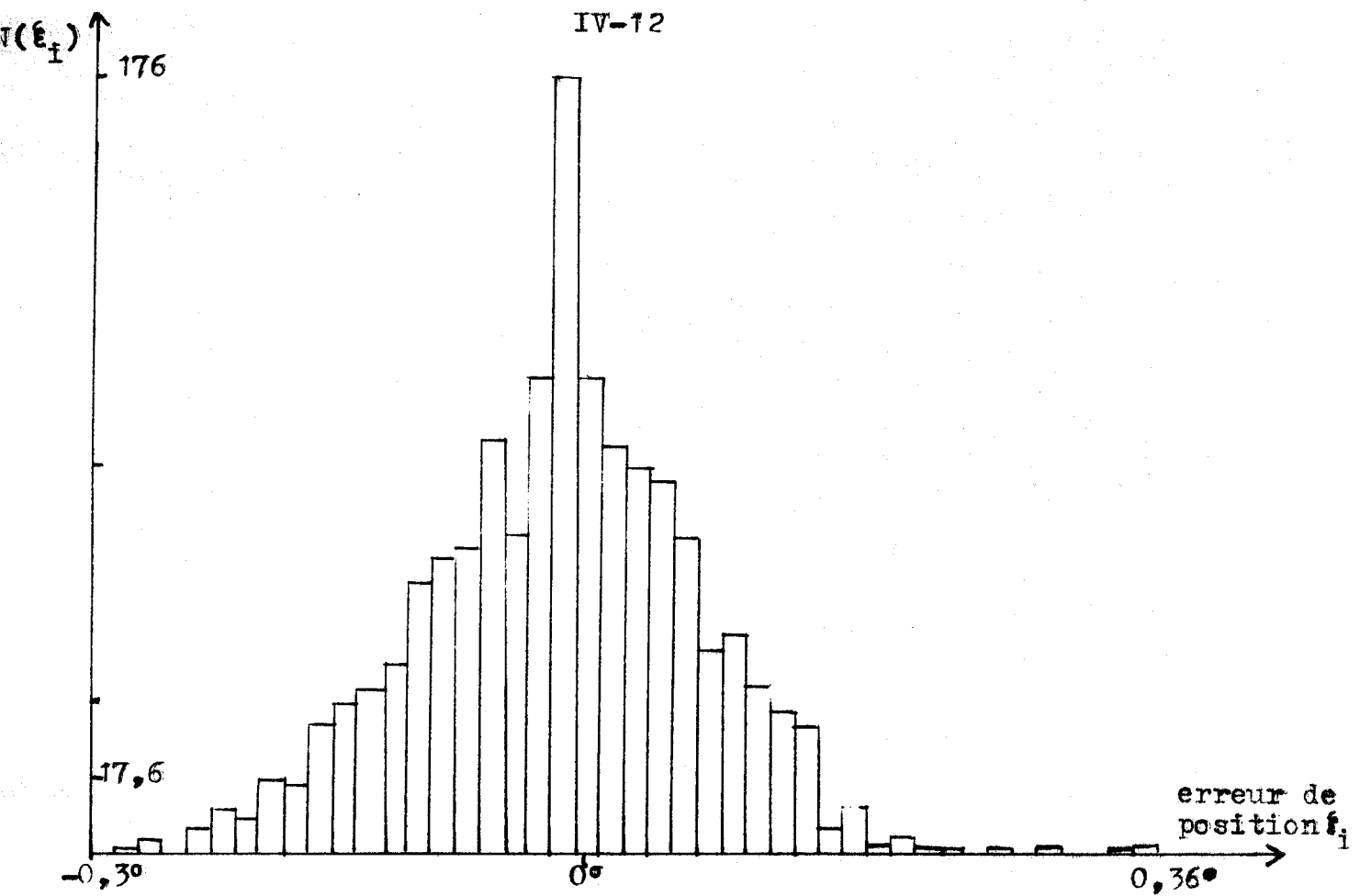


Fig 4.10.a: Histogramme de répartition des erreurs de position  
(commande en position- vitesse cible:  $1,2^\circ/s$ )

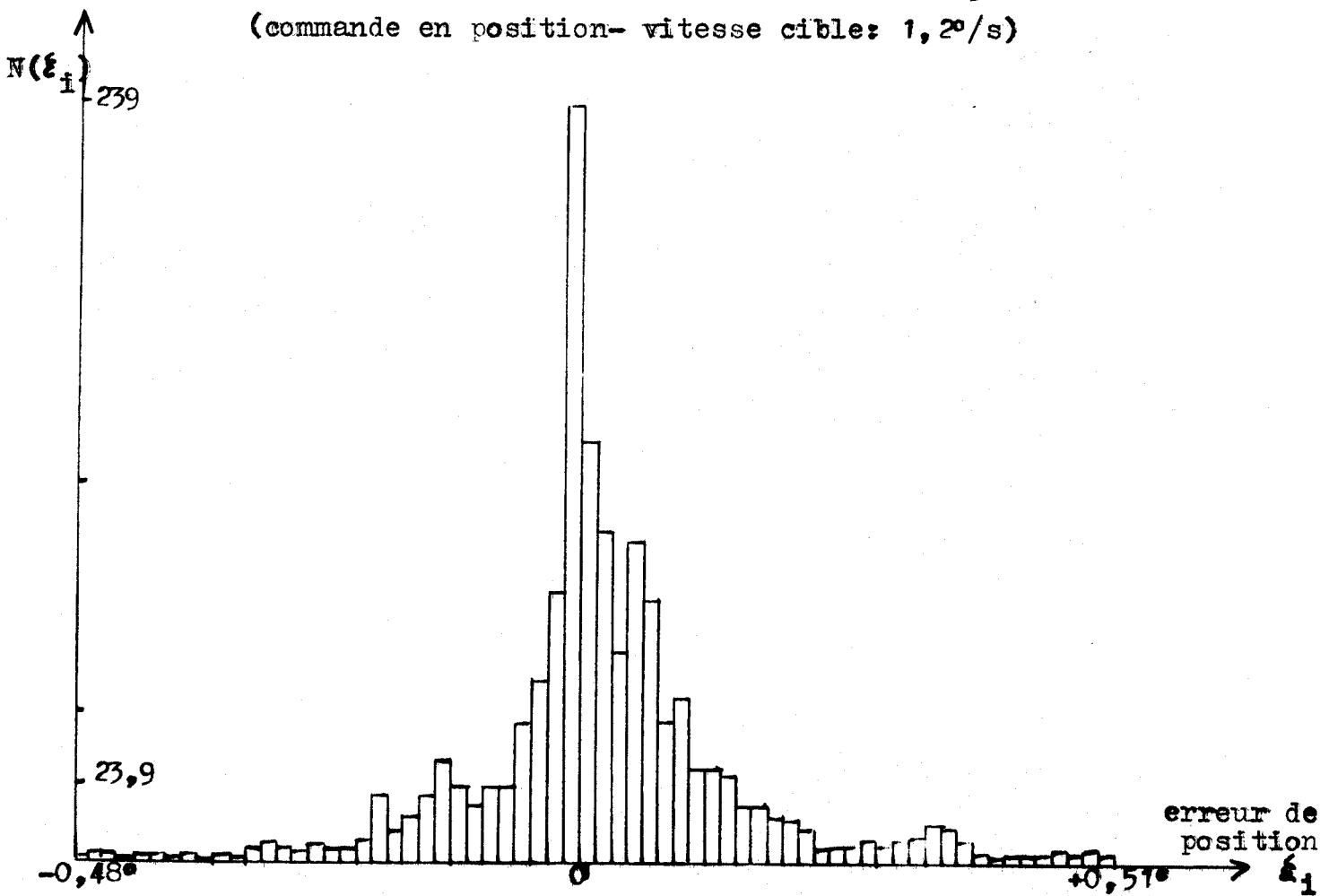


Fig 4.10.b: Histogramme de répartition des erreurs de position  
(commande en vitesse- vitesse cible  $1,2^\circ/s$ )



	Vitesse cible	Bornes		Intervalles
		MIN	MAX	
ERREURS EN POSITION (DEGRES)	1,2°/s	-0,3	0,36	0,66
	1,8°/s	-0,46	0,65	1,11
	2,4°/s	-0,63	0,79	1,42
	3,6°/s	-0,61	0,74	1,35

Commande en position

	Vitesse cible	Bornes		Intervalles
		MIN	MAX	
RETARDS (SECONDES)	1,2°/s	-1,09	0,08	1,17
	1,8°/s	-1,54	0,03	1,57
	2,4°/s	-2,27	0,08	2,35
	3,6°/s	-2,35	0,45	2,8

	Vitesse cible	Bornes		Intervalles
		MIN	MAX	
	1,2°/s	-0,48	0,51	0,99
	1,8°/s	-0,5	0,54	1,04
	2,4°/s	-1	0,7	1,7
	3,6°/s	-1,08	1,12	2,2

Commande en vitesse

	Vitesse cible	Bornes		Intervalles
		MIN	MAX	
	1,2°/s	-1,45	0,36	1,81
	1,8°/s	-2,24	0,08	2,32
	2,4°/s	-2,24	0,34	2,58
	3,6°/s	-3,86	0,17	4,03

Fig 4.11: Domaines de variation des erreurs de pistage en fonction de la vitesse de la cible

On remarque, en accord avec les résultats du III.3, que :

- \* les domaines de variation des erreurs augmentent avec la vitesse de la cible
- \* ces domaines sont plus grands lors d'une commande en vitesse
- \* les erreurs en position semblent réparties autour d'une moyenne nulle
- \* les retards sont surtout distribués pour des valeurs négatives (suiveur en retard sur la cible) mais aussi pour quelques valeurs positives (prédiction)
- \* on retrouve  $\forall i$  : erreur en position  $POS_i \ll \pm 1^\circ$

Les distributions observées sont unimodales, symétriques et en forme de cloche ; les essais d'identification vont ainsi être effectués en utilisant un modèle gaussien.

b) Identification des histogrammes expérimentaux

Les deux paramètres caractérisant une distribution Gaussienne sont  $M$  et  $\sigma$  respectivement moyenne et écart type de la distribution ; le problème est donc d'identifier ces deux paramètres de la fonction modèle  $F(\xi_i)$  à la distribution expérimentale avec :

$$F(\xi_i) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\xi_i - M)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$N$ : nombre total de valeurs  
 $\xi_i$ : erreur de pistage

L'identification a été réalisée en utilisant une méthode bidimensionnelle de recherche du couple  $(M_0, \sigma_0)$  optimal et minimisant le nombre de calculs (Méthode de Fibonacci: 29).

Les paramètres caractéristiques de la fonction modèle  $(M_0, \sigma_0)$  obtenu par cette méthode d'identification sont présentés dans le tableau 4.12 dans lequel figure aussi les pourcentages d'erreurs d'identification définis au paragraphe précédent.

c) Conformité du modèle obtenu - test du  $\chi^2$ 

Il nous reste à présent à savoir si cette représentation par une loi de Gauss est conforme à la distribution expérimentale. La mesure de l'écart entre distribution expérimentale et théorique est classiquement effectuée à l'aide du test du  $\chi^2$  ce test consiste à calculer la valeur

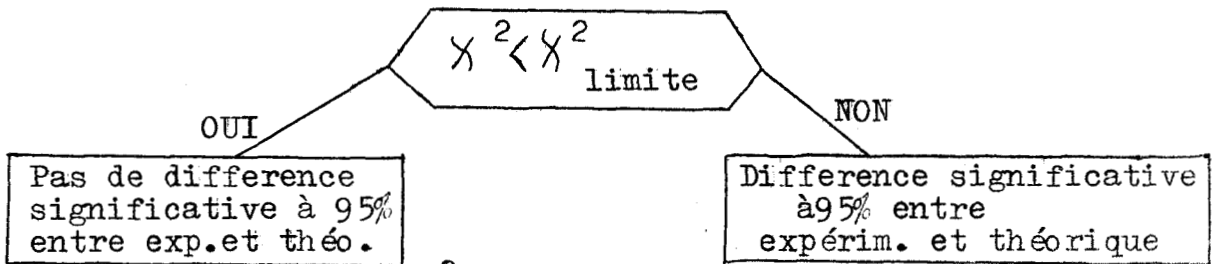
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{[N_{\text{ex}}(i) - N_{\text{th}}(i)]^2}{N_{\text{th}}(i)}$$

dans lequel  $N_{\text{ex}}(i)$  = Effectif de la  $i^{\text{ème}}$  valeur expérimentale

$N_{\text{th}}(i)$  = Effectif de la  $i^{\text{ème}}$  valeur théorique

$k$  = nombre total de valeurs

Il faut alors comparer cette valeur  $\chi^2$  à une valeur limite  $\chi^2_{\text{limite}}$  fonction de deux paramètres : nombre de degré de liberté (dans notre cas =  $K - 1$ ) et coefficient de sécurité (choisi à 95 %)



Les valeurs des différents  $\chi^2$  calculés, présentées dans le tableau 4.12, indiquent que les différences entre distribution expérimentale et modèle ne sont pas significatives à 95 %.

Les histogrammes expérimentaux peuvent ainsi être assimilés à des courbes Gaussiennes permettant statistiquement de considérer l'écart type comme un indice de dispersion des erreurs autour de leur valeur moyenne  $M$ , en particulier :

Il existe 99 % de chances de trouver l'erreur dans l'intervalle

$$[M - 2,6 \sigma ; M + 2,6 \sigma]$$

Il existe 95 % de chances de trouver l'erreur dans l'intervalle

$$[M - 2 \sigma ; M + 2 \sigma]$$

#### d) Conclusion

Nous pouvons ainsi élaborer un nouveau critère de performance rendant compte de la dispersion des erreurs autour de leur moyenne ; en effet la mesure de l'écart type permet de définir un domaine  $M \pm 2\sigma$  dans lequel on a 95 % de chances de trouver l'erreur de pistage ; plus cet écart type est petit, plus petites seront aussi les variations de l'erreur.

Les variations de ce dernier critère en fonction des paramètres de la commande, présentés fig 4.13, rejoignent les résultats précédents (Chapitre III et IV 3.1) et rendent ainsi compte de la qualité des divers types de commandes envisagés.

Com- mande en	Vitesse de la cible	Moyenne expérim. en 1/1000	Moyenne modèle degré	$\sigma$ exp. en 1/1000	$\sigma$ mod. degré	$\chi^2$ exp.	$\chi^2$ lim. à 95%
POS	1,2°/s	11	15	8,5	8	2,8	69
POS	1,8°/s	10,8	2	110	80,5	22,8	105
POS	2,4°/s	17,7	26	148	101	53,5	130
POS	3,6°/s	4,2	3,1	165	117	94	124

VIT	1,2°/s	-2,4	-8,7	133	71	81	95,5
VIT	1,8°/s	34,5	25	169	82	56	100
VIT	2,4°/s	51,5	47	261	116	245	152

## ERREURS EN POSITION

Com- mande en	Vitesse de la cible	Moyenne expérim. en 1/1000 sec.	Moyenne modèle	$\sigma$ exp. en 1/1000 sec.	$\sigma$ mod. sec.	$\chi^2$ exp.	$\chi^2$ lim. à 95%
POS	1,2°/s	-477	-474	233	234	2,6	68
POS	1,8°/s	-656	-669	346	350	10,8	95
POS	2,4°/s	-920	-906	480	522	24,5	116
POS	3,6°/s	-1006	-1078	675	781	39	136

VIT	1,2°/s	-375	-230	400	340	29,5	95
VIT	1,8°/s	-741	-407	605	710	65	116
VIT	2,4°/s	-900	-838	600	710	39,5	127

## RETARDS SUR LA CIBLE

Fig 4.12: Tableau récapitulatif des caractéristiques "objet" et "modèle" des distributions des erreurs de pistage.

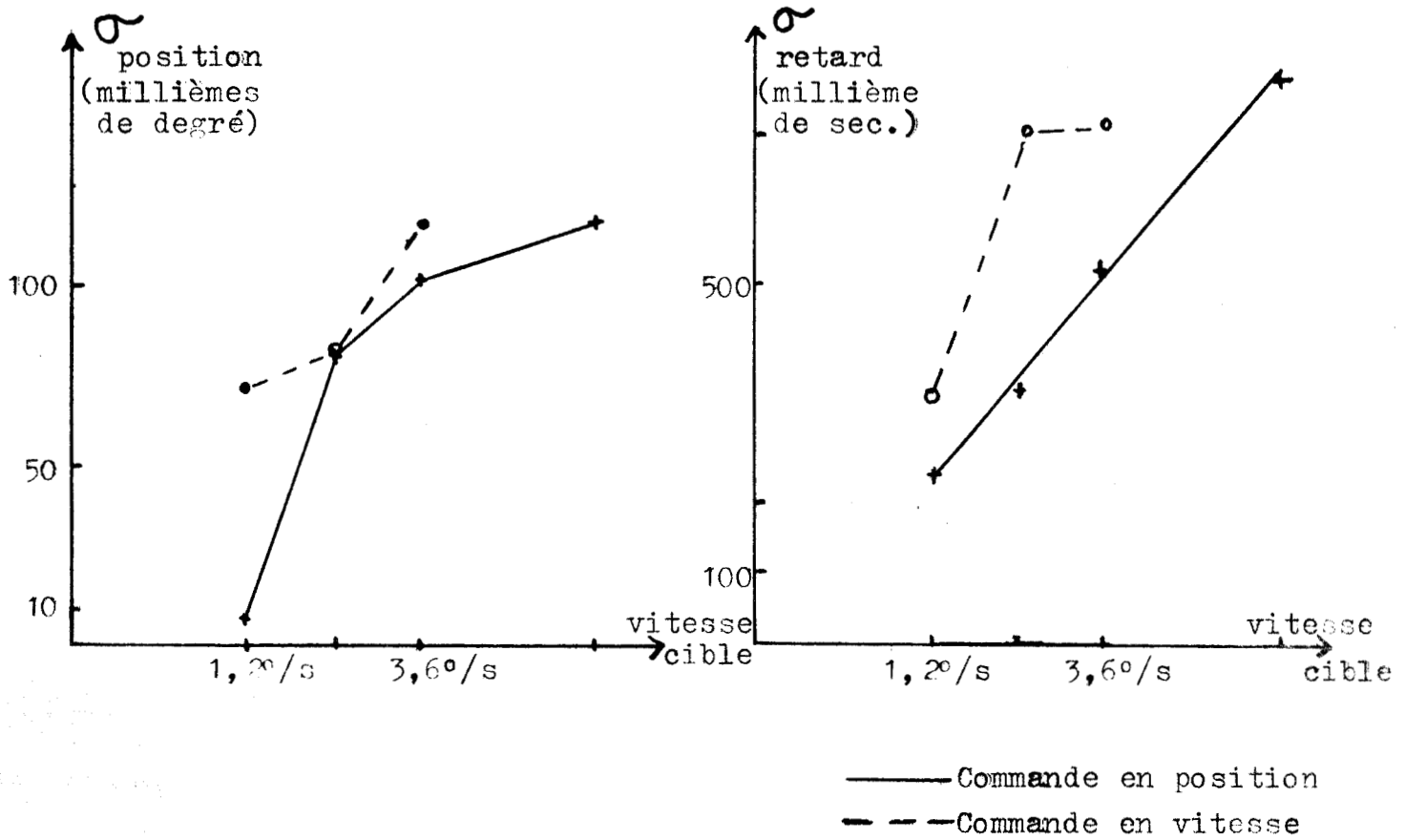


Fig 4.13: Evolution du "critère ecart-type" en fonction de la vitesse de la cible.

IV. 2 : Etude de critères de performance lors de suivi de contour

L'étude précédente a permis de dégager des critères de performances lors de tâches de pistage de spot cible se déplaçant avec une vitesse fixée ; le sujet ayant dans cette expérience ajusté la vitesse du spot qu'il commande à celle du spot cible. Au contraire, dans une tâche de suivi de contour, l'opérateur connaît le contour qu'il doit suivre et effectue la tâche avec la rapidité qu'il désire. Nous lui avons donc demandé d'effectuer cette tâche 10 fois avec les contraintes suivantes :

- aller très vite (1 fois)
- aller vite (2 fois)
- aller ni vite, ni lentement (4 fois)
- aller lentement (2 fois)
- aller très lentement (1 fois)

Ces contraintes font bien sûr intervenir la notion subjective que le sujet a de la rapidité d'exécution de la tâche mais permettent l'étude des relations erreurs-rapidité d'exécution dans une gamme de valeurs où les critères élaborés rendront compte des performances globales dans ce type de tâche.

Le tableau 4.14 indique les temps mis par le sujet étudié dans les 10 suivis de contour effectués

	Très vite	Ni vite, VITE ni lentement	Lentement	Très lentement
Commande en position	6,46	8,97- 12,88-13,88 10,08 14,68-16,21	18,04-20,55	22,71
Commande en vitesse	10,35	13,98 17,50-19 16,34 19,36-19,62	20-23,8	24,39

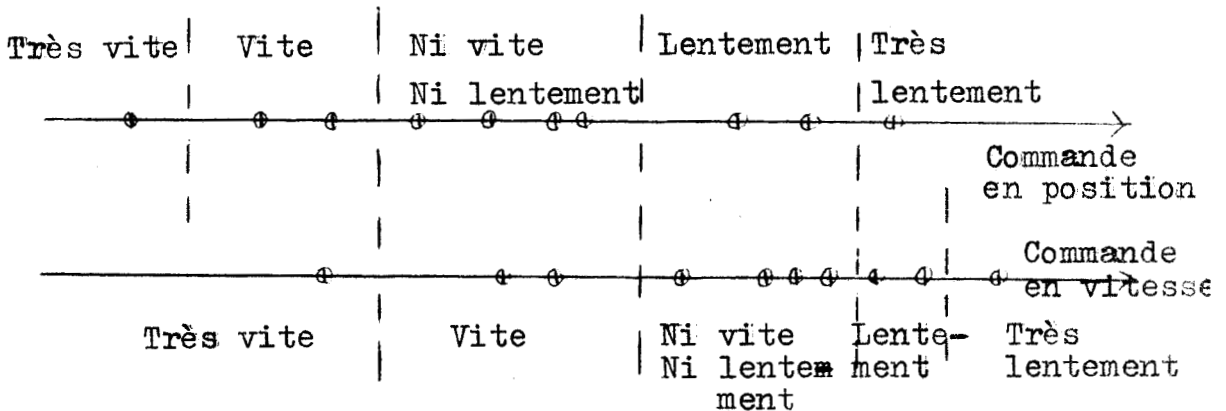
Tableau 4.14: Temps d'exécution des suivis de contour (en secondes)

Les résultats exposés dans ce tableau nécessitent quelques commentaires :

- \* Le sujet semble avoir une notion plus précise de la rapidité avec laquelle il effectue la tâche lors



d'une commande en position ; la partition des classes obtenue (Tableau 4.14) est en effet plus sélective que lors d'une commande en vitesse comme l'indique le schéma ci-dessous :



\* Ce schéma ci-dessus met aussi en évidence le décalage des classes lors des deux types de commandes : Une tâche exécutée très vite lors d'une commande en vitesse correspond à une tâche exécutée vite lors d'une commande en position.

a) Critères de performances retenus

De la même façon que dans le paragraphe précédent, nous avons retenu les deux mesures :

moyenne des valeurs absolues des erreurs :

$$E ( |X| ) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i|$$

moyenne des carrés des erreurs  $E ( X^2 ) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2$

dans lesquelles N = nombre de valeurs des  $X_i$  :

$X_i$  = erreur algébrique par rapport au contour imposé

Les répartitions des critères ainsi obtenus sont représentés Fig 4.15 dans chacune des configurations (commande en position ou en vitesse (Gain 1) ) et en fonction de la rapidité d'exécution de la tâche, c'est-à-dire du temps mis pour effectuer le suivi de contour imposé.

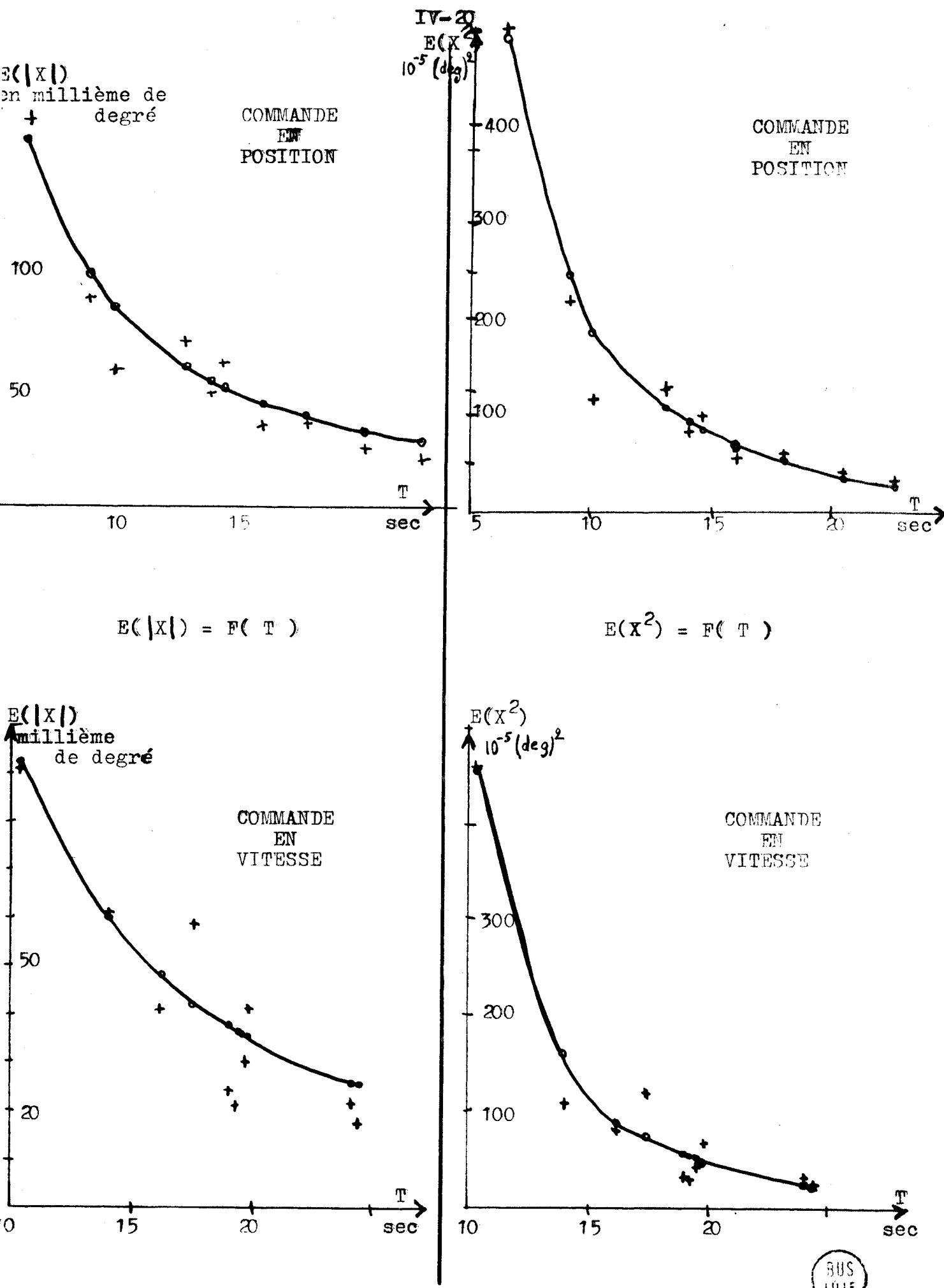


Fig 4.15: Répartitions expérimentales des critères et des modèles.  
 (+: expérim. ; o: modèle )

L'examen de ces tracés semble montrer que les relations liant ces critères au temps de trajet T sont de la forme

$$\frac{E(|X|)}{E(X^2)} = \frac{a}{T^b}$$

L'identification des critères de performances sera ainsi effectuée en utilisant une fonction modèle de type hyperbolique  $\frac{a}{T^b}$

b) Identification des critères

La fonction modèle  $\frac{a}{T^b}$  peut aussi s'écrire  $aT^{-b}$ ; l'algorithme présenté au paragraphe précédent (IV. 1.1) peut ainsi être utilisé à nouveau en changeant le domaine de variation du paramètre b du IV.1. (domaine négatif) :

Il s'agit de minimiser l'écart quadratique :

$$\sum_{i=1}^{10} (X_i - aT_i^{-b})^2 \quad \text{avec } b < 0$$

Ce qui donne les résultats suivants :

$$\begin{array}{ll} \text{Commande en position} & E(|X|) = \frac{a}{T^{1,4}} \quad E(X^2) = \frac{a}{T^{2,2}} \\ \text{Commande en Vitesse} & E(|X|) = \frac{a}{T^{1,5}} \quad E(X^2) = \frac{a}{T^{3,4}} \end{array}$$

Les fonctions modèles obtenues sont également tracées sur la fig. 4.15 indiquant les mesures expérimentales ce qui permet une comparaison visuelle des écarts objet-modèle.

La précision de l'identification, chiffrée par le critère

$$100 \times \frac{\sum_{i=1}^{10} (a_0 T_i^{-b_0} - X_i)^2}{\sum_{i=1}^{10} (X_i - X)^2} \quad \text{reste inférieure à 15\%}$$

La mesure du coefficient de corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs "modèles" sont :

$$\begin{array}{ll} \text{Commande en position} & 0,95 (E(X^2)) \quad \text{et} \quad 0,91 (E(|X|)) \\ \text{Commande en vitesse} & 0,96 (E(X^2)) \quad \text{et} \quad 0,84 (E(|X|)) \end{array}$$

Ces mesures permettent ainsi de pouvoir rendre compte des

critères de performances à l'aide de modèles de la forme  $\frac{a}{T^b}$  et d'étudier les variations de ces critères en fonction de la rapidité d'exécution de la tâche.

c) Conclusions

L'étude du critère le plus sensible aux variations du temps d'exécution,  $E(X^2)$ , indique que les performances se dégradent en  $\frac{a}{T^b}$  lorsque la rapidité d'exécution de tâche augmente, dégradation accentuée lors d'une commande en vitesse. A partir d'une certaine vitesse d'exécution les écarts relatifs deviennent ensuite moins importants (de l'ordre de 10% entre lentement et très lentement).

### IV. 3 : Conclusions

L'étude ci-dessus a conduit à l'évaluation des performances réalisées lors d'une commande par les mouvements céphaliques ; l'identification de ces critères fournit en particulier des renseignements concernant le domaine paramétrique (vitesse cible, rapidité d'exécution, nature de la commande, gain) permettant une bonne qualité de réalisation de la tâche.

Les résultats présentés conduisent ainsi au tableau 4.16 pouvant servir d'aide lors de l'élaboration du "cahier des charges" nécessaire à l'obtention de la meilleure commande à l'aide du dispositif utilisé

	VITESSE CIBLE	GAIN	RAPIDITE D'EXECUTION	PRECISION DE LA COMMANDE
Commande en pos.	3,6°/s	$0,5 < G < 1,5$	3°/s	1/4°
Commande en vit.	3,6°/s	$0,5 < G < 1,5$	2°/s	1/4°

Fig 4.16: Domaine de variation des paramètres permettant une bonne qualité de commande.

Il convient donc dans le chapitre suivant d'envisager, à la lumière des résultats précédents, les possibilités de commande d'un engin à deux degrés de liberté à l'aide du capteur des mouvements céphaliques employé.

C H A P I T R E V

COMMANDABILITE D UN ENGIN A DEUX DEGRES

DE LIBERTE A L AIDE D UN CAPTEUR DE

MOUVEMENTS CEPHALIQUES A JAUGES DE CONTRAINTE

Les chapitres précédents ont exposé les principes d'une simulation de commande par les mouvements de tête. Le choix des diverses tâches de commande (pointages - suivis de contours - pistages) a d'une part permis l'étude des composantes spatio-temporelles des signaux de commande céphaliques ; l'élaboration de critères de performance a d'autre part caractérisé l'évolution des performances en fonction des paramètres de la commande.

Ce dernier chapitre a pour but d'étudier l'application pratique des résultats fournis par la simulation précédente. La faisabilité d'une commande d'engin par les mouvements céphaliques est ainsi envisagée grâce à l'adaptation du capteur à jauges de contrainte à l'une des réalisations susceptibles d'aider le handicapé : un fauteuil roulant à commande électrique.

## V.1 : Introduction

### V 1.1 : Résultats de la simulation de la commande sur calculateur numérique

Les procédures de tests informatiques précédentes ont permis d'évaluer les performances de la commande lors des trois types de tâches complémentaires présentées aux sujets (Chapitre III).

Les tâches de pointages de carrés cibles ont rendu compte de la précision du pointage qui peut ainsi être estimée à une valeur inférieure à 0,5 degré (III.1.3).

D'autre part, les tâches de suivi de contour (III.2) ont permis de dégager l'intérêt de la commande en vitesse lorsque le trajet à effectuer ne se modifie pas brusquement ; les erreurs réalisées restent alors inférieures au degré et mettent ainsi en relief l'intérêt d'une telle commande.

Enfin les tâches de pistage ont permis d'évaluer la dégradation des performances lorsque la vitesse de la cible augmente. Toutefois les erreurs réalisées semblent comparables pour des vitesses de cible peu élevées ( $1,2^\circ/\text{sec} < V < 3,6^\circ/\text{sec}$ ). Cette dernière procédure a d'autre part mis en évidence l'existence d'une zone de gain pour laquelle la commande semble être optimale. ( $0,5 < G < 1,5$ ).

### V.1.2 : Autres possibilités d'application des procédures de test informatiques décrites

La simulation d'une commande d'engin sur calculateur a été entreprise à l'aide du capteur des mouvements céphaliques décrit au II.1 ; toutefois le domaine d'application des procédures décrites peut être étendu à l'étude de la commande par tout autre effecteur à deux degrés de liberté.

La connaissance de la fonction de transfert de l'engin à commander (32) permettrait en outre, par le biais de sa simulation numérique, l'étude approfondie du comportement de l'opérateur humain lors d'une tâche de commande à deux degrés de liberté (33)

Les performances réalisées lors des diverses tâches proposées sont fonctions de l'état de fatigue du sujet. L'estimation des performances peut ainsi rendre compte de l'évolution de la fatigue



ressentie par un opérateur au cours de sa charge de travail (34) ; les procédures de tests décrites précédemment forment par exemple l'une des composantes de l'étude de la fatigue lors de l'apprentissage du travail sur ordinateur et sur écran lumineux (Participation du laboratoire de Neurophysiologie de Lille II à la Recherche biomédicale en milieu scolaire).

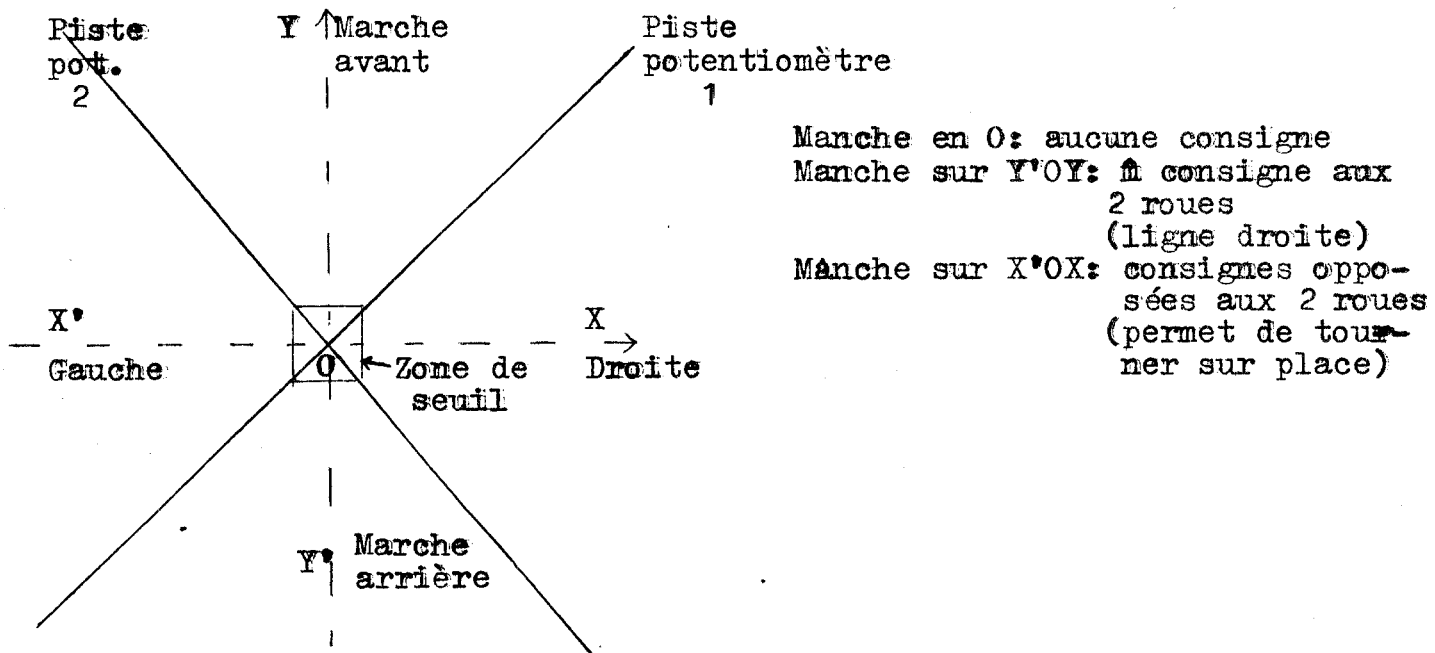
## V. 2 : Application à la commande d'un fauteuil roulant électrique pour handicapé physique

Une application de notre étude a été entreprise sur les possibilités de commande d'un fauteuil roulant électrique par les mouvements de tête. Les signaux de commande délivrés par le capteur à jauges utilisé semblent en effet aptes à ce type de commande de par :

- × la transposition habituelle d'espace (Mouvement droite gauche pour la direction - Mouvement haut bas pour la vitesse)
- × la précision de la commande
- × le peu de tremblements de ces signaux

### V. 2.1 : Présentation du fauteuil

Dans sa version commercialisée, le fauteuil utilisé (POIRIER Modèle MEN 32) comporte une commande manuelle du type "manche à balai". Sur ce manche à balai, deux potentiomètres sont montés en croix, chacun d'eux commandant un moteur (Fig 5.1)



Les deux roues motrices du fauteuil sont ainsi commandées de façon indépendante par deux moteurs à courant continu alimentés en 24 Volts.

Afin de ne pas avoir à refaire entièrement la commande électronique pour adapter notre dispositif, nous avons choisi de substituer nos signaux de commande à ceux d'origine au niveau du boîtier de commande manuelle. Il a donc fallu donner aux signaux délivrés par le capteur à jauges les mêmes caractéristiques que celles des signaux potentiométriques.

### V. 2.2 : Adaptation capteur- fauteuil

Après avoir pris connaissance des premières caractéristiques présentées par le fauteuil, le second stade a consisté à intégrer le capteur des mouvements céphaliques au fauteuil. Un bâti dans le prolongement du dossier a permis d'adapter le capteur au fauteuil tout en comprenant un certain nombre de réglages nécessaires :

- \* réglage d'inclinaison du bâti afin d'approcher plus ou moins le capteur de la tête du pilote
- \* réglage de hauteur optimisant la liaison tête-capteur

Ces différents réglages permettent, outre un confort acceptable, une posture permettant au pilote d'être dans les meilleures conditions lors de la conduite du fauteuil ( 35 ).

### V. 2.3 : Caractéristique de la commande

Rappelons que le capteur des mouvements céphaliques comporte une pré-contrainte lors de la détection des mouvements haut-bas (II.1). Cette configuration présente un problème de sécurité ; il semble en effet nécessaire qu'à la position de repos de la jauge haut bas, corresponde l'arrêt du fauteuil (autrement dit lorsque le sujet retire la tête du capteur, celui ci oblige l'arrêt des moteurs). A ce problème vient s'ajouter celui de la différenciation entre marche avant et marche arrière.

Un codage "avant-arrière" semble la meilleure solution : le sens de déplacement change dès que le pilote enlève la tête du capteur. L'incertitude quant au sens de marche est levée par l'adjonction d'un signal sonore indiquant la modification de la direction.

En conclusion :

- la lame haut-bas détermine le sens de marche et la vitesse du fauteuil
- la lame droite (respectivement gauche) permet de diriger le fauteuil à droite (respectivement à gauche)

#### V. 2.4 : Réalisation de l'interface capteur-boîtier de commande

##### \* Codage avant-arrière

Dès que le sujet n'exerce plus de pression sur la lame de détection haut bas, le signal délivré par la jauge est nul ; un détecteur de seuil envoie alors un creneau mis en forme par un monostable qui déclenche une bascule commandant un relais inverseur.

Cette logique permet aussi de déclencher un témoin sonore de changement de sens par l'intermédiaire d'un multivibrateur générant un signal sinusoïdal excitant un haut parleur situé sur le fauteuil.

##### \* Commande des deux roues

La jauge haut bas assurant la progression avant-arrière doit donner la même consigne aux deux roues.

Les jauges droite-gauche servant à changer de direction doivent donner des consignes opposées aux deux roues.

Une des deux roues recevra donc la somme des consignes l'autre la différence.

##### \* Alimentation utilisée

Notre première idée a été d'utiliser les batteries du fauteuil. Cependant les baisses transitoires de tension lors des pointes de démarrage (phénomène de pompage) nous ont conduit à rejeter cette solution.

Nous avons été ainsi amenés à employer une alimentation spécifique à cette interface de commande. Pour plus de commodité (capacité de charge - stabilité en tension - facilité de recharge) nous avons choisi des batteries au plomb du type batteries de moto présentant un faible encombrement donc facilement logeables

sur le fauteuil.

Le schéma de principe de l'interface de commande est présenté en Annexe A4

#### V. 2.5 : Résultats obtenus

Les premiers essais réalisés ont mis en évidence la faisabilité de la commande d'un fauteuil pour handicapé par les mouvements de tête. Notons tout de suite que ces essais, réalisés sur des sujets sains, doivent être poursuivis en tenant compte des besoins des malades ; cet aspect fait actuellement l'objet d'une collaboration avec le fabriquant du matériel utilisé afin de pouvoir parfaire l'adaptation de notre dispositif aux besoins des handicapés.

#### V. 2.6 : Critiques et améliorations du dispositif

Les critiques se situent à trois niveaux :

- \* mécanique de par la conception des roues avant ; certaines positions angulaires de ces deux roues rendent en effet délicates les manoeuvres désirées. Une amélioration possible consisterait à remplacer ces deux roues par une seule roue centrale sans toutefois trop nuire à l'équilibre dynamique de l'ensemble.
- \* au niveau des indicateurs ensuite ; en effet si le témoin sonore indique le changement de sens, il ne renseigne pas sur le sens de progression du fauteuil ; ce problème peut être résolu par l'adjonction d'un témoin lumineux (indiquant par exemple la marche avant)
- \* enfin, il est nécessaire de prévoir un système de sécurité fiable pouvant permettre au handicapé d'arrêter le fauteuil. Une solution pouvait être d'utiliser le frein électromagnétique existant sur la version à commande manuelle ; ce principe présente toutefois un gros inconvénient : les roues étant bloquées brusquement, le fauteuil s'arrête sur place et risque d'éjecter plus ou moins le pilote.

Nous avons ainsi été amenés à préférer une sécurité qui coupe simplement toute alimentation aux moteurs ; ceci permet alors l'arrêt

non brusque du fauteuil à l'aide du frein moteur. Des essais réalisés à l'aide d'un interrupteur placé au niveau de l'épaule et déclenché par un simple haussement d'épaule ont donné satisfaction.

Cependant la position d'une telle sécurité est bien entendu fonction des restes de motricité du handicapé tétraplégique (souffle, EMG, etc...)

### V. 3 : Conclusion

L'adaptation du capteur de mouvements céphaliques à jauges de contrainte à la commande d'un fauteuil roulant électrique semble ainsi donner des résultats concrets satisfaisants ; il peut aussi répondre aux objectifs fixés par le projet Spartacus en aboutissant à l'une des réalisations susceptibles d'aider le handicapé.

Le capteur des mouvements de tête servant à générer des signaux destinés à la commande d'un fauteuil roulant pour handicapés, d'autres applications peuvent aussi être envisagées dans cette optique de commande :

\* des essais de commande d'un robot à six degrés de liberté ont été entrepris à l'aide d'un tel dispositif au laboratoire ; la commande des rotations droite gauche et haut bas est élaborée par l'intermédiaire du capteur, la commande en profondeur (de type télescopique) étant réalisée grâce à un potentiomètre linéaire actionné par la main. Après une période d'apprentissage relativement courte (quelques heures), la précision réalisée a mis en évidence l'intérêt d'une telle commande ; une étude plus approfondie des performances lors de la commande de ce robot par un opérateur humain est actuellement en cours.

\* les recherches entreprises au sein de l'IRIA ont conduit à développer un système de commande du télémanipulateur MA 23 par mouvements céphaliques (36)

Le capteur utilisé par l'équipe de l'IRIA est un capteur potentiométrique articulé (37) ; la commande du MA 23 à l'aide de ce dispositif étant de bonne qualité, il serait alors intéressant d'étudier en parallèle une commande réalisée par l'intermédiaire du capteur à jauges de contrainte décrit dans ce mémoire.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) DURAND J, BOURLIOUX-GAVARDIN M, PANNIER J  
(Hôpital Poincaré - Garches)  
Résultats et commentaires à propos d'une enquête nationale  
sur les tétraplégiques.  
Conférence internationale sur les télémanipulateurs pour  
handicapés physiques - IRIA - Rocquencourt - 4 - 6 Sept. 78
- (2) BLATT J.L  
Contribution à l'étude des réponses indicielles céphaliques  
d'un opérateur humain à des stimulus lumineux en vue d'une  
liaison tête-machine  
Thèse de Docteur - Ingénieur - Lille 1975 -
- (3) METRAL S, CADORET A  
Principes d'utilisation d'un retour sensitif  
Journées robotique - IRIA - Rocquencourt - Nov 77
- (4) LC V. RENNER  
Extravéhicular attitude control by use of head motions  
S M Thesis Dep Aeronaut. Astronaut.  
M.I.T Man Vehicle Laboratory - Cambridge (MASS) 1970
- (5) Outerbridge J S - Melvill Jones  
Reflex Vestibular Control of Head movement in man  
Aerospace Medicine : Vol 42 N° 9 p 935-940 Sept 71
- (6) BARNES GR - RANCE BH  
Transmission of angular acceleration to the head in the  
seated man subject.  
Aerospace Medicine : Vol 45 N° 4 p 411-416 April 74
- (7) GRETTY MA  
The relationship between eye and head movements  
Revue Agressologie 14 A 7-10 1973
- (8) MORASSO - BIZZI - DICHGANS  
Adjustment of saccade characteristics during head movements  
Experimental Brain Research Vol 16 p 492-500 1973



- (9) BIZZI - KHALIL - MORASSO  
Two modes of active eye head coordination in monkeys  
Brain Research Vol 40 p 45-48 1972
- (10) BIZZI F  
The coordination of eye head movements  
Scientific American (New York) 231 (4) 100 - 6 Oct. 74
- (11) CHOUET BA - YOUNG JR  
Tracking with head position using an electrooptical monitor  
IEEE Systems, Man and Cybernetics Vol 4 N° 2 Mars 74
- (12) LOREILLE P.  
Détermination de la position "habituelle" de la tête par clinomètre.  
Thèse de doctorat es Sciences Odontologiques Paris VI Mars 75
- (13) SMITH - DURGO - RAJANA  
Characteristics of head motions during variable visual feedback delay, velocity and displacement.  
American Journal of Physical Medicine Vol 48 N°6 1969
- (14) SOULATGES  
Prise en compte de certains facteurs ergonomiques lors de la modélisation du comportement du pilote  
Colloque Biomeca II Toulouse Nov 76
- (15) SPIEGEL MR  
Théorie et applications de la Statistique  
M<sup>c</sup> Graw -Hill Ediscience Paris 74
- (16) SHIRACHI - MONK - BLACK  
Head rotationnal spectral characteristics during two dimensionnal smooth pursuit tasks  
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Vol 8 N°9  
Sept. 78

- (17) GUILBERT J, JACQUESSON JM, BLATT JL, MILBLED G  
Etude des mouvements de tête - Application à la commande  
d'engin  
Association des Physiologistes - INSERM Lyon - Mai 76
- (18) JACQUESSON JM, GUILBERT J, BLATT JL  
Etude des mouvements de tête pour la commande d'un manipulateur  
Journées Robotique - IRIA - Nov 77
- (19) PHATAK A - BEKEY GA  
Model of the adaptive behavior of the human operator in  
response to a sudden change in the control of situation  
IEEE Trans. on Man Machine Systems 10-3 Sept 69
- (20) MALVACHE N  
Analyse et identification des systèmes visuels et manuels  
en vision frontale et périphérique chez l'homme.  
Thèse de doctorat es Sciences Lille Avril 73
- (21) CITTA  
Traitement de l'information par l'opérateur humain dans  
une tâche de pistage  
Journées d'étude de la commande automatique de processus  
-Lille-Sept. 71
- (22) Centre d'Automatique Lille I - Laboratoire de Neurophysiologie  
Lille II  
Etude des mouvements céphaliques pour la commande d'un  
télémanipulateur.  
Rapport final - Convention 75-143 IRIA - Juin 77
- (23) MILSUM  
Biological Control Systems Analysis  
M<sup>c</sup> Graw Hill 1966
- (24) LAMOTTE  
Initiation aux méthodes statistiques en biologie  
MASSON Paris 1971

- (25) SAGE-MELSA  
System Identification  
Academic Press 1970
- (26) POVY L  
Identification des processus  
Dunod Université 1976
- (27) GUILBERT J - JACQUESSON JM - BLATT JJ  
Détermination informatique de critères de performance dans la  
commande d'un engin à deux degrés de liberté notamment par  
capteur céphalique.  
Conférence internationale sur les télémanipulateurs pour  
handicapés physiques - IRIA - Sept. 78
- (28) DELARMINAT - THOMAS  
Automatique des systèmes linéaires - T 2 - Identification -  
Flammarion 1977
- (29) RICHALET - RAULT - POULIQUEN  
Identification des processus par la méthode du modèle  
Gordon et Breach - Paris 71 -
- (30) MAX J  
Méthodes et techniques de traitement du signal  
Masson Paris 72
- (31) LABARRERE - KRIEF - GIMONET  
Le filtrage et ses applications  
CEPADUES Editions 1978
- (32) WHITNEY D.E  
Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses  
IEEE Trans. on Man Machine Systems Vol 10 N° 2 1969
- (33) KLEINMAN - BARON - LEVISON  
A control theoretic approach to manned-vehicle systems analysis  
IEEE Tran on Automatic Control Vol 16 N° 6 Dec 71

- (34) SCHERRER  
Physiologie du travail  
Masson 1967
- (35) PAILLARD J  
Tonus, posture et motricité télécinétiq<sup>ue</sup>  
Physiologie par C. KAYSER . T II  
Flammarion 1969
- (36) GUITTET - KWEE - QUETIN - YCLOW  
The Spartacus Telethesis : manipulator control and experimentation  
Conférence internationale sur les télémanipulateurs pour  
handicapés physiques  
IRIA - Rocquencourt - Sept 78
- (37) KWEE H.H  
Capteurs céphaliques articulés  
Journées Robotique IRIA - Nov 77

## TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS

### CHAPITRE I

ETUDE DES CAPTEURS ENVISAGEABLES POUR LA COMMANDE  
A PARTIR DES MOUVEMENTS DE TETE

- |   |        |
|---|--------|
| 1. Intérêt et choix des composantes céphaliques adaptées à une commande | p I-1  |
| 1.1 Intérêt de la prise en compte des mouvements de tête                | p I-1  |
| 1.2 Contraintes du capteur  | p I-2  |
| 2. Divers capteurs envisagés  | p I-4  |
| 2.1 Capteur Murex   | p I-4  |
| 2.2 Capteurs sans harnachement  | p I-9  |
| 2.3 Capteurs nécessitant peu de harnachement                            | p I-11 |
| 2.4 Capteurs nécessitant un harnachement important                      | p I-22 |
| 2.5 Dispositif à jauges de contrainte                                   | p I-26 |
| 3. Dispositif retenu et conclusion                                      | p I-30 |

## CHAPITRE II

### ETUDE DU CAPTEUR A JAUGES DE CONTRAINTE ET DE SES CARACTERISTIQUES

#### PROTOCOLE EXPERIMENTAL UTILISE

1. Nécessité et élaboration d'un capteur réglable p II-2
2. Mise en forme et amplification des signaux : ponts d'extensiométrie p II-3
- 3.1 Caractéristiques statiques des capteurs p II-4
- 3.2 Caractéristiques d'étalonnage de l'ensemble tête capteur p II-6
4. Essais de commande avec table traçante p II-12
  - 4.1 Caractéristiques de la table traçante p II-12
  - 4.2 Dispositif expérimental p II-12
  - 4.3 Commande en position dans un test de pointage p II-12
  - 4.4 Commande en vitesse dans un test de pointage p II-17
  - 4.5 Etude des temps de stabilisation p II-22
5. Procédure informatique de test du capteur p II-23
  - 5.1 But de la procédure p II-23
  - 5.2 Dispositif expérimental p II-23
  - 5.3 Logiciel d'acquisition des paramètres p II-25
  - 5.4 Caractéristiques des stimulus visuels et protocole expérimental p II-25
6. Conclusion p II-29

## CHAPITRE III

### ETUDE DES PARAMETRES CARACTERISANT UNE COMMANDE PAR LES MOUVEMENTS DE TETE

1. Etude des temps de stabilisation recueillis lors d'une tâche de pointage p III-2
  - 1.1 Influence de la nature de la commande sur les temps de stabilisation p III-3
  - 1.2 Influence du gain sur les temps de stabilisation p III-5
  - 1.3 Précision de la commande par mouvements céphaliques p III-7
2. Etude des erreurs de trajectoire lors d'une tâche de suivi de contour imposé p III-10
3. Etudes des erreurs et des retards réalisés lors d'une tâche de pistage labyrinthique p III-12
  - 3.1 Domaine de variation des erreurs lorsque la vitesse de la cible varie p III-13
  - 3.2 Domaine de variation des erreurs en fonction du gain utilisé p III-16
  - 3.3 Conclusion p III-19

## CHAPITRE IV

### DETERMINATION ET ETUDE DE CRITERES DE PERFORMANCE LORS DE TACHES DE COMMANDE PAR MOUVEMENTS CEPHALIQUES

1. Etude de critères de performance lors d'une tâche de pistage labyrinthique p IV-2
  - 1.1 Elaboration et étude des critères de performance p IV-2
    - a - Méthode d'identification utilisée p IV-4
    - b - Précision de l'identification p IV-6
    - c - Conclusion p IV-10
  - 1.2 Etude des répartitions des erreurs de pistage p IV-11
    - a - Histogrammes expérimentaux p IV-11
    - b - Identification des histogrammes expérimentaux p IV-14
    - c - Conformité du modèle obtenu  
Test du  $\chi^2$  p IV-14
    - d - Conclusion p IV-15
2. Etude de critères de performance lors de suivis de contours p IV-18
  - a - Critères de performances retenus p IV-19
  - b - Identification des critères p IV-21
  - c - Conclusion p IV-22
3. Conclusions p IV-23



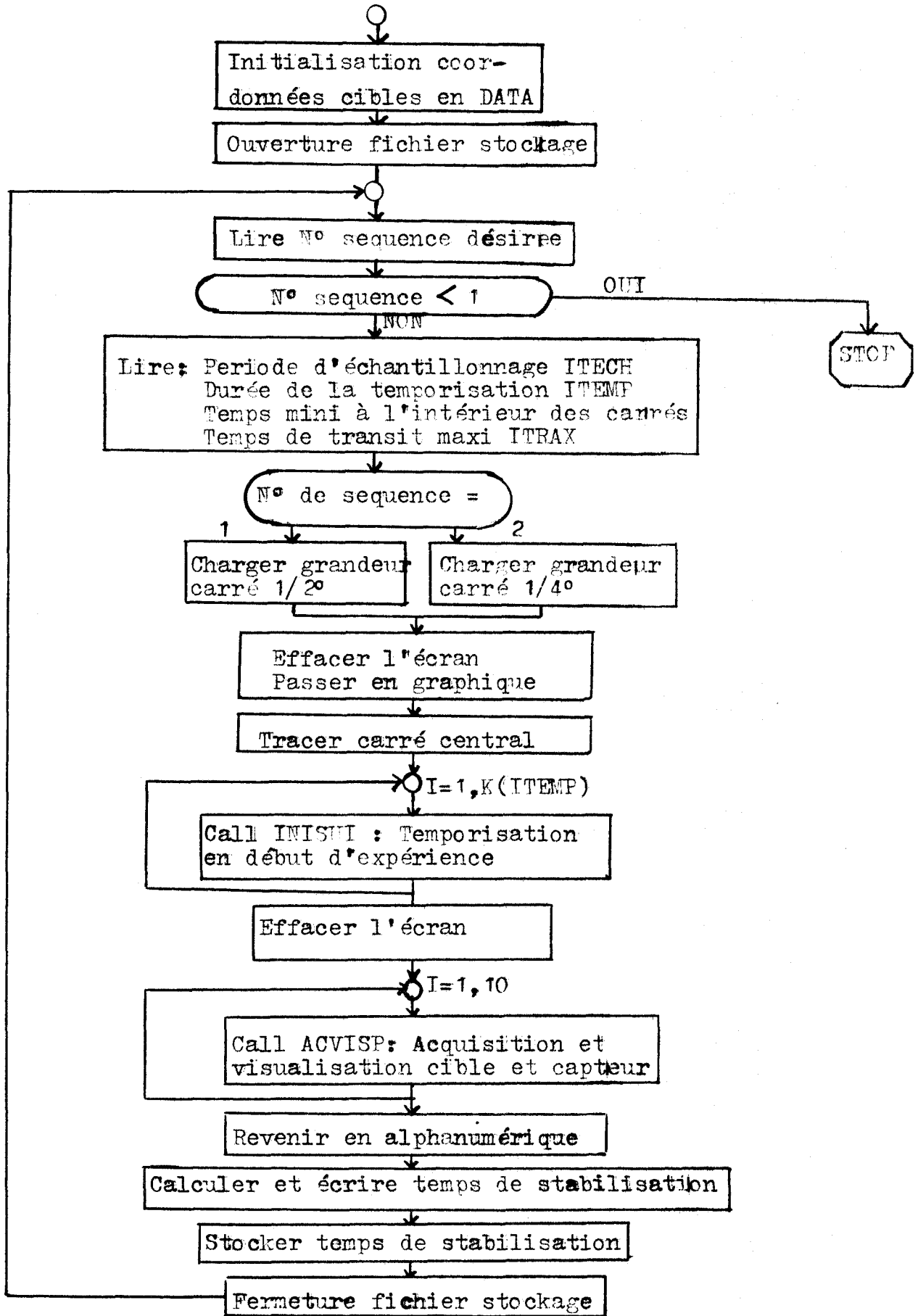
## CHAPITRE V

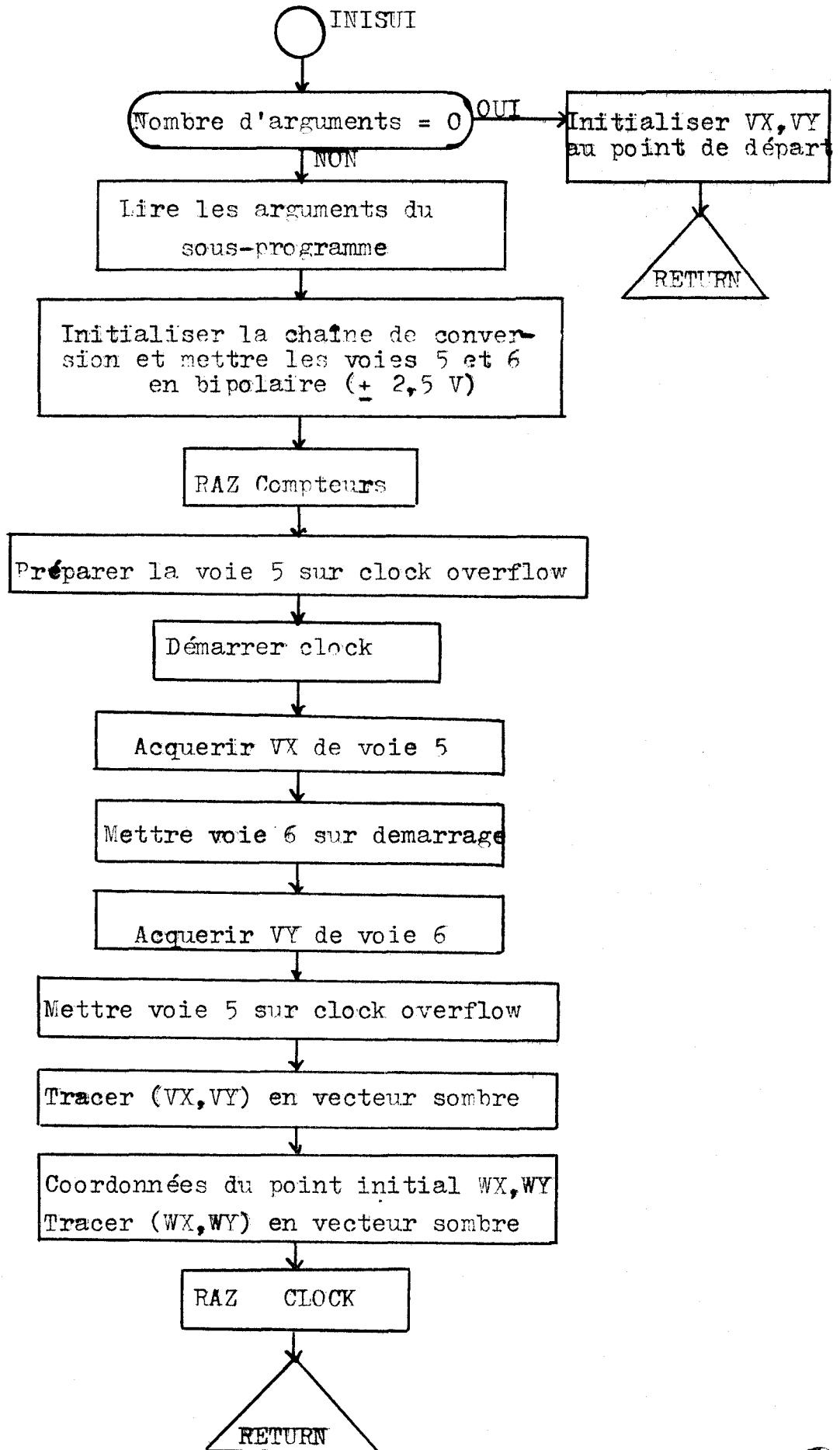
### COMMANDABILITE D'UN ENGIN A DEUX DEGRES DE LIBERTE A L'AIDE D'UN CAPTEUR DE MOUVEMENTS CEPHALIQUES A JAUGES DE CONTRAINTE

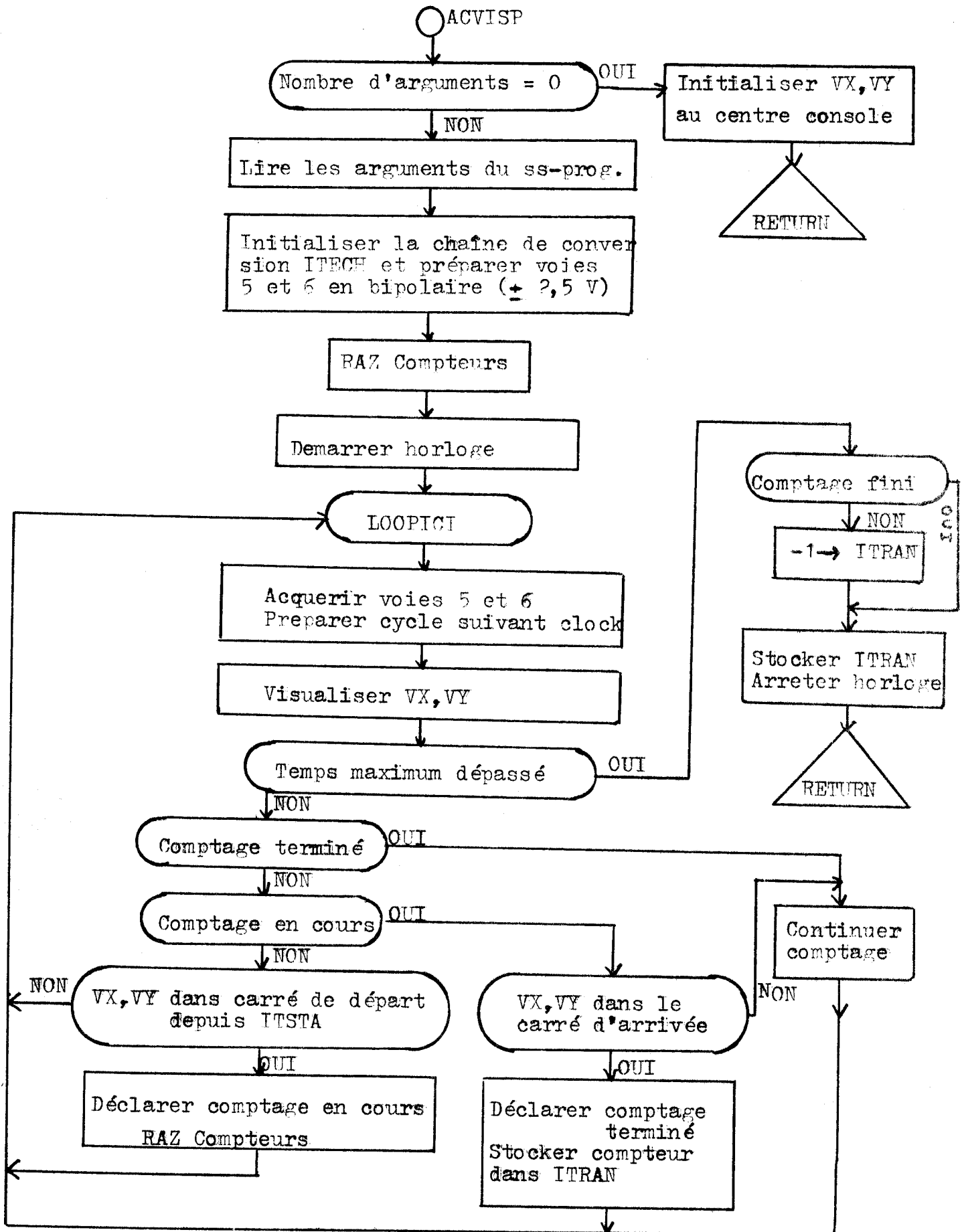
- |  |       |
|--|-------|
| 1. Introduction  | p V-2 |
| 1.1 Résultats de la simulation de la<br>commande sur calculateur numérique                 | p V-2 |
| 1.2 Autres possibilités d'application<br>des procédures de tests informatiques<br>décrites | p V-2 |
| 2. Application à la commande d'un fauteuil<br>roulant électrique pour handicapé physique   | p V-4 |
| 2.1 Présentation du fauteuil   | p V-4 |
| 2.2 Adaptation capteur-fauteuil  | p V-5 |
| 2.3 Caractéristiques de la commande  | p V-5 |
| 2.4 Réalisation de l'interface<br>capteur-boîtier de commande                              | p V-6 |
| 2.5 Résultats obtenus  | p V-7 |
| 3. Conclusion  | p V-8 |

**A N N E X E S**  
-----

SPACAR

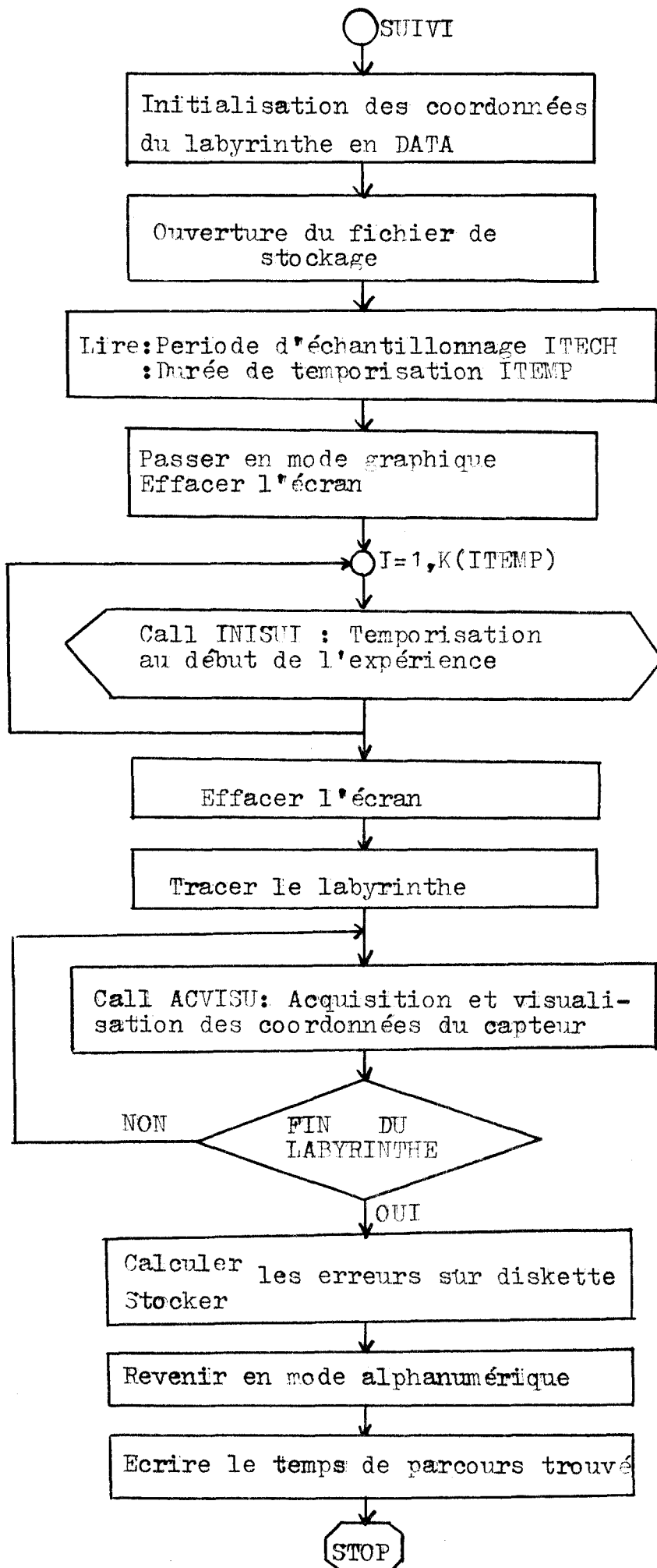


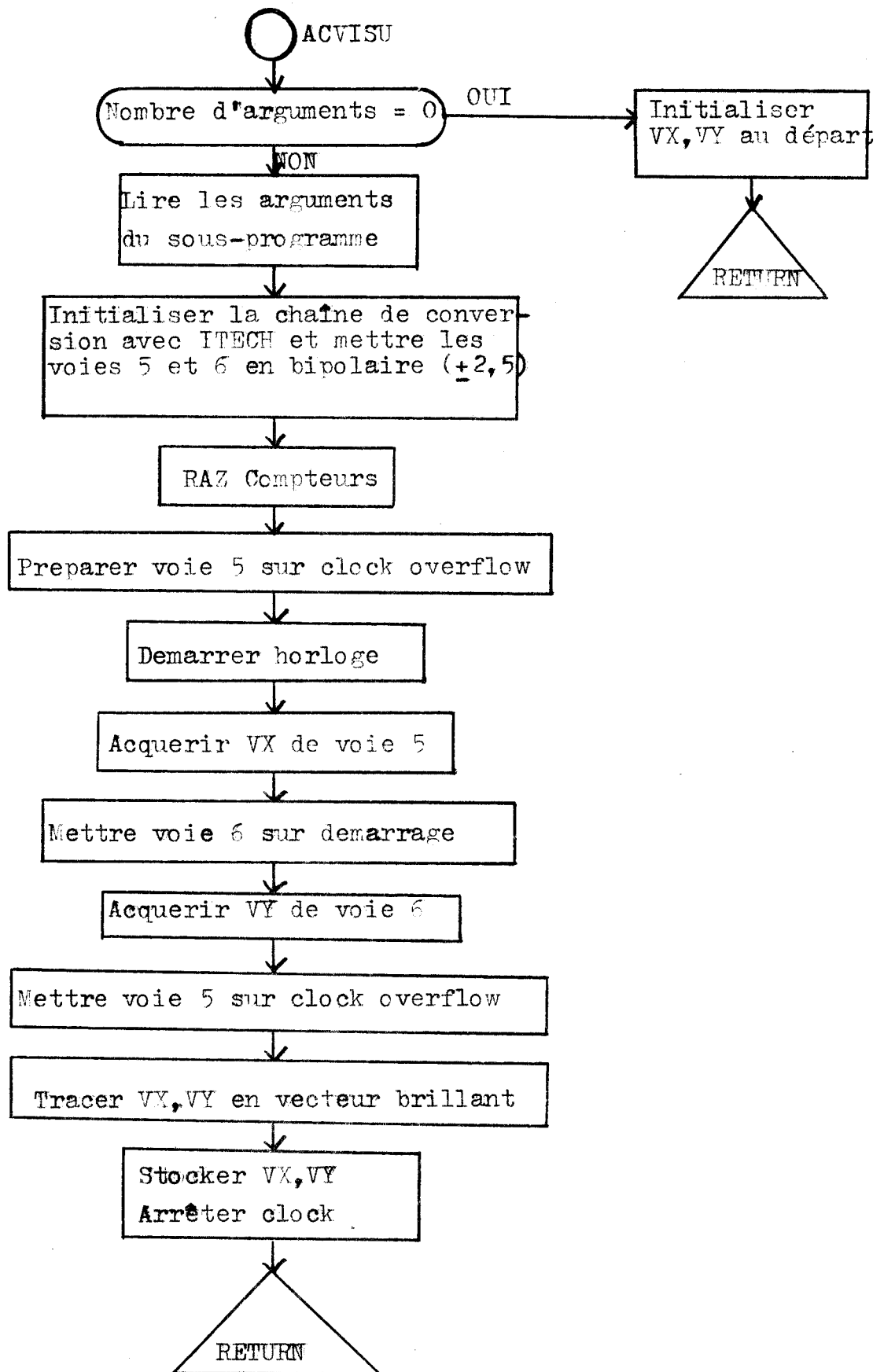




A1: SOUS-PROGRAMME D'ACQUISITION DES TEMPS DE STABILISATION  
ET DE VISUALISATION (ACVISP)

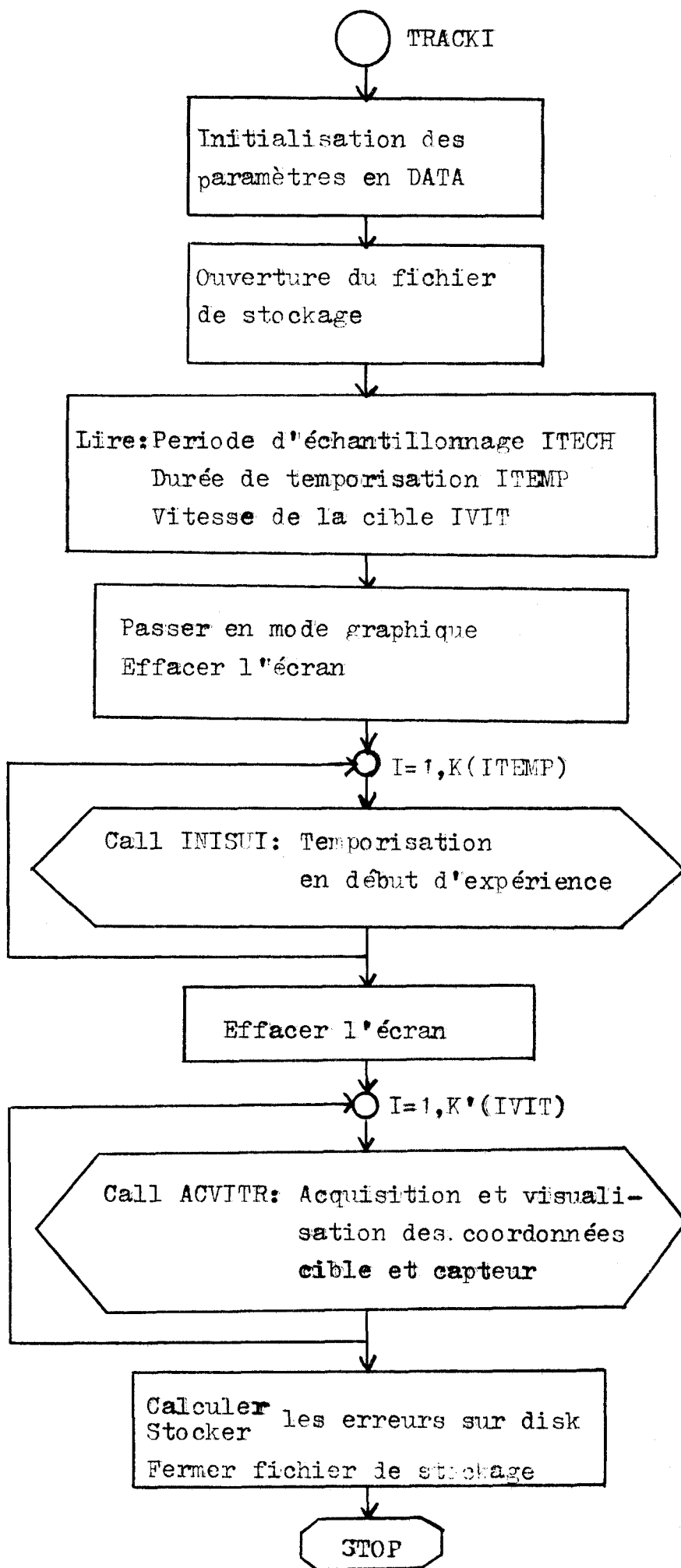




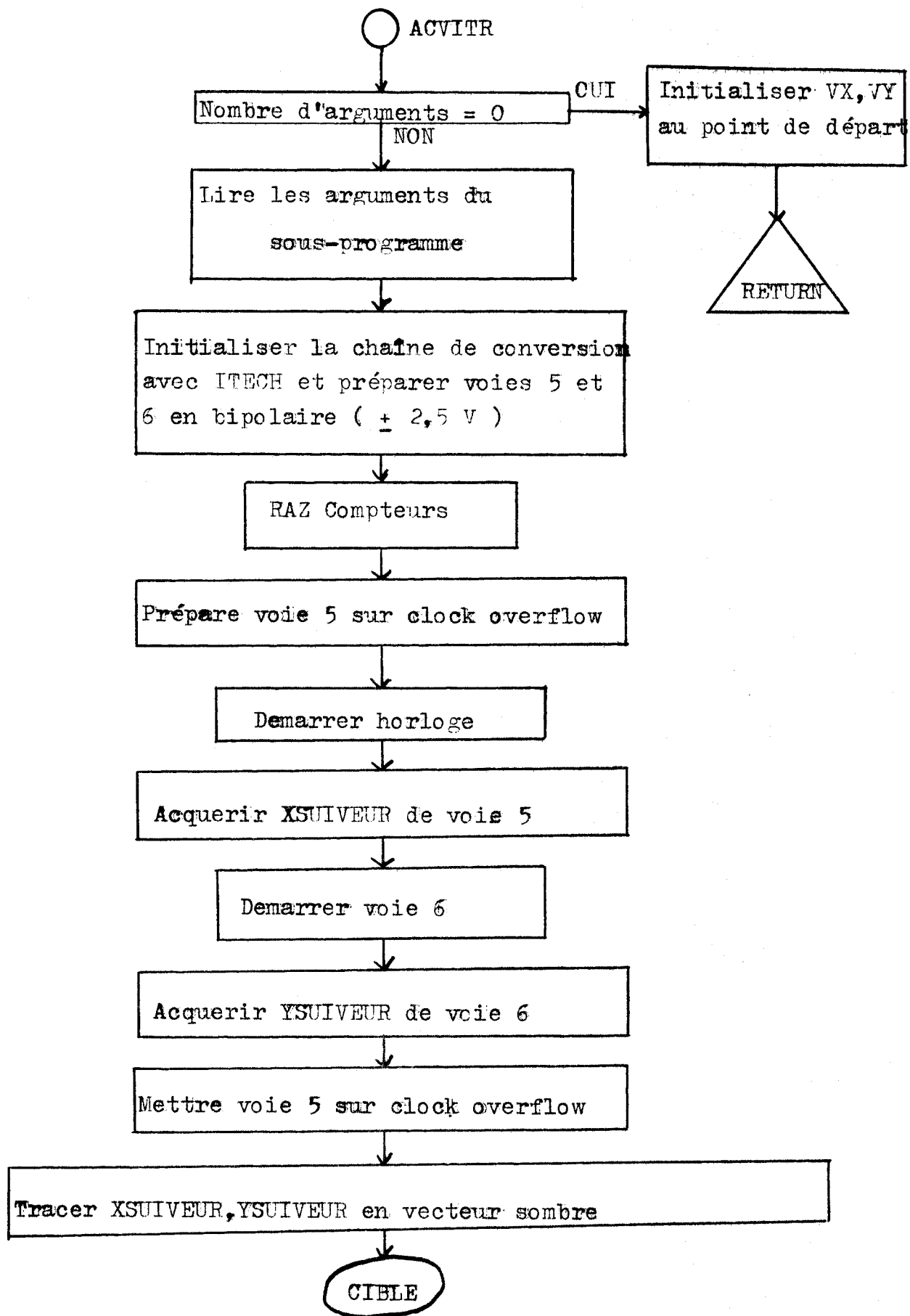


**A 2:** SOUS-PROGRAMME D'ACQUISITION DES ERREURS DE SUIVI DE CONTOUR ET VISUALISATION DES COORDONNES DU CAPTEUR (ACVISU)



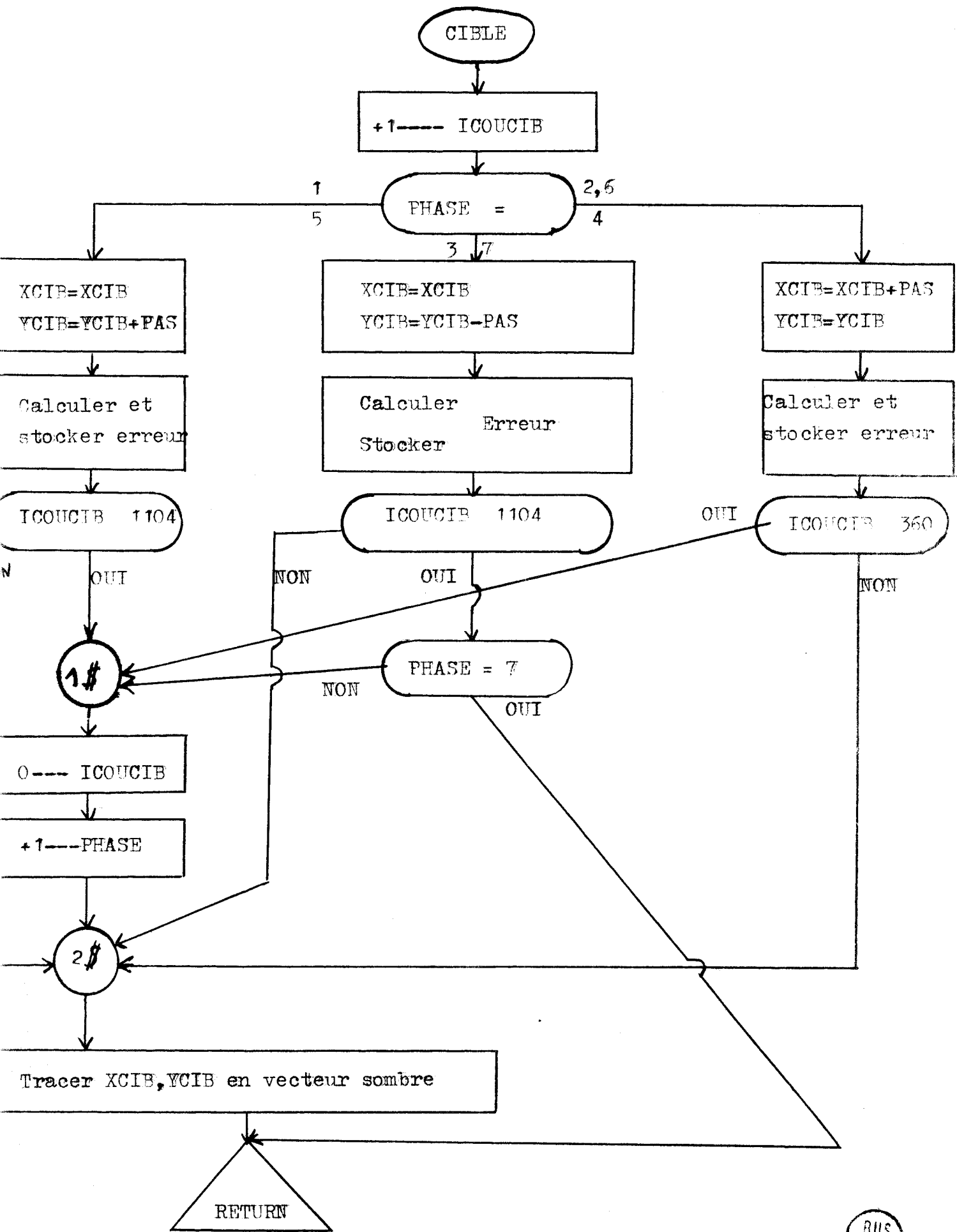






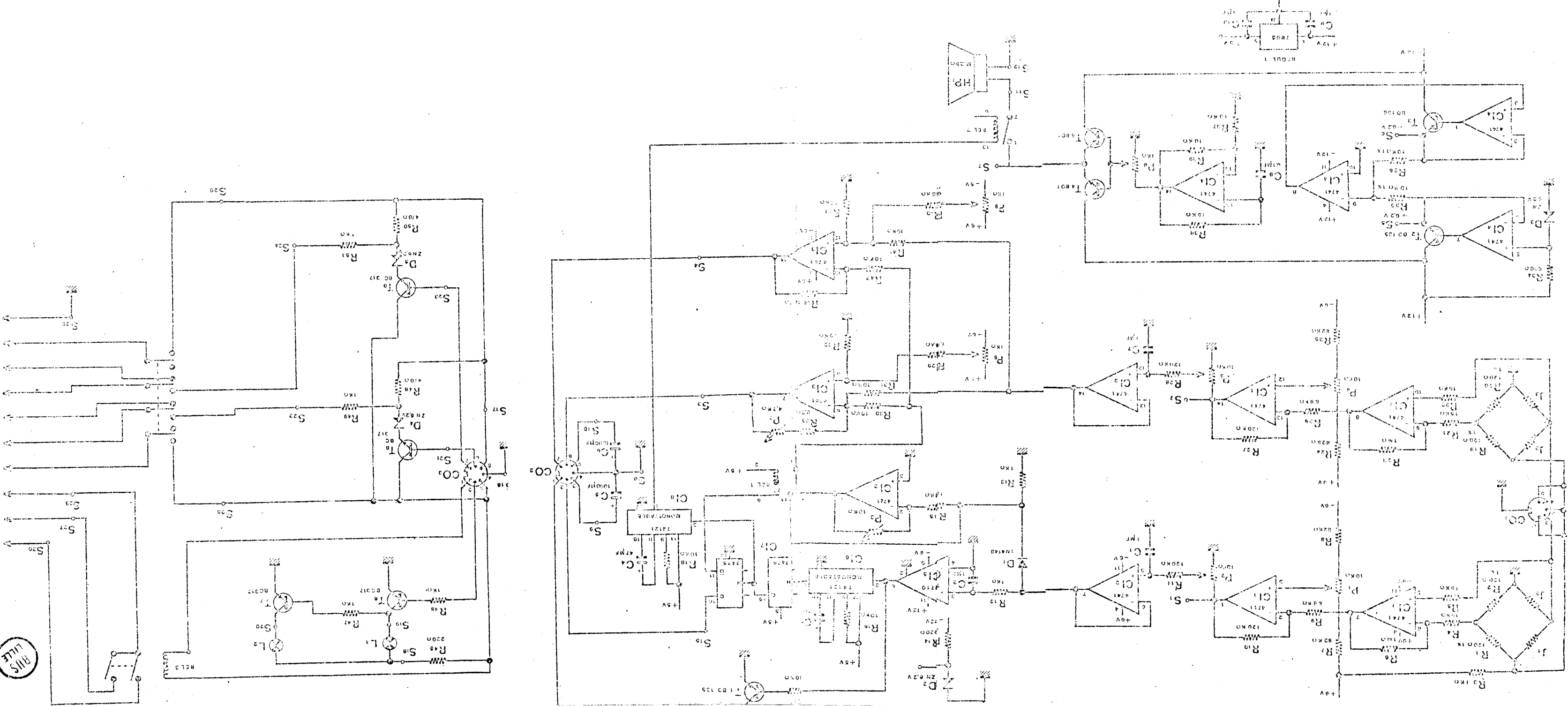
A3: SOUS-PROGRAMME ACQUISITION ERREURS ET RETARDS LORS D'UN TRACKING LABYRINTHIQUE ET VISUALISATION (ACVITR 1<sup>re</sup> PARTIE)





BUS  
LILLE

A3: SOUS-PROGRAMME ACQUISITION ERREURS ET RETARDS LORS D'UN TRACKING LABYRINTHIQUE ET VISUALISATION ( ACVITR 2<sup>ème</sup> PARTIE )



A4: Schema de principe de l'interface de commande du fauteuil roulant électrique

