

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

pour obtenir le titre de Docteur-Ingénieur

par

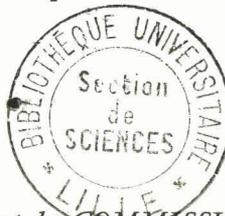
Jean-Marc TOULOTTE

Ingénieur ISEN



**1^{ère} THÈSE : Dispositif d'étude et modèle analogique
de la Fonction d'équilibration chez l'homme.**

2^{me} THÈSE : Propositions données par la Faculté.



Soutenues le 27 Novembre 1967, devant la COMMISSION-D'EXAMEN

MM. R. DEHORS, Président

P. VIDAL

P. NAYRAC

M. KERGUIGNAS, Examineurs

UNIVERSITE DE LILLE

FACULTE DES SCIENCES

DOYENS HONORAIRES :

MM. PRUVOST, LEFEBVRE, PARREAU

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. ARNOULT, BEGHIN, CAU, CHAPELON, CHAUDRON, CORDONNIER, DE HEUVELS,
DEHORNE, DOLLE, FLEURY, GERMAIN, KOURGANOFF, LAMOTTE, LELONG, M^{me} LELONG,
MAZET, MICHEL, NORMANT, PARISELLE, PASCAL, PAUTHENIER, ROIG, ROSEAU,
ROUBINE, WIEMANN, ZAMANSKY, KAMPE DE FERJET.

DOYEN :

M. TILLIEU, Professeur de Physique

ASSESSEURS :

MM. DURCHON, Professeur de ZOOLOGIE

HEUBEL, Professeur de CHIMIE MINERALE

PROFESSEURS TITULAIRES

M. BACCHUS Pierre	Astronomie et Calcul Numérique
M. BEAUFILS Jean Pierre	Chimie Générale
M. BONNEMAN Pierre	Chimie Industrielle
M. BONTE Antoine	Géologie Appliquée
M. BOUGHON Pierre	Mathématiques
M. BOURIQUET Robert	Botanique
M. CORSIN Pierre	Paléobotanique
M. DECUYPER Marcel	Mathématiques
M. DEFRETIN René	Laboratoire Biologique Maritime de WIMEREUX
M. DEHORS Roger	Physique Industrielle
M. DELATTRE Charles	Géologie Générale
M. DESCOMBES Roger	Mathématiques
M. DURCHON Maurice	Zoologie
M. FOURET René	Physique
M. GABILLARD Robert	Radio
M. GLACET Charles	Chimie Organique
M. HEUBEL Joseph	Chimie Minérale
M. HOCQUETTE Maurice	Botanique
M. LEBEGUE André	Botanique C.S.U AMIENS
M. MARION Ernest	Chimie C.S.U AMIENS
M. MARTINOT-LAGARDE André	Mécanique des Fluides
M. MONTREUIL Jean	Chimie Biologique
M. PEREZ Jean-Pierre	Physique
M. PHAM MAU QUAN	Mathématiques
Mme SCHWARTZ Marie- Héléne	Mathématiques
M. TILLIEU Jacques	Physique Théorique
M. TRIDOT Gabriel	Chimie Minérale Appliquée - E.N.S.C.L.
M. VIVIER Emile	Zoologie C.S.U AMIENS
M. WATERLOT Gérard	Géologie et Minéralogie
M. WERTHEIMER Raymond	Physique Générale

PROFESSEURS A TITRE PERSONNEL

M. DELEAU Paul	Géologie et Minéralogie
M. HEIM DE BALSAC Henri	Zoologie
M. LEBRUN André	Radioélectricité
M. LUCQUIN Michel	Chimie Physique - Département de Chimie
M. PARREAU Michel	Mathématiques
M. SAVARD Jean	Chimie Générale
M. SCHILTZ René	Physique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. BECART Maurice	Physique
M. BLOCH Vincent	Psychophysiologie
M. BOUISSET Simon	Physiologie Animale
M. CELET Paul	Géologie Générale
M. CONSTANT Eugène	Radio
M. DELHEYE Michel	Chimie Physique et Minérale 1er Cycle
M. GONTIER Gérard	Mécanique des fluides
Mme LEBEGUE Georgette	Physique C.S.U. AMIENS
Mlle LENOBLE Jacqueline	Physique
M. LIEBAERT Robert	I.U.T.
M. LINDER Robert	Botanique
Mlle MARQUET Simone	Mathématiques
M. MENNESSIER Guy	Géologie C.S.U AMIENS
M. MONTARIOL Frédéric	Chimie Minérale Appliquée
M. MORIAMEZ Michel	Physique
M. MOUVIER Gérard	Chimie SAINT QUENTIN
M. POUZET Pierre	Calcul Numérique
M. PROUVOST Jean	Géologie et Minéralogie
M. SCHALLER François	Zoologie
M. VAZART Bernard	Botanique AMIENS

PROFESSEURS ASSOCIES

M. DEDECKER Paul	Mathématiques
------------------	---------------

MAITRES DE CONFERENCES

M. ATTELA Marc	Mathématiques Appliquées
M. BELLET Jean	Physique
M. BENABOU Jean	Mathématiques
M. BILLARD Jean	Physique
M. BOILLET Pierre	Physique
M. BUI TRONG LIEU	Mathématiques
M. CHERRUAULT Yves	Mathématiques
M. CHEVALIER Alfred	Mathématiques C.S.U AMIENS
M. DERCOURT Jean Michel	Géologie et Minéralogie
M. DEVRAINNE Pierre	Chimie Minérale
Mme DIXMIER Suzanne	Mathématiques AMIENS
Mme DRAN Raymonde	Chimie Appliquée et de la Houille
M. GOUBMAND Pierre	Chimie Physique
M. GUILBAULT Pierre	Département de Biologie et Physiologie Animale.
M. GUILLAUME Jean	Botanique
M. HANGAN (associé)	Mathématiques
M. HENRY Lucien	Physique AMIENS
M. HERZ Jean-Claude	Calcul Numérique
M. HEYMAN Michel	Physique C.S.U. AMIENS
M. HUARD DE LA MARRE Pierre	Calcul Numérique
M. JOLY Robert	Zoologie C.S.U. AMIENS
M. LABLACHE-COMBIER Alain	Chimie Générale
M. LACOSTE Louis	Botanique
M. LAMBERT Gérard	Physique SAINT-QUENTIN
M. LANDAIS Jean	Chimie Organique
M. LEHMANN Daniel	Mathématiques
Mme LEHMANN Josiane	Mathématiques
M. LOUCHEUX Claude	Chimie
M. MAES Serge	Physique
M. METTETAL Christian	Zoologie AMIENS
M. MONTEL Marc	Physique C.S.U. VALENCIENNES
M. NGUYEN PHONG CHAU	Mathématiques SAINT-QUENTIN
M. PANET Marius	Electromécanique
M. PARSY Fernand	Mathématiques AMIENS
M. SAADA Georges	Physique

MAITRES DE CONFERENCES (Suite)

M. SEGARD Emile	Chimie Biologique
M. TUDO Joseph	Chimie Minérale Appliquée C.S.U AMIENS
M. VAILLANT Jean	Mathématiques
M. VIDAL Pierre	Physique Industrielle
Mme ZINN-JUSTIN Nicole	Mathématiques

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

1912

1913

1914

1915

1916

1917

AVANT PROPOS

Le travail que nous présentons a été effectué au Laboratoire de Bionique de l'Institut d'Automatique de la Faculté des Sciences de Lille dirigé par Monsieur le Professeur DEHORS auquel nous exprimons toute notre gratitude pour l'accueil qu'il nous a réservé, pour les moyens matériels mis à notre disposition et pour le précieux enseignement qu'il a su nous dispenser.

Nous sommes particulièrement sensible au grand honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider notre jury de thèse.

Monsieur le Professeur VIDAL nous a suivi et guidé durant toute cette étude avec intérêt et sympathie. Nous tenons à l'assurer ici de notre amicale gratitude.

Nous sommes respectueusement reconnaissant à Monsieur le Professeur NAYRAC, Membre correspondant de l'Académie de Médecine, d'avoir considéré avec bienveillance nos travaux. Il est l'instigateur de la fructueuse collaboration qui s'est établie entre nos deux disciplines. Monsieur le Professeur NAYRAC nous fait l'honneur de faire partie de notre jury de thèse ; nous en sommes particulièrement touché.

Nous tenons également à témoigner notre profonde gratitude à Monsieur KERGUIGNAS, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers et à l'Institut Industriel du Nord, pour son aide précieuse et efficace. Il a su nous conseiller et nous diriger dans la première partie de notre étude. Il a suivi la progression de nos travaux avec intérêt. Monsieur KERGUIGNAS a accepté de juger notre thèse. Nous l'en remercions très vivement.

Monsieur le professeur VANLERENBERGHE a bien voulu nous accueillir dans son laboratoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance.

Au cours d'échanges fructueux avec Monsieur le Professeur MILBLED nous avons pu préciser certains aspects importants des phénomènes étudiés. Nous lui exprimons notre reconnaissance.

Nous sommes très reconnaissant et remercions vivement Monsieur le Docteur PARQUET pour son amicale et précieuse collaboration. Il nous a particulièrement aidé et guidé durant toute notre étude.

Enfin nous tenons à rendre hommage à l'esprit d'équipe qui règne dans le laboratoire où nous avons travaillé, les chercheurs et le personnel ont toujours répondu avec empressement à nos sollicitations et par leur amicale présence nous ont aidé dans nos recherches. Nous les en remercions bien sincèrement.

— — — — —

INTRODUCTION

Le développement extraordinaire des techniques de mesure électronique a permis ces dernières années l'élaboration de moyens nouveaux et puissants d'investigation dans le domaine médical. Ceux-ci se concrétisent par un grand nombre d'appareils d'enregistrements : électro-encéphalographes, échographes etc.. et de commande automatique : monitoring, main artificielle... Le perfectionnement sans cesse accru des composants électroniques conduit d'une part à une augmentation importante de la sensibilité des capteurs et d'autre part à un accroissement certain de la fiabilité, condition indispensable à une utilisation clinique. Dans certaines applications : gestion, simulation, automatisation..., le calculateur universel a pris progressivement une place non négligeable.

Parallèlement à cette évolution, la recherche médicale, profitant de l'état actuel des techniques, s'est modifiée. Une connaissance plus approfondie des mathématiques, de la physique s'est révélée obligatoire.

De façon similaire, les sciences physiques et plus particulièrement l'automatique, tentent d'imiter le comportement des régulateurs biologiques pour en déduire des dispositifs industriels. Une synthèse de ces idées de base est alors évidente.

Les problèmes que nous allons évoquer s'inscrivent dans le cadre des recherches que le Laboratoire d'Automatique de la Faculté des Sciences de l'Université de Lille a entreprises depuis trois ans et qui concernent l'étude de régulateurs biologiques. Découlant de ce programme général, certains travaux sont poursuivis en collaboration avec la clinique de Neurologie et Psychiatrie de la Faculté de Médecine de l'Université de Lille, et ont permis d'étudier la fonction d'équilibration chez l'homme.

Au cours de ces études, nous envisageons la représentation de cette fonction par la projection du centre de gravité de l'homme sur le plan horizontal. Dans la première partie, après avoir tenté de définir le problème nous indiquerons comment il a été possible de mettre en oeuvre un dispositif expérimental permettant de détecter les variations de la position du corps.

Dans la seconde partie nous présenterons les résultats obtenus, puis nous en ferons l'analyse statistique, condition indispensable à une utilisation de l'appareil en Médecine.

La dernière partie est consacrée à la simulation sur calculatrice analogique de la fonction d'équilibration. Après avoir obtenu l'expression théorique caractérisant le fonctionnement de ce type de régulateur humain, nous montrerons comment trouver pour les modèles proposés, l'allure des réponses obtenues expérimentalement.

1^e PARTIE

APPAREILLAGE

Les recherches sur la posture fondamentale de l'être humain et plus précisément de la fonction d'équilibration de l'homme [1] sont depuis longtemps l'objet de préoccupations constantes de la part des physiologistes.

La compréhension plus complète du phénomène nécessitant l'utilisation d'un appareillage expérimental, quelques dispositifs ont été mis au point : inscripteur céphalique de BERGONIE, plateforme dynamographe de MAREY, table de RADERMAECKER. Mais, quoique d'un apport certain, ces appareils portent en eux-mêmes leurs propres limitations. Ils ne peuvent fournir que des résultats qualitatifs.

Aussi dans le but de déterminer quantitativement les éléments du problème, d'autres recherches ont été tentées. Celles-ci ont en commun pour mode de représentation de la fonction d'équilibration : la projection du centre de gravité de l'homme sur le plan horizontal.

Les travaux de BARON en France [2 a, 2 b, 2 c, 2 d], de GURFINKEL en URSS [3] et de LITVINENKOVA en Tchécoslovaquie [4] permettent notamment d'aborder le problème sous un angle plus précis. De plus LITVINENKOVA a tenté une étude dynamique : une ceinture attachée à l'individu est reliée à un système de commande permettant de réaliser une perturbation particulière.

Toutefois à notre connaissance, quelle que soit la manière dont le problème a été abordé et résolu, le comportement en régulateur du système d'équilibration de l'homme n'a pas été envisagé. Il nous semble que ceci constitue une étude importante et nous nous proposons de construire un appareillage permettant tout d'abord de préciser le mouvement de la projection du centre de gravité, notion fort utile aux médecins. Ensuite nous essayerons de déterminer une fonction de transfert de l'homme considéré dans cette optique et par voie de conséquence de trouver un modèle de celui-ci, notion intéressante pour les automaticiens.

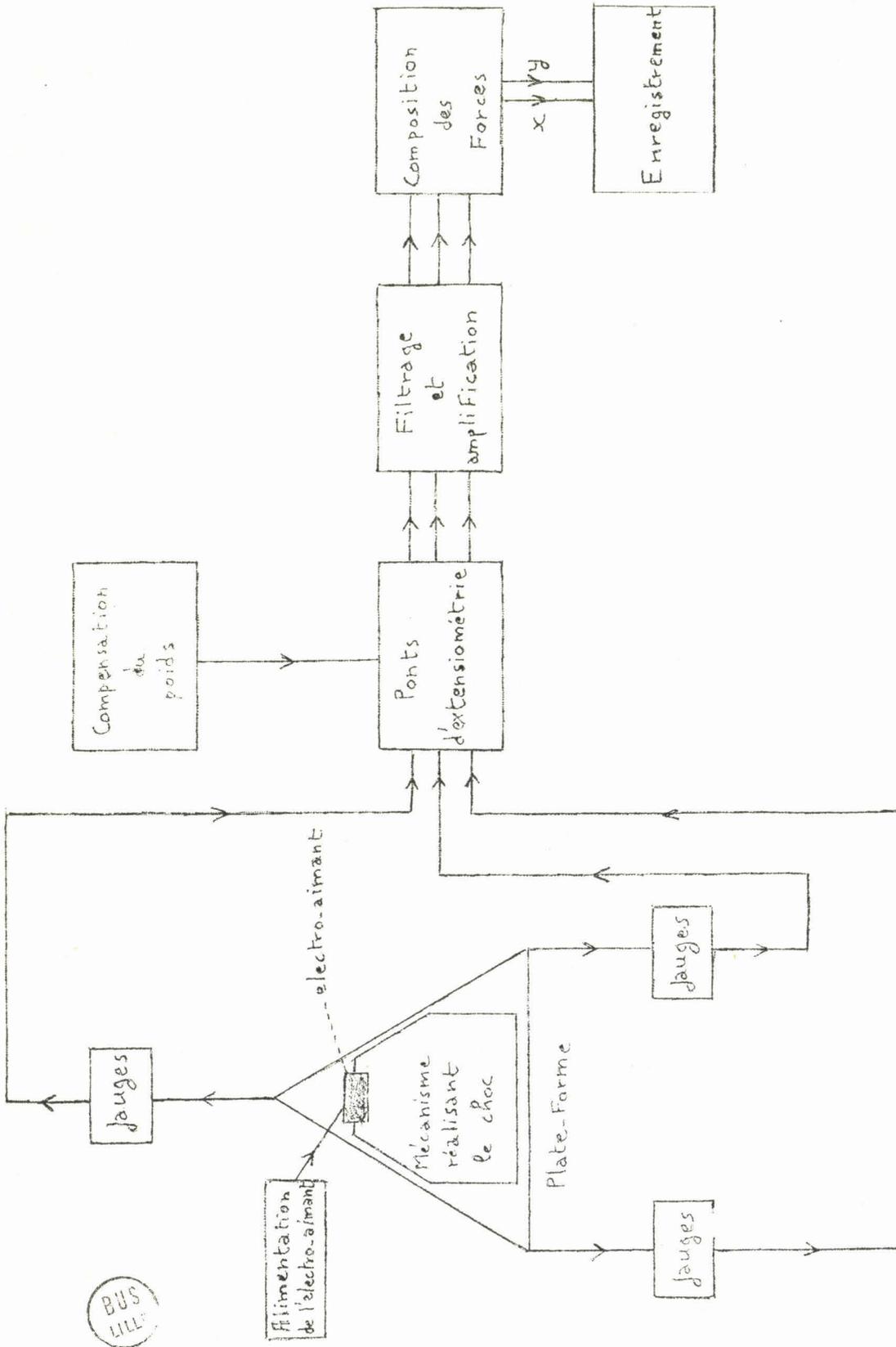
Nous définissons la projection du centre de gravité par la mesure puis la composition des forces s'exerçant en divers points du plan horizontal. Parmi les diverses possibilités de résolution de ce problème, nous avons retenu, pour des raisons de simplicité, de robustesse et de prix, le dispositif suivant :

Le sujet se tient debout sur une plateforme supportée par trois poutres encastrées dans un bâti très rigide et faisant entre elles des angles de 120° . Les mouvements de l'individu provoquent une déformation des barres, qui est captée à l'aide de jauges de contrainte. Un dispositif d'extensiométrie fournit trois tensions électriques proportionnelles à l'allongement de la fibre externe des barres et par conséquent aux déplacements du centre de gravité. Après amplification et mise en forme, ces tensions traitées sur calculatrice analogique fournissent les composantes de la projection du centre de gravité sur le plan horizontal.

Le système est rendu indépendant du poids par un dispositif de compensation incorporé au montage. De plus afin de mieux préciser la fonction d'équilibration nous lui avons adjoint un mécanisme permettant de créer une perturbation du type échelon.



Figure 1



- Figure 2 -

I.1 PARTIE MECANIQUE

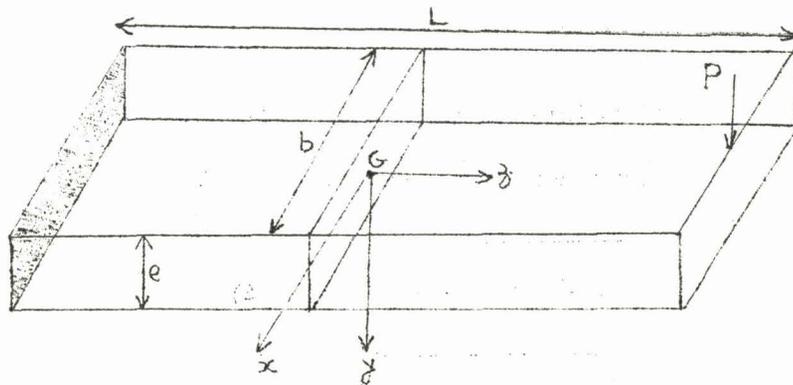
Une plateforme circulaire en aluminium coulé repose sur l'extrémité libre de trois barres d'acier solidement encastées dans un cadre très rigide construit à partir de fers en I soudés. Trois rotules supportent la plateforme et réalisent un équilibre isostatique. Afin de pouvoir engendrer une perturbation en échelon, la plateforme porte un plateau articulé maintenu en position horizontale par un électro-aimant. L'ouverture de l'interrupteur d'alimentation de l'électro-aimant fait basculer le plateau et crée une perturbation très brusque (échelon de position) pour le sujet debout sur le plateau.

La précision et la sensibilité de notre appareillage dépendent en majeure partie de la nature et des dimensions des barres. Pour effectuer ce choix, nous allons calculer un certain nombre de leurs caractéristiques fondamentales et déterminer s'il existe des couplages mécaniques.

I.1.1 Contrainte

La contrainte d'une poutre chargée en flexion simple (figure 3) (équilibre isostatique) est donnée par la **formule** classique :

$$\sigma = - \frac{M_x y}{I}$$



- Figure 3 -

où M_x est la composante du moment fléchissant selon l'axe des x. Compte tenu des notations de la figure 3, le moment d'inertie I de la poutre s'exprime par la formule

$$I = \frac{be^3}{12}$$

On en déduit :

$$\boxed{\sigma = \frac{6 PL}{b e^2} \text{ kg/mm}^2} \quad (1)$$

I.1.2 Flèche

La flèche se calcule à partir de l'équation de la ligne élastique dans le cas d'une flexion simple :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \approx - \frac{M}{E I} \quad \left[y(0) = 0 ; \frac{dy}{dx}(0) = 0 \right] \quad (2)$$

En désignant par M le moment fléchissant par rapport à l'axe Gx et par E le module d'élasticité.

En intégrant cette équation différentielle on obtient : $y = \frac{Px^2}{2 EI} (L - \frac{x}{3})$

La flèche a alors pour expression lorsque $x = L$:

$$\boxed{f = \frac{PL^3}{3 EI} = \frac{4 PL^3}{Ebe^3}} \quad (3)$$

I.1.3 Allongement relatif

L'allongement relatif est donné par la formule classique : $\sigma = E \frac{\Delta L}{L}$
ce qui donne , en tenant compte de la formule (1) :

$$\boxed{\frac{\Delta L}{L} = \frac{6 PL}{Ebe^2}} \quad (4)$$

I.1.4 Fréquence propre de la poutre [5]

Etant donné le théorème classique suivant : l'effort tranchant est égal à la dérivée du moment fléchissant :

$$T = \frac{\partial M}{\partial x}$$

et l'équation (2) : $\frac{d^2 y}{dx^2} \approx - \frac{M}{E I}$

considérons un élément S dx de masse $\rho S dx$ soumis à l'accélération $\frac{d^2 y}{dt^2}$;
 l'équation régissant son mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial x} dx = \rho S \frac{d^2 y}{dt^2} dx$$

$$\rho S \frac{d^2 y}{dt^2} = - \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{d^2 y}{dx^2})$$

comme E et I sont des constantes :

$$\rho S \frac{d^2 y}{dt^2} = - EI \frac{d^4 y}{dx^4} \quad (5)$$

Si l'on suppose le signal y sinusoïdal , de pulsation ω , on peut écrire :

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = - \omega^2 y$$

Après avoir posé $x = L \xi$ (ξ variant entre 0 et 1) et $\alpha^4 = \frac{\rho S L^4 \omega^2}{EI}$
 l'équation (5) s'écrit :

$$\frac{d^4 y}{d\xi^4} = \alpha^4 y$$

la solution générale de l'équation ci-dessus est :

$$y = A \operatorname{ch} \alpha \xi + B \operatorname{sh} \alpha \xi + C \cos \alpha \xi + D \sin \alpha \xi$$

Le calcul des constantes A,B,C,D s'effectue en tenant compte des conditions initiales :

- à l'encastrement $\xi = 0$ $y = 0$ $A+C = 0$

$$\frac{dy}{d\xi} = 0 \quad B+D = 0 \quad \text{sinon il y aurait des efforts infinis dans la barre.}$$

- à l'extrémité libre $\xi = 1$ $\frac{\partial^2 y}{d\xi^2} = 0$ car à cet endroit $M=0$, $\frac{\partial^3 y}{\partial \xi^3} = 0$

d'où les conditions : $A(\operatorname{ch} \alpha + \cos \alpha) + B(\operatorname{sh} \alpha + \sin \alpha) = 0$

$$A(\operatorname{sh} \alpha - \sin \alpha) + B(\operatorname{ch} \alpha + \cos \alpha) = 0$$

Pour avoir des solutions non nulles pour A,B,C,D, il est nécessaire que le déterminant du système soit identiquement nul, condition qui s'exprime par l'équation transcendante $\cos \alpha \operatorname{ch} \alpha + 1 = 0$, dont la première solution est $\alpha = 0,597 \Pi$.

$$\omega = \frac{\alpha^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{3,515}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

$$F_p = \frac{3,515}{4 \pi} \frac{c}{L^2} \sqrt{\frac{E}{3 \rho}} \quad (6)$$

I.1.5 Fréquence de la poutre chargée

La poutre chargée peut être assimilée à un ressort, La formule (3) nous conduit à écrire $gP = kf$ avec $k = \frac{3 EI g}{L^3}$. On a alors $T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{k}}$ d'où la formule de la fréquence :

$$F_c = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{Ebe^3 g}{4 L^3 p}} \quad (7)$$

I.1.6 Détermination des valeurs caractéristiques de la poutre.

A partir des résultats précédents, nous pouvons déterminer les dimensions des barres. Afin de rester dans le domaine d'élasticité des barres, nous devons imposer $\sigma \leq 16 \text{ kg/mm}^2$. Or la condition de limite d'allongement relatif des jauges est toujours plus restrictive $\frac{\Delta L}{L} < 3 \cdot 10^{-3}$ soit d'après (4) :

$$\frac{6 PL}{Ebe^2} < 3 \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

D'autre part pour ne pas perturber les mesures il est impératif d'imposer une valeur F_c minimum de la fréquence de la poutre chargée (la fréquence propre de la poutre étant toujours très supérieure à celle-ci).

D'après l'équation (7) il faut que $\frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{Ebe^3 g}{4 L^3 p}} > F_{c_0}$ (9)
(Nous avons choisi $F_{c_0} = 30 \text{ Hz}$).

La recherche d'un compromis entre les inégalités (8) et (9) conduit au choix :

$$e = 2 \text{ cm}$$

$$L = 20 \text{ cm}$$

$$b = 4 \text{ cm}$$

Compte tenu de ces valeurs nous avons tracé (figure 4) les courbes :

$$\frac{\Delta L}{L} = f(P) ; \sigma = f(P) ; \text{flèche} = f(P) ; F_c = f(P)$$

1.1.7 Etude des couplages [6]

Le calcul des couplages entre les barres (Annexe I) conduit aux expressions des pulsations de couplage vis à vis des trois degrés de liberté : z rebondissement, θ roulis, ϕ galop :

$$\omega_z = \sqrt{\frac{3 Kz}{m}} \quad \omega_\theta = \sqrt{\frac{3 Kz r^2}{2 m \rho_x^2}} \quad \omega_\phi = \sqrt{\frac{3 Kz r^2}{2 m \rho_y^2}} \quad (10)$$

où Kz désigne la rigidité de la poutre.

m désigne le poids appliqué

r la distance de l'origine du système d'axes au point d'application (extrémité des barres).

ρ_x et ρ_y rayons de giration suivant les axes x et y .

En ω_z on retrouve pour le système complet une relation du même type que la relation (7), expression de la pulsation d'une poutre chargée. Quant aux pulsations ω_ϕ et ω_θ , elles prouvent l'existence d'un couplage. Il est impossible de le chiffrer car il dépend de ρ_x et ρ_y rayons de giration de l'individu debout sur la plateforme ; toutefois des essais après réalisation de l'appareil ont montré qu'il était négligeable.

1.2 - PARTIE EXTENSIONOMETRIE [7]

1.2.1 Notions sur les jauges de contrainte

Choix du capteur

Le problème qu'il s'agit de résoudre réside dans la détection des variations des forces de liaison au niveau des rotules ; celles-ci sont relativement faibles par rapport au poids nominal du sujet. En outre, la constante de temps des capteurs ne doit pas être trop élevée si l'on désire enregistrer des phénomènes variables rapidement dans le temps. Aussi, compte tenu de notre dispositif mécanique, le choix ne peut se faire qu'entre quatre types de capteurs :

- capteurs piezoélectriques
- détecteurs à condensateur
- transformateurs différentiels
- jauges de contrainte

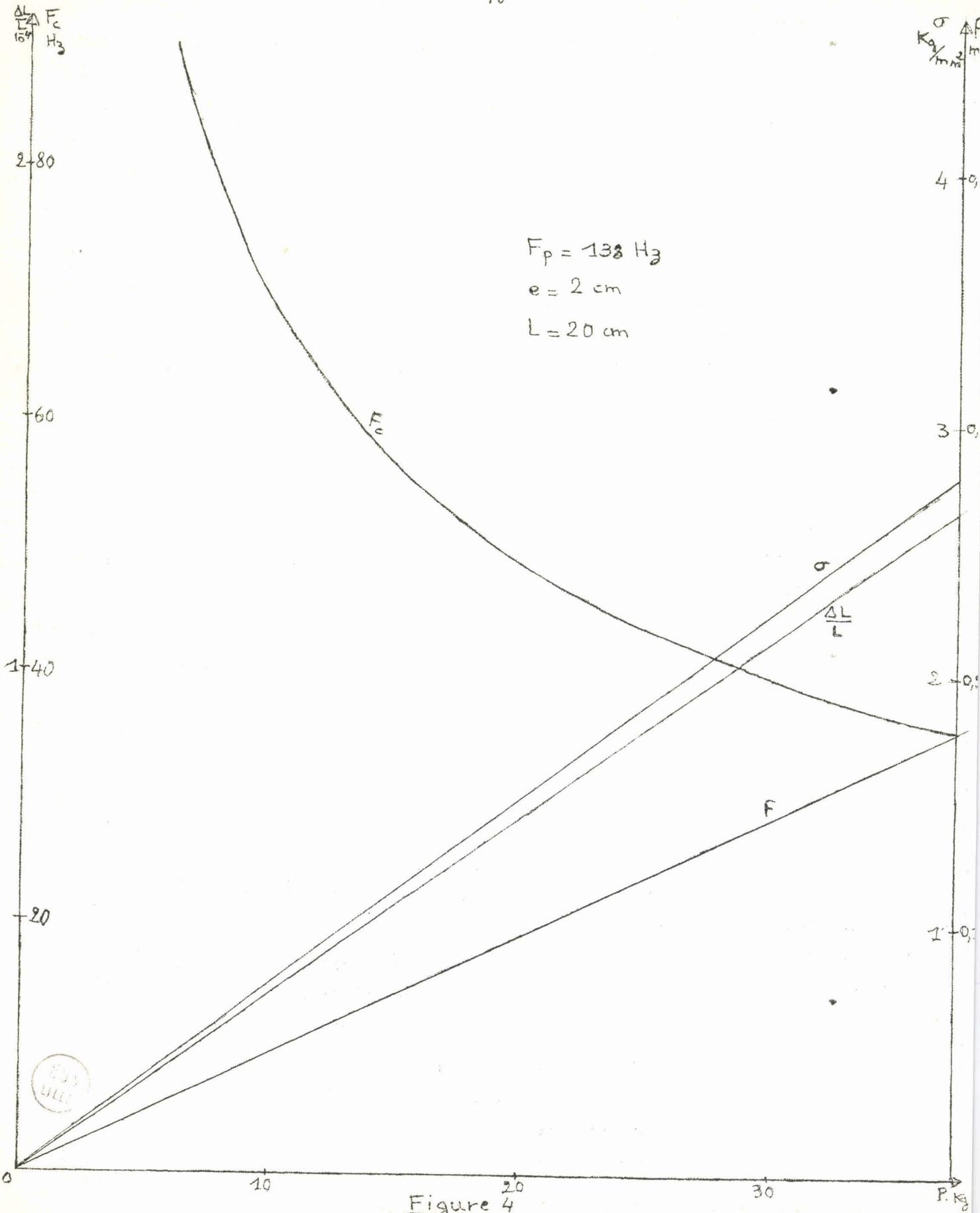


Figure 4

Les deux premiers nécessitent un appareillage électronique fort important et de plus les pressions qu'il est possible d'exercer doivent rester faibles, ce qui est incompatible avec notre obligation de détecter de faibles variations autour d'un niveau continu relativement élevé. Il est donc nécessaire d'avoir une plage de linéarité très large ce qui oblige à utiliser des discriminateurs de fréquence très complexes.

Le transformateur différentiel quoique très intéressant ne donne que des variations de pression ce qui supprime une partie de l'information, et de ce fait ne semble pas bien adapté à notre problème. Nous avons adopté par conséquent des jauges de contrainte, capteurs très sensibles et linéaires sur une très grande plage de variation de l'allongement relatif $\frac{\Delta L}{L}$.

Généralités sur les jauges de contrainte

La jauge de contrainte est constituée par un fil résistant très fin placé entre deux lames cellulósiques souples. Il existe deux grandes catégories de jauges : les jauges à fil résistif en alliage métallique et les jauges semi-conductrices que nous avons adoptées.

Ces dernières sont constituées par un filament taillé dans la masse d'un monocristal de matériau semi-conducteur. Les propriétés particulières inhérentes au phénomène de piézorésistivité font que la variation de résistivité, sous l'effet d'un allongement, est considérablement augmentée au point d'en être le facteur principal.

Cette résistivité est liée au nombre N de porteurs de charge et à leur mobilité moyenne m par la relation $\rho = \frac{1}{eNm}$ e charge de l'électron.

Si nous appliquons une contrainte à la jauge, le nombre de porteurs et leur mobilité varient ; la grandeur et le signe de cette variation dépendent, pour un corps donné de son orientation cristallographique. Dans le cas de traction ou de compression pure le long de la direction du courant, la variation de résistivité s'écrit :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \Pi_{\ell} \sigma \quad \text{avec } \Pi_{\ell} \text{ coefficient longitudinal de piézorésistivité.}$$

La théorie générale des jauges montre que le coefficient K d'un semi-conducteur liant $\frac{\Delta R}{R}$ à $\frac{\Delta L}{L}$ a pour valeur :

$$K = 1 + 2\mu + \frac{\pi Y}{2}$$

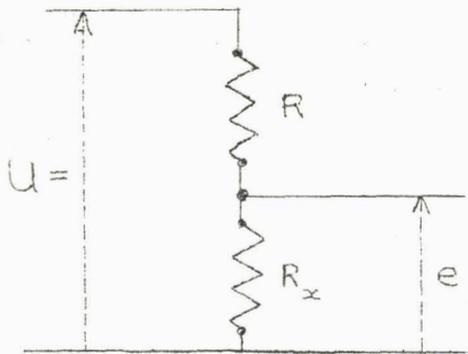
Pour les jauges semi-conductrices, on arrive à obtenir $K = 200$ ($\frac{\pi Y}{2}$ prépondérant) alors que pour les jauges à fil métallique $K = 2$ (μ prépondérant) ; c'est pourquoi, afin d'obtenir une très grande sensibilité nous avons choisi des jauges semi conductrices.

1.2.2 Généralités sur les montages extensiométriques

Le but des montages extensiométriques au nombre de quatre est de transformer la variation de résistance des jauges $\frac{\Delta R}{R}$ en variation de tension $\frac{\Delta e}{e}$.

1.2.2.1 - Montage potentiométrique

Le schéma est indiqué figure 5



- figure 5 -

R_x étant la jauge, il vient :

$$e = \frac{R_x U}{R + R_x}$$

- si $R \gg R_x$ $e = \frac{R_x U}{R}$ $\Delta e = \frac{U}{R} \Delta R_x$

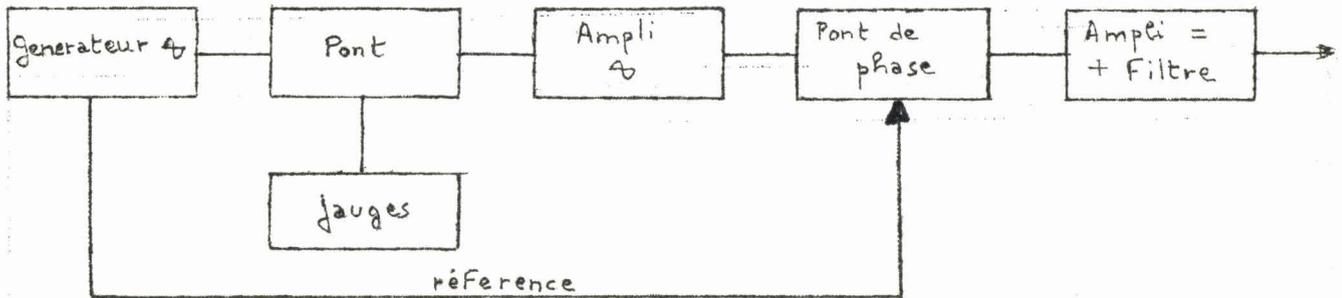
- $\Delta e = U \frac{\Delta R_x}{R_x} \frac{R R_x}{(R + R_x)^2}$ Δe est maximum pour $R = R_x$

- $\Delta e_{\max} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_x}{R_x}$

Ce dispositif est en pratique inutilisable car il ne réalise pas de compensation de température et de plus lorsqu'on superpose aux variations alternatives un niveau continu, il est impossible de l'éliminer si l'on utilise un

amplificateur à courant continu.

1.2.2.2 - Montage en pont alimenté en alternatif



- figure 6 -

Un générateur d'amplitude fixe E_0 et de fréquence ω stabilisée alimente un pont de Wheatstone sur l'une des branches duquel on insère la jauge de contrainte (figure 6).

Compte tenu de la relation :

$$R = R_0 \left[1 + \frac{dR}{R} f(t) \right]$$

la tension de déséquilibre du pont s'écrit :

$$\Delta V = \frac{E_0}{4} \frac{dR}{R} \sin \omega t f(t)$$

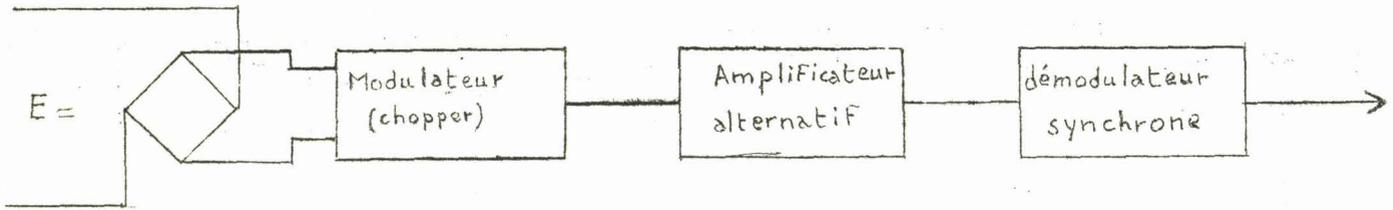
Dans le cas où $f(t) = \sin \Omega t$ on obtient :

$$\Delta V = - \frac{E_0}{8} \frac{dR}{R} \left[\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t \right]$$

Il convient de remarquer que l'amplificateur doit avoir une bande passante $B = 2 \Omega_m$; Ω_m étant la pulsation maximum du phénomène à étudier.

Ce dispositif permet de réaliser une amplification à très grand gain et de diminuer le bruit de fond (celui-ci étant proportionnel à la bande passante); le pont de phase détecte le sens de variation, et un filtre restitue le signal $f(t)$. Ce montage très intéressant n'a pu être utilisé à cause de son prix de revient trop élevé, pour l'utilisation désirée.

1.2.2.3 - Montage en pont alimenté par tension continue et amplification en alternatif.



- figure 7 -

Dans ce montage (figure 7) la tension continue modulée est amplifiée avec un grand gain, mais le bruit de fond reste important il est alors nécessaire de filtrer le signal. C'est la méthode que nous avons choisie ; l'ensemble modulateur, amplificateur démodulateur étant réalisé à partir d'un amplificateur opérationnel.

1.2.2.4 - Montage en pont alimenté par tension continue

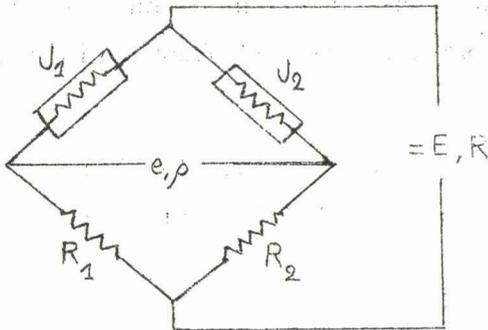
La sortie du pont est directement reliée à un amplificateur à courant continu. Ce montage est difficilement utilisable à cause des dérives car les gains des amplificateurs de la chaîne ne peuvent être rendus très grands.

1.2.3 Etude du pont de jauges

Le problème consiste à détecter une variation moyenne de longueur de jauge $\frac{\Delta L}{L}$ de 10^{-4} (composante poids) avec des variations d'environ $3 \cdot 10^{-6}$.

Pour compenser les variations dues à la température, on utilise un montage en demi-pont ; en plaçant sur la barre supportant la plateforme une jauge dite active J_2 et sous la barre une jauge de compensation J_1 . J_2 travaille donc dans le sens opposé à J_1 .

Considérons le pont de jauges de la figure 8.



- figure 3 -

la tension de déséquilibre e a pour valeur

$$e = \rho \frac{\frac{ER_1}{R_1 + R + J_1} - \frac{ER_2}{R_2 + R + J_2}}{\frac{R_1(R + J_1)}{R + R_1 + J_1} + \frac{R_2(R + J_2)}{R + R_2 + J_2}}$$

En première approximation, en supposant $\rho \gg \frac{R_2(R + J_2)}{R + R_2 + J_2} + \frac{R_1(R + J_1)}{R + R_1 + J_1}$

et $R \ll R_1 + J_1$ et $R_2 + J_2$, il vient :

$$e = \frac{E(R_1 J_2 - R_2 J_1)}{(R_1 + J_1)(R_2 + J_2)} \quad (12)$$

en tenant compte de l'équilibre initial du pont : $J_2 = J + \Delta R$ $J_1 = J - \Delta R$

et $R_1 = R_2 = J$ on a
$$e = \frac{2EAR}{R_1} \frac{1}{4 - \left(\frac{\Delta R}{R_1}\right)^2} \quad (13)$$

si $\frac{\Delta R}{R_1} \ll 2$ il vient :
$$e = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R_1} \quad (14)$$

1.2.3.1 - Choix des jauges

L'équation (14) permet d'écrire :

$$e = \frac{E}{2} K \frac{\Delta L}{L} \quad (15)$$

L'importance du coefficient K est alors mise en évidence et justifie notre choix de jauges semi-conductrices ($K = 200$). Nous avons utilisé les jauges suivantes :

- Budd type DHP 10000-500 de résistance nominale 10 k Ω
- Facteur de jauge $K = + 195$, déformation maximale $3000 \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta L}{L}$.

1.2.3.2 - Détermination de l'alimentation régulée

La puissance dissipée dans les jauges devant être inférieure à la puissance maximale autorisée par le constructeur soit : 5 mW, il faut choisir une tension d'alimentation de $E = 8$ v.

Nous avons réalisé une alimentation stabilisée (figure 9) dont les performances sont les suivantes : $E = 8$ v, $I_{\max} = 20$ mA, $R < 1\Omega$, stabilisée à 5/1000.

1.2.3.3 - Valeur de la tension d'erreur

La composante poids compte tenu de la relation $\frac{\Delta L}{L_{\max}} = 2 \cdot 10^{-4}$ conduit à une-tension continue : $e = 160$ mV. Une variation de 1 kg sur une barre provoque un allongement relatif $\frac{\Delta L}{L} = 3 \cdot 10^{-6}$, c'est à dire engendre une tension variable de $e = 2,4$ mv ce qui implique la compensation de la composante poids.

1.2.3.4 - Compensation de la composante poids

La méthode la plus simple pour annuler la tension continue représentative de la composante poids, consiste à ajouter en série avec la jauge J_1 une résistance r_1 variable suivant le poids.

En première approximation on peut écrire :

$$e = \frac{E [R_1 J_2 - R_2 (J_1 + r_1)]}{(R_1 + J_1 + r_1)(R_2 + J_2)}$$

et si r_1 est négligeable devant $(R_1 + J_1)$ il vient :

$$e = \frac{2 ER_1 \Delta R - ER_1 r_1}{4 R_1^2 - (\Delta R)^2}$$

Posons $R_1 = R_2 = J$ $J_2 = J + \Delta R$ $J_1 = J - \Delta R$ et si $\frac{\Delta R}{R_1}$ est très petit devant 2

$$e = \frac{E \Delta R}{2R_1} - \frac{Er_1}{4R_1} \quad (16)$$

Il suffit alors de régler r_1 de manière à ce que $e_0 = \frac{Er_1}{4R_1}$: cette valeur de e_0 s'obtient à partir de la courbe $\frac{\Delta L}{L} = f(P)$ de la figure 4 par l'intermédiaire de la formule (15).

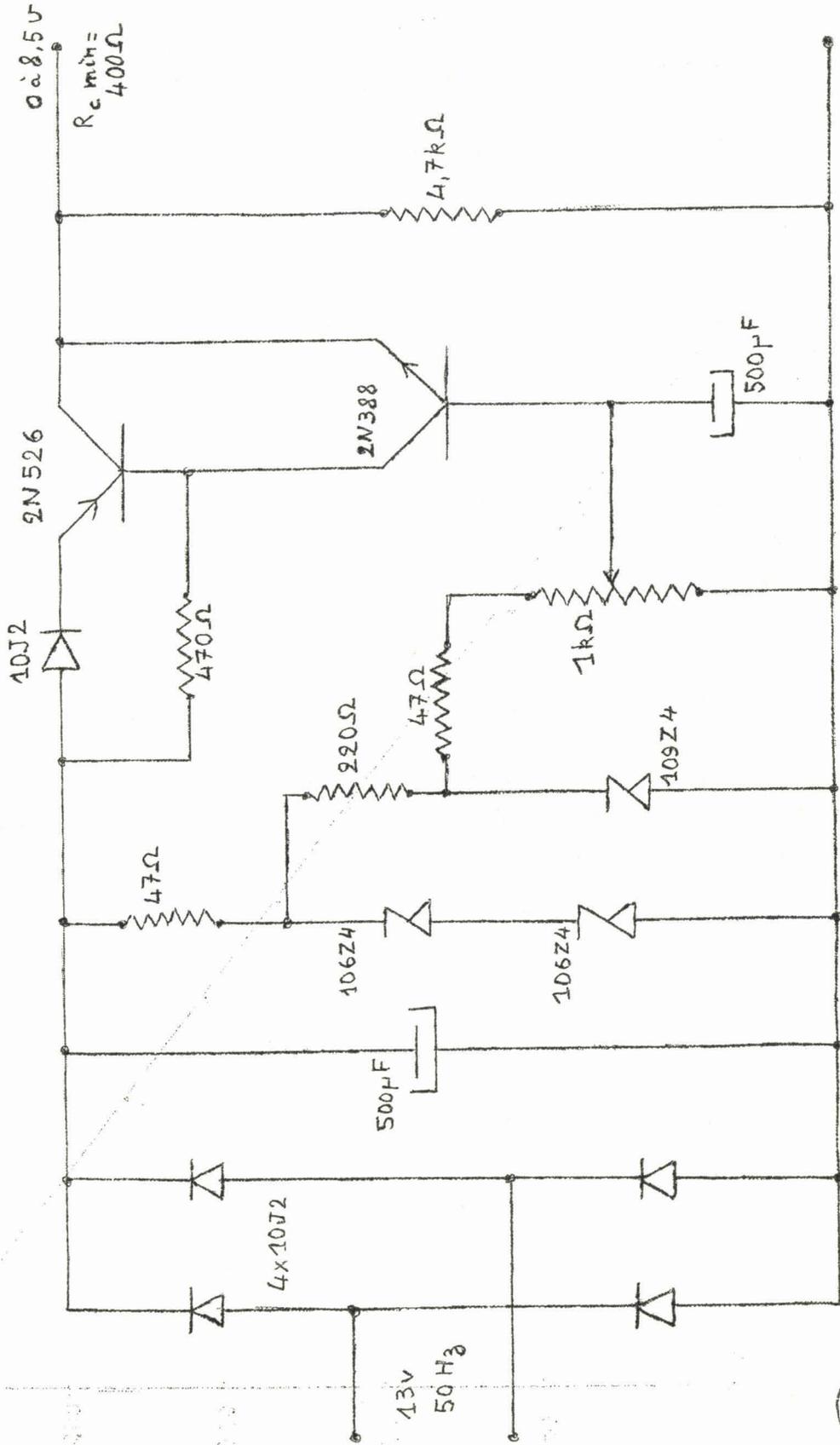


Figure 9

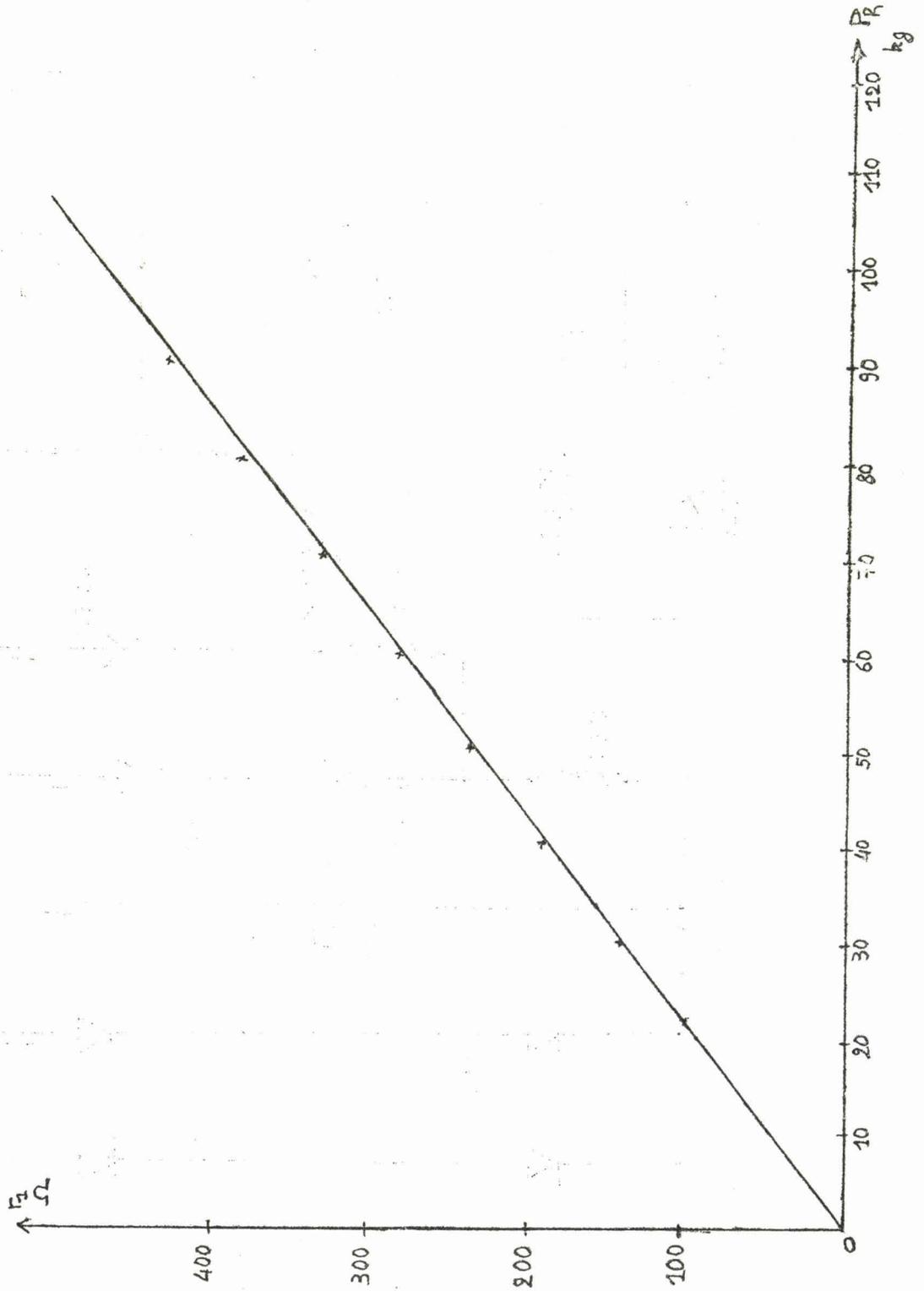


Figure 10



Ceci permet de tracer la courbe $r_1 = f(P_h)$ (figure 10) P_h poids de l'individu debout sur le plateau.

1.2.3.5 - Formule générale

Introduisons la résistance r_1 dans la formule (11) (en négligeant R devant $R_1 + J_1$)

$$e = \rho \frac{\frac{ER_1}{R_1 + J_1 + r_1} - \frac{ER_2}{R_2 + J_2}}{\frac{R_1(J_1 + r_1)}{R_1 + J_1 + r_1} + \rho + \frac{R_2 J_2}{R_2 + J_2}}$$

posons $R_1 = R_2 = J$ $J_2 = J + \Delta R$ $J_1 = J - \Delta R$, il vient :

$$e = \frac{1}{1 + \frac{1}{\rho} \left[\frac{R_1(R_1 + r_1 - \Delta R)}{2 R_1 + r_1 - \Delta R} + \frac{R_1(R_1 + \Delta R)}{2 R_1 + \Delta R} \right]} \times \frac{2 ER_1 \Delta R - ER_1 r_1}{4 R_1^2 + r_1 (2 R_1 + \Delta R) - (\Delta R)^2}$$

et si $(\Delta R)^2$ est négligeable

$$e = \left[\frac{E \Delta R}{2 R_1} - \frac{r_1 E}{4 R_1} \right] \frac{1}{1 + \frac{r_1}{4 R_1} \left(2 + \frac{\Delta R}{R_1} \right)} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{\rho} \left[\frac{R_1(R_1 - \Delta R + r_1)}{2 R_1 + r_1 - \Delta R} + \frac{R_1(R_1 + \Delta R)}{2 R_1 + \Delta R} \right]}$$

On peut considérer que ΔR est scindé en deux parties : ΔR_0 correspondant à la composante poids, et Δr correspondant aux variations.

Or :
$$\frac{E \Delta R_0}{2 R_1} = \frac{r_1 E}{4 R_1} \text{ c'est à dire : } r_1 = 2 \Delta R_0$$

d'où :
$$e = \frac{E \Delta r}{2 R_1} \frac{1}{1 + \frac{r_1}{4 R_1} \left[2 + \frac{r_1}{2 R_1} \right]} \times \frac{1}{1 + \frac{R_1}{\rho} \left[\frac{R_1 + \frac{r_1}{2}}{2 R_1 + \frac{r_1}{2}} + \frac{R_1 + \frac{r_1}{2}}{2 R_1 + \frac{r_1}{2}} \right]}$$

soit donc
$$e = \frac{E\Delta r}{2 R_1} \frac{1}{1 + \frac{r_1}{4R_1} \left[2 + \frac{r_1}{2 R_1} \right]} \frac{1}{1 + \frac{2 R_1}{\rho} \left[\frac{1 + \frac{r_1}{2 R_1}}{2 + \frac{r_1}{2 R_1}} \right]}$$

en posant : $\epsilon = \frac{r_1}{2 R_1}$ e s'écrit :

$$e = \frac{E\Delta r}{2 R_1} \frac{1}{1 + \epsilon + \frac{2 R_1}{\rho} \left[\frac{1 + 2 \epsilon}{2 + \epsilon} \right]} \quad (17)$$

Compte tenu de l'expression (17), il est possible de tracer (figure 11) l'erreur commise sur e en fonction du poids de l'individu debout sur la plateforme en prenant ρ , impédance d'entrée de l'amplificateur, comme paramètre.

1.3 - PARTIE ELECTRONIQUE DU MONTAGE

1.3.1 Amplification

Les caractéristiques de l'amplificateur se déduisent facilement des calculs précédents. L'utilisation de jauges semi-conductrices très sensibles nécessitent un gain de la chaîne de mesure inférieur à 100. D'autre part afin que l'erreur ne soit pas trop importante nous avons choisi pour impédance d'entrée de l'amplificateur une résistance de 1 M Ω (erreur inférieure à 3 %). En outre la composition des tensions nécessitant l'emploi d'amplificateurs opérationnels, nous nous sommes servis de ceux-ci pour obtenir le gain indiqué ci-dessus.

1.3.2 Composition des tensions

1.3.2.1 - Détermination des coordonnées du centre de gravité

Par construction les forces F_1 , F_2 , et F_3 sont appliquées aux trois sommets (M_1, M_2, M_3) d'un triangle équilatéral de côté a.

Pour un système d'axes rectangulaires quelconque xOy avec G centre de gravité du triangle $M_1 M_2 M_3$, on a la relation :

$$(a_1 + a_2 + a_3) \vec{Og} = a_1 \vec{OM}_1 + a_2 \vec{OM}_2 + a_3 \vec{OM}_3$$

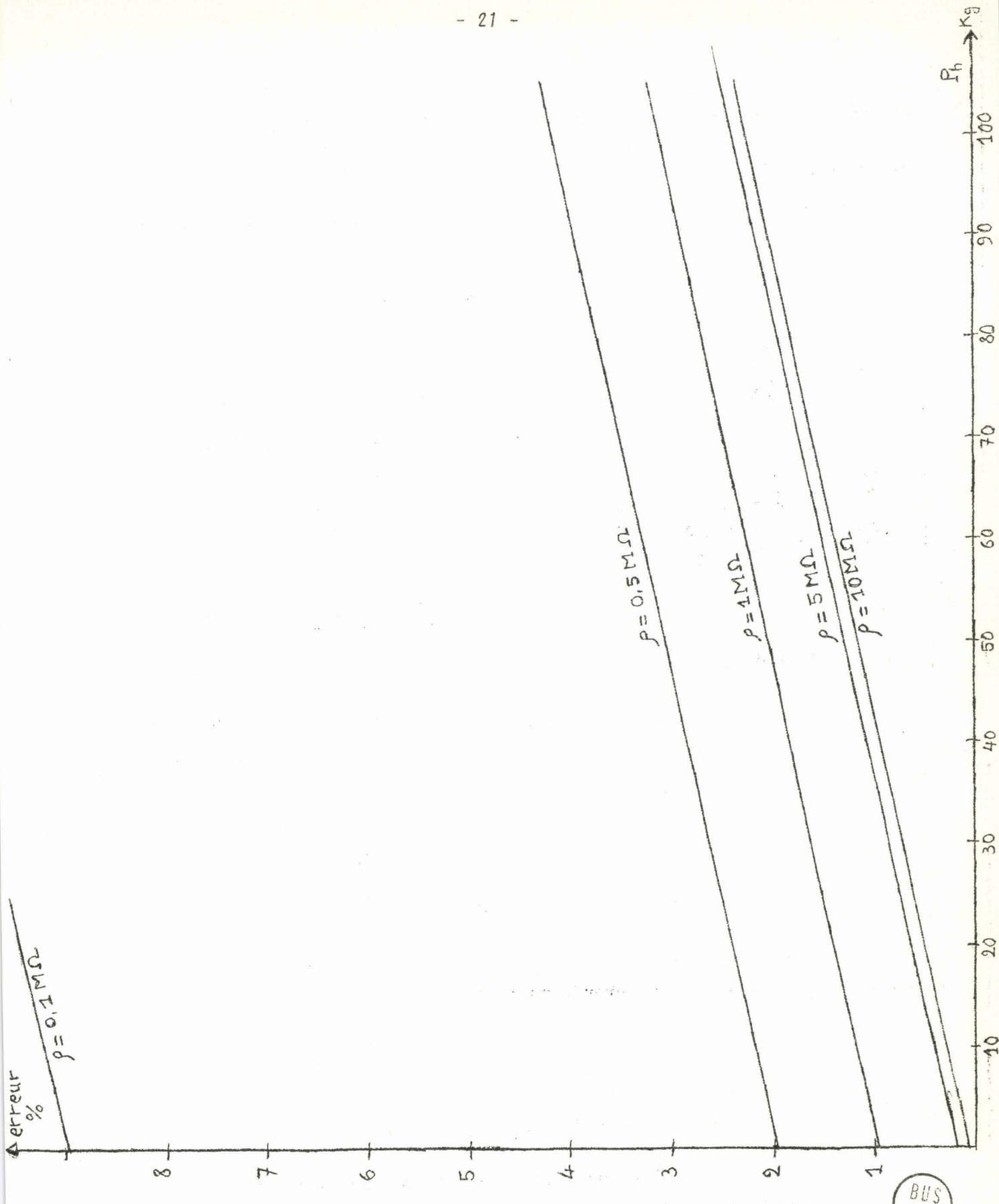
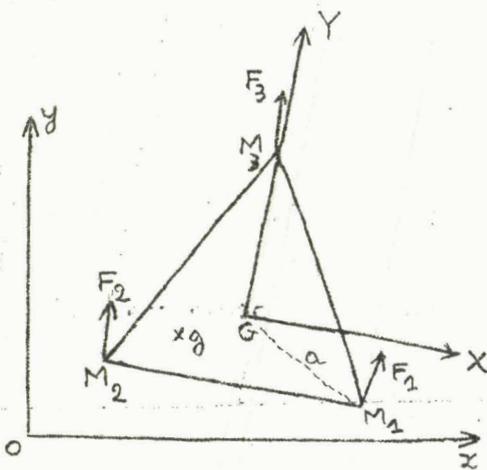


Figure 11



en appelant a_1, a_2, a_3 des coefficients attachés aux points M_1, M_2, M_3 . Dans notre montage $a_1 = F_1, a_2 = F_2, a_3 = F_3$.

Si nous projetons sur les axes Ox, Oy la relation vectorielle ci-dessus nous obtenons :



- figure 12 -

$$(a_1 + a_2 + a_3)x = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

$$(a_1 + a_2 + a_3)y = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3$$

Posons : $e_1 = kF_1 - e_0$, $e_2 = kF_2 - e_0$, $e_3 = kF_3 - e_0$

(e_0 représente la composante poids.) Dans le système d'axes (fig.12) il vient :

$$X = \frac{a}{2} \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2 + e_3 + 3 e_0}$$

$$Y = \frac{a\sqrt{3}}{6} \frac{2 e_3 - e_1 - e_2}{e_1 + e_2 + e_3 + 3 e_0}$$

En pratique on peut considérer la somme $e_1 + e_2 + e_3$ négligeable devant $3 e_0$. L'expérience nous a montré que l'erreur commise reste inférieure à 4 %.

Ceci permet d'écrire

$$X = \frac{a}{2} \frac{e_1 - e_2}{3 e_0} \quad (18)$$

$$Y = \frac{a\sqrt{3}}{6} \frac{2 e_3 - e_1 - e_2}{3 e_0}$$

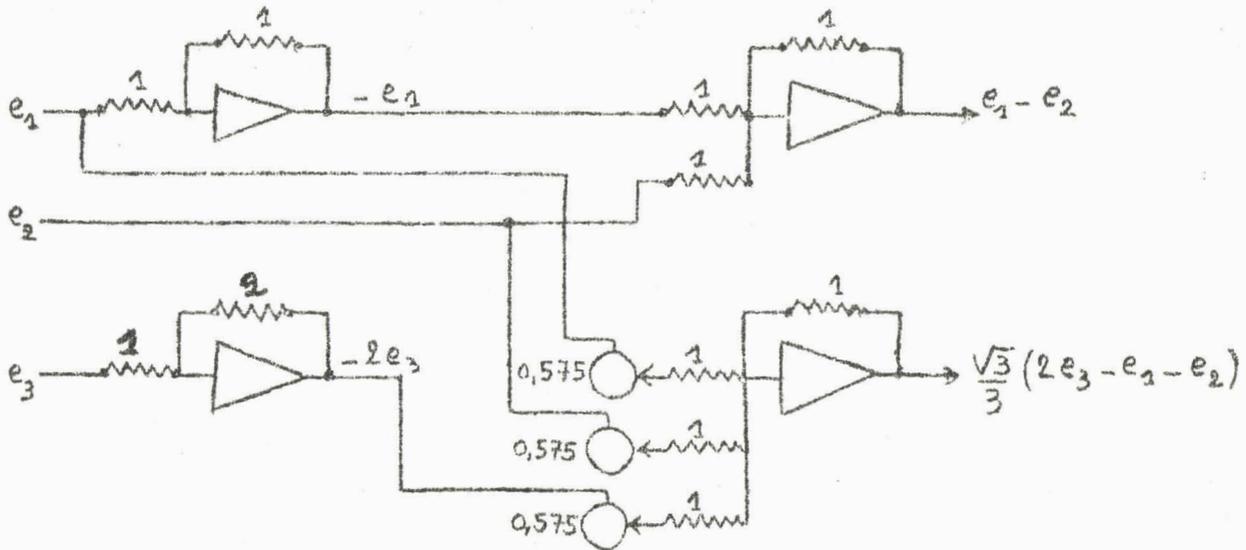
Il suffit pour composer les tensions de réaliser X et Y sur calculatrice analogique. En fait nous prendrions :

$$X = (e_1 - e_2) \quad (19)$$

$$Y = \frac{\sqrt{3}}{3} (2 e_3 - e_1 - e_2)$$

c'est à dire que nous amplifions par $\frac{6 e_0}{a}$ chaque composante de façon à rendre les coordonnées indépendantes du poids.

1.3.2.2 - Schéma de la composition



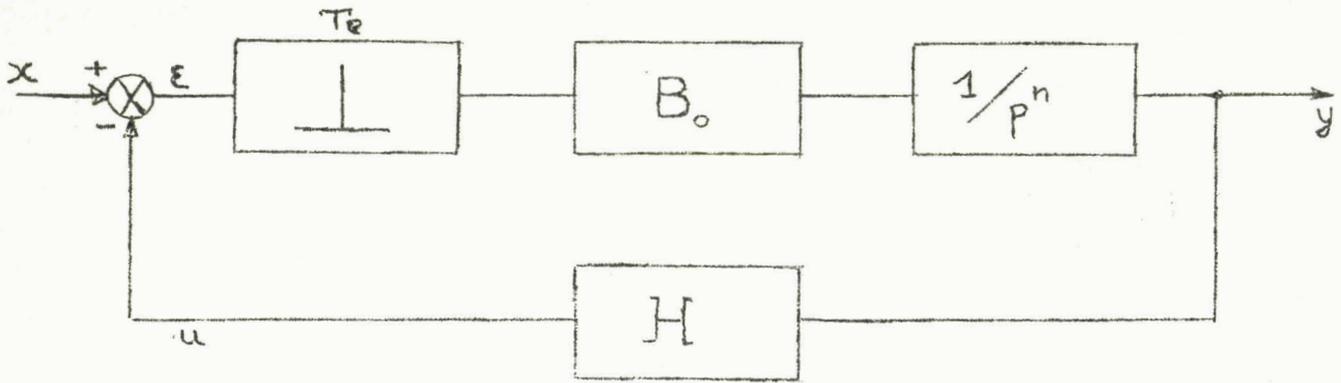
- figure 13 -

1.3.3 Filtrage

Les signaux que nous avons à exploiter sont principalement entachés de bruit à fréquence fixe et égale à 50 Hz, engendré par les diverses alimentations alternatives du montage. Il faut donc réaliser un filtre passe-bas dont la fréquence à atténuation infinie est 50 Hz, et dont la bande-passante est voisine de 20 Hz, afin d'enregistrer les signaux variables dans la gamme dite physiologique.

Les filtres passifs ont l'inconvénient d'avoir un déphasage non constant dans la bande passante et l'atténuation infinie est difficile à réaliser. C'est pourquoi nous avons utilisé un filtre à échantillonnage : un signal de fréquence assez basse, auquel se superpose un bruit de fréquence plus élevée et constante, peut être supprimé, si l'échantillonnage se fait à la fréquence du bruit. Si le déphasage n'est pas nul, le bruit devient une constante, dans le cas contraire cette constante est nulle.

Le théorème de SHANNON-KOCHENBURGER [12] démontre qu'on ne peut transmettre convenablement que des signaux dont la fréquence est au plus moitié de celle de l'échantillonneur.



- figure 14 -

Le signal échantillonné puis bloqué (B_0 bloqueur d'ordre zéro) est reconstitué grâce à un extrapolateur d'ordre n ; dans la boucle de retour, H est un élément qui réalise la fonction :

$$u = a_1 y + a_2 y^{(1)} + a_3 y^{(2)} + \dots + a_n y^{(n-1)} \quad (20)$$

Les coefficients a_1, a_2, \dots, a_n sont déterminés pour que le système soit totalement stable, ce qui correspond au meilleur système possible [13], c'est à dire en annulant toutes les racines de l'équation caractéristique.

Dans ce cas la sortie suit sensiblement l'entrée avec un retard de n périodes d'échantillonnage T_e .

Compte tenu de la relation (20), en symbolisant les variables d'état à l'instant nT_e par l'indice n , l'équation régissant le système s'écrit :

$$Y_{n+1} = AY_n + Bx_n \quad (21)$$

avec :

$$Y_{n+1} = \begin{bmatrix} y_{n+1} \\ y_{n+1}^{(1)} \\ y_{n+1}^{(2)} \\ \vdots \\ y_{n+1}^{(n-1)} \end{bmatrix} ; \quad Y_n = \begin{bmatrix} y_n \\ y_n^{(1)} \\ y_n^{(2)} \\ \vdots \\ y_n^{(n-1)} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{n!} \\ \frac{1}{(n-1)!} \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

et A =

$$\begin{bmatrix}
 1 - \frac{a_1}{n!} & 1 - \frac{a_2}{n!} & \frac{1}{2!} - \frac{a_3}{n!} & \dots & \frac{1}{n-1!} - \frac{a_n}{n!} \\
 -\frac{a_1}{n-1!} & 1 - \frac{a_2}{n-1!} & 1 - \frac{a_3}{n-1!} & \dots & \frac{1}{n-2!} - \frac{a_n}{n-1!} \\
 -\frac{a_1}{n-2!} & -\frac{a_2}{n-2!} & 1 - \frac{a_3}{n-2!} & \dots & \frac{1}{n-3!} - \frac{a_n}{n-2!} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 -\frac{a_1}{2!} & -\frac{a_2}{2!} & -\frac{a_3}{2!} & \dots & 1 - \frac{a_n}{2!} \\
 -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & 1 - a_n
 \end{bmatrix}
 \tag{22}$$

Pour obtenir l'équation caractéristique, nous développons le déterminant de la matrice $[A - \lambda I]$ avec λ valeurs propres, I matrice unité.

En effectuant, la soustraction pondérée de la première ligne aux autres nous éliminons les coefficients a_i dans les $(n-1)$ dernières lignes, et en développant maintenant par rapport à la première ligne, nous obtenons un polynôme en λ qui, une fois ordonné, a des coefficients fonctions linéaires des a_i . Pour que les valeurs propres soient toutes nulles, il faut que ces coefficients soient nuls.

Ce système a en général une solution et une seule si son déterminant est différent de zéro. Il est alors possible de calculer les coefficients de réglage a_i [14].

En pratique un extrapolateur d'ordre deux suffit. Dans ce cas, l'expression (22) devient :

$$A = \begin{bmatrix}
 1 - \frac{a_1}{2!} & 1 - \frac{a_2}{2!} \\
 -a_1 & 1 - a_2
 \end{bmatrix}
 \tag{23}$$

Elle a pour équation caractéristique : $\lambda^2 + \lambda(\frac{a_1}{2} + a_2 - 2) + (\frac{a_1}{2} - a_2 + 1) = 0$ (24)

d'où

$$\begin{cases} \frac{a_1}{2} + a_2 - 2 = 0 \\ \frac{a_1}{2} - a_2 + 1 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

on en déduit $a_1 = 1$ $a_2 = 3/2$.

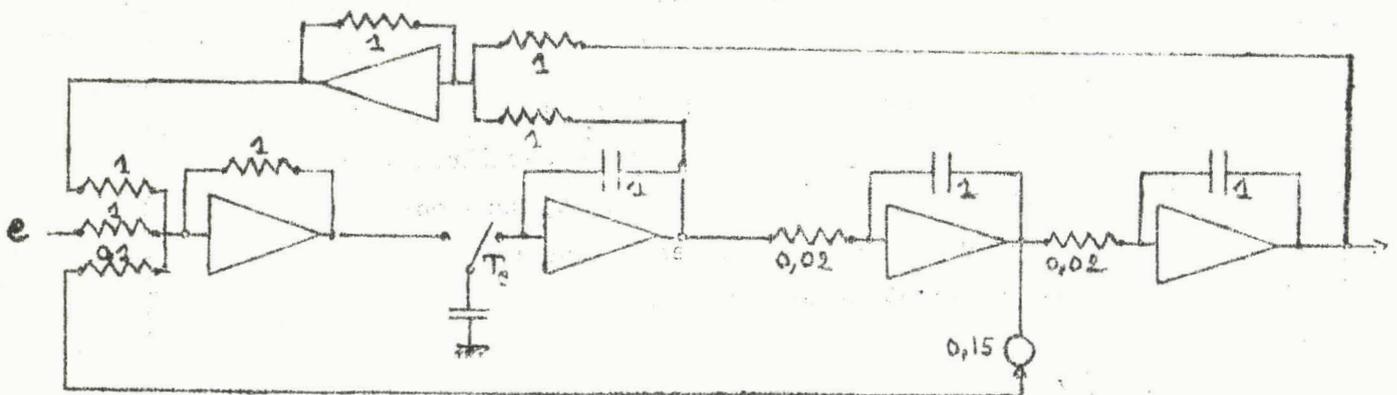
L'équation de récurrence reliant la sortie à l'entrée peut finalement être écrite :

$$y_{n+2} = \frac{x_{n+1}}{2} + \frac{x_n}{2} \quad (26)$$

et l'équation aux erreurs : $\epsilon_{n+2} = x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n$ (27)

Avec un tel filtre on obtient une bande passante égale à environ 20 Hz ; il n'y a pas de déphasage mais un retard pur constant dans toute la bande passante et égal à deux périodes d'échantillonnage [8], et la réponse du système à un échelon unité se fait sans dépassement.

Le schéma de ce dispositif réalisé sur calculatrice analogique [9] est indiqué figure 15.



- figure 15 -

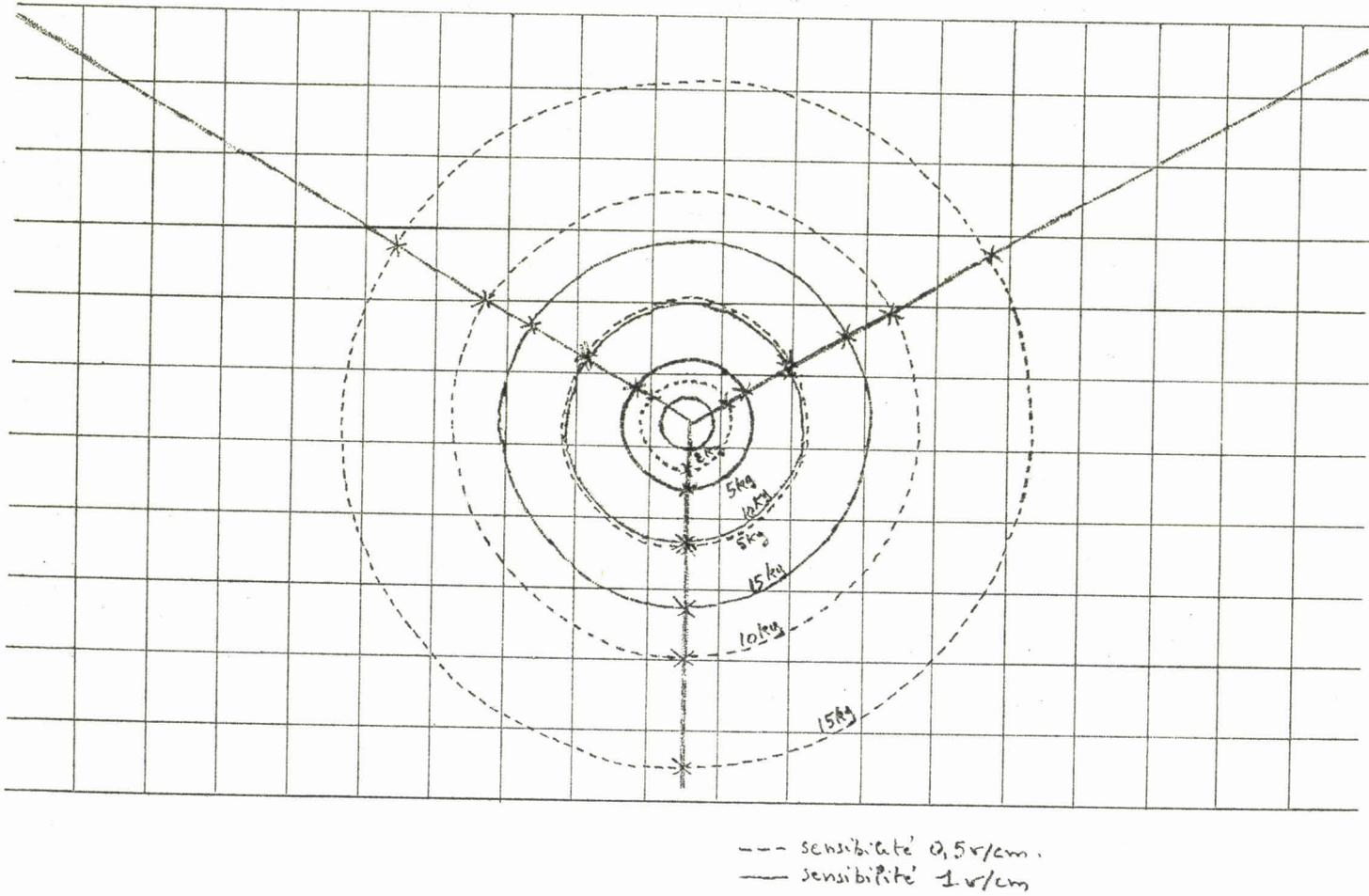
1.4 TESTS ET ESSAIS

1.4.1 Le premier test consiste à vérifier la symétrie du montage, c'est à dire après avoir enlevé le plateau central, à appuyer sur chacune des barres de

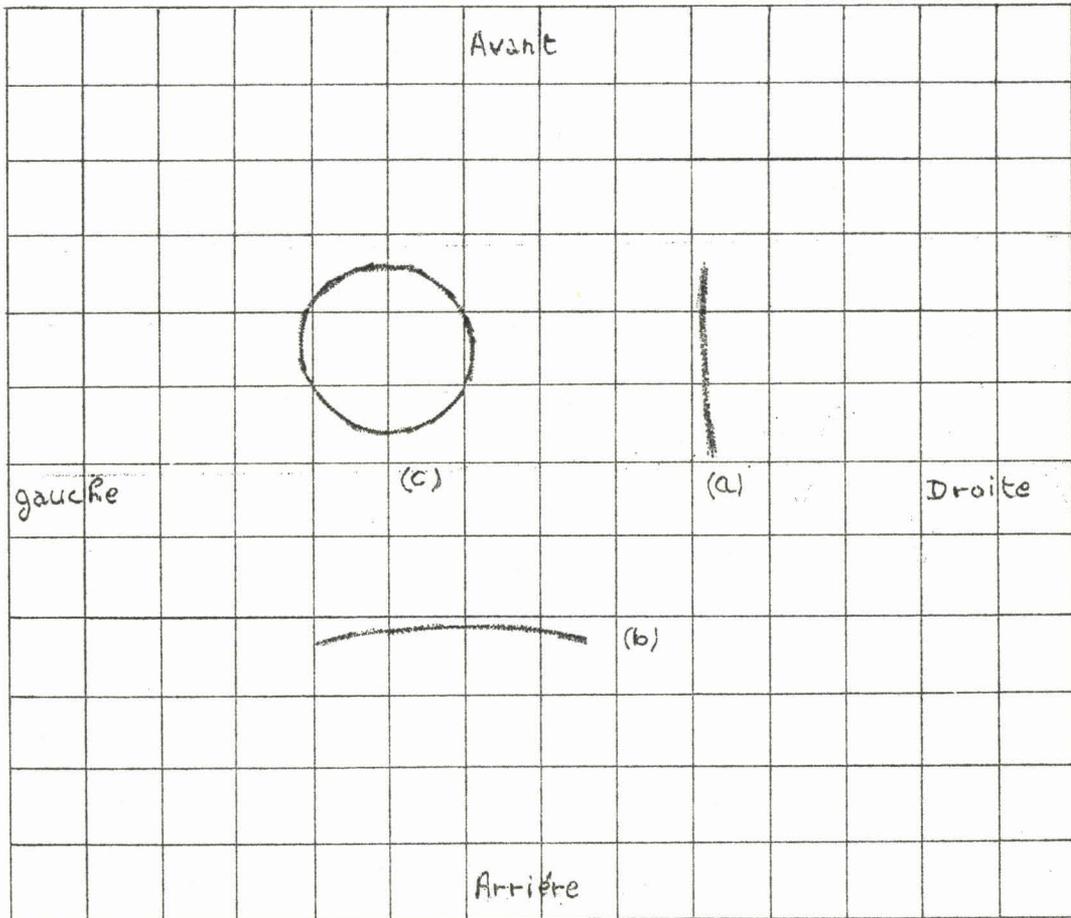
flexion de manière à obtenir trois droites faisant entre elles des angles de 120° . Ensuite il convient de placer différents poids sur chacune des barres et de vérifier que les points images du centre de gravité se trouvent sur un cercle. En outre la distance du point obtenu au centre de la figure (obtenu au repos) doit être proportionnelle au poids appliqué. La figure 16 réunit ces divers essais.

I.4.2 Afin de vérifier qualitativement que le point obtenu est bien représentatif de la projection du centre de gravité, nous avons réalisé le test suivant: sur le plateau central nous disposons un pendule simple (poids de 2 kg). En le faisant osciller dans le plan antéro-postérieur, nous obtenons le tracé de la figure 17 a ; 17 b correspond à une oscillation latérale (la légère courbure est due à un manque de rigidité de la tige supportant le pendule) ; l'oscillation circulaire est celle de la figure 17 c.

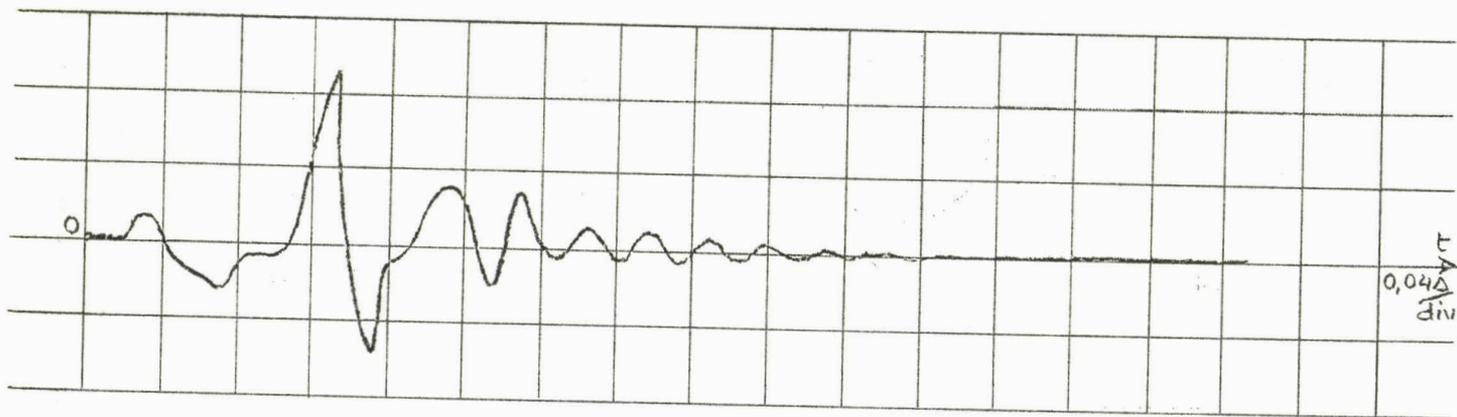
I.4.3 Enfin nous allons essayer de déterminer l'importance de la perturbation créée par le choc. Pour cela nous plaçons une masse inerte sur le plateau et nous effectuons le basculement. L'enregistrement (figure 18) montre que, pendant environ 0,2 s, la réaction des barres fausse les mesures. Ce temps correspond sensiblement au temps de réaction nerveuse de l'homme et par ce fait ne gêne pratiquement pas l'interprétation des mesures.



- Figure 16.



- Figure 17 -



- Figure 18 -



1.5 CONCLUSION

Le dispositif expérimental que nous venons de décrire présente deux particularités essentielles :

- Il montre tout d'abord l'intérêt de l'association d'une calculatrice analogique à un organe mécanique. Celle-ci permet d'effectuer en continu un certain nombre d'opérations simples : sommation, inversion de signe, multiplication, intégration et même dérivation [15].

- Le montage présente également l'avantage de permettre une étude statique et dynamique de la fonction d'équilibration. L'analyse des résultats obtenus fait l'objet de la seconde partie.

II^e PARTIE

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie, après avoir décrit le déroulement des expériences, nous nous proposons d'en analyser les résultats et d'examiner leurs conséquences. En effet le nombre important de tests effectués exige tout d'abord une étude statistique des paramètres choisis ; celle-ci est rendue nécessaire par le caractère physiologique des expériences. Puis à l'aide de ces travaux, nous tenterons de montrer l'intérêt d'une utilisation du dispositif pour des sujets malades.

II.1 GENERALITES ET PRESENTATION DES EXPERIENCES

II.1.1 Protocole d'expérience

Les mesures, que nous avons effectuées au Laboratoire de Physiologie de la Faculté de Médecine de l'Université de Lille, ont porté sur 80 personnes, dont 64 normales.

Dans le but de réaliser les expériences dans les mêmes conditions, nous avons défini un protocole de mesure. Le sujet se tient debout, les bras le long du corps, sans chaussures, talons joints, les pieds faisant un angle de 45°. Il doit, pendant le test, regarder un rectangle blanc (25 cm x 30 cm) placé à environ 4 mètres devant lui, à la hauteur des yeux ; la tête se trouve ainsi dans une posture donnée, pratiquement identique pour des individus de tailles différentes.

II.1.2 Divers types d'enregistrements

Les expériences comportent deux phases principales : les enregistrements statiques puis les enregistrements dynamiques.

Les premiers, effectués sur une table traçante sont les suivants :

- Trois enregistrements, les yeux ouverts, de durée croissante 10 secondes, 20 secondes et 30 secondes.

- Trois enregistrements effectués dans les mêmes conditions de durée, mais le sujet ayant les yeux fermés.

Les figures 19 et 20 donnent un aperçu de l'allure générale des courbes. Afin d'étudier le comportement dynamique de l'opérateur, il est nécessaire de faire une autre série de tests en considérant également les deux attitudes yeux couverts et fermés.

L'expérience réalisée est alors la suivante : un tracé de 10 secondes est enregistré avant et après le basculement du plateau, sur une table traçante et sur un enregistreur $x(t)$, $y(t)$.

Les figures 21 et 22 donnent quelques exemples de tracé X-Y ; on trouvera dans la troisième partie les courbes $X(t)$, $Y(t)$.

II.2 PRESENTATION DES RESULTATS

Nous allons maintenant définir les paramètres permettant de caractériser les tracés obtenus et de les analyser statistiquement.

Pour étudier les enregistrements statiques, nous nous sommes plus particulièrement attachés aux paramètres suivants, aisément accessibles à la mesure : l'amplitude maximale selon les axes de coordonnées et la surface déterminée par l'enveloppe des courbes.

Les tracés dynamiques peuvent être décrits par les quatre paramètres suivants : l'amplitude maximale suivant les axes X et Y ; la distance D entre les zones représentatives des points d'équilibre avant et après la perturbation ; et la longueur du parcours correspondant au régime transitoire noté LT.

L'étude d'une fonction physiologique en tant que régulation n'est jamais aisée. En effet le caractère même de cette fonction interdit toute détermination rigoureuse des paramètres à partir d'un seul élément de test. Afin de pallier cette insuffisance, il est nécessaire de procéder pour des individus normaux à une étude statistique des diverses grandeurs choisies ci-dessus. Ceci permettra également une analyse des grandeurs obtenues pour les sujets malades.

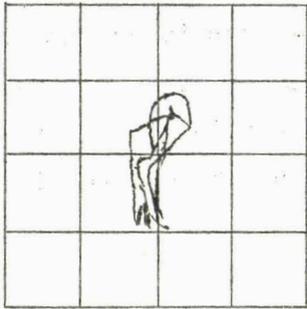
II.3 ANALYSE DES RESULTATS

II.3.1 Traitement des informations

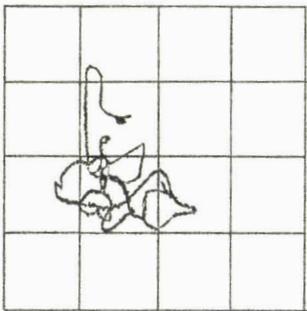
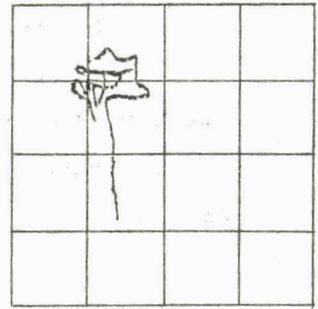
De manière à faciliter une utilisation ultérieure des résultats, nous

avons calculé la plupart des grandeurs statistiques classiques et nous rap-
pelons leurs définitions dans l'annexe II.

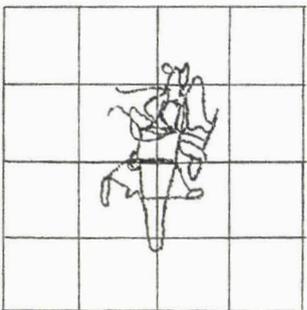
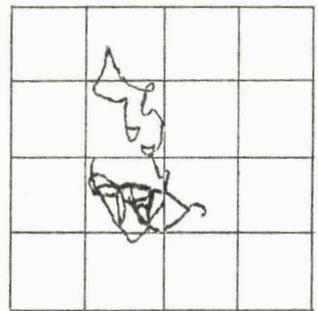
De plus nous considérons deux formes possibles numérique ou classée
des séries statistiques ; la série numérique ayant la double utilité de ser-
vir dans les calculs de corrélation et de vérifier le choix des classes. La
série classée étant intéressante pour la recherche éventuelle de loi de proba-
bilité.



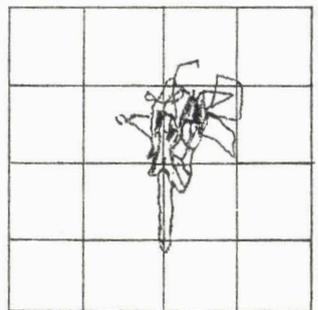
10s



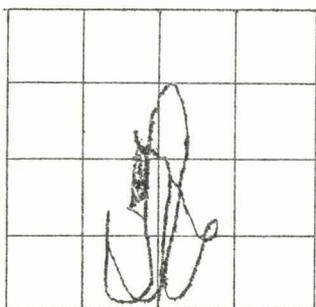
20s



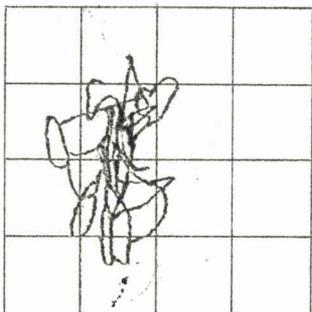
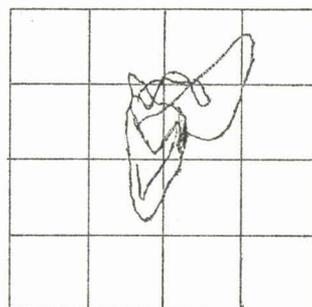
30s



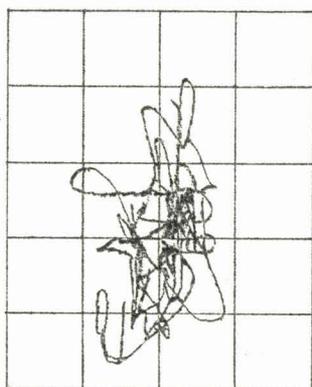
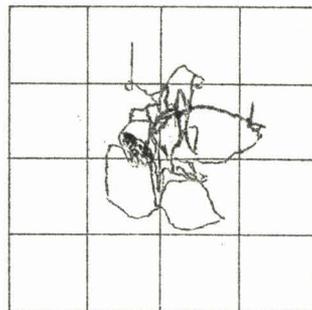
Tests statiques Y0



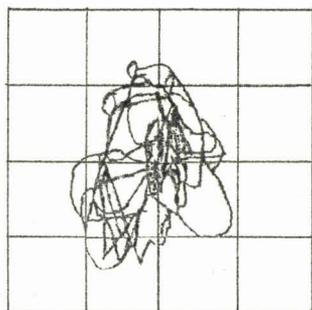
10 s



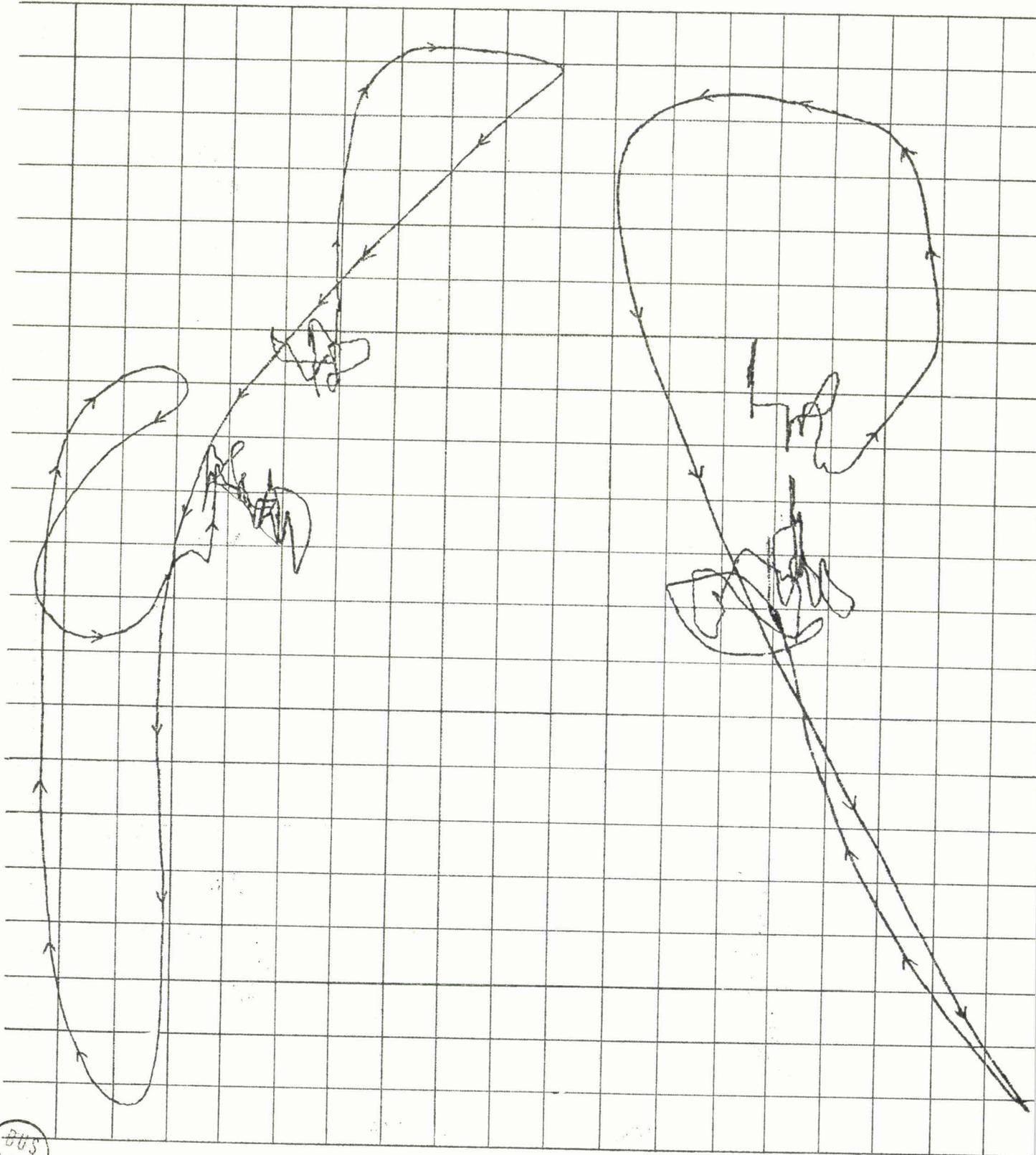
20 s



30 s



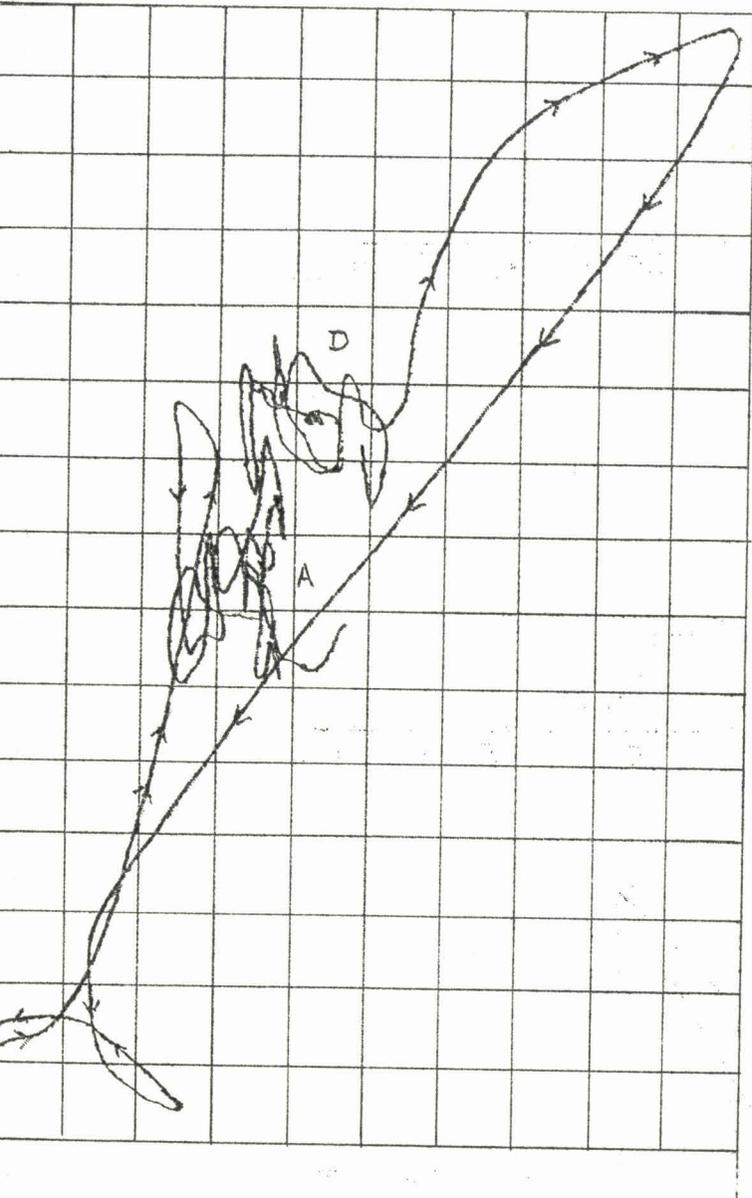
Tests statiques YF



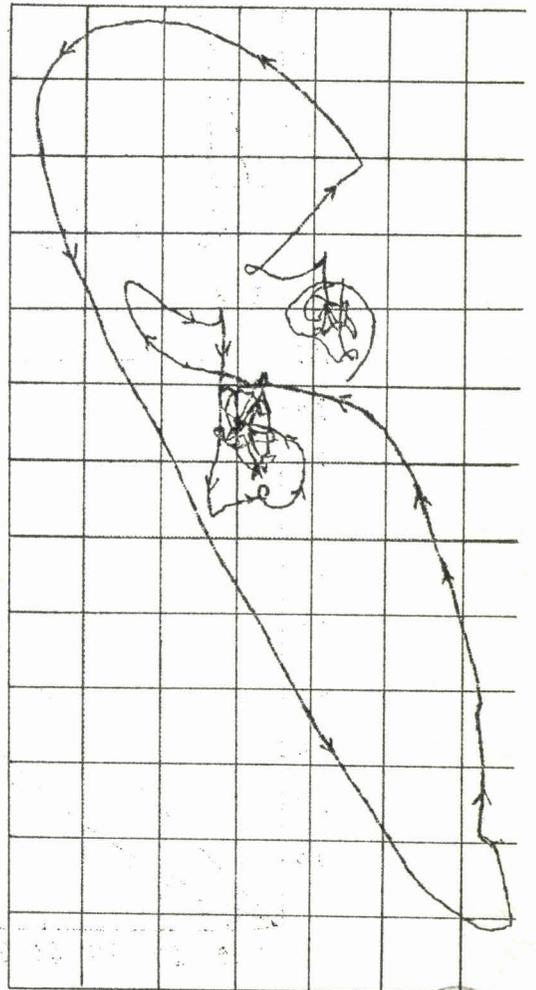
BUS
HILL

Tests dynamiques YO

- Figure 21 -

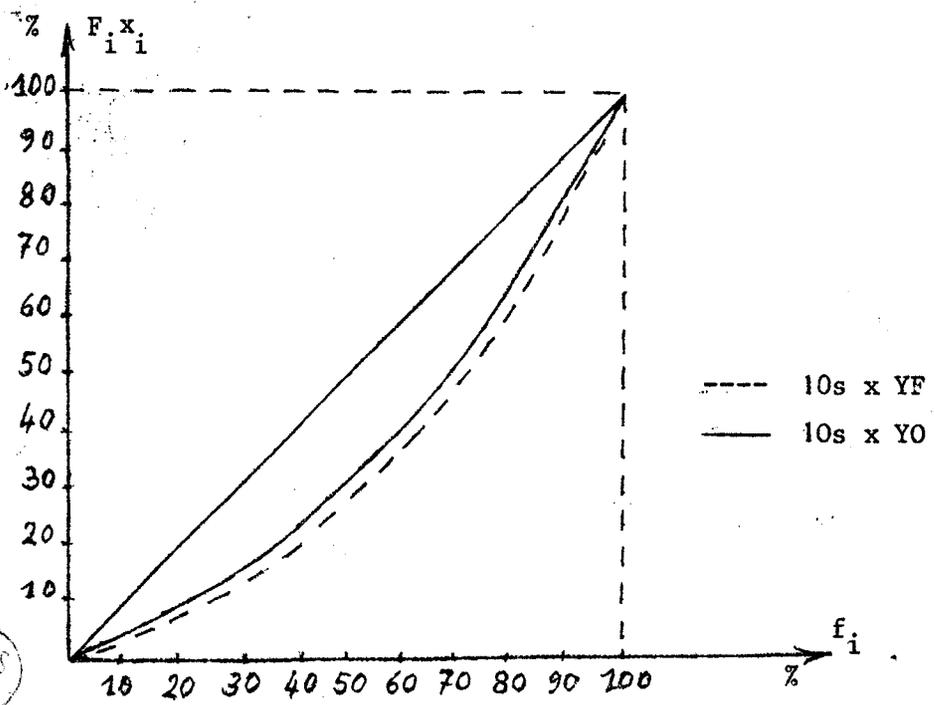
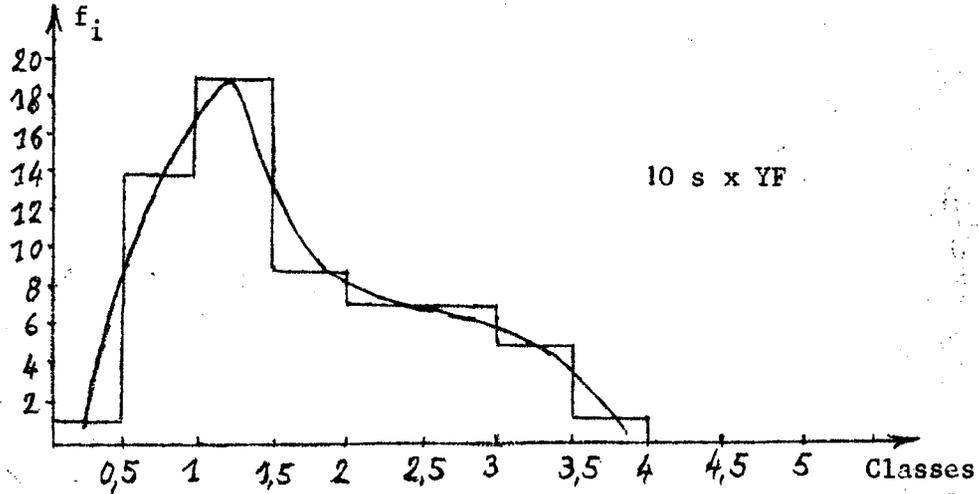
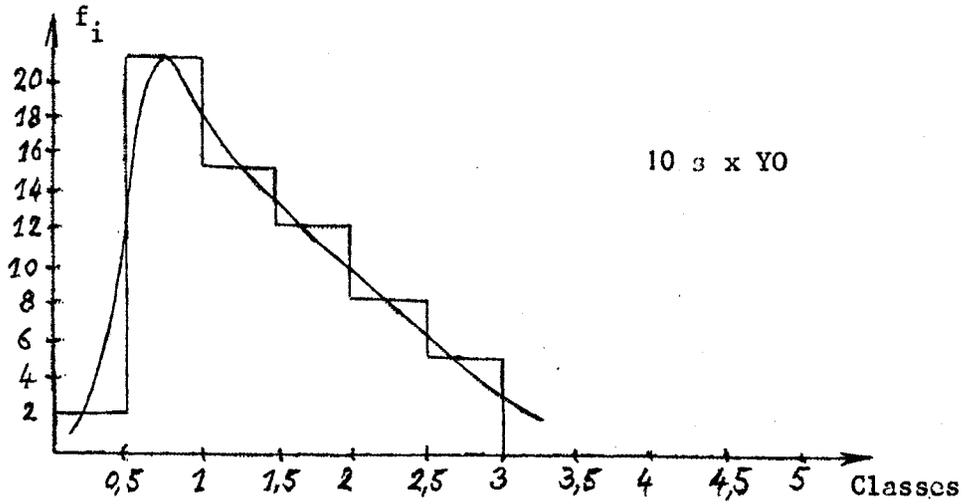


Tests dynamiques YF



- Figure 22 -

BUS
LILLE



II-3-2 Etude du test 10 s amplitude maximale en X

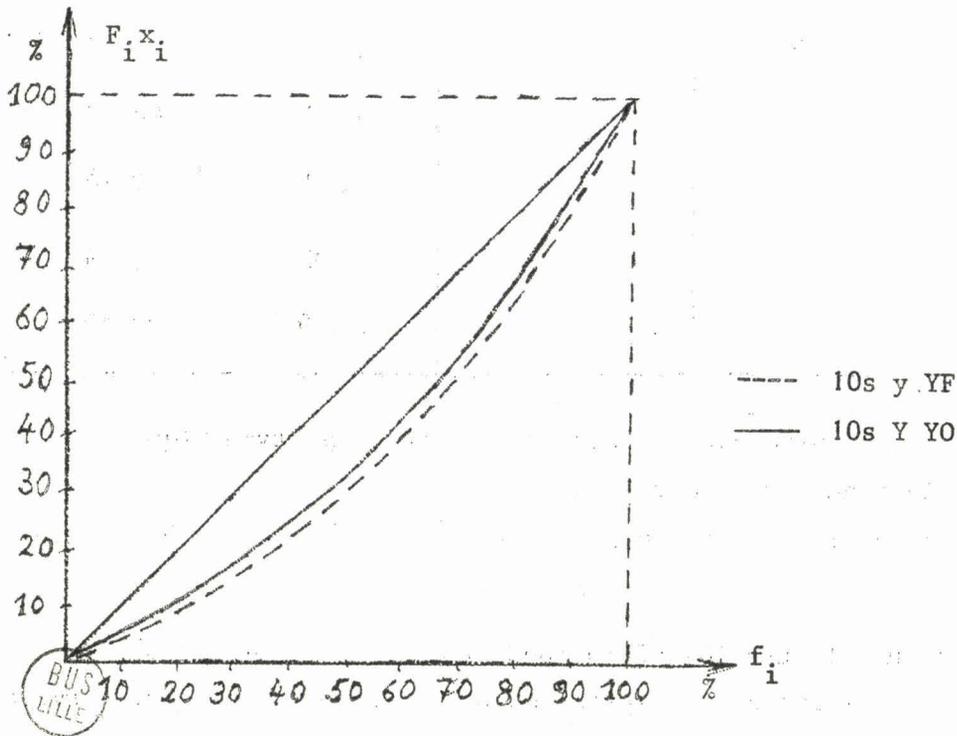
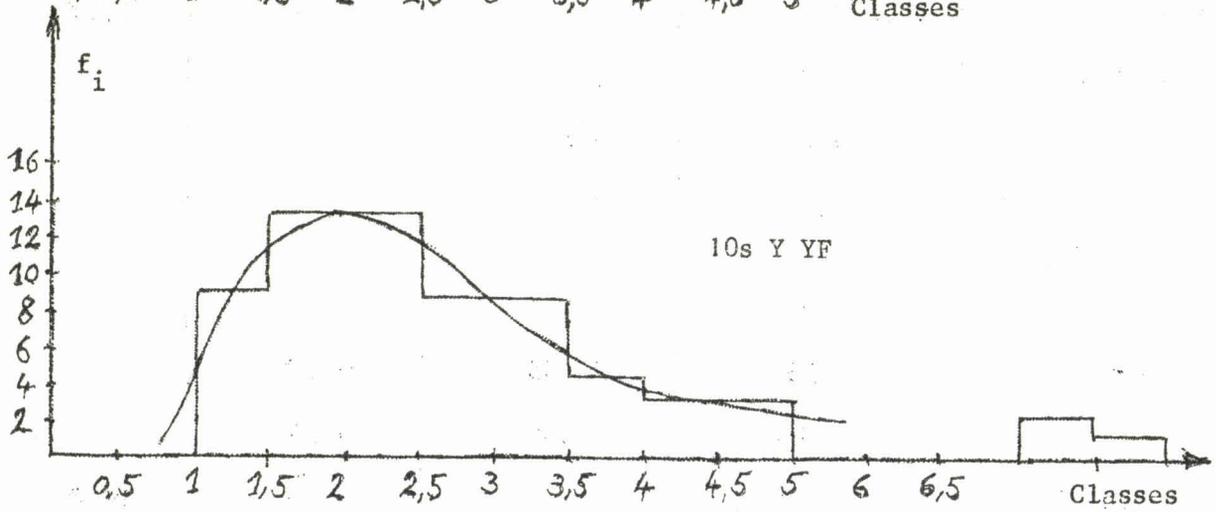
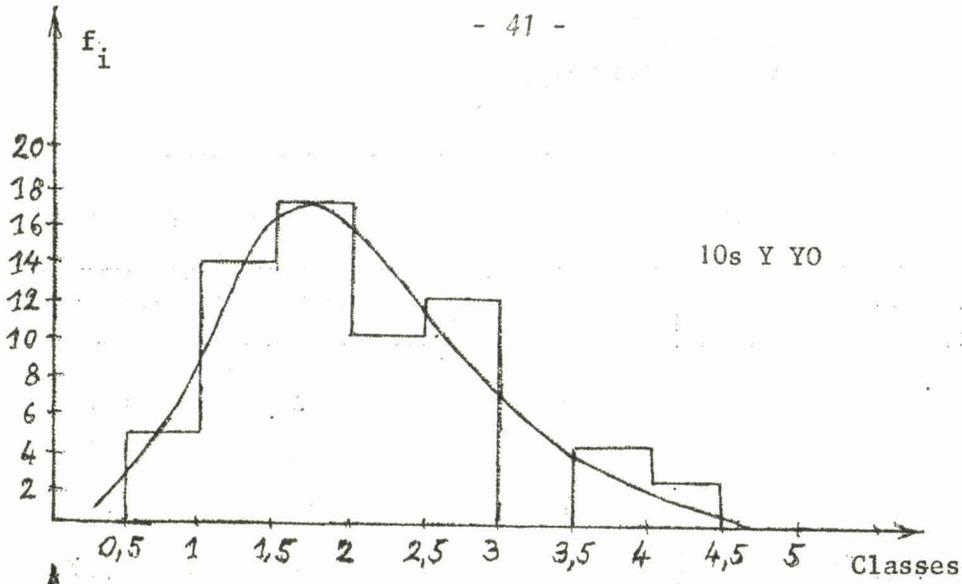
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	1,39	1,7	1,44	1,74
Médiane	1,1	1,4	1,03	1,19
Mode			0,88	1,17
Quartile Q_1	0,8	1		
Q_3	1,8	2,4		
Déviatiion quartile	0,5	0,7		
"Range"	3,7	5,6		
$\mu_2 = \sigma^2$	0,56	0,995	0,57	1,02
σ	0,76	0,998	0,75	1,01
γ	0,54	0,59	0,53	0,58
m_2	2,49	3,88	2,63	4,05
m_4			15,20	46,82
c			-0,81	-0,15
Médiale			1,98	1,92
Concentration			0,29	0,30

Test "yeux ouverts": la courbe est asymétrique à gauche, platykurtique, la dispersion est moyenne et la concentration faible.

Il y a 66% de l'effectif compris entre $\bar{x} - \sigma$ et $\bar{x} + \sigma$; 98 % entre $\bar{x} + 2 \sigma$ et $\bar{x} - 2 \sigma$.

Test "yeux fermés" ; on retrouve les mêmes tendances pour la courbe YF.

Il y a 68 % de l'effectif compris entre $\bar{x} - \sigma$ et $\bar{x} + \sigma$, 97 % entre $\bar{x} + 2 \sigma$ et $\bar{x} - 2 \sigma$



II-3-3 Etude du test 10 s amplitude maximale en V

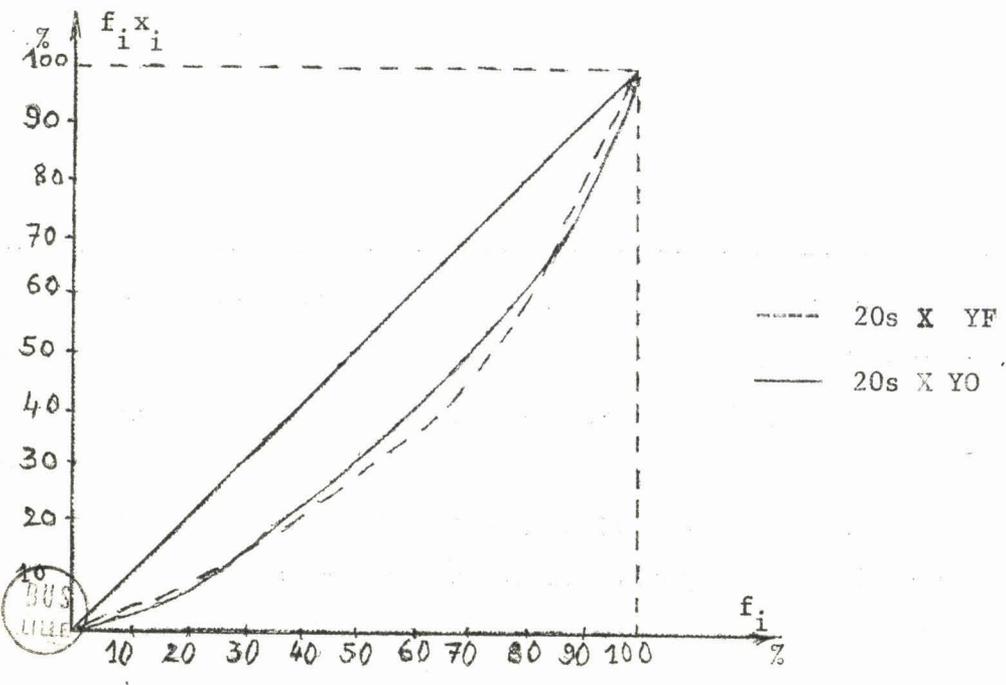
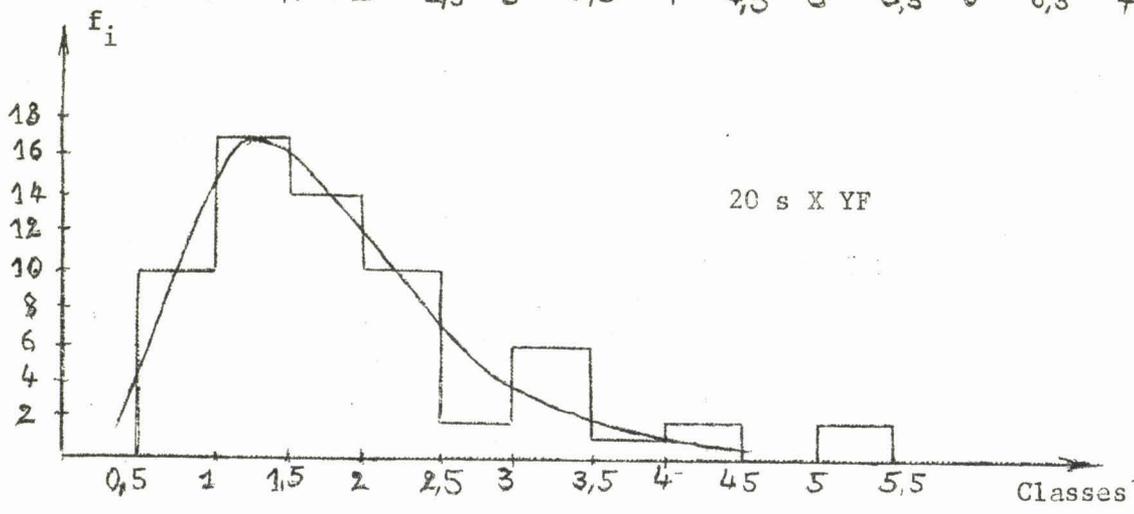
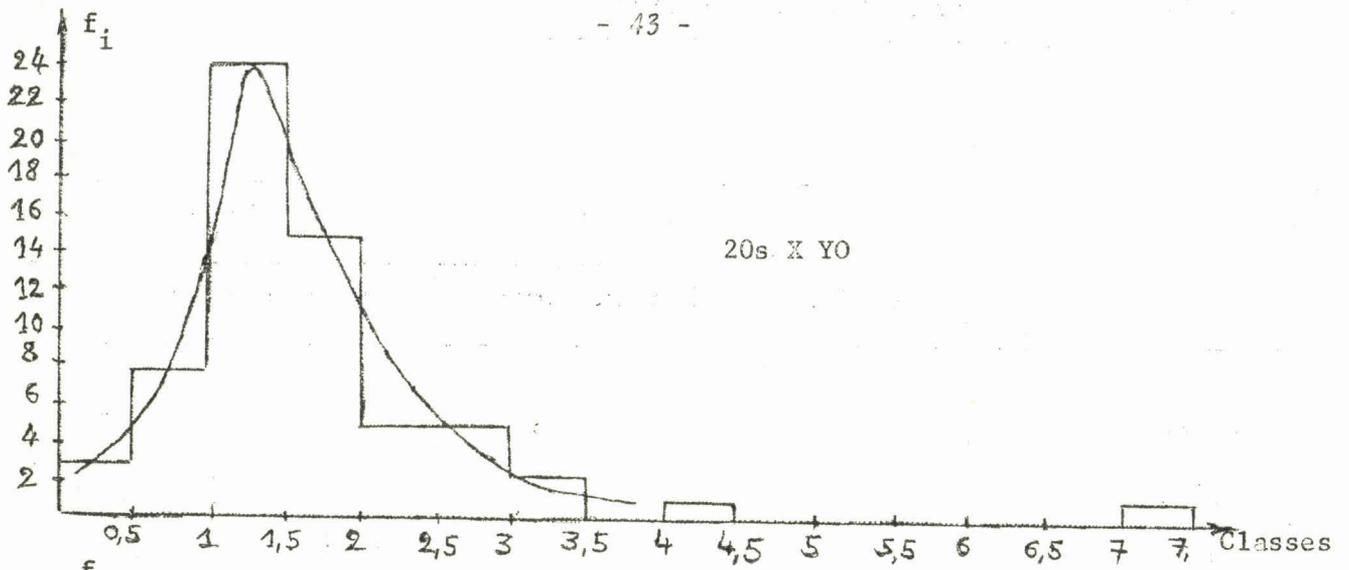
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	1,99	2,66	2,03	2,72
Médiane	1,7	2,3	1,53	2,13
Mode			1,65	1,94
Quartile Q_1	1,4	1,7		
Q_3	2,5	3,25		
Déviat. quartile	0,55	0,77		
"Range"	3,7	6,2		
$\mu_2 = \sigma^2$	0,69	1,76	0,72	1,77
σ	0,83	1,32	0,85	1,33
γ	0,42	0,49	0,42	0,49
m_2	4,66	8,88	4,85	9,16
m_4			40,33	188,10
c			-1,28	-0,76
Médiale			2,03	2,8
Concentration			0,22	0,25

Test "yeux ouverts" : La courbe est peu asymétrique à gauche, légèrement platykurtique ; la dispersion est moyenne et la concentration faible.

Il y a 55 % de l'effectif compris entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 97 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$

Test "yeux fermés" : Les tendances générales sont les mêmes.

Il y a 77 % de l'effectif compris entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 95 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



II-3-4 Etude du test 20 s amplitude maximale en X

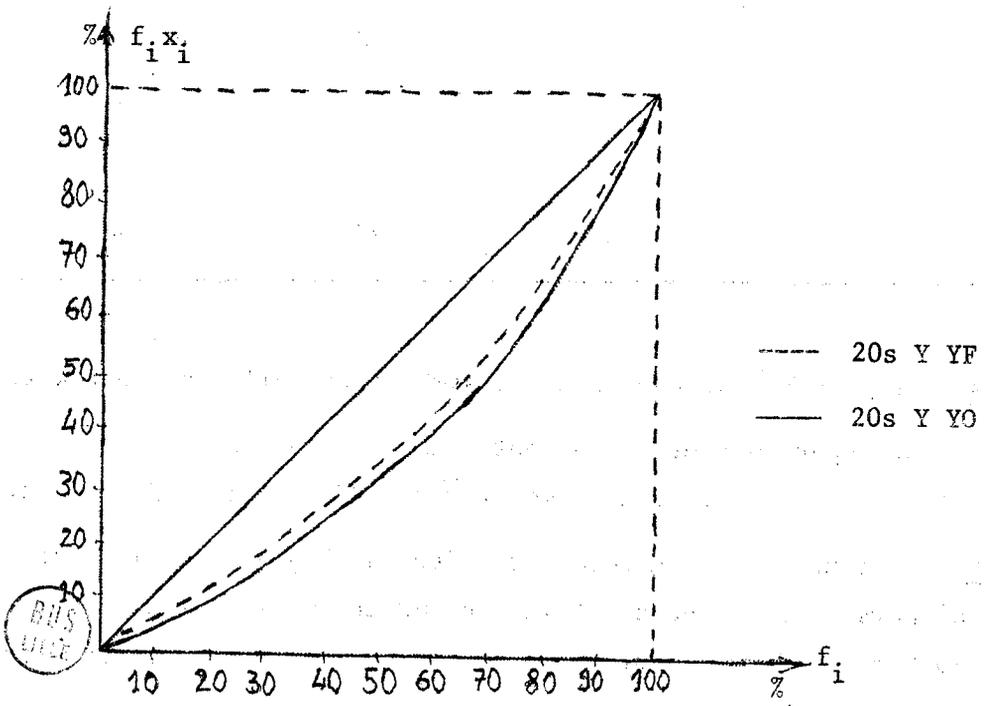
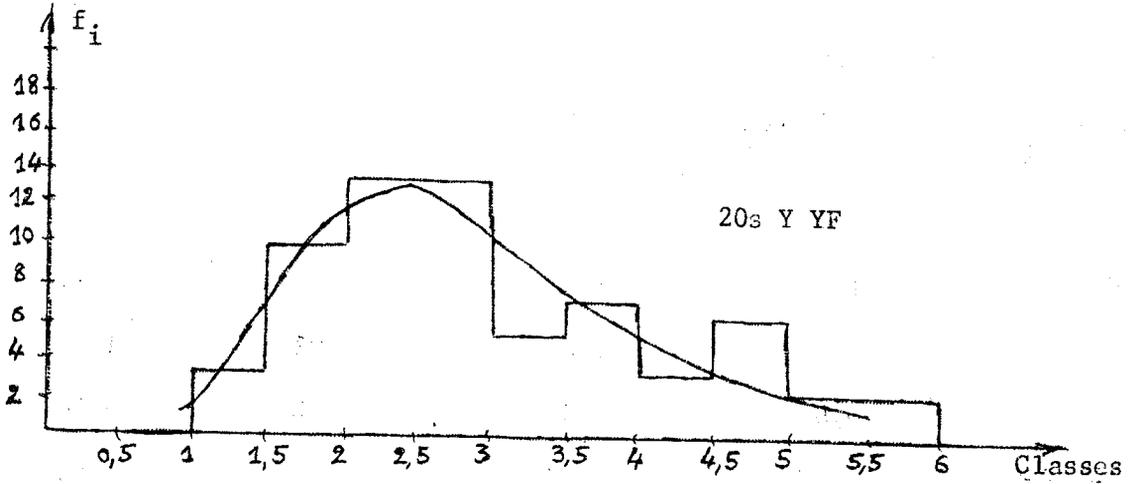
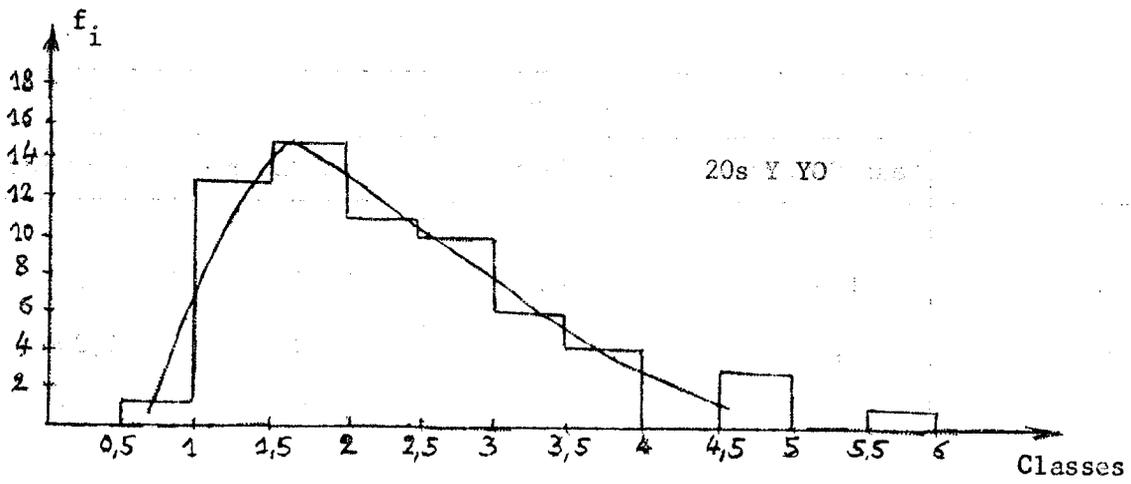
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux fermés	Yeux Ouverts	Yeux fermés
Moyenne	1,61	1,89	1,66	1,93
Médiane	1,4	1,65	1,18	1,39
Mode			1,32	1,35
Quartile Q_1	1	1,2		
Q_3	1,9	2,3		
Déviati-on quartile	0,45	0,55		
"Range"	6,8	4,6		
$\mu_2 = \sigma^2$	1,00	1,03	1,05	1,11
σ	1,0	1,01	1,02	1,05
γ	0,62	0,54	0,62	0,54
m_2	3,59	4,62	3,79	4,83
m_4			61,38	56,02
c			1,26	-0,60
Médiale			1,56	1,97
Concentration			0,29	0,29

Test "yeux ouverts" : La courbe est pratiquement symétrique, elle est leptokurtique ; la dispersion est importante et la concentration est faible.

Il y a 81 % de l'effectif entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$; 97 % entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.

Test "yeux fermés" : La courbe est légèrement asymétrique à gauche ; elle est platykurtique. La dispersion est moyenne et la concentration est faible.

Il y a 75 % de l'effectif entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$; 94 % entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.



II-3-5 Etude du test 20 s amplitude maximale en V

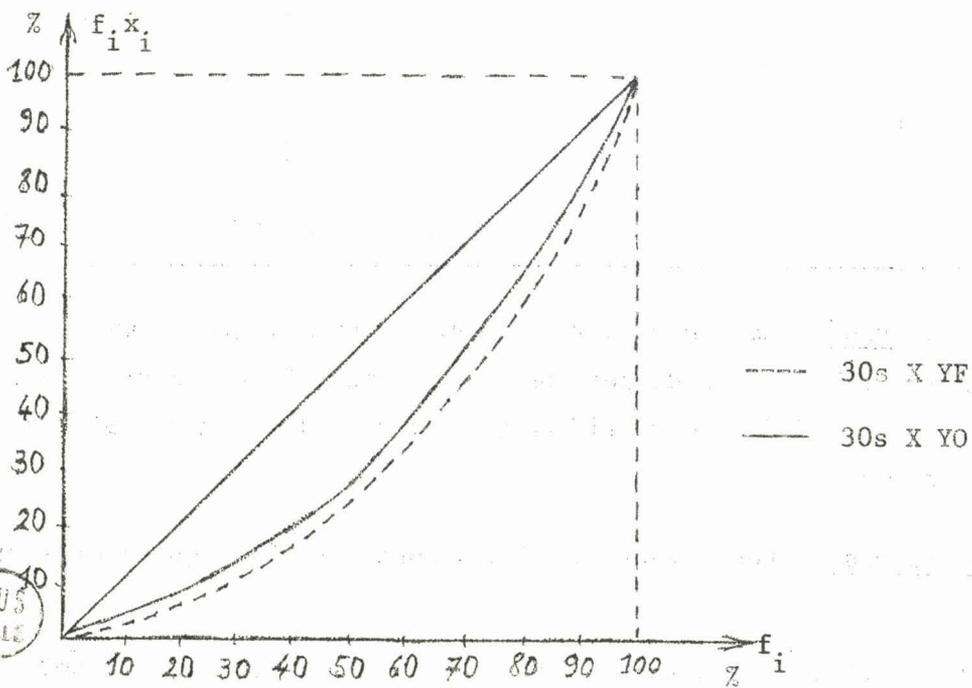
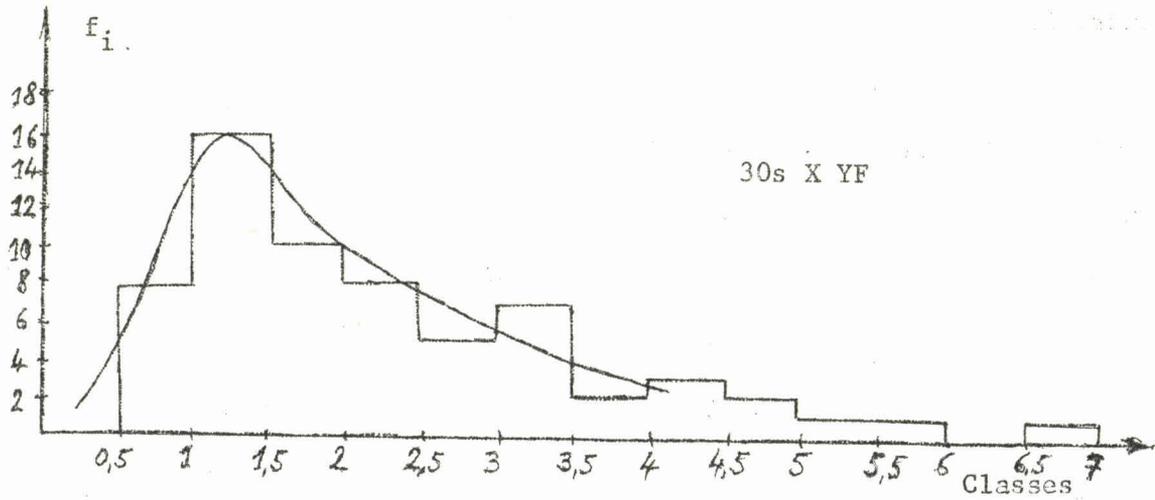
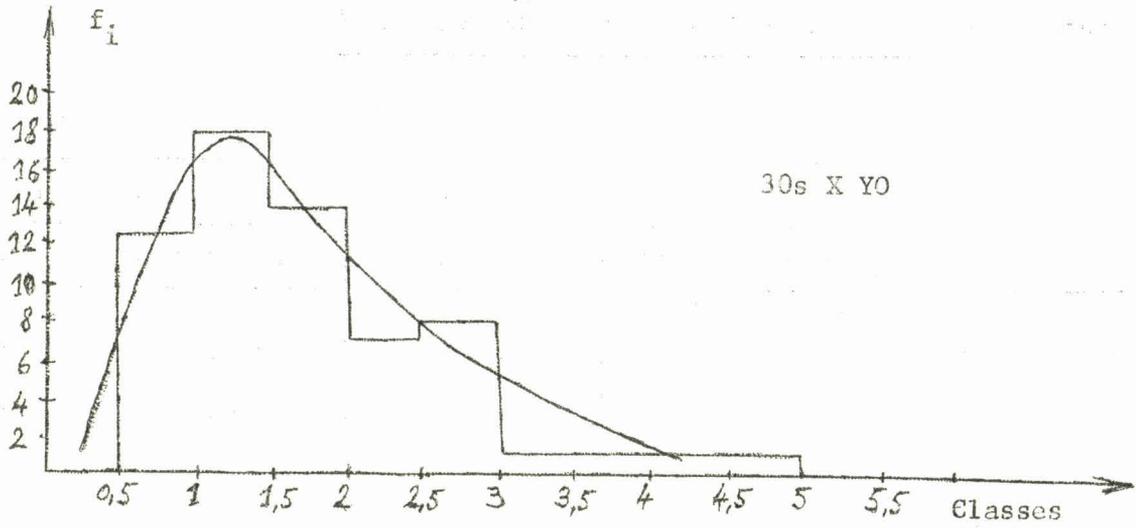
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	2,29	2,97	2,34	3
Médiane	2	2,7	1,93	2,44
Mode			1,66	2,27
Quartile Q_1	1,5	2,05		
Q_3	2,9	3,8		
Déviatiion Quartile	0,7	0,87		
"Range"	4,8	4,3		
$\mu_2 = \sigma^2$	1,05	1,37	1,04	1,33
σ	1,02	1,17	1,02	1,15
γ	0,44	0,39	0,43	0,38
m_2	6,33	10,24	6,54	10,33
m_4			79,80	169,66
c			-1,13	-1,41
Médiale			2,37	3,07
Concentration			0,24	0,22

Test "yeux ouverts" : La courbe est faiblement asymétrique à gauche, elle est nettement platykurtique. La dispersion est moyenne, la concentration est faible.

Il y a 72 % de l'effectif compris entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$; 94 % de l'effectif entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.

Test "Yeux fermés" : Les caractéristiques sont les mêmes que pour le test précédent.

Il y a 64 % de l'effectif entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$; 95 % entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.



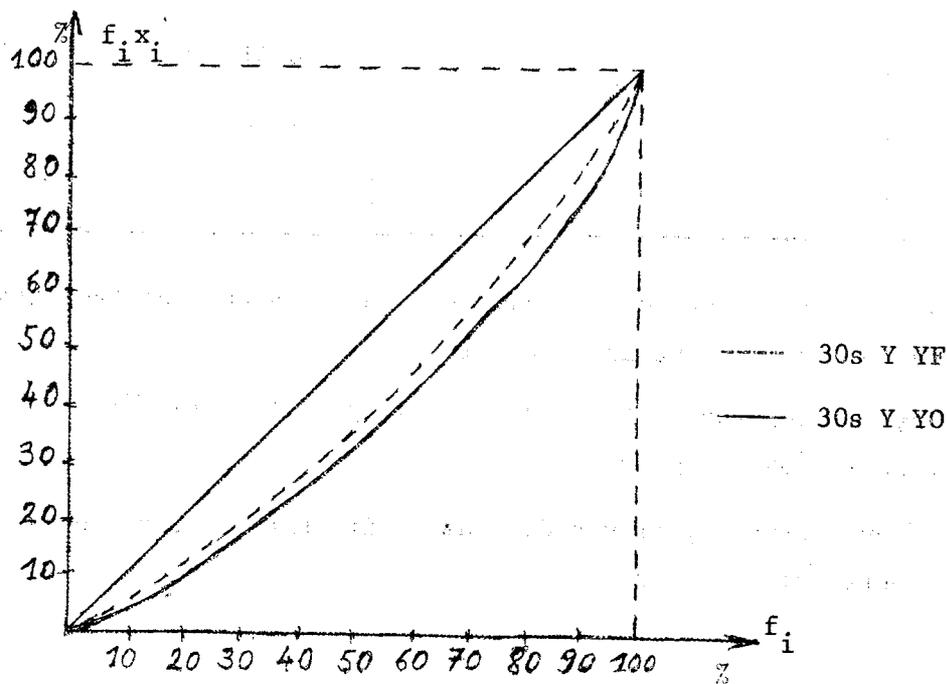
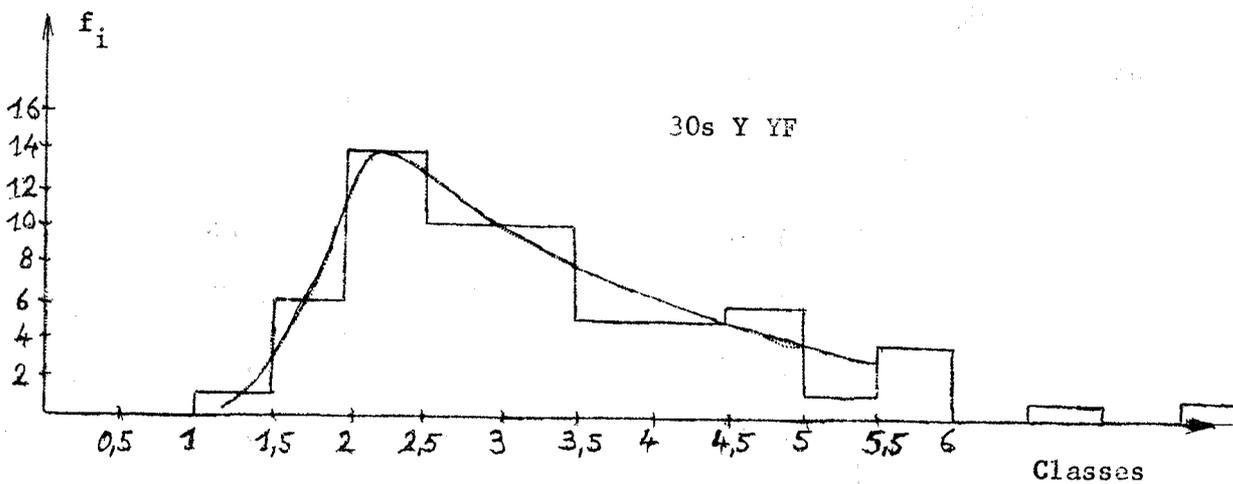
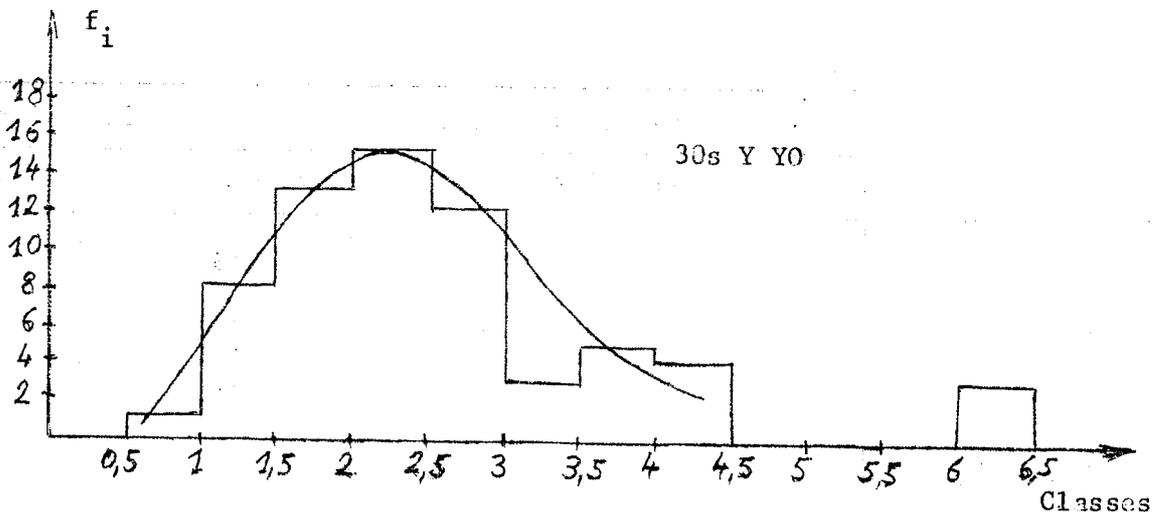
11-3-6 Etude du test 30 s amplitude maximale en X

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	1,57	2,22	1,73	2,27
Médiane	1,5	1,85	1,22	1,64
Mode			1,27	1,28
Quartile Q_1	1,1	1,15		
Q_3	2	3		
Déviat. Quartile	0,45	0,92		
"Range"	4	6,1		
$\mu_2 = \sigma^2$	1,04	1,77	0,76	1,80
σ	1,02	1,33	0,87	1,34
γ	0,65	0,59	0,50	0,59
m_2	3,51	6,70	3,74	6,97
m_4			30,64	120,75
c			-0,81	-0,51
Médiale			1,73	2,70
Concentration			0,29	0,32

Dans les deux cas, les courbes sont asymétriques à gauche, platykurtiques, de dispersion moyenne, de concentration faible.

Pour le test "yeux ouverts", il y a 84 % de l'effectif entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$, 96 % de l'effectif entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.

Pour le test "yeux fermés", il y a 80 % de l'effectif entre $\bar{x} + \sigma$ et $\bar{x} - \sigma$; 96 % de l'effectif entre $\bar{x} + 2\sigma$ et $\bar{x} - 2\sigma$.



BUS LILLE

BUS LILLE

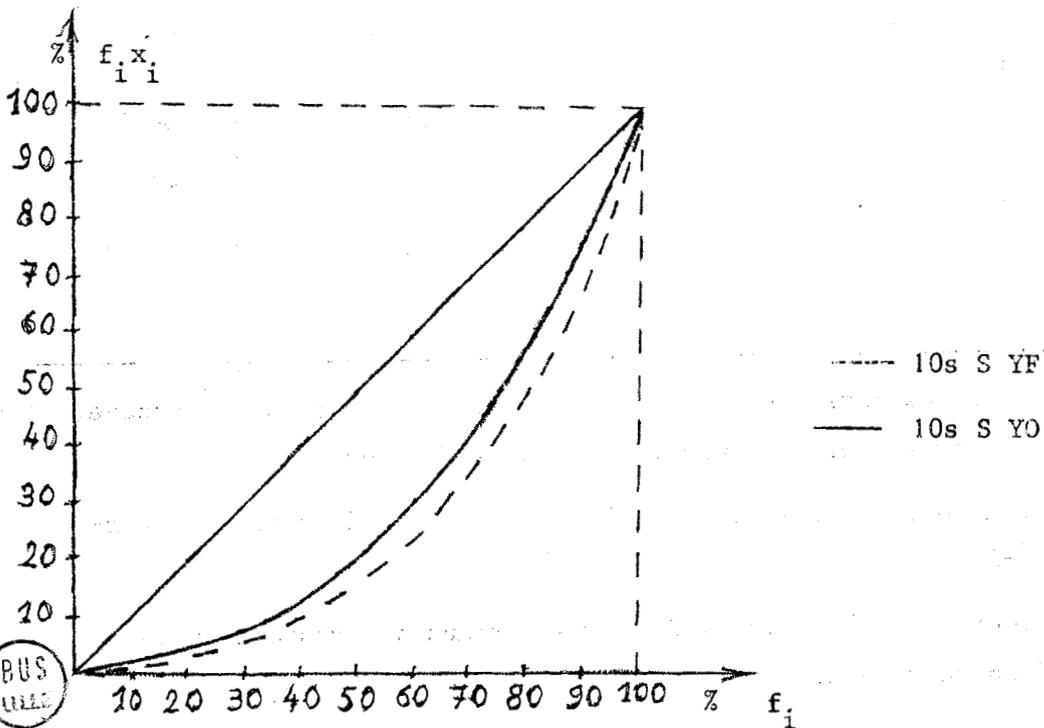
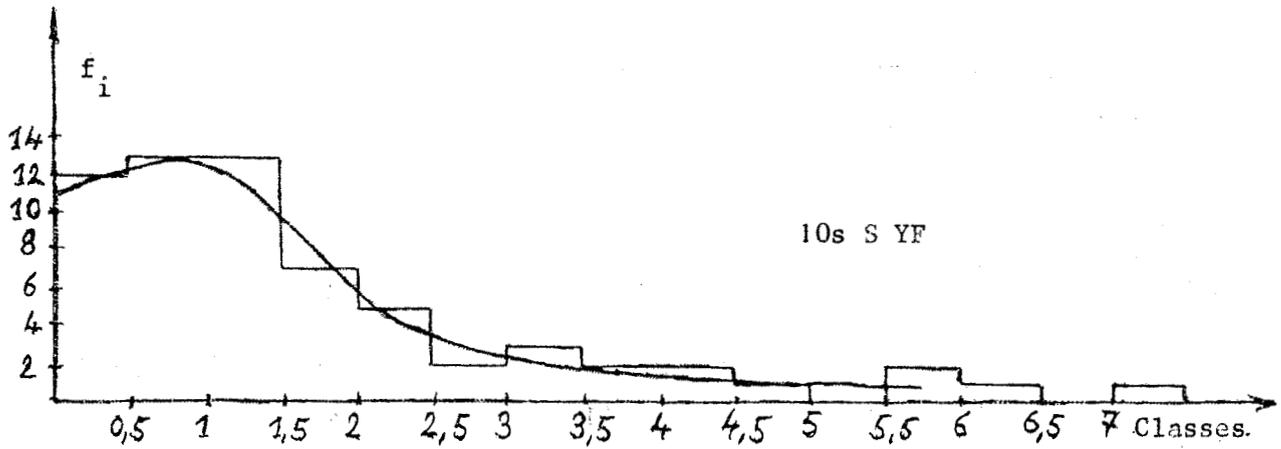
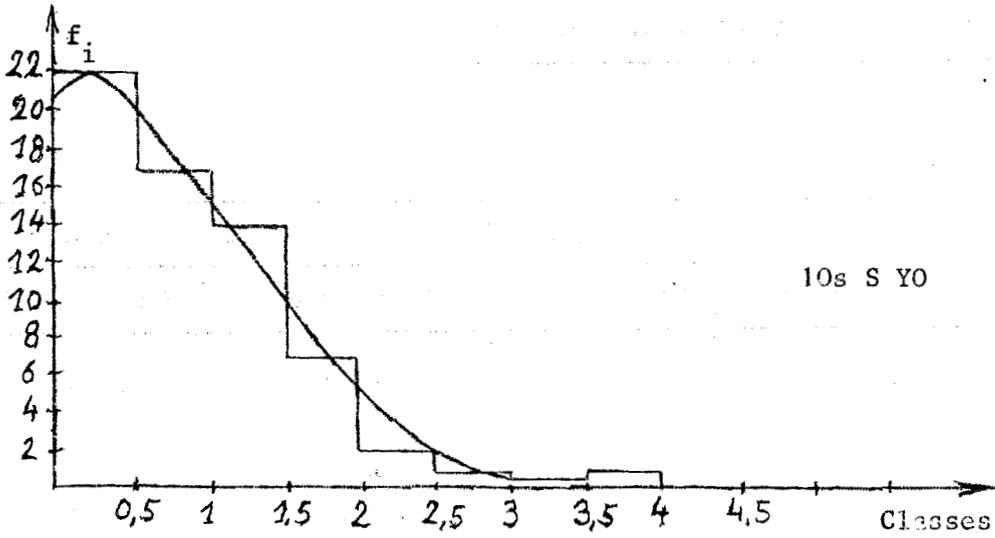
II-3-7 Etude du test 30 s amplitude maximale en V

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	2,55	3,30	2,57	3,35
Médiane	2,3	3,05	2,08	2,78
Mode			2,2	2,33
Quartile Q_1	1,8	2,25		
Q_3	2,85	4,1		
Déviatiion Quartile	0,52	0,92		
"Range"	5,4	6,5		
$\mu_2 = \sigma^2$	1,36	1,82	1,33	1,79
σ	1,17	1,35	1,17	1,34
γ	0,46	0,41	0,46	0,399
m_2	7,87	12,71	7,98	13,02
m_4			131,54	290,54
c			-0,93	-1,23
Médiale			2,49	4,01
Concentration			0,26	0,21

Les tendances sont les mêmes pour les deux courbes : asymétrique à gauche, platykurtique ; la dispersion et la concentration sont faibles.

Pour le test "yeux ouverts", il y a 71,87 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 95,31 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Pour le test "yeux fermés"; 73,43 % des gens normaux se trouvent entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 96,87 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



II-3-8 Etude du test 10 s surface d'enveloppe

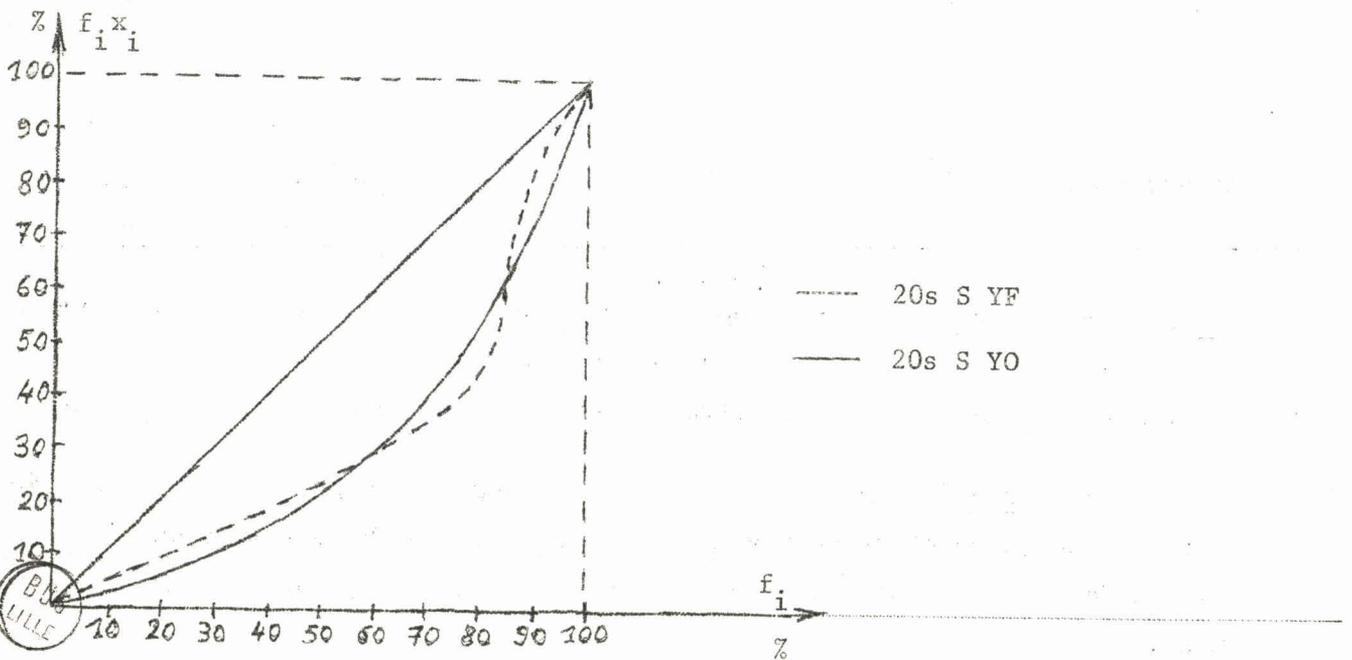
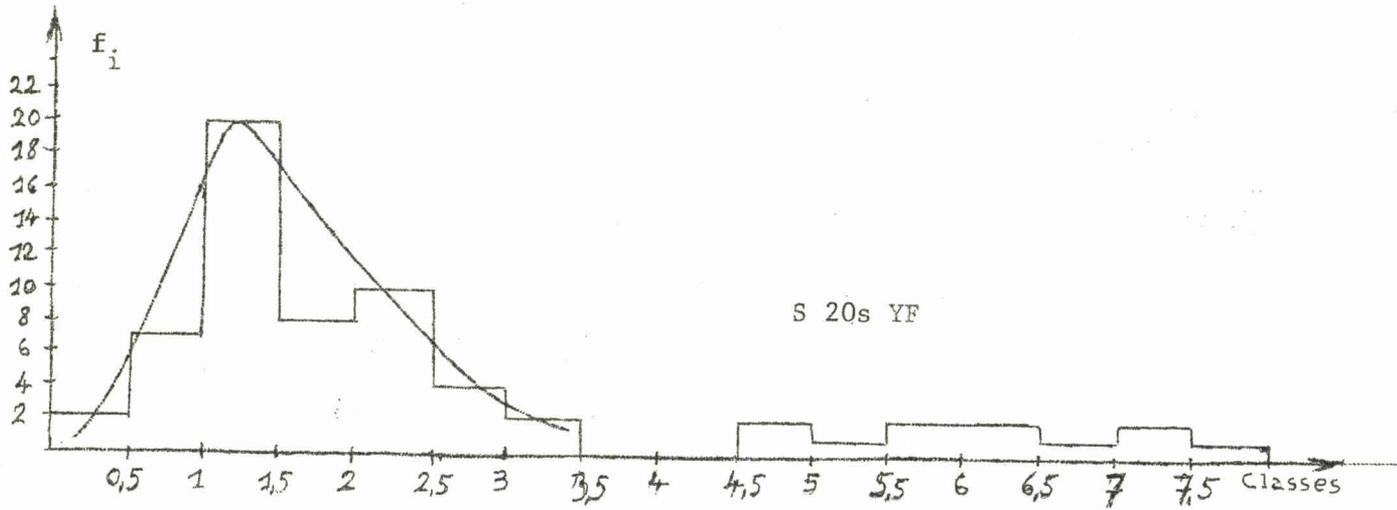
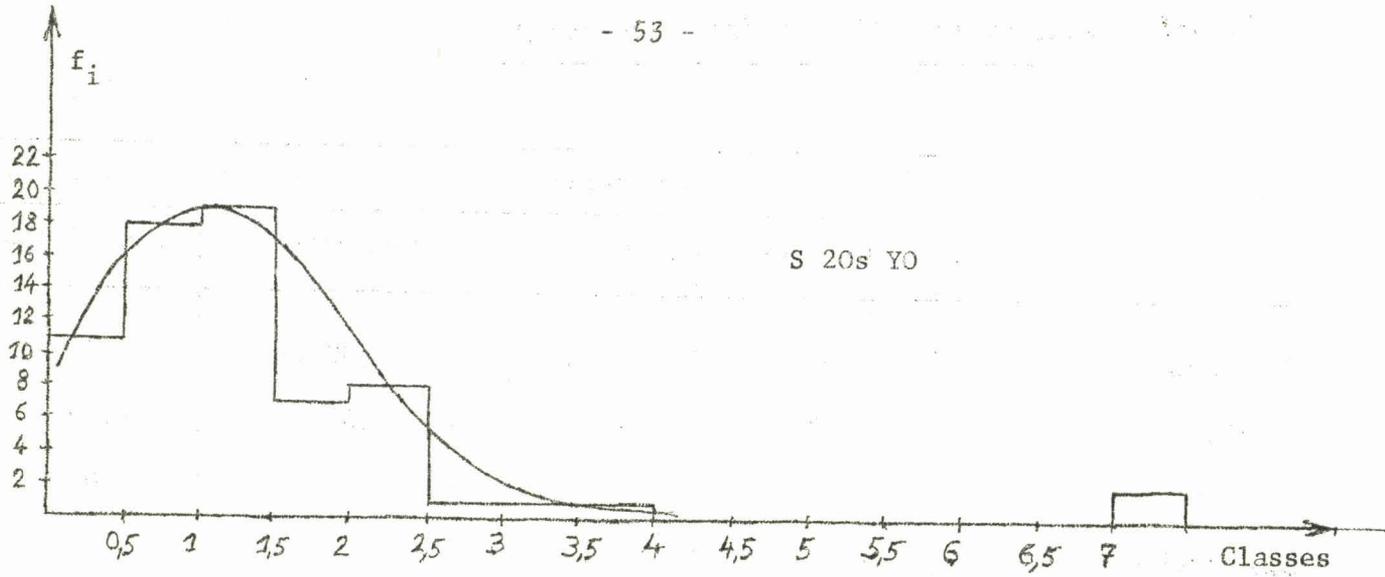
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	0,92	1,78	0,92	1,77
Médiane	0,77	1,17	0,52	1,50
Mode			0,40	0,64
Quartile Q_1	0,37	0,64		
Q_3	1,28	2,26		
Déviat. Quartile	0,45	0,30		
"Range"	3,41	6,39		
$\mu_2 = \sigma^2$	0,42	2,48	0,49	2,56
σ	0,65	1,58	0,22	1,60
γ	0,71	0,80	0,24	0,90
m_2	1,26	5,64	1,34	5,72
m_4			6,44	136,11
c			0,57	1,15
Médiale			1,08	2,63
Concentration			0,40	0,46

Test "Yeux Ouverts" : La courbe est très asymétrique à gauche, leptokurtique, de dispersion faible et de concentration moyenne.

Il y a 79,68 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$, et 95,31 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Test "Yeux Fermés" : On remarque une forte asymétrie à gauche, une dispersion forte et une concentration moyenne ; en outre la courbe est leptokurtique.

Il y a 84,37 % de l'effectif compris entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 93,75 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



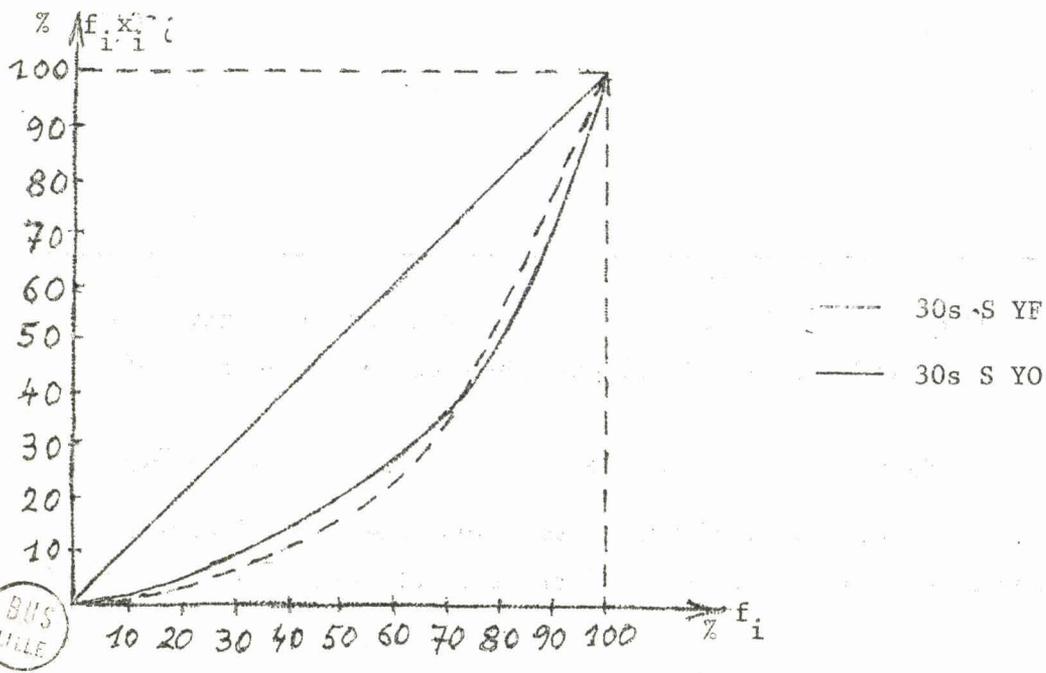
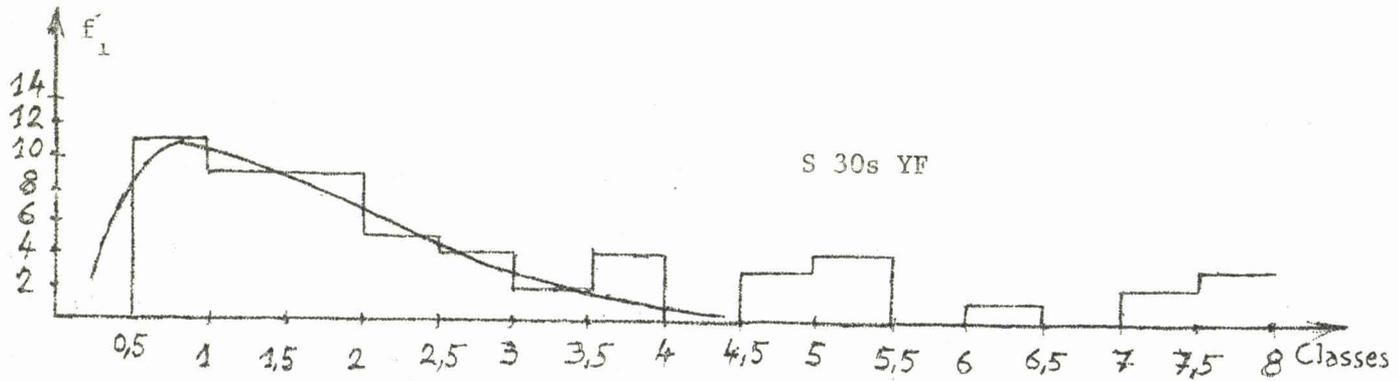
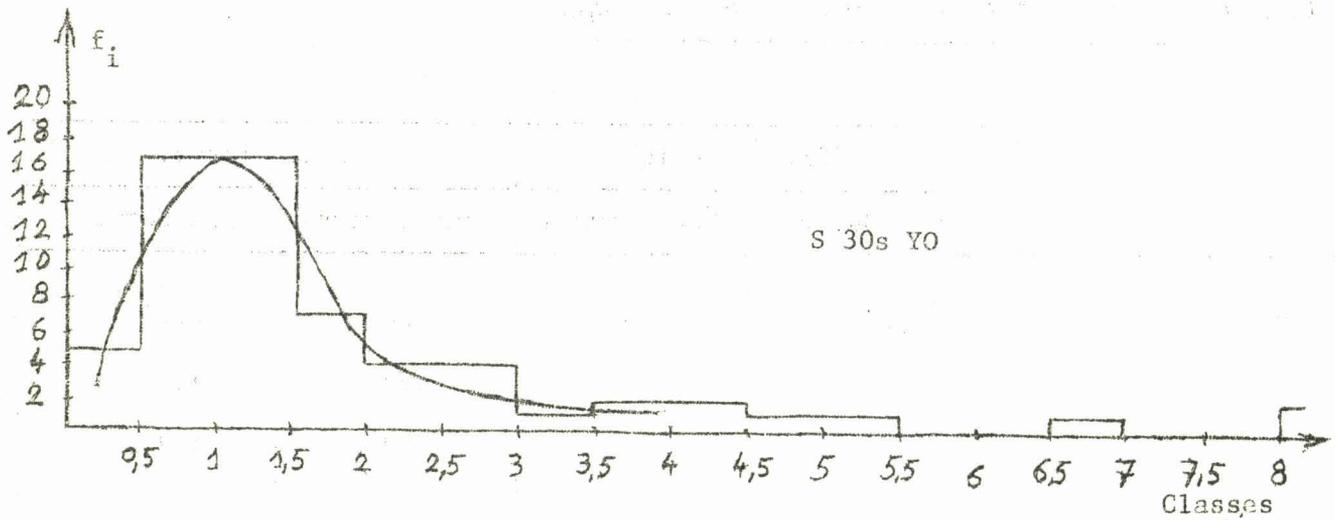
II-3-9 Etude du test 20 s surface d'enveloppe

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	1,33	2,36	1,38	2,29
Médiane	1,02	1,61	0,76	1,41
Mode			0,93	1,26
Quartile Q_1	0,61	1,09		
Q_3	1,71	2,74		
Déviat. Quartile	0,55	0,82		
"Range"	7,3	7,16		
$\mu_2 = \sigma^2$	1,74	3,41	1,67	5,58
σ	1,32	1,84	1,29	2,36
γ	0,96	0,73	0,93	(+ de 1)
m_2	3,64	9,02	3,58	10,86
m_4			13,47	297,80
c			-1,95	-0,47
Médiale			1,57	2,73
Concentration			0,41	0,39

Test "Yeux Ouverts" : Les caractéristiques de la courbe sont les suivantes : asymétrique à gauche, platykurtique, de dispersion très forte, de concentration moyenne.

Il y a 92,18 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 96,87 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Test "Yeux Fermés" : Les tendances générales sont les mêmes que ci dessus. Mais entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$ nous trouvons 31,25 % de l'effectif, et entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$, 92,18 %



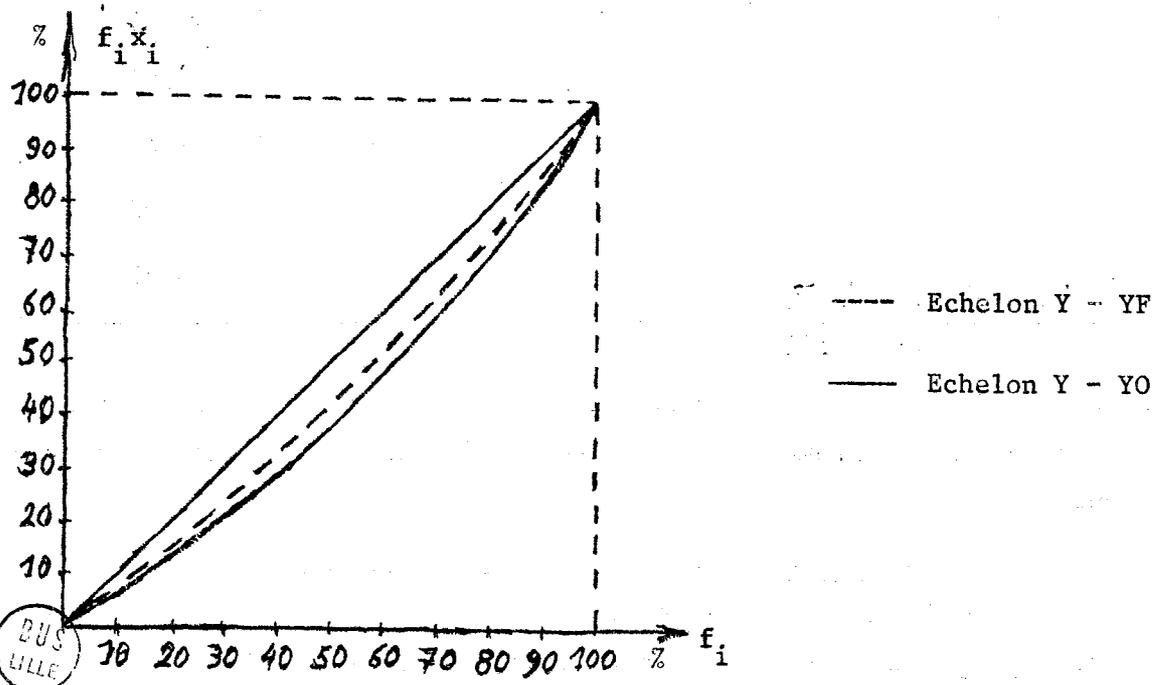
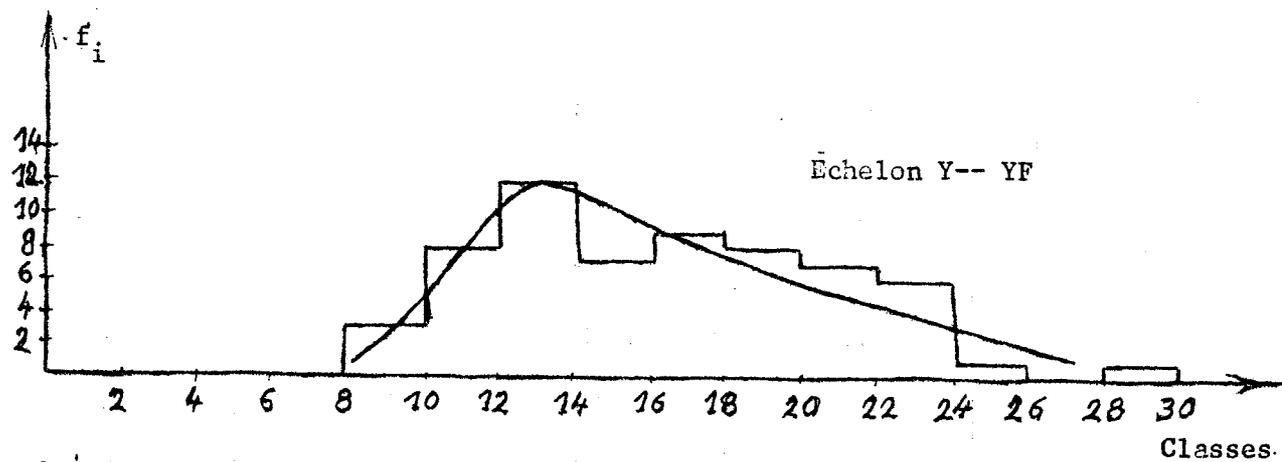
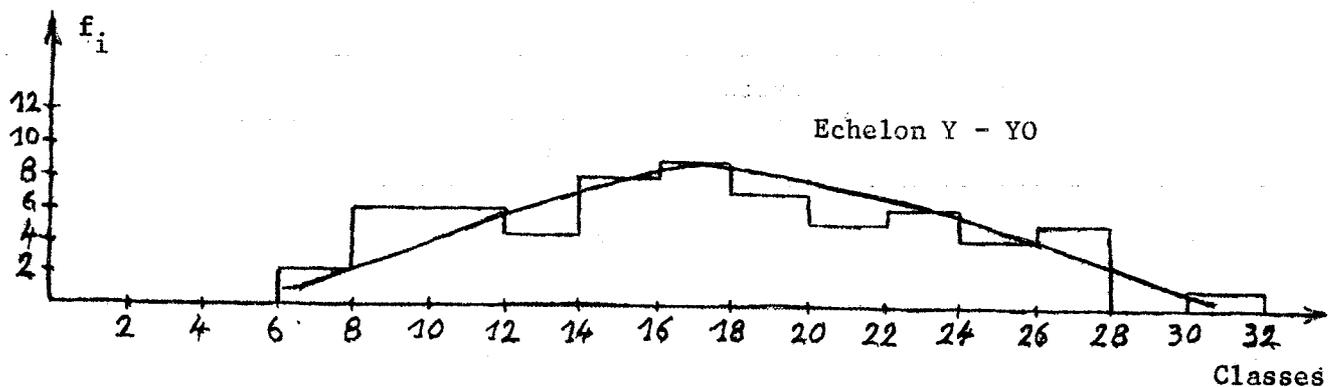
II-3-10 Etude du test 30 s surface d'enveloppe

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	1,87	3,35	1,88	3,36
Médiane	1,30	2,09	1,01	1,87
Mode			1,04	1,16
Quartile Q_1	0,8	1,19		
Q_3	2,22	4,16		
Déviat. Quartile	0,71	1,49		
"Range"	8,23	13,94		
$\mu_2 = \sigma^2$	3,08	9,68	3,07	9,76
σ	1,75	3,11	1,75	3,12
γ	0,94	0,93	0,93	0,93
m_2	6,60	20,93	6,62	21,04
m_4			241,29	2132,83
c			2,51	1,81
Médiale			2,44	4,98
Concentration			0,44	0,46

Les tendances générales sont les mêmes pour les deux courbes : légèrement asymétrique à gauche, peu leptokurtique, la dispersion est forte et la concentration moyenne.

Il y a dans le test "Yeux Ouverts" 85,93 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 95,31 % de l'effectif entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Pour le test "Yeux Fermés" les pourcentages sont les suivants : 85,93 % entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$, 93,75 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



BUS LILLE

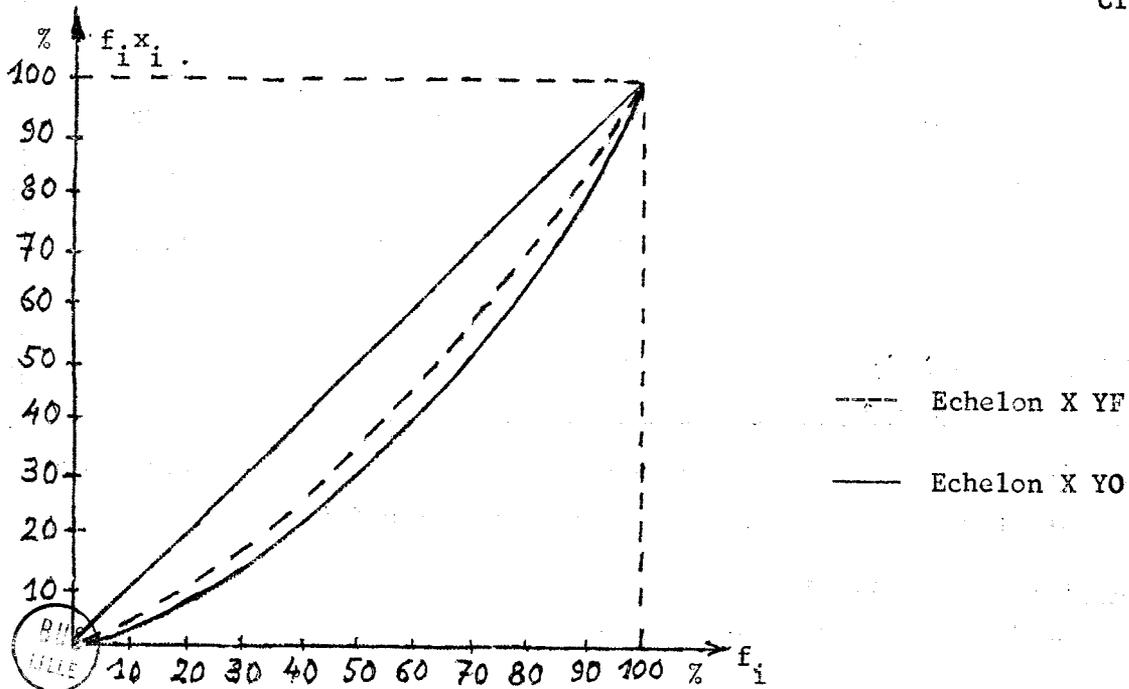
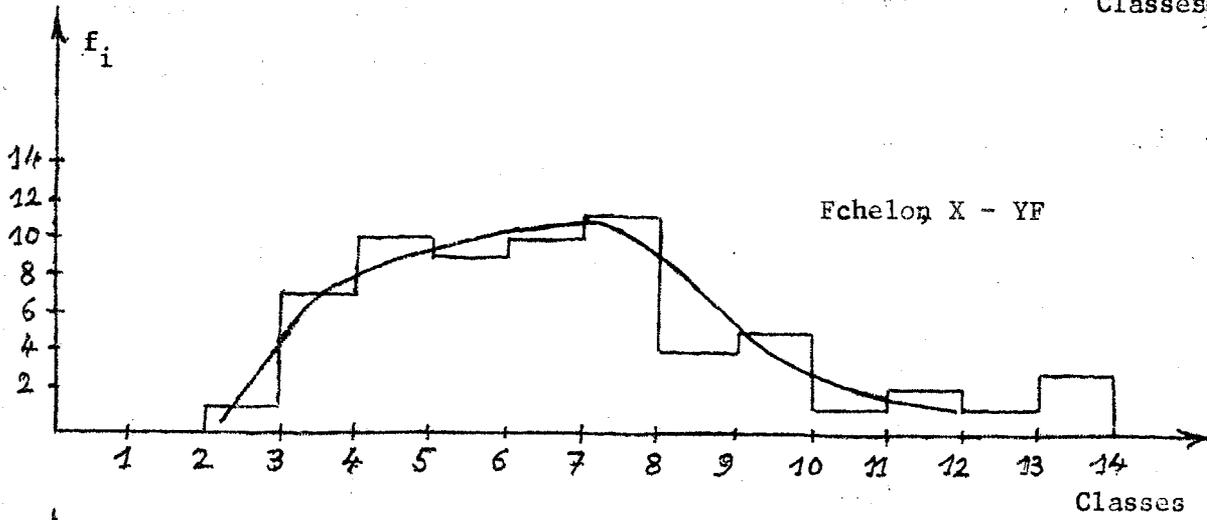
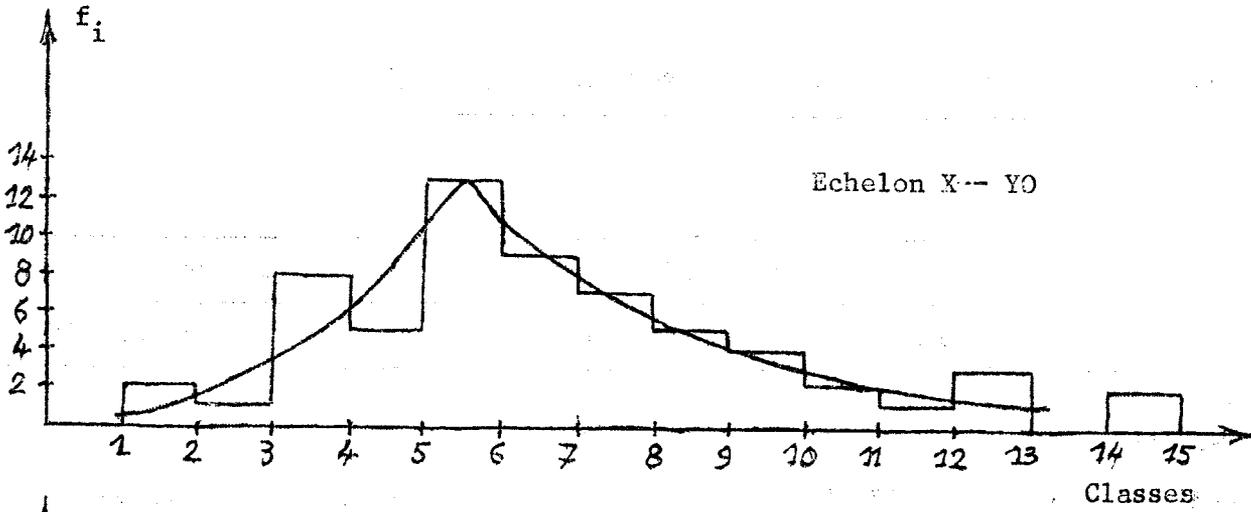
II-3-11 Etude du test : Echelon amplitude maximale en V

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	17,28.	16,24	17,40	16,31.
Médiane	17,05	15,5	17,08	15,94
Mode			16,66	12,8
Quartile Q_1	12,85	11,75		
Q_3	21,65	19,5		
Déviaton Quartile	4,4	3,87		
"Range"	23,9	18,8		
$\mu_2 = \sigma^2$	42,98	19,20	34,02	20,15
σ	6,55	4,38.	5,83	4,49
γ	0,38	0,27.	0,33.	0,27
m_2	341,56	282,96	337	286,25
m_4			158.413	106.401
c			-1,60.	-1,70
Médiale			19,42	17,64
Concentration			0,19	0,15

Les caractéristiques des deux courbes sont les suivantes : pratiquement symétrique, platykurtique, faible dispersion, concentration faible.

Test "yeux ouverts" : Nous trouvons 67,18 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$ et la totalité de l'effectif entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Test "yeux fermés" : Les pourcentages sont les suivants : 60,93 % entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 98,43 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



II-3-12 Etude du test : Echelon amplitude maximale en X

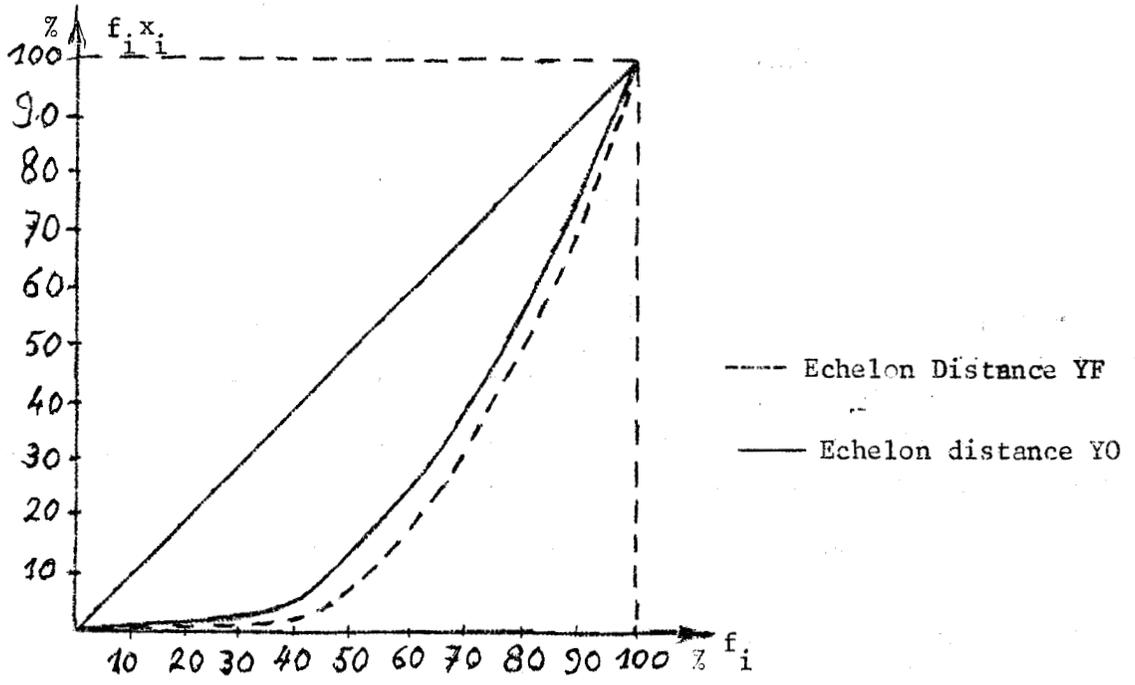
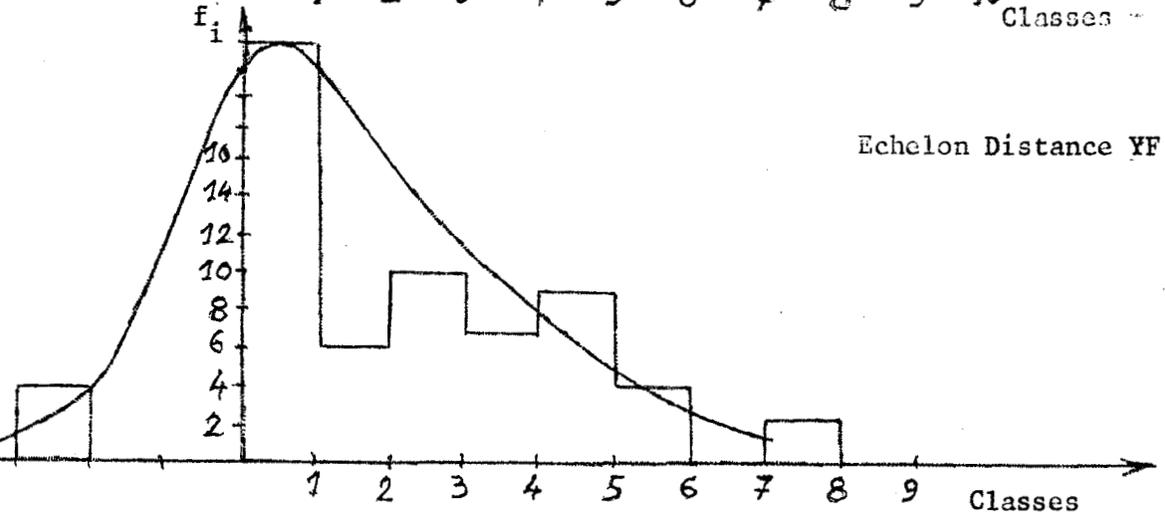
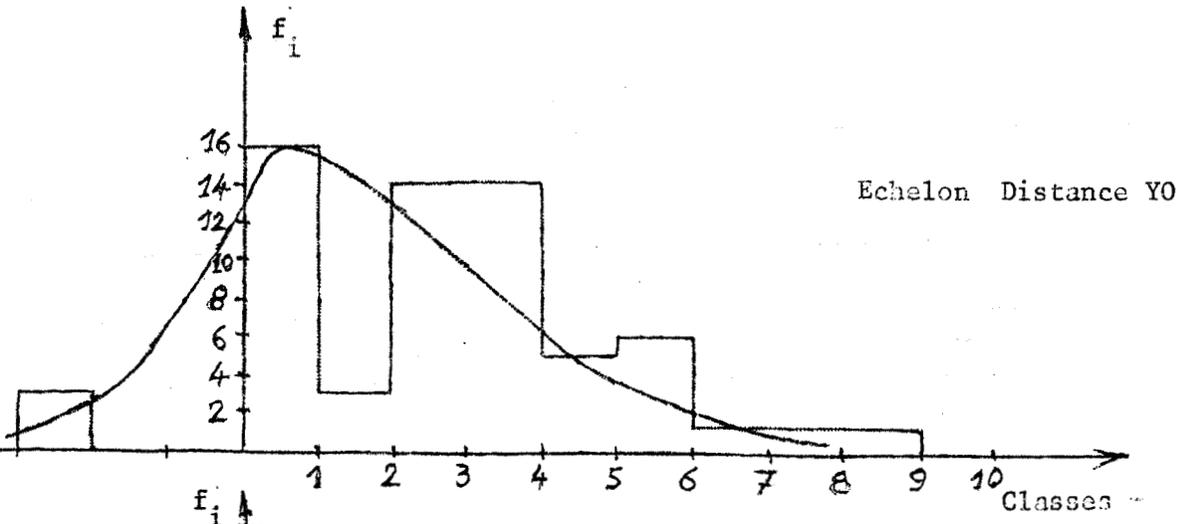
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	7,05	6,77	7,1	6,82
Médiane	6,15	6,5	6,31	6,42
Mode			5,66	7,12
Quartile Q_1	4,95	4,05		
Q_3	8,35	7,95		
Déviatiion Quartile	1,7	1,95		
"Range"	17,9	11,3		
$\mu_2 = \sigma^2$	12,22	7,02	12,39	5,34
σ	3,49	2,65	3,52	2,31
γ	0,49	0,39	0,49	0,34
m_2	62,01	52,88	62,93	51,96
m_4			8655,59	4669,95
c			-0,81	-1,27
Médiale			7,84	7,48
Concentration			0,27	0,22

Test "Yeux Ouverts" : La courbe est pratiquement symétrique, platykurtique, de dispersion moyenne et de concentration faible.

Il y a 78,12 % entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 93,75 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Test "Yeux Fermés" : Les tendances générales sont les mêmes que ci dessus.

Il y a 67,18 % entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 93,75 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



II-3-13. Etude du test : Echelon, distance entre les points de départ et d'arrivée

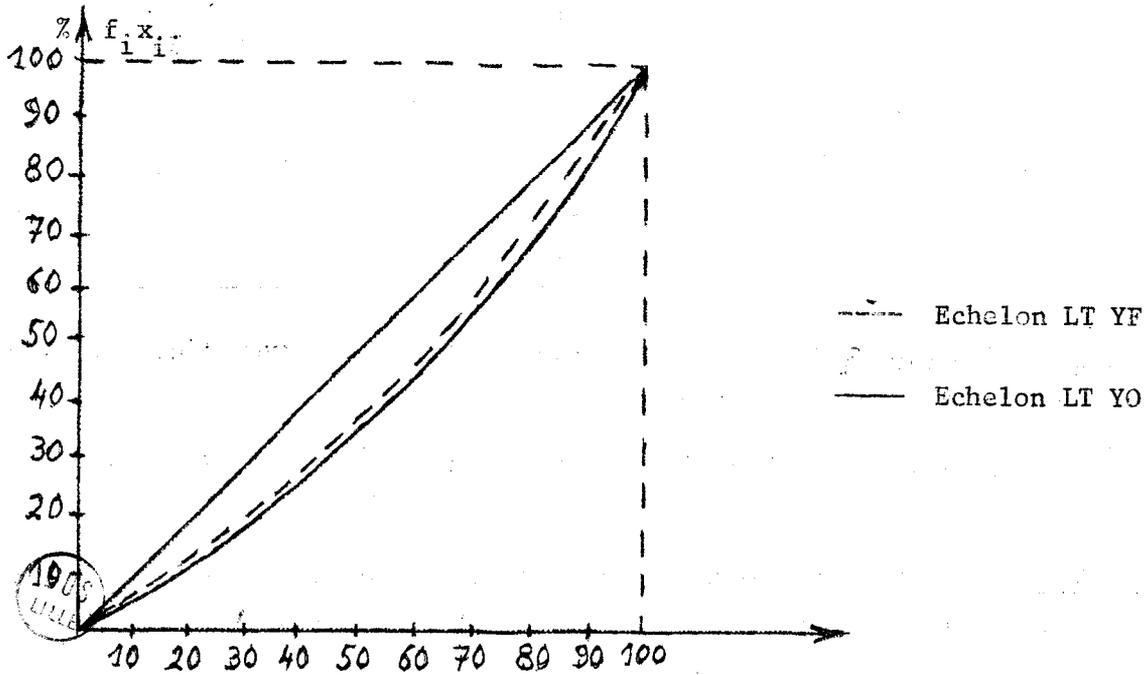
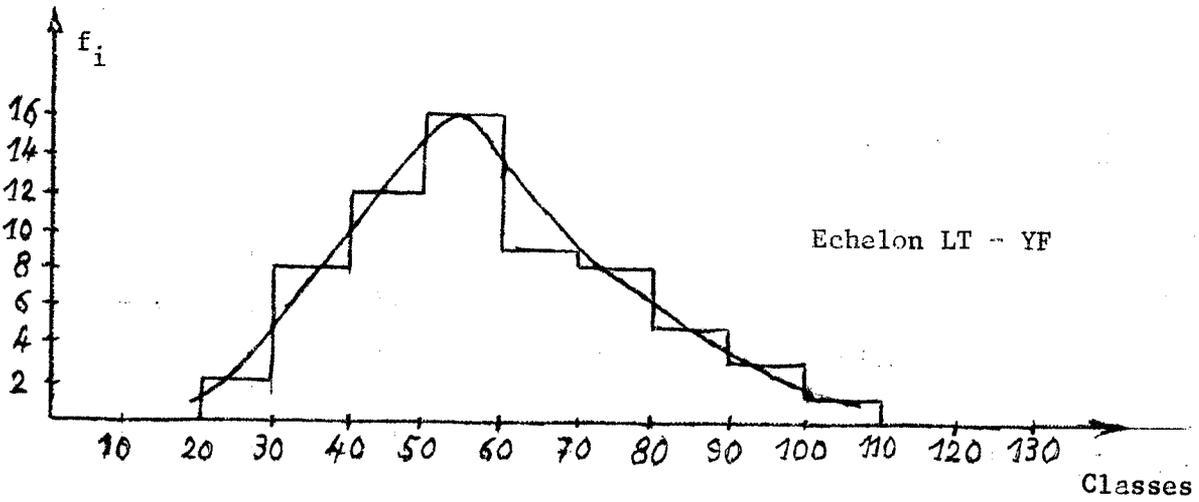
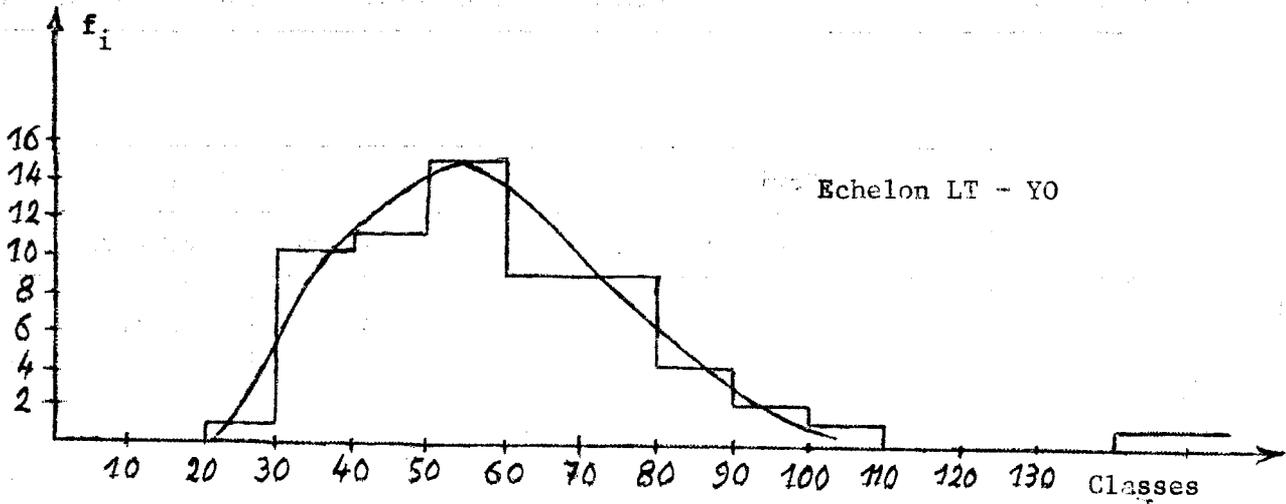
	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	2,37	1,82	2,61	2,11
Médiane	2,5	1,85	2,67	1,95
Mode			3,1	0,53
Quartile Q_1	0,5	0		
Q_3	3,55	3,75		
Déviation Quartile	1,52	1,87		
"Range"	11,5	12		
$\mu_2 = \sigma^2$	4,80	5,32	4,78	5,22
σ	2,19	2,30	2,18	2,28
γ	0,92	1,26	0,84	1,08
m_2	10,42	8,63	11,59	9,67
m_4			320,12	241,76
c			-0,62	-0,41
Médiale			3,9	4,21
Concentration			0,45	0,53

Test "Yeux Ouverts" : La courbe est asymétrique à droite, platykurtique, de dispersion très forte et de concentration moyenne.

Entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$, il y a 62,5 % de l'effectif et entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$, il y a 93,75 %.

Test "Yeux Fermés" : Nous constatons une asymétrie à gauche, une dispersion élevée et une concentration moyenne ; La courbe est platykurtique.

Il y a 79,68 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 95,31 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.



II-3-14 Etude du test : Echelon , longueur du transitoire

	Série Numérique		Série Classée	
	Yeux Ouverts	Yeux Fermés	Yeux Ouverts	Yeux Fermés
Moyenne	59,40	57,07	60,78	53,59
Médiane	54	53,5	56,4	55,89
Mode			54	53,63
Quartile Q_1	44	41,5		
Q_3	70,5	70		
Déviat. Quartile	13,25	14,25		
"Range"	130	72		
$\mu_2 = \sigma^2$	581,34	298,98	558,77	332,40
σ	24,11	17,29	23,64	18,23
γ	0,40	0,30	0,38	0,31
m_2	4110,43	3556,89	4253,12	3765,62
m_4			33.682.656	19.517.031
c			-1,13	-1,62
Médiale			64,77	62,58
Concentration			0,21	0,13

Les caractéristiques des deux courbes sont les mêmes : pratiquement symétrique, platykurtique, de dispersion et de concentration faibles.

Test "Yeux Ouverts" : Il y a 75 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 95,31 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

Test "Yeux Fermés" : Il y a 67,18 % de l'effectif entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; 93,75 % entre $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$.

II.3.15 Analyse des résultats statistiques

a) Les courbes statiques montrent tout d'abord que le point représentatif de la projection du centre de gravité ne reste pas fixe mais décrit une courbe déterminant une surface S dont la valeur varie selon les individus et avec certaines conditions extérieures telles que le degré d'excitation, la fatigue ...

Il est également intéressant de faire la comparaison entre les tests "yeux ouverts" (YO), "yeux fermés" (YF) et dans le tableau suivant, nous avons figuré pour les temps de 10 secondes, 20 secondes et 30 secondes, les valeurs moyennes des trois paramètres X, Y, S et les rapports correspondant. Rappelons que X et Y représentent les amplitudes maximales selon les axes de coordonnées et S la surface déterminée par l'enveloppe du lieu du centre de gravité.

X	YO	YF	Rapports
10 s	1,39	1,7	1,22
20 s	1,61	1,9	1,18
30 s	1,57	2,22	1,41
Y	YO	YF	Rapports
10 s	1,99	2,67	1,34
20 s	2,3	2,98	1,3
30 s	2,55	3,3	1,29
S	YO	YF	Rapports
10 s	0,92	1,73	1,94
20 s	1,38	2,37	1,72
30 s	1,88	3,35	1,79

L'analyse de ces résultats permet de constater une nette augmentation de toutes les grandeurs si l'on supprime les afférences optiques. De plus les rapports correspondant à une même caractéristique sont sensiblement constants quand la durée du test augmente.

Ceci semble indiquer l'influence importante exercée par les afférences optiques sur la régulation de l'équilibration.

En outre, les dimensions des courbes croissent en général avec la durée de l'expérience, conséquence prévisible du phénomène de fatigue.

b) Des enregistrements dynamiques considérés à présent se dégagent trois particularités importantes que nous allons préciser à l'aide du tableau suivant en notant par X et Y les amplitudes suivant les axes de coordonnées, par LT la longueur du parcours correspondant au régime transitoire et par D la distance entre les zones représentatives des points d'équilibre avant et après la perturbation.

	Y	X	LT	D
YO	17,28	7,06	59,41	2,37
YF	16,24	6,77	57,08	1,82
Rapports	0,94	0,96	0,96	0,77

Il ressort de l'examen du tableau ci-dessus l'existence suivant l'axe antéro-postérieur d'un écart entre les surfaces décrites avant et après le choc. Un tel résultat peut être envisagé comme la conséquence d'une modification de la posture fondamentale du sujet (après basculement, le plateau central n'est plus parfaitement horizontal mais légèrement incliné).

Nous observons ensuite une légère diminution, les yeux fermés, de toutes les valeurs des paramètres ; celle-ci est due soit à une adaptation au choc soit à l'absence des afférences optiques.

La troisième constatation est issue de l'examen de certaines courbes pour lesquelles l'amplitude latérale de la trajectoire prend une valeur importante. Un tel résultat provient d'une mauvaise position accidentelle des pieds sur le plateau. En effet, le choc se produisant suivant l'axe avant-arrière ne devrait normalement avoir qu'une faible influence latérale, hypothèse qui sera confirmée ultérieurement par l'étude des corrélations.

Remarque : En première approximation, nous avons approché les courbes statistiques obtenues par des courbes normales. Pour faciliter la comparaison, nous avons calculé les pourcentages correspondant à des effectifs compris entre $\bar{x}-\sigma$ et $\bar{x}+\sigma$; $\bar{x}-2\sigma$ et $\bar{x}+2\sigma$ avec \bar{x} la valeur moyenne et σ l'écart-type. Nos résultats sont un peu supérieurs à ceux de la loi de LAPLACE-GAUSS.

II.3.16 Etude des corrélations

Cette étude a pour but de chercher la relation qui peut exister entre les variables X et Y. En considérant les résultats des tests statistiques, il est possible de calculer les valeurs des coefficients de corrélation linéaire et des coefficients d'amélioration ; ceux-ci donnent le pourcentage de chance pour qu'il y ait une liaison stochastique linéaire entre les deux variables.

Le tableau suivant réunit les résultats obtenus pour les divers tests statistiques :

	r	A %
10s YO	0,45	10,5
YF	0,12	7,5
20s YO	0,53	15,4
YF	0,57	18
30s YO	0,652	24,2
YF	0,66	25

Les valeurs montrent qu'en première approximation, il existe peu de chances pour qu'il y ait un lien entre X et Y. Ce résultat nous permettra, dans la troisième partie, de ne considérer pour l'analyse de la réponse à l'échelon que la seule variable Y.

III ANALYSE DES COURBES DE SUJETS MALADES

Sans avoir l'intention de nous immiscer dans un domaine qui n'est pas le nôtre et en laissant aux médecins le soin d'interpréter les divers résultats, nous désirons présenter ci-dessous un des aspects de l'utilisation de notre dispositif.

Dans ce but, nous allons comparer les valeurs calculées précédemment à celles obtenues pour des sujets malades.

Notons toutefois que ces considérations, ne reposant pas sur l'étude d'une population de malades atteints d'une même affection, n'ont qu'une valeur d'exemple.

Dans le tableau suivant, nous avons réuni les moyennes, les grandeurs $\bar{x} + \sigma$, $\bar{x} + 2\sigma$ et les pourcentages correspondant aux sujets normaux ; en regard nous donnons les chiffres des mesures effectuées sur neuf malades.

L'analyse des résultats permet d'effectuer quelques constatations intéressantes :

- Dans certains cas, il peut y avoir une augmentation importante des dimensions de toutes les courbes.

- Parfois également, les courbes "yeux ouverts" restent normales et les tracés "yeux fermés" sont considérablement dilatés.

- Ailleurs le sujet ne supporte pas le choc et il y a en outre un accroissement sensible des surfaces.

- Dans d'autres cas, les résultats des tests dynamiques semblent normaux mais les surfaces des tests statiques sont anormalement augmentées. Ces constatations nous entraînent à croire à la dissociation des éléments de détection statique et dynamique, conclusion qui sera mise en évidence dans la troisième partie de notre étude.

\bar{x} - $\bar{x} + \sigma$ - $\bar{x} + 2\sigma$	1 M.I..	2 M.L...	3 M.D...	4 M.T...	5 M.B...	6	7 M.Q...	8 M.H...	9 M.B...
<u>Test statique 10 s X</u>									
YO 1,39 2,13 2,88 66 % 93%	9,4	1,8	3,1	2,7	2	2,6	3,9	2,3	2,7
YF 1,7 2,70 3,69 68 % 97 %	5,7	5,4	3,7	4,4	3,5	2,3	6,8	7,5	5,2
<u>Test statique 10 s Y</u>									
YO 1,99 2,83 3,66 55 % 97 %	4,6	1,8	4,4	3	3,3	6,8	4,7	1,5	7,6
YF 2,67 3,99 5,32 77 % 95 %	8,8	9,3	3,5	4,9	5,2	11,5	18,6	6,4	12,7

<u>Test dynamique X</u>								CHOC				
YO	7,055	10,55	14,05	15,8	10	9,8	7,8	I	4,6	6,9	11,4	10,2
		78 %	94 %									
YF	6,77	9,42	12,07	14,3	11,2	12,8	10,9	M	7,2	6,7	8,6	6,9
		67 %	94 %					P				
<u>Test dynamique distance</u>								O				
YO	2,37	4,56	6,75	0	0	0	3,5	S	1	0	1	0
		62,5 %	94 %									
YF	1,82	4,13	6,43	3,5	-3	0	5	S	3,5	0	0	4
		30 %	95 %					I				
<u>Test dynamique L.T</u>								B				
YO	59,41	83,52	107,63	114	104	112	54	L	45	42	53	128
		75 %	95 %									
YF	57,08	74,37	91,66	104	135	104	52	E	30	50	64	234
		67 %	94 %									

IV CONCLUSION

Les résultats obtenus à partir des enregistrements effectués sur un certain nombre de sujets, nous ont permis tout d'abord, par l'intermédiaire de calculs statistiques, de dégager divers aspects fort utiles aux médecins ; puis d'aborder l'étude du système en tant qu'asservissement, notion essentielle aux automaticiens.

C'est dans ce dernier cadre que nous allons nous placer pour envisager en régulateur la fonction d'équilibration de l'être humain.

III^e PARTIE

ETUDE DE LA FONCTION D'EQUILIBRATION

Cette dernière partie est consacrée à l'étude des systèmes d'équilibration en tant que régulateurs. A l'aide des résultats de la deuxième partie, nous allons chercher à déduire un schéma bloc rendant compte des phénomènes physiologiques.

Puis tenant compte de l'analyse des courbes dynamiques $Y(t)$, nous nous pencherons sur l'étude mathématique de la fonction de transfert du régulateur. Nous dégagerons quatre modes principaux de représentation : une approche par un asservissement linéaire, par un asservissement non linéaire à variation dans le temps où à variation en fonction de l'erreur, enfin une représentation échantillonnée du processus.

III.1 SCHEMA BLOC PHYSIOLOGIQUE

Le schéma bloc que nous présentons comporte quatre boucles imbriquées rendant compte des grandes unités structurales qui captent l'information [1] : les systèmes labyrinthique, proprioceptif, extéroceptif et l'ensemble oculaire. Quand le stimulus atteint un certain seuil, les informations issues du labyrinthe sont transmises au système d'intégration et de déclenchement, dont l'activité ne commence qu'à partir d'une valeur donnée de l'information. Pour faciliter la représentation, nous confondons artificiellement ces deux seuils. La présence de cet élément se justifie par l'existence des surfaces dans les tests statiques.

De nombreux paramètres s'exercent sur le seuil ; parmi ceux-ci, signalons les conditions extérieures, l'état de vigilance, la durée de l'expérience (fatigue et apprentissage) et enfin les afférences optiques sur lesquelles nous reviendrons.

Les centres moteurs mettant en action les muscles posturaux sont inclus dans cette même chaîne. Entre la commande et l'effecteur, il existe un délai de transmission nerveuse.

La posture agit en retour sur le labyrinthe. Une autre chaîne de rétroaction dénommée "adaptation tension posture" influence directement les centres moteurs.

La deuxième boucle comporte les centres détecteurs proprioceptifs placés à tous les niveaux et dont les informations sont transmises aux centres d'intégration et de déclenchement pour un certain seuil. Il en va de même pour celles fournies par le système extéroceptif. Il convient maintenant de considérer le mode d'action de l'ensemble oculaire. On peut d'abord individualiser l'ensemble capteur rétinien transmettant ses informations aux aires visuelles qui comprennent le cortex visuel et les aires visuelles associées. Entre ces deux blocs, il existe une chaîne de retour appelée retour image-rétine.

D'autre part les informations partant de cet ensemble déclenchent l'activité des centres oculo-moteurs qui, par action sur les muscles oculaires, déterminent la position des yeux. Celle-ci agit en retour (adaptation tension position) sur l'état de fonctionnement des centres oculo-moteurs qui sont également concernés par les chaînes de retour dynamique et proprioceptive.

Ce second sous-ensemble fonctionne pour une grande part sur un mode réflexe. Il est néanmoins influencé par les centres nerveux supérieurs sur lesquels il agit également à partir d'un certain seuil. Le schéma physiologique global est donné figure 23.

III.2 INTRODUCTION DU MODELE MATHEMATIQUE

Nous allons maintenant effectuer la transformation du schéma précédemment défini pour en obtenir un modèle mathématique, en mettant dans un même bloc les divers types de capteurs. Les éléments de transmission nerveuse sont assimilés à un retard pur (fonction de transfert e^{-Tp}). Les centres d'intégration et de déclenchement sont subdivisés en deux dispositifs, dissociant artificiellement les comportements statique et dynamique.

Le premier présente un seuil variable et une partie linéaire de gain constant K , le second est représenté par un gain K' variable. Sur ces blocs agissent les afférences optiques, les conditions extérieures, le degré de vigilance etc... En outre les centres moteurs sont figurés par un gain K'' fixe et les muscles posturaux par une fonction de transfert linéaire $L(p)$ qui sera déterminée ultérieurement.

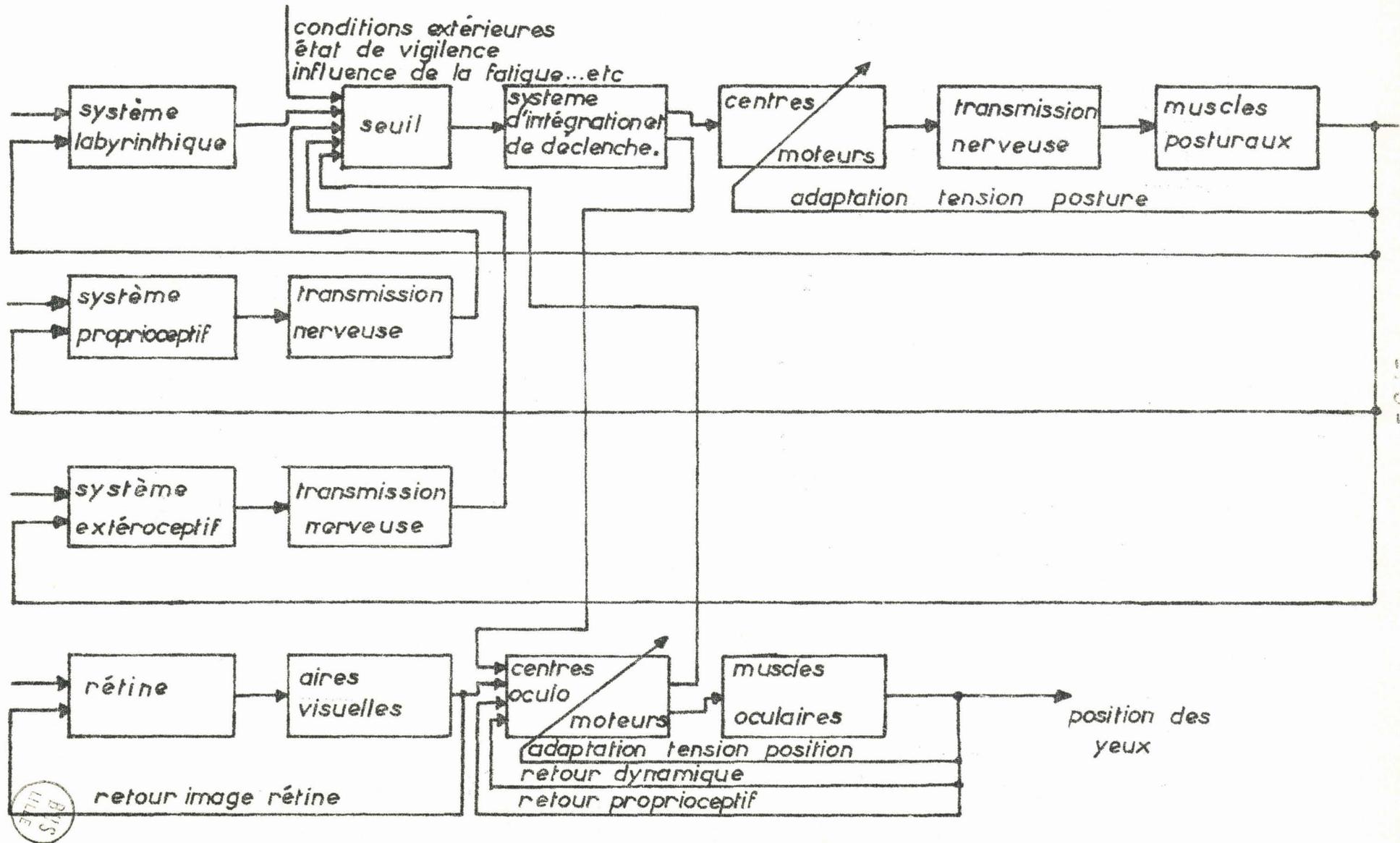


Figure 23



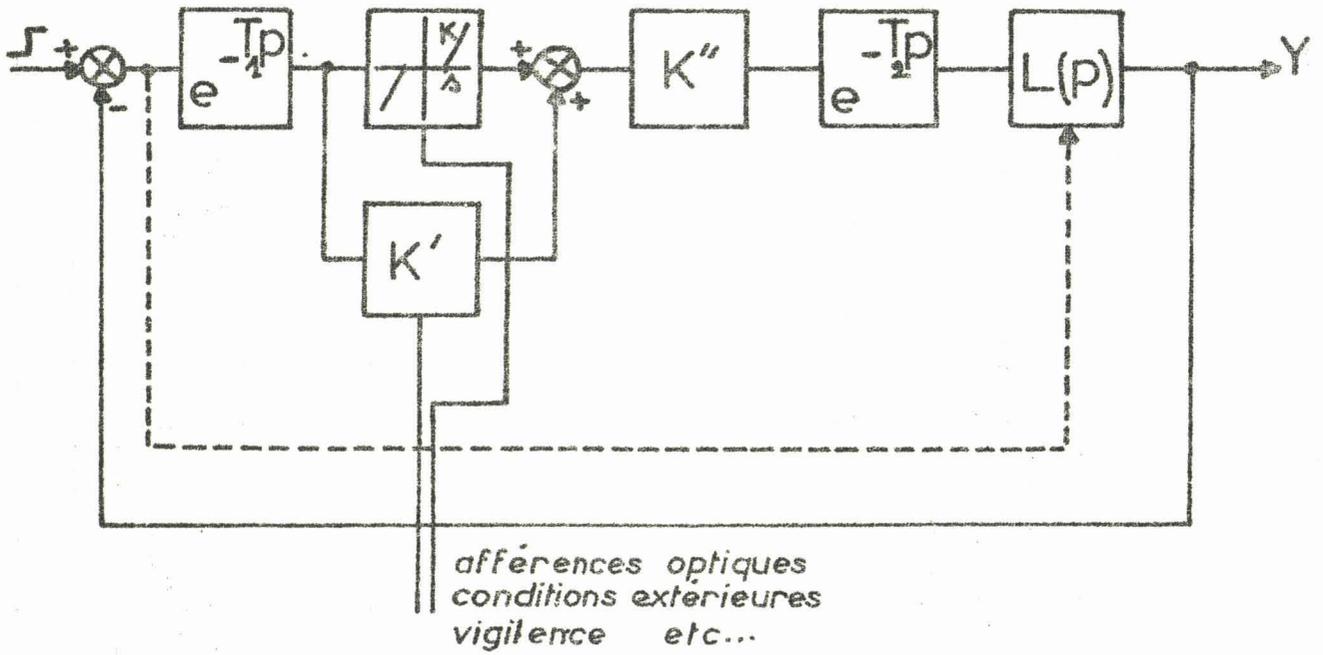


figure 24

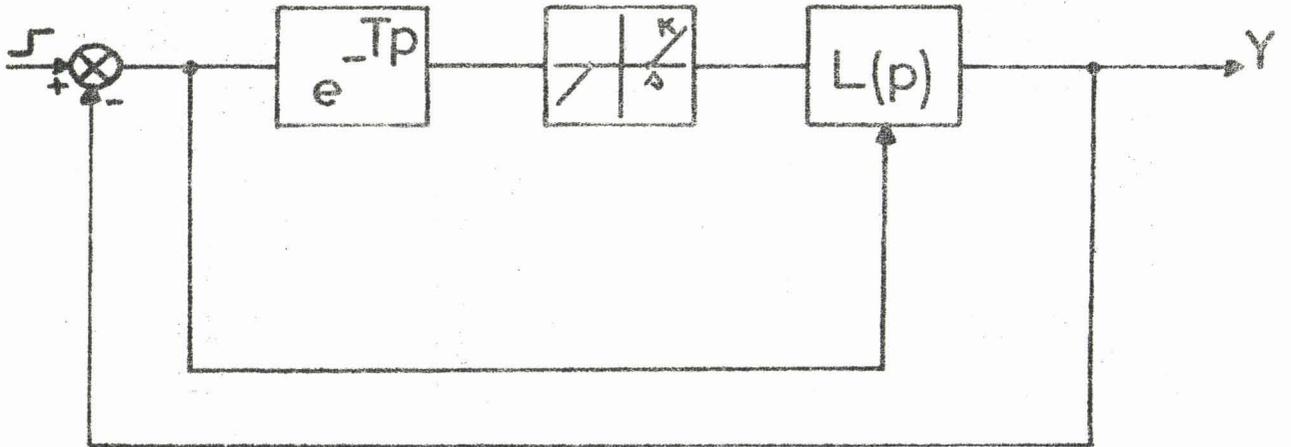


figure 25



L'intervention du système oculaire peut être ramenée à une action au niveau du détecteur (proprioceptivité oculaire) et du seuil. Le schéma général du modèle est donné figure 24.

Nous avons ajouté en pointillé une possibilité d'action adaptative sur la fonction de transfert.

Rappelons toutefois que la représentation ne porte que sur la seule variable Y le choc ayant été appliqué suivant l'axe antéro-postérieur.

Ce fait est confirmé par l'étude des corrélations entre X et Y.

Le schéma de la figure 24 se ramène alors à celui de la figure 25.

III.3 ANALYSE DE LA REPONSE INDICIELLE OBTENUE EXPERIMENTALEMENT

Les enregistrements obtenus peuvent se ramener à trois types essentiels, couvrant pratiquement 30 % des cas, et dont les allures générales sont données figure 26. En réalité on peut considérer qu'il s'agit de l'évolution en fonction de divers paramètres d'un même système, et en première approximation celui-ci se caractérise par quatre notions :

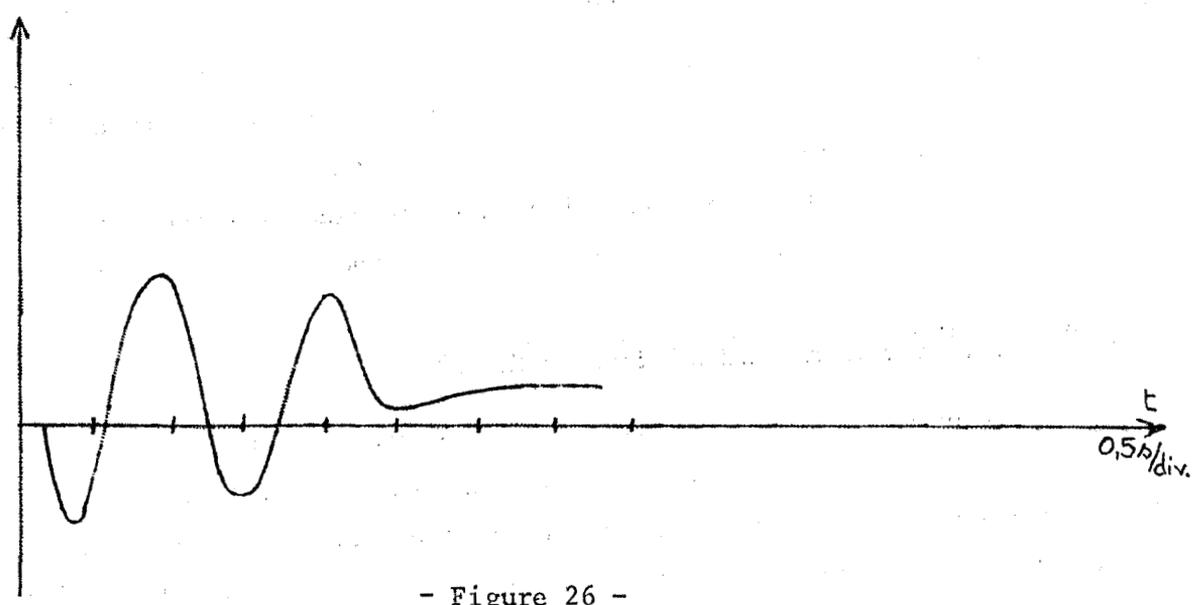
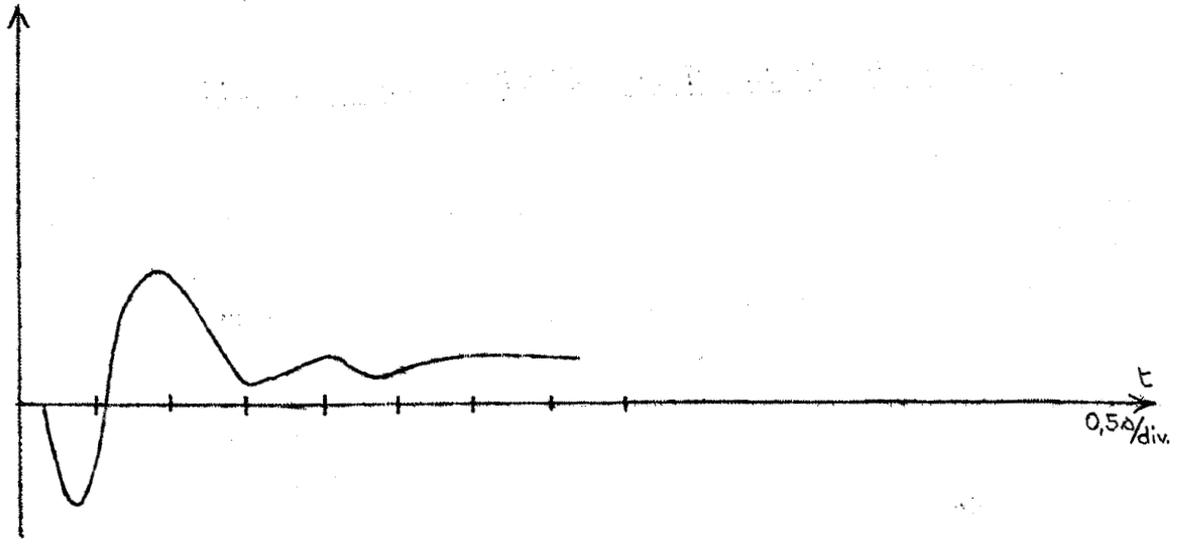
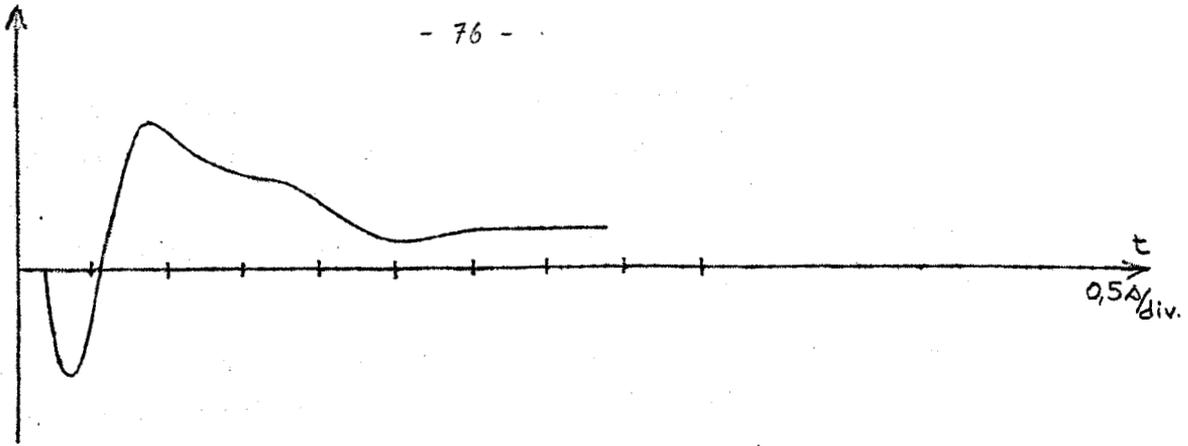
- Il existe un retard pur, variable, entre 0,1 s et 0,2 s.
- Le comportement du système est "vicieux au départ", comme pour les systèmes à déphasage non minimal.
- Le système est oscillant mais possède un facteur d'amortissement non constant.

- Il y a une erreur permanente, négligeable en première analyse.

D'autre part l'existence d'oscillations de grande amplitude suivies d'un mode essentiellement non oscillatoire pour de faibles valeurs de l'erreur ou après un certain temps de réponse indiciale, suggère soit une évolution du système dans le temps, soit une variation dans l'espace de phase. Il se produit en outre des oscillations permanentes d'amplitude très peu élevée.

III.4 REALISATION D'UN MODELE : CARACTERES GENERAUX

A la suite de l'analyse précédente, le système correspondant aux données semble devoir posséder une fonction de transfert à déphasage non minimal, une intégration dans la chaîne d'action et un retour unitaire pour assurer une erreur permanente nulle. Le gain en boucle fermé doit être suffisamment élevé pour introduire un régime oscillatoire.



- Figure 26 -

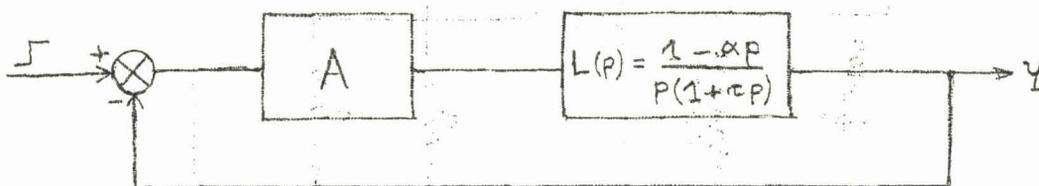
Les autres aspects particuliers sont abordés dans divers cas de réalisations. Celles-ci peuvent être classées en deux groupes importants : les modèles continus et les modèles échantillonnés.

III.5 DIVERSES REALISATIONS DU MODELE

III.5.1 Modèles continus

a) Modèle linéaire

Pour répondre aux spécifications précédentes, considérons le système de la figure 27 où A représente un gain fixe (celui-ci pourra d'ailleurs être rendu égal à 1) et où L(p) est la fonction de transfert en boucle ouverte.



- figure 27 -

L(p) a pour expression :
$$L(p) = \frac{1 - \alpha p}{p(1 + \tau p)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit alors :

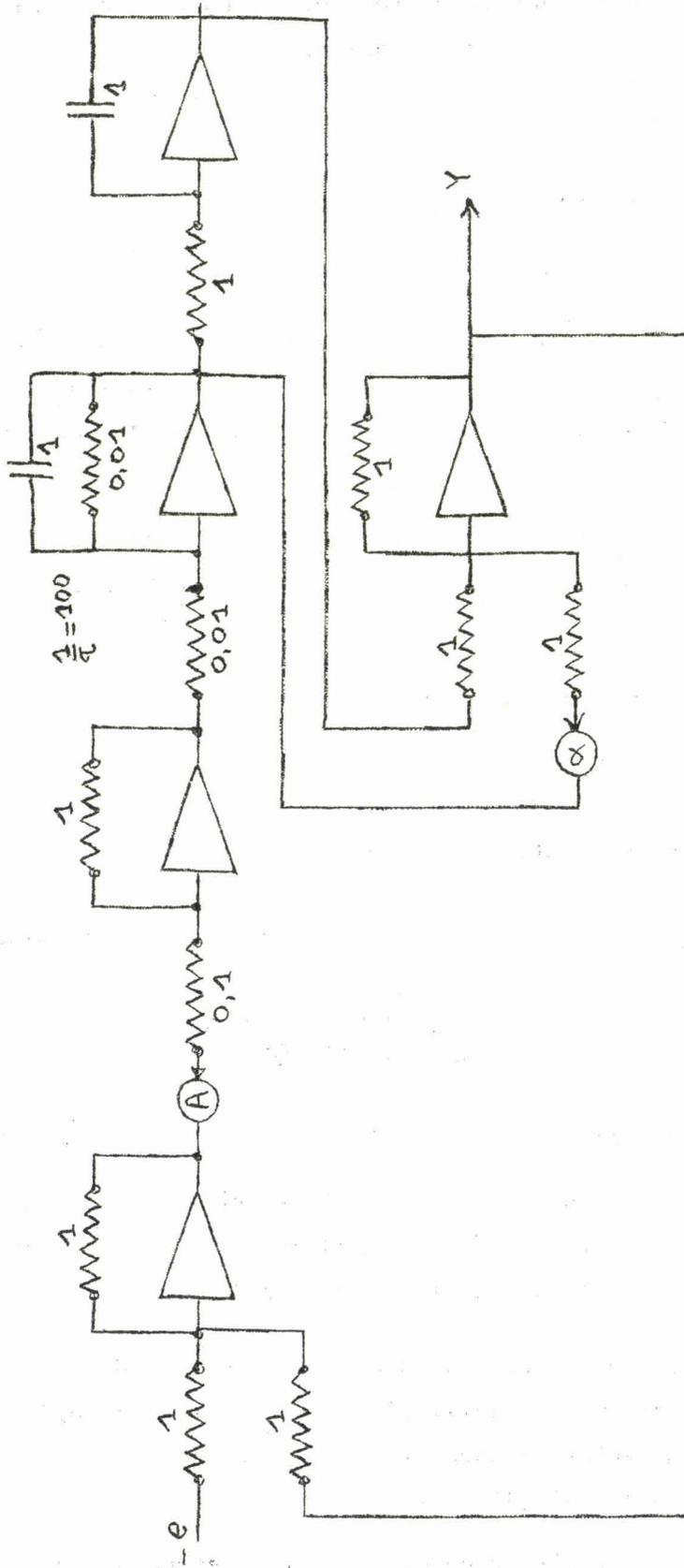
$$G(p) = \frac{A(1 - \alpha p)}{\tau \left[p^2 + p \frac{(1 - \alpha A)}{\tau} + \frac{A}{\tau} \right]}$$

Le système est oscillant si la condition : $4\tau > \frac{(1 - \alpha A)^2}{A}$ est remplie.

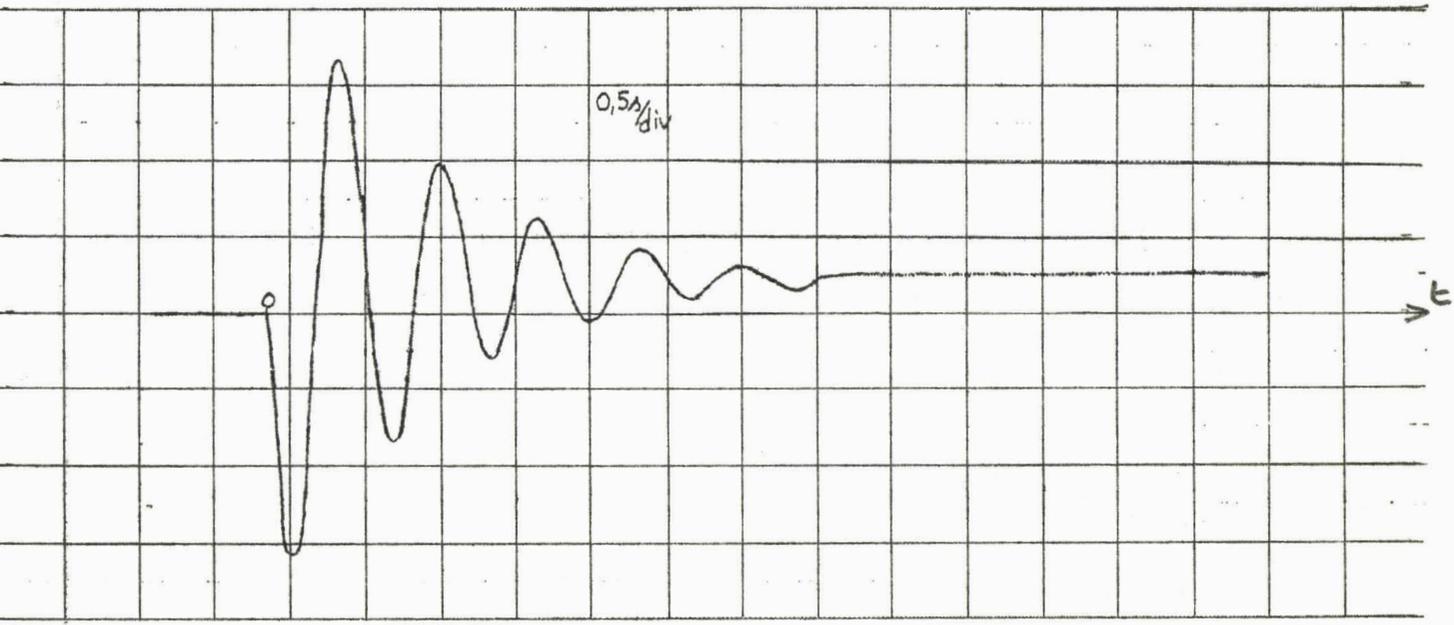
La réalisation du modèle sur calculatrice analogique aboutit au montage de la figure 28, et les réponses indicielles obtenues pour diverses valeurs des paramètres sont donnés figure 29 et 30.

Le montage constitue déjà une bonne approche des réponses souhaitées, toutefois la cessation des oscillations ne se fait pas suffisamment rapidement, et il est impossible d'obtenir un changement de mode. Cette constatation nous suggère deux modes d'amélioration :

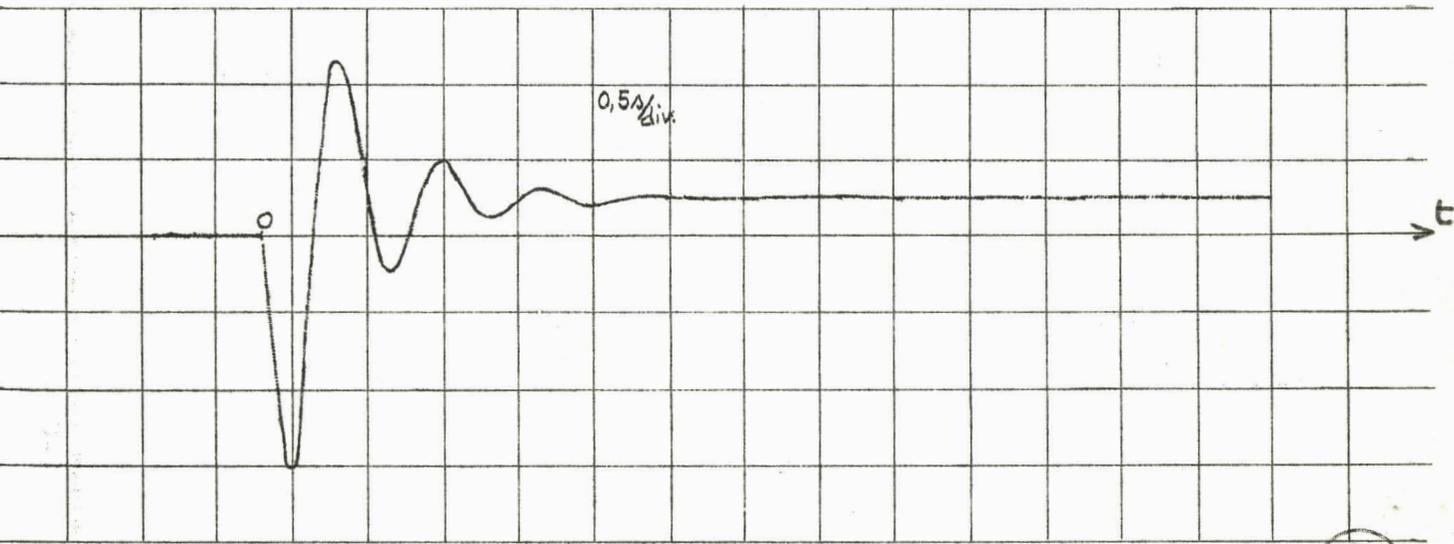
On peut soit réaliser un changement de structure du système au bout d'un certain temps (système linéaire adaptatif) soit encore modifier sa structure lorsque l'erreur devient petite (modèle continu non linéaire). Nous allons les évoquer ci-dessous.



- Figure 28 -

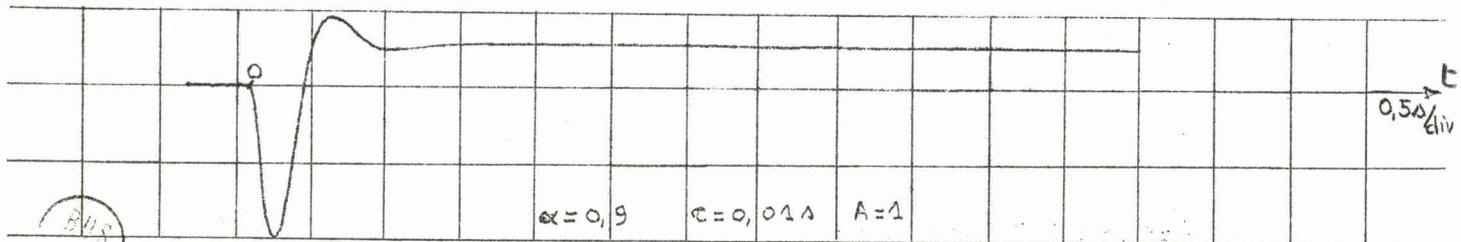
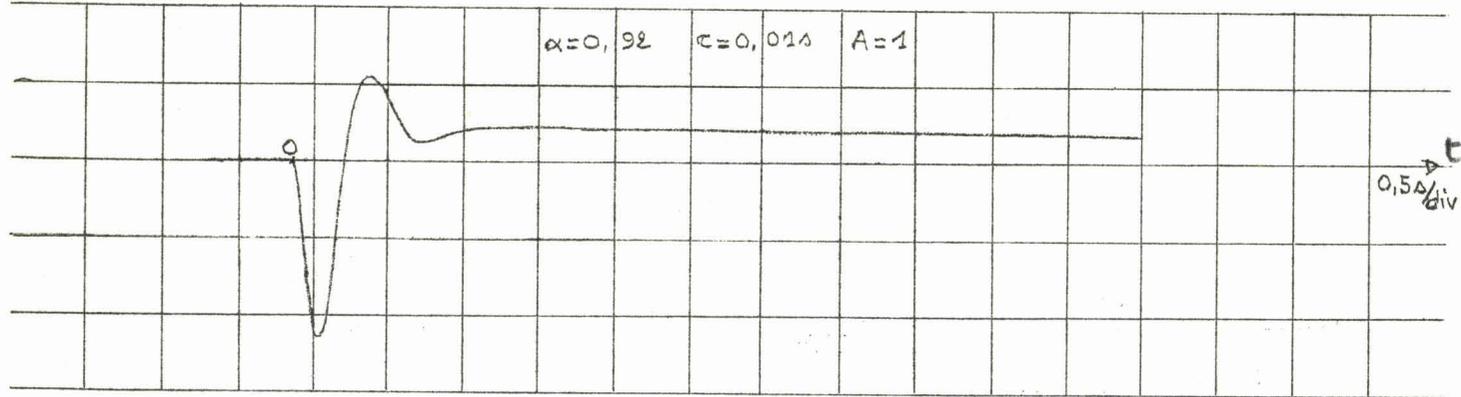
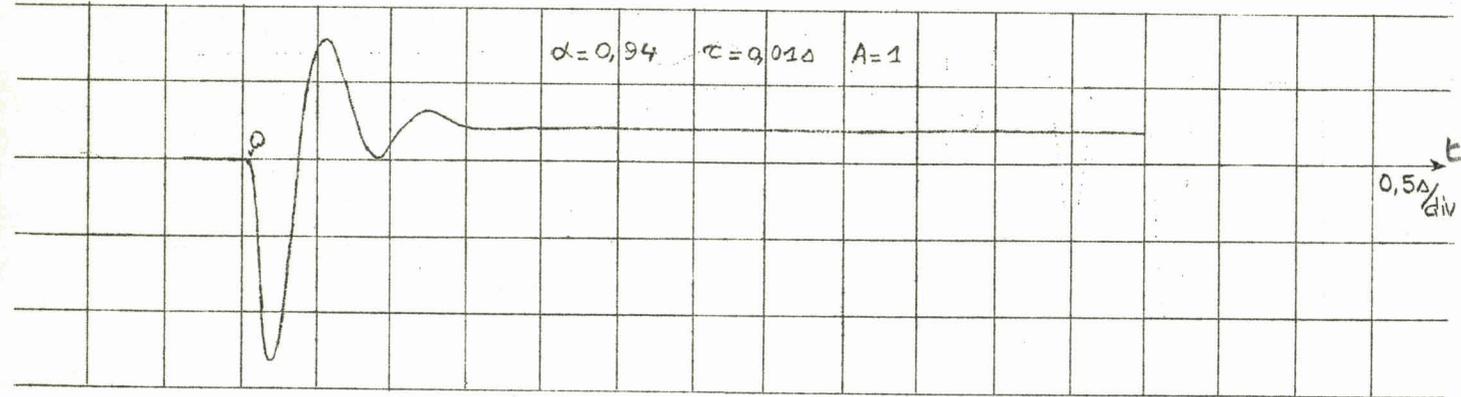


$A=1 \quad \alpha=0,98 \quad \tau=0,01A$



$A=1 \quad \alpha=0,96 \quad \tau=0,01A$

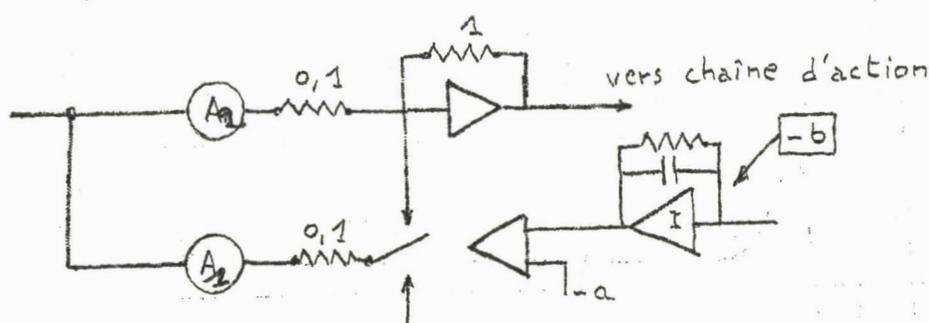




- Figure 30 -

b) Modèle linéaire adaptatif

Pour évoluer vers un mode non oscillant la méthode la plus simple consiste à changer après un certain temps de fonctionnement, la valeur de gain A, en réalisant sur calculatrice analogique un gain variable. Les données physiologiques suggèrent une variation continue du gain, mais pour des raisons de technologie nous avons utilisé un montage simple (figure 31) permettant de diminuer la valeur du gain à un instant donné.



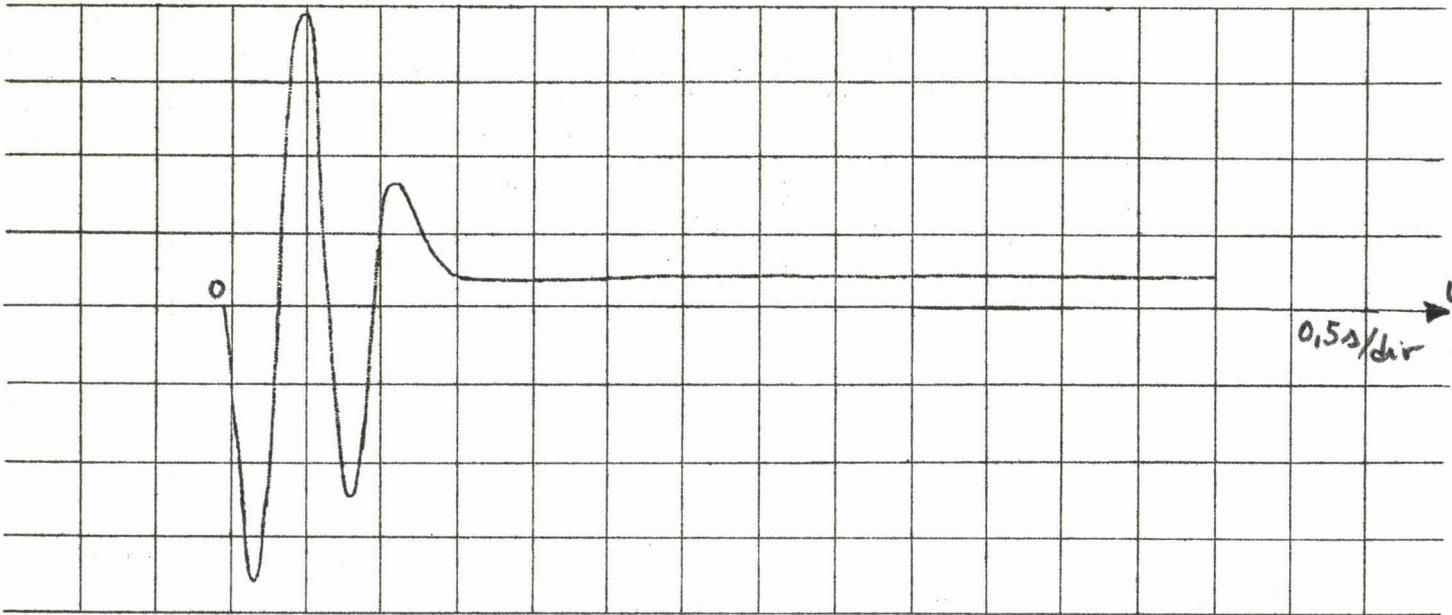
- figure 31 -

Au début le gain est égal à $A_1 + A_2$, et après basculement de la paillette du comparateur, il devient égal à A_2 . On injecte comme condition initiale de l'intégrateur I une quantité $-b$ telle que $b > a > 0$. La sortie de cet élément évolue alors comme $b e^{-t/\tau}$ et au bout du temps t_0 le basculement se produit lorsque $b e^{-t_0/\tau} = a$.

Cet ensemble constitue une horloge qui pourrait être remplacée par les éléments de comptage internes dans une calculatrice hybride. La figure 32 donne l'allure des courbes obtenues par cette méthode.

c) Modèle non linéaire continu

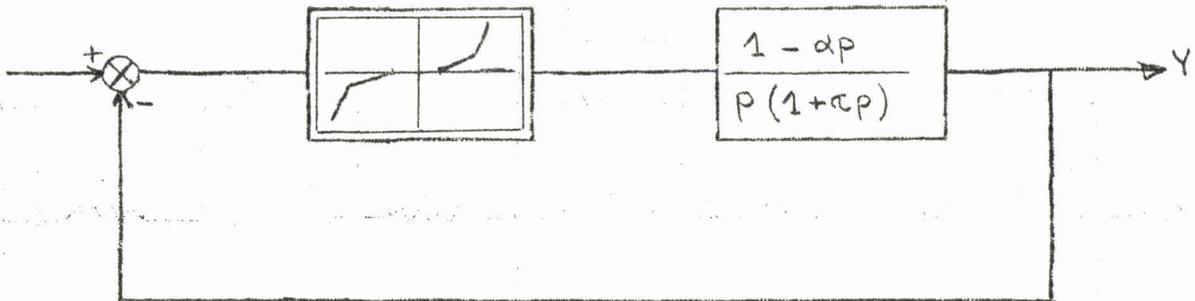
Dans ce modèle le mode varie avec la valeur de l'erreur en introduisant dans la chaîne d'action une non-linéarité. Celle-ci présente un seuil réglable et deux pentes ajustables. Pour les faibles amplitudes de l'erreur le gain reste faible, mais au dessus d'une certaine valeur il devient beaucoup plus élevé. (figure 33).



$A_1 = 0,1$ $\alpha = 0,98$
 $A_2 = 0,9$ $\tau = 0,01s$



- Figure 32 -

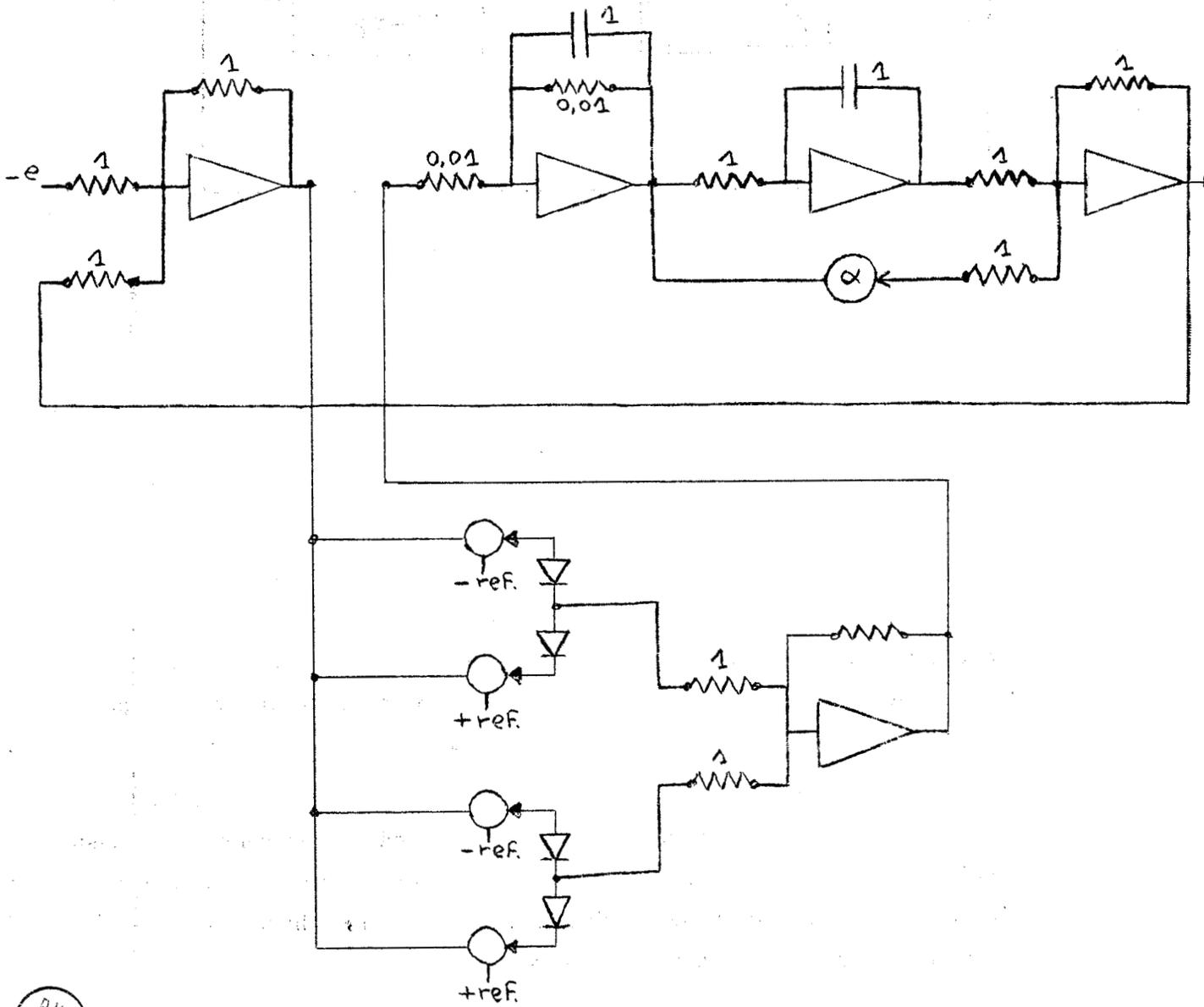


- Figure 33 -

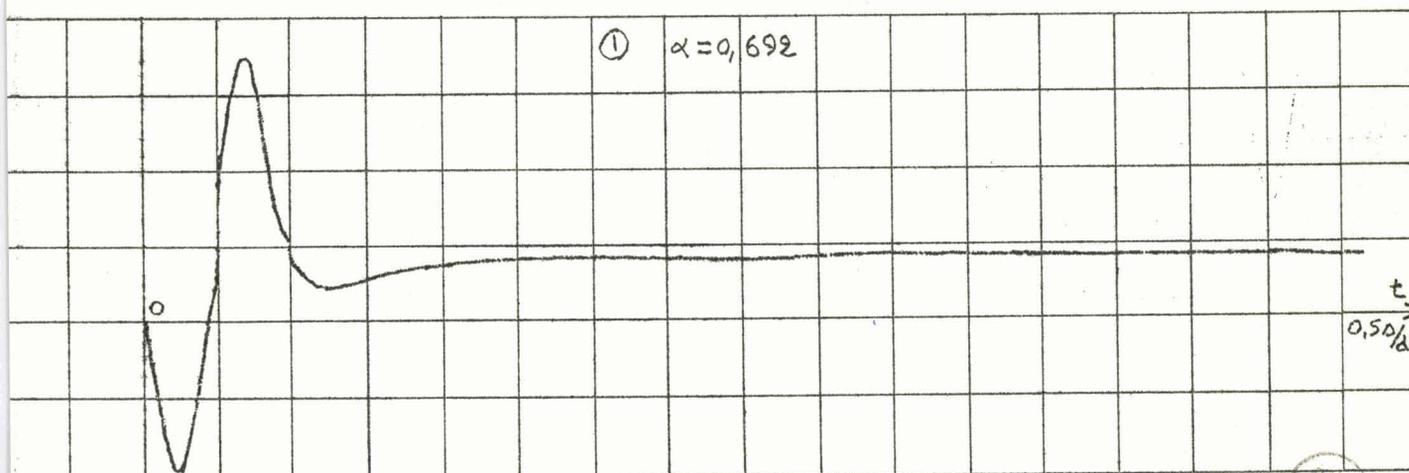
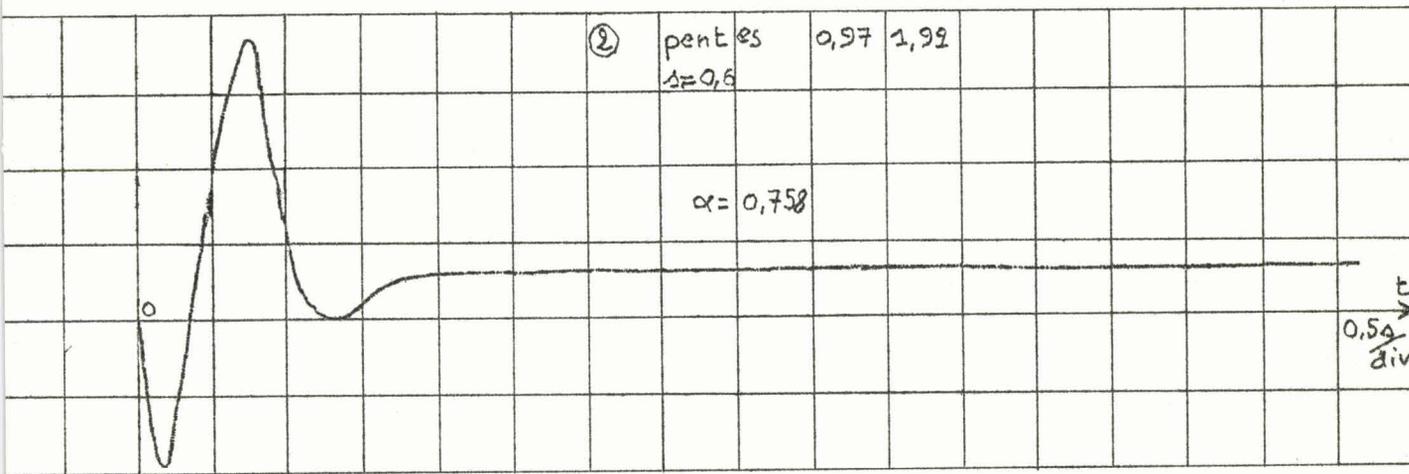
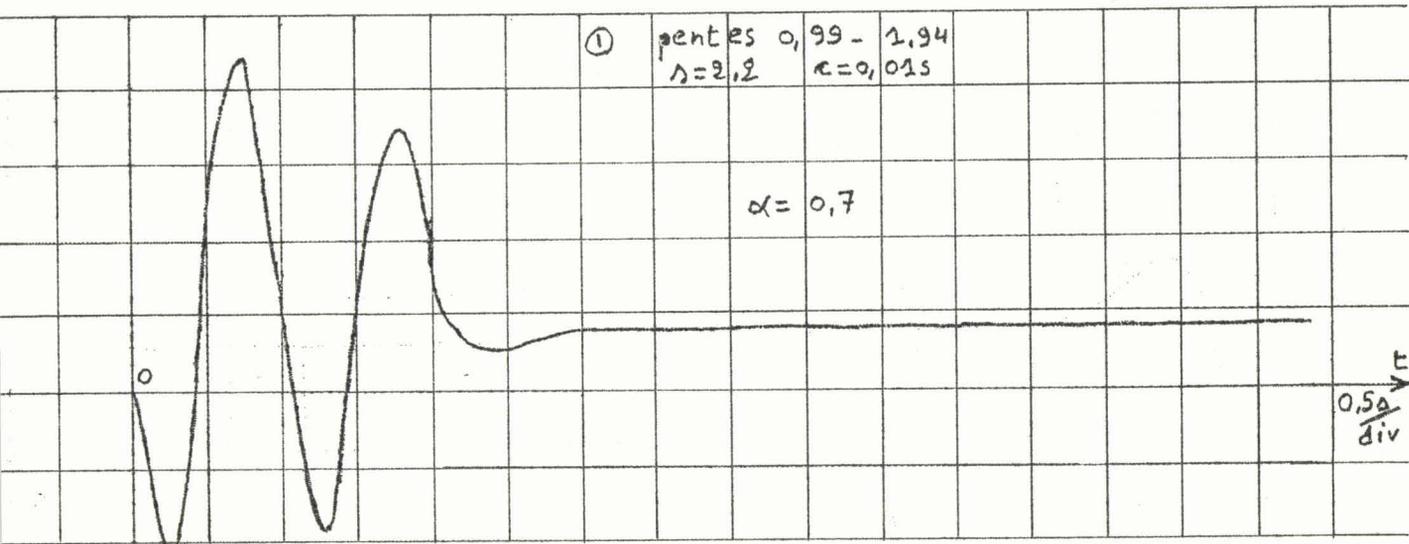
L'analyse directe est longue et difficile, mais la simulation permet d'obtenir les valeurs des paramètres. Le schéma de réalisation complet (Fig. 34) se déduit de celui de la figure 23 en remplaçant l'élément de gain Δ par un générateur de fonction. On obtient ainsi les tracés des figures 35 et 36.

Cette méthode donne une très bonne approximation du phénomène. Il faut toutefois remarquer que dans chacun des modèles présentés ci-dessus, il convient d'ajouter un retard pur qui vient alors se placer de manière artificielle. Ceci ne répond pas parfaitement à certaines hypothèses sur le fonctionnement interne du système nerveux.

Aussi pour pallier cet inconvénient, nous avons envisagé une représentation échantillonnée du modèle.

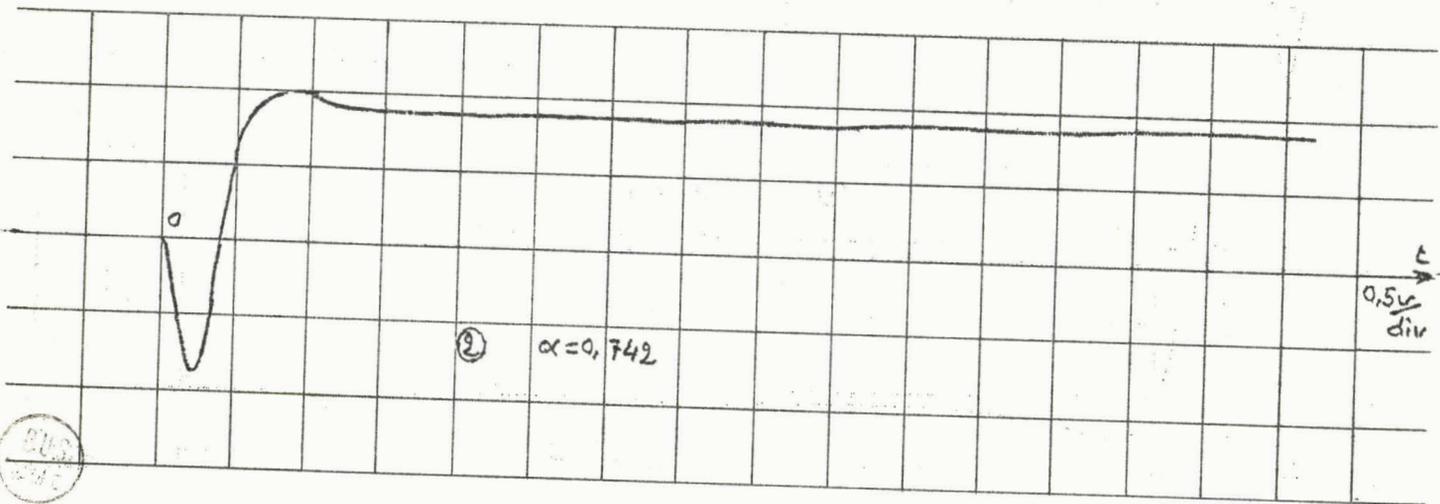
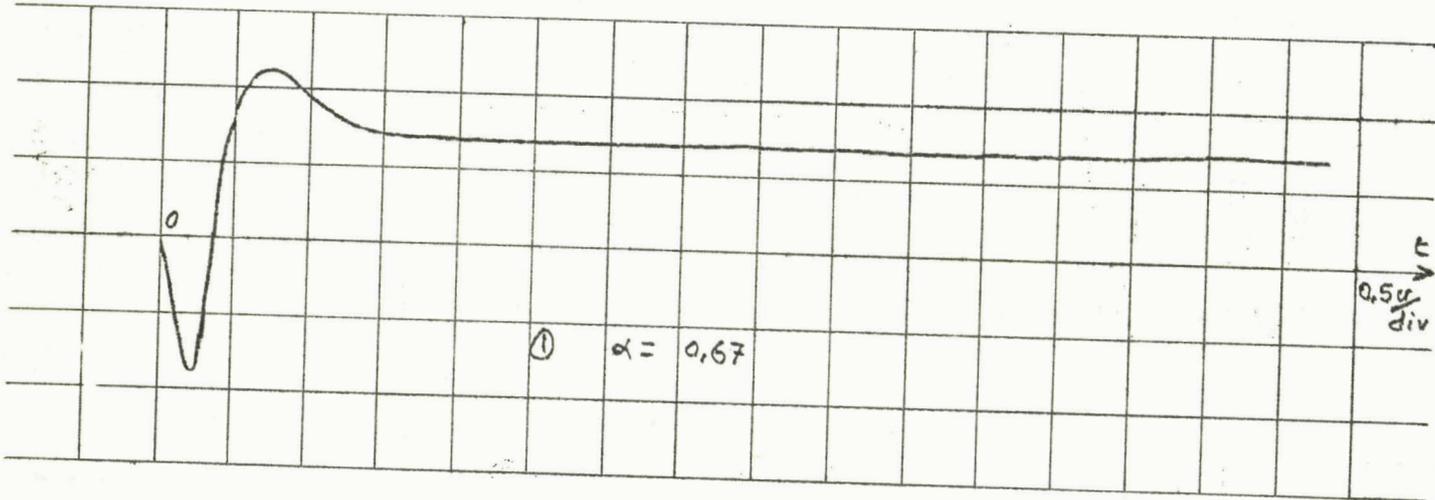


- Figure 34 -



- Figure 35 -



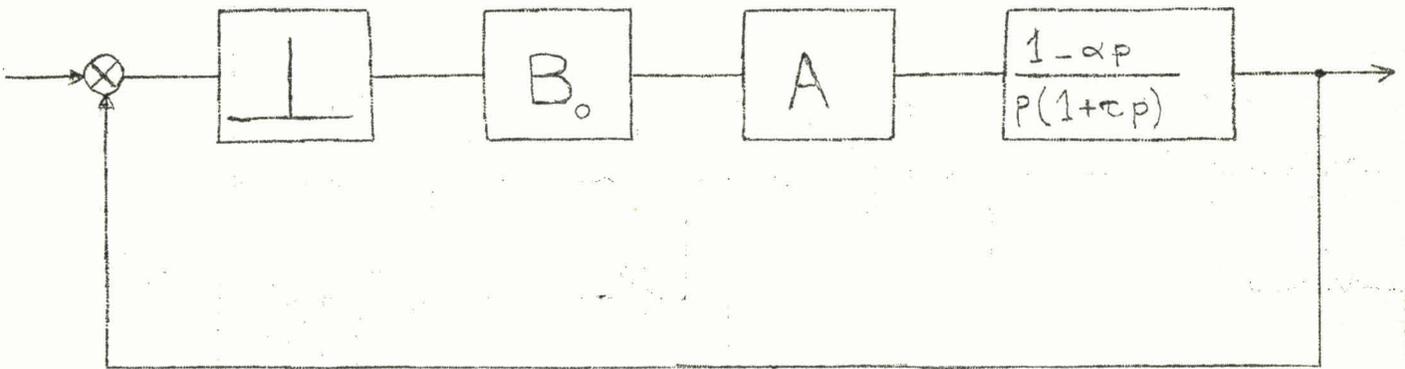


-Figure 36-

III.5.2 Modèles échantillonnés

a) Système échantillonné linéaire

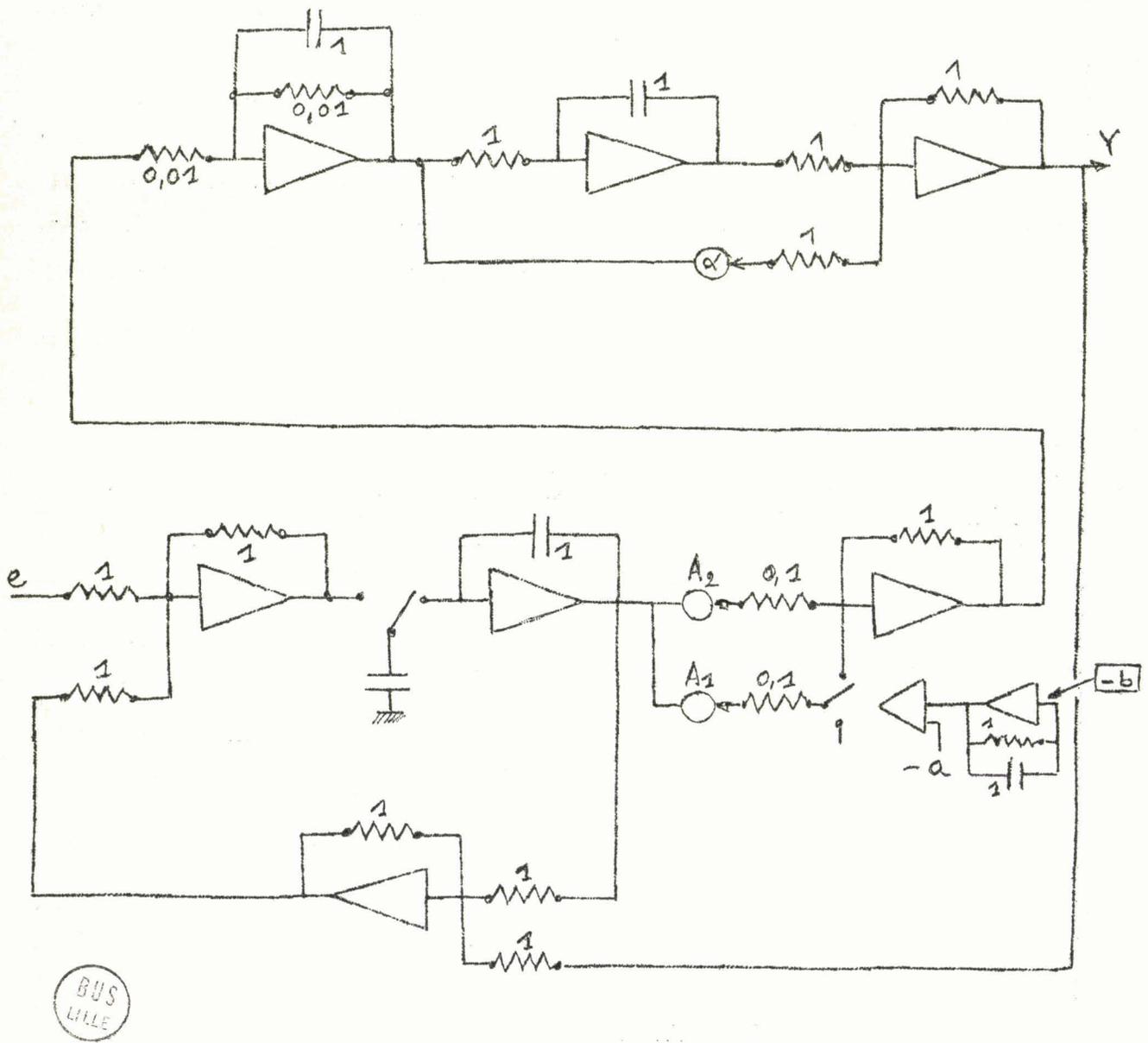
Afin de traduire les opérations de discrétisation des signaux effectuées par l'opérateur nous devons introduire (figure 37) un organe modulateur de l'erreur suivi d'un bloqueur d'ordre zéro. Cet ensemble est en première approximation équivalent à un retard pur. Pour que celui-ci soit égal à environ 0,10 s, il faut prendre une valeur de fréquence d'échantillonnage proche de 20 Hz. Les réponses indicielles obtenues par l'intermédiaire du montage de la figure 38 sont alors analogues à celles relevées pour les systèmes continus linéaires (figures 39 et 40)



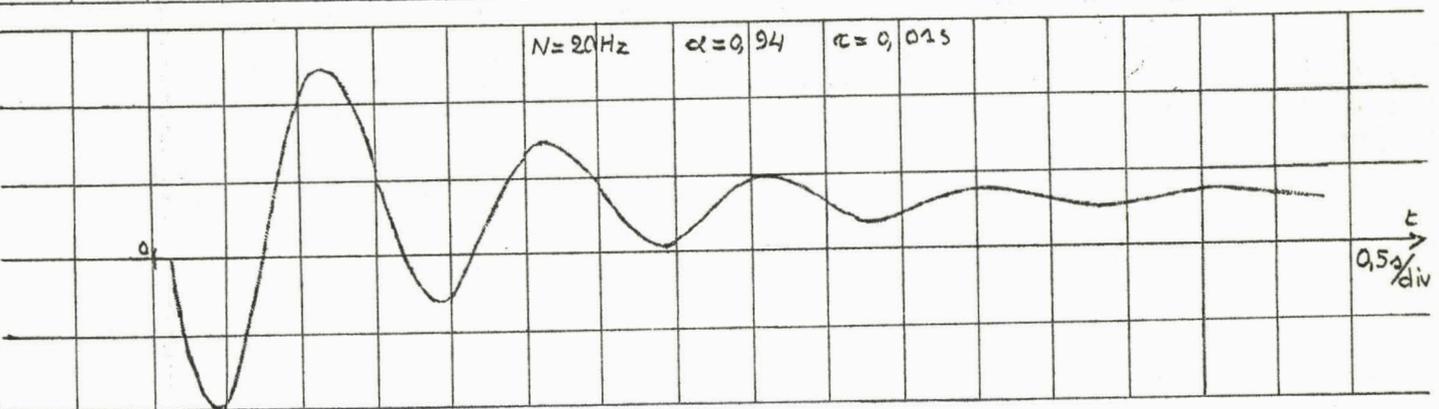
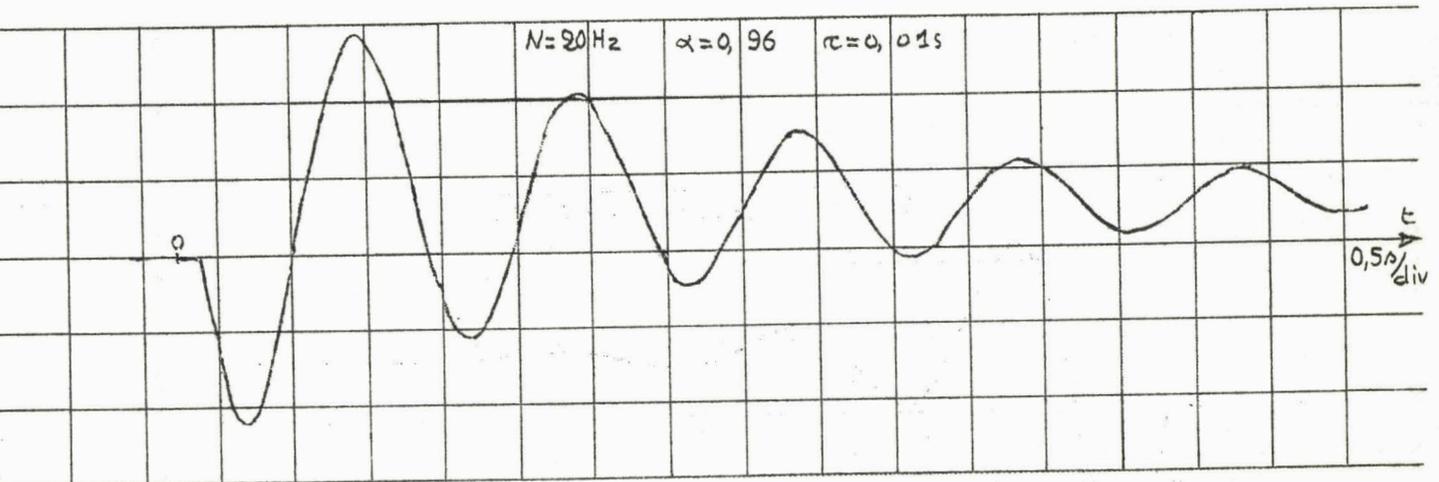
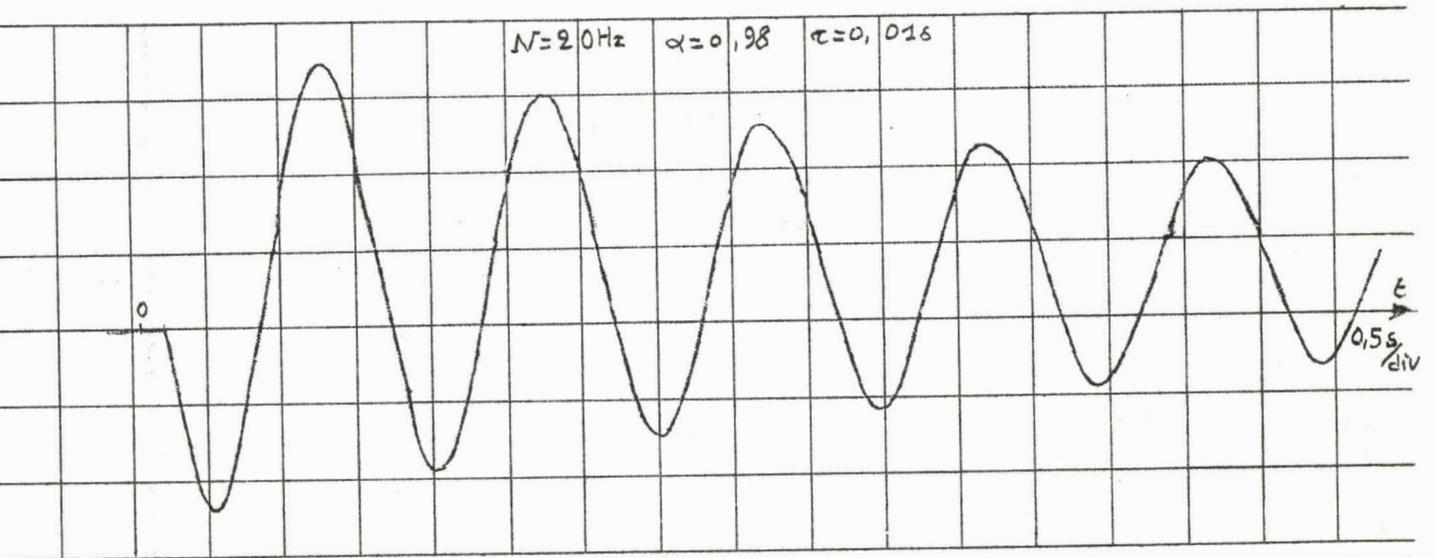
- Figure 37 -

b) Systèmes échantillonnés non linéaires

Nous pouvons dans les systèmes adaptatif et non linéaire précédemment étudiés introduire un échantillonneur bloqueur (figures 38 et 42). Les courbes obtenues (figures 41,43,44) pour $T = 0,05$ s sont analogues à celles des modèles continus. Toutefois l'introduction d'un retard supplémentaire donne une approximation plus proche de la réalité.

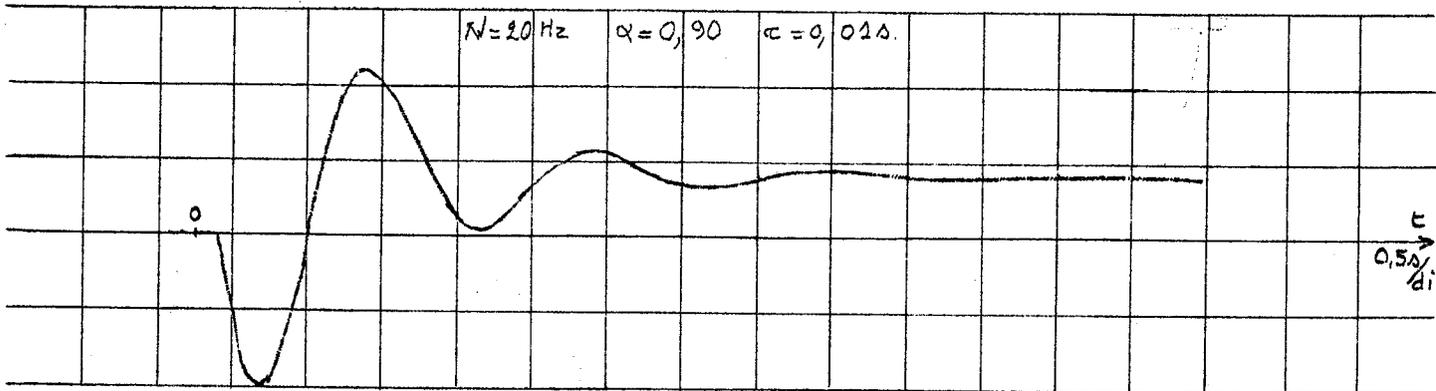
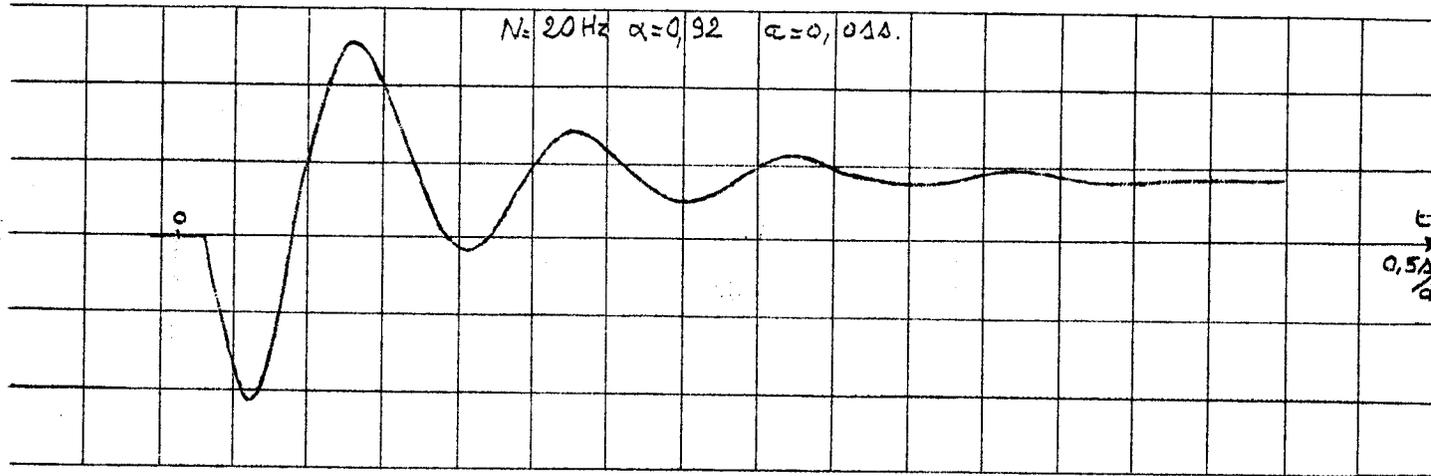


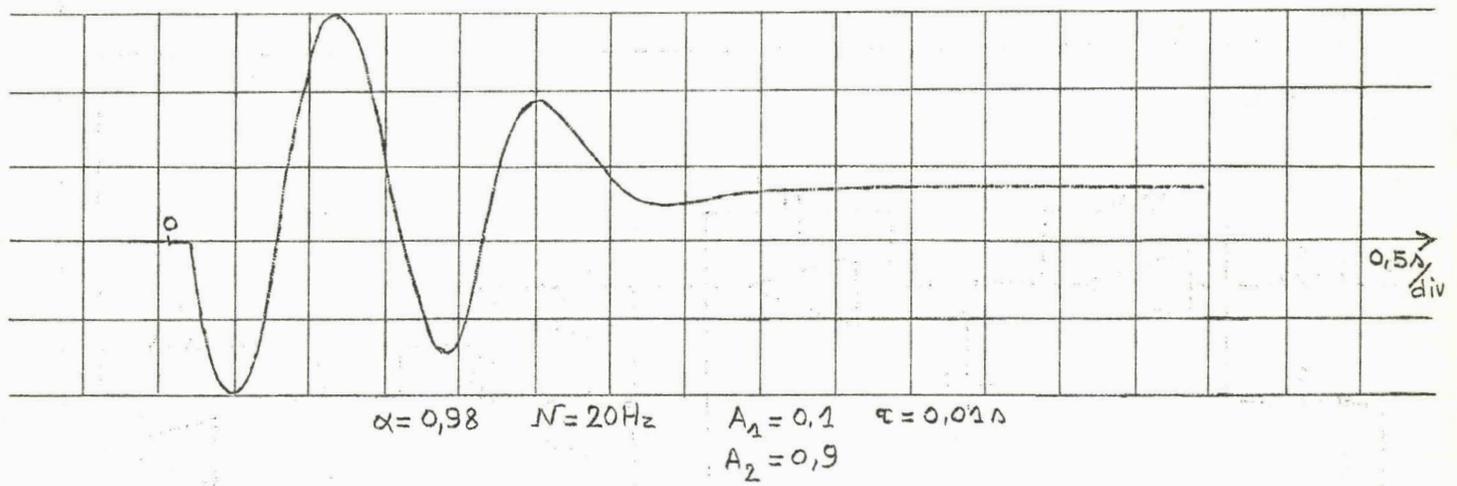
- Figure 38 -



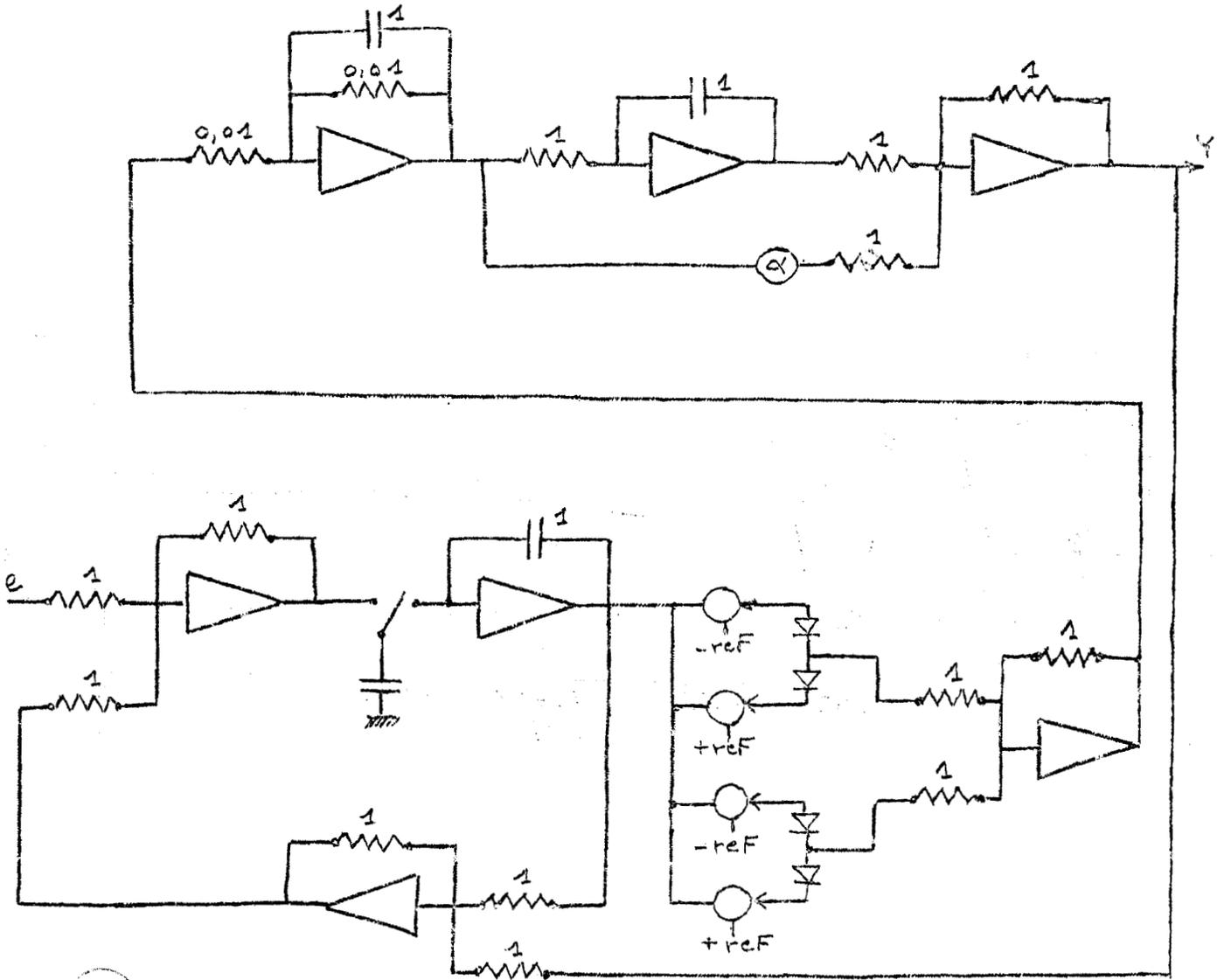
- Figure 39 -



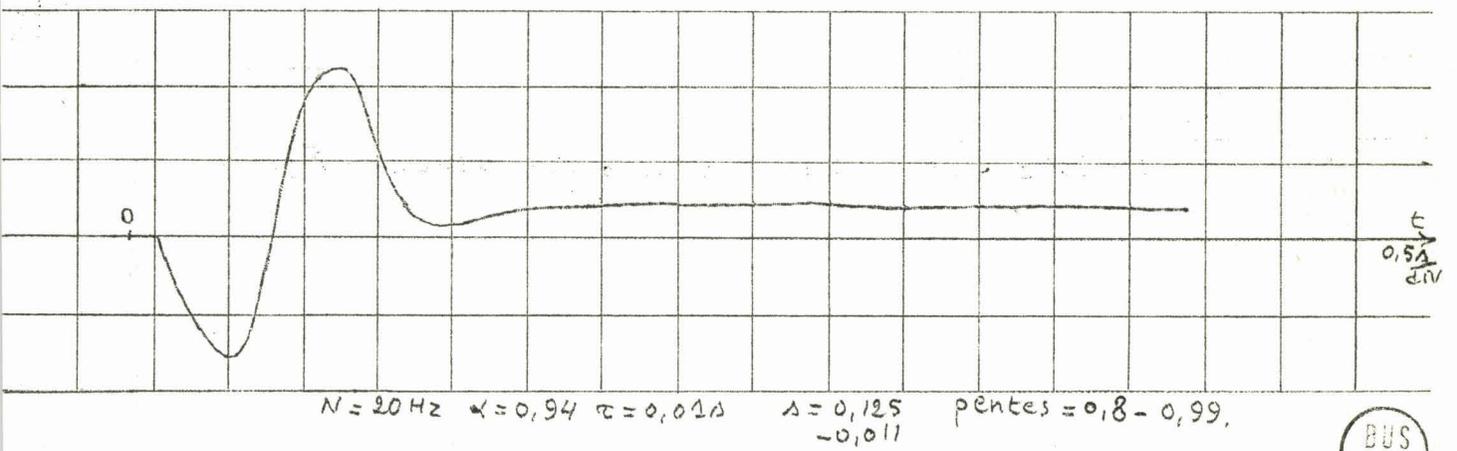
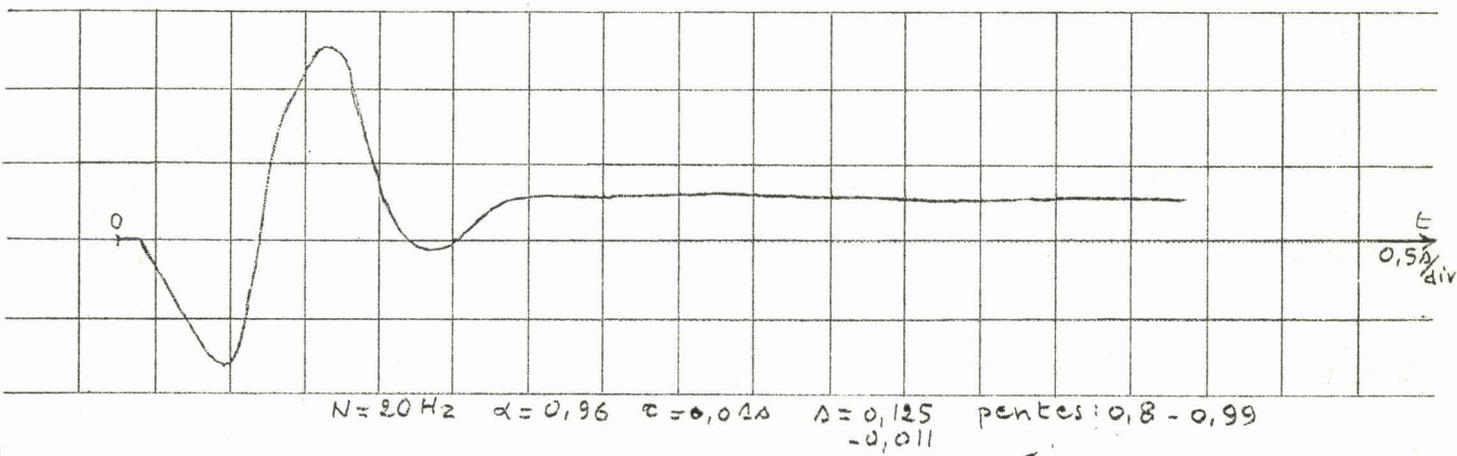
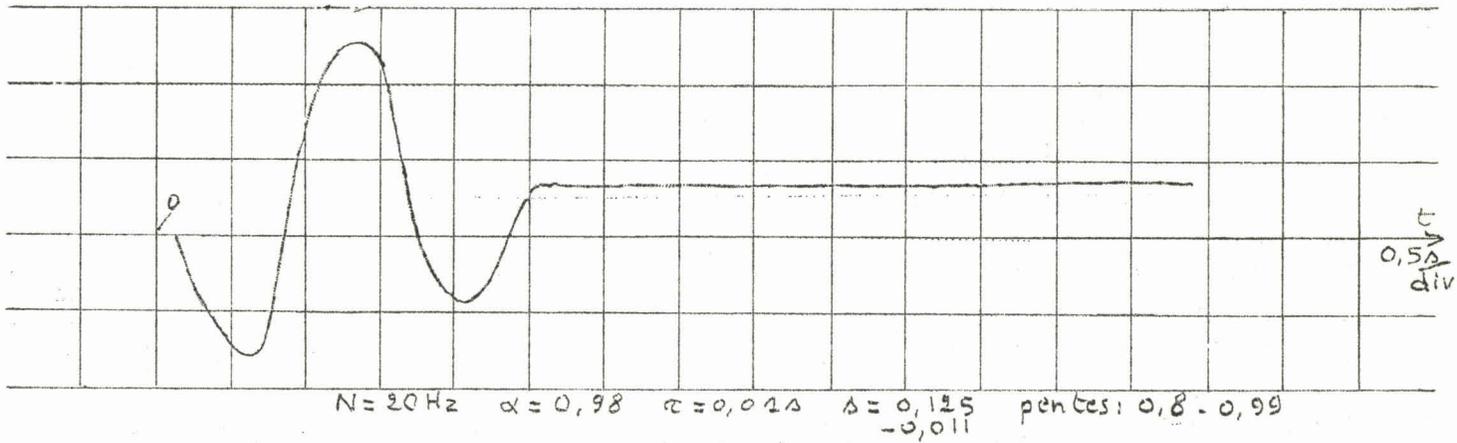




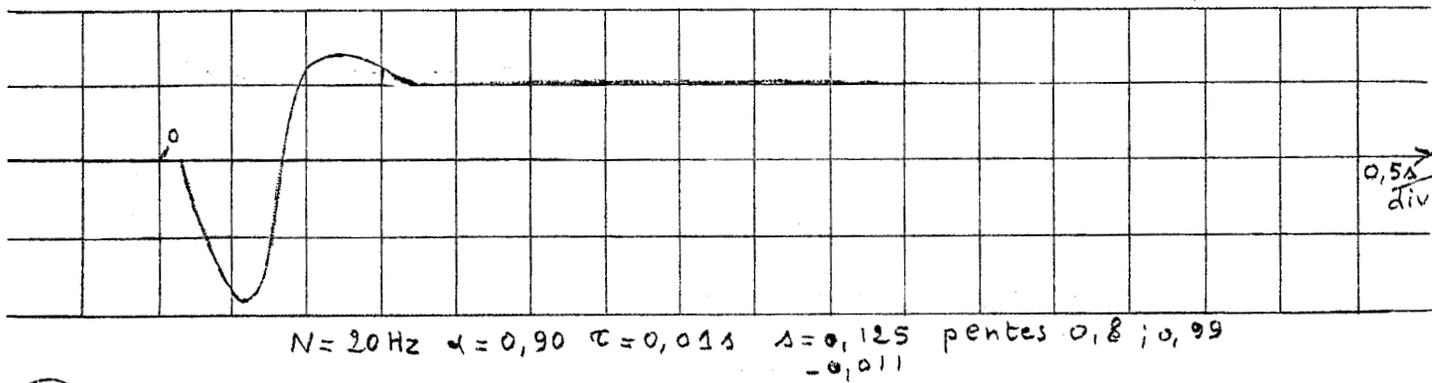
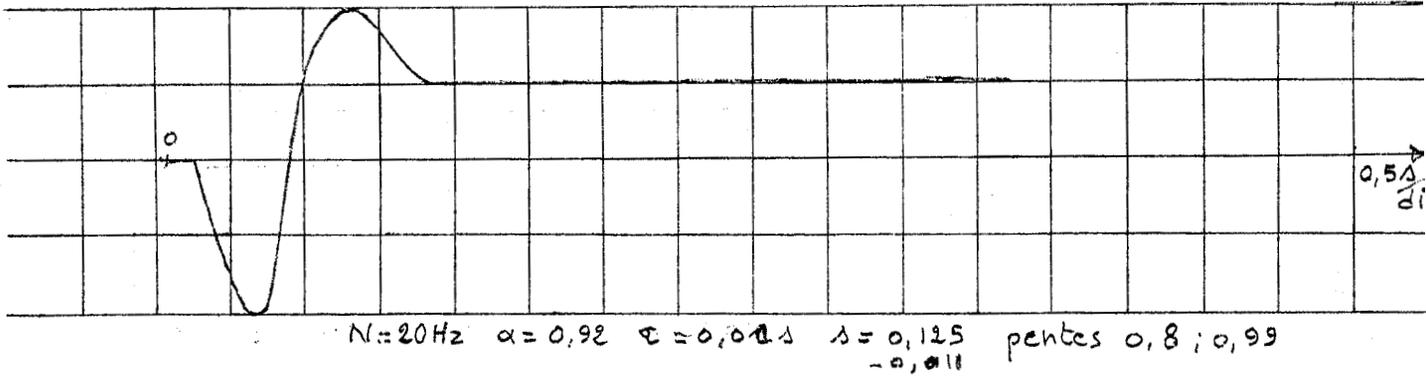
- Figure 41 -



- Figure 42 -



- Figure 43 -



- Figure 44 -

III.6 CONCLUSION

Les différents modèles présentés correspondent à environ 80 % des cas analysés. Sans doute une étude plus poussée et l'utilisation de paramètres nouveaux introduits par une analyse systématique des malades permettraient de mieux cerner la réalité. Toutefois, nous n'avons pas orienté nos travaux dans ce sens et avons préféré définir un modèle simple et facile à manipuler.

Indépendamment des processus chimiques de transmission de l'influx nerveux, l'échantillonnage, qui traduit la discrétisation des signaux par l'opérateur humain, constitue une justification à l'introduction d'un retard pur.

CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous avons entreprise et dont nous avons donné les principaux résultats ci-dessus n'est pas terminée sur le plan médical et nous laissons le soin aux médecins de poursuivre ces travaux.

Une observation systématique des malades pourrait permettre de compléter mieux encore l'analyse de la fonction de transfert que nous avons déterminée, et de mettre en évidence les perturbations d'une affection sur le régulateur humain. Par contre, le dérèglement d'un ou plusieurs mécanismes risque d'entraîner l'établissement d'un régulateur pathologique dont la structure est fondamentalement différente de celle des modèles introduits.

Ce travail s'intègre d'autre part dans le cadre plus général des études de fonctions biologiques en tant que systèmes asservis. De tels travaux n'ont été rendus possibles que grâce à la collaboration efficace de médecins et de physiiciens.

Toutefois, il convient de ne pas se méprendre sur ce point, car il ne s'agit pas d'une simple juxtaposition de deux sciences fort différentes, mais de la symbiose de celle-ci en une nouvelle discipline : la bionique.

La réunion de ces deux modes de pensée demande de la part des biologistes et des physiiciens des efforts notables de compréhension mutuelle pour adopter un langage commun. Nous ne prétendons pas avoir réalisé pleinement cette synthèse mais nous espérons avoir apporté notre contribution à la constitution d'une équipe de recherche pour l'étude de la bionique, condition indispensable à un essor de cette discipline.

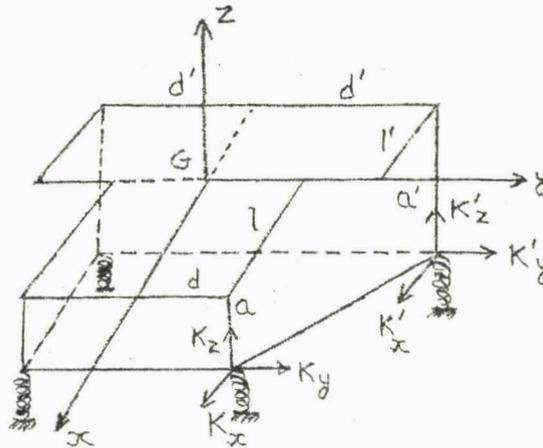
ANNEXES

-:~::~-

ANNEXE 1

Etude des couplages et des vibrations du système mécanique [6]

Nous allons tout d'abord effectuer l'étude des couplages et des vibrations dans le cas général d'un système à 6 degrés de liberté, ensuite nous l'appliquons à notre système.



Soit m la masse du dispositif

K_x, K_y, K_z les rigidités des ressorts avant

K'_x, K'_y, K'_z les rigidités des ressorts arrière

ρ_x, ρ_y, ρ_z les rayons de giration

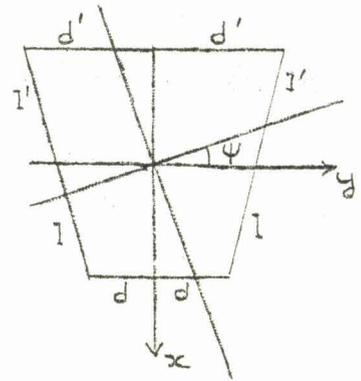
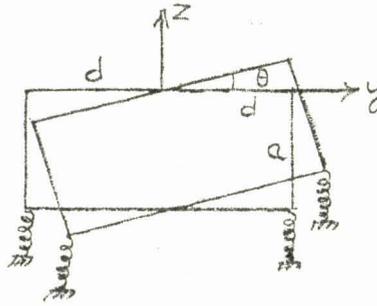
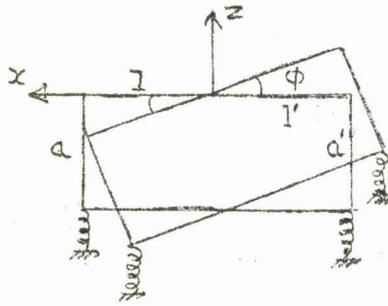
Les six degrés de liberté sont : x avance ; y ballant ; z rebondissement ; θ roulis ; ϕ galop ; ψ lacet.

Energie potentielle pour un ressort

Si, sous l'action de m le ressort passe de L_0 à L l'énergie potentielle s'exprime par la relation

$$U = \int_{L_0}^L K_x dx = \frac{K}{2} (\Delta l)^2$$

Energie potentielle du système complet



En considérant le système complet, il vient :

$$\begin{aligned}
 2 U &= K_z (z-1\phi+d\theta)^2 + K_z (z-1\phi-d\theta)^2 + K_z' (z+1'\phi+d'\theta)^2 + K_z' (z+1'\phi-d'\theta)^2 + K_x (x-a\phi-d\psi)^2 \\
 &+ K_x (x-a\phi+d\psi)^2 + K_x' (x-a'\phi-d'\psi)^2 + K_x' (x-a'\phi+d'\psi)^2 + K_y (y+a\theta+1\psi)^2 + K_y (y+a\theta-1\psi)^2 \\
 &+ K_y' (y+a'\theta-1'\psi)^2 + K_y' (y+a'\theta+1'\psi)^2 \\
 2 U &= 2 z^2 (K_z + K_z') + 2 x^2 (K_x + K_x') + 2 y^2 (K_y + K_y') + 2 \phi^2 (K_z l^2 + K_z' l'^2 + K_x a^2 + K_x' a'^2) \\
 &+ 2 \theta^2 (K_z d^2 + K_z' d'^2 + K_y a^2 + K_y' a'^2) + 2 \psi^2 (K_x d^2 + K_x' d'^2 + K_y l^2 + K_y' l'^2) + 2z\phi(2K_z' l' - 2K_z l) \\
 &- 2 x\phi(2 K_x a + 2 K_x' a') + 2 y\theta(2 K_y a + 2 K_y' a') + 2 y\psi(2 K_y l - 2 K_y' l') \\
 &+ 2 \theta\psi(2 a l K_y - 2 a' l' K_y')
 \end{aligned}$$

Energie cinétique

Elle est par définition égale à :

$$2 T = m x'^2 + m y'^2 + m z'^2 + m \rho^2 \phi'^2 + m \rho^2 \psi'^2 + m \rho_x^2 \theta'^2$$

On en déduit les équations de LAGRANGE suivantes :

$m x'' + 2(K_x + K_x')x - 2\phi(K_x a + K_x' a') = 0$
$m z'' + 2(K_z + K_z')z + 2\phi(K_z l' - K_z l) = 0$
$m \rho^2 \phi'' + 2(K_z l^2 + K_z' l'^2 + a^2 K_x + a'^2 K_x')\phi + 2z(K_z l' - K_z l) - 2x(K_x a + K_x' a') = 0$
$m y'' + 2(K_y + K_y')y + 2(K_y a + K_y' a')\theta + 2\psi(K_y l - K_y' l') = 0$
$m \rho_x^2 \theta'' + 2(K_z d^2 + K_z' d'^2 + K_y a^2 + K_y' a'^2)\theta + 2y(K_y a + K_y' a') + 2\psi(a l K_y - a' l' K_y') = 0$
$m \rho_z^2 \psi'' + 2(K_x d^2 + K_x' d'^2 + K_y l^2 + K_y' l'^2)\psi + 2y(K_y l - K_y' l') + 2\theta(a l K_y - a' l' K_y') = 0$

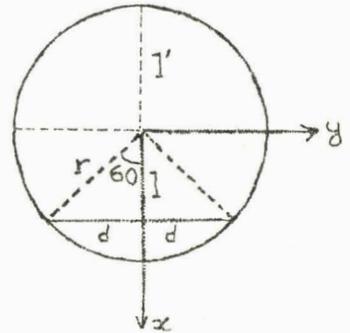
Pour notre dispositif nous supposons que, seulement, trois degrés de liberté existent : $K_x = K'_x = K_y = K'_y = 0$. On a d'autre part $K_z = K'_z$ et en outre il n'y a qu'un seul ressort à l'arrière soit $d' = 0$. Il vient :

$$2 U = z^2(2 K_z + K'_z) + \phi^2(2 K_z l^2 + K'_z l'^2) + \theta^2(2 K_z d^2) + 2 z\phi(1'K'_z - 2 K_z l)$$

$$\text{d'où } \begin{cases} 2 U = 3 K_z z^2 + K_z \phi^2(2 l^2 + l'^2) + 2 K_z d^2 \theta^2 + 2 K_z \phi_z(1' - 2 l) \\ 2 T = m z'^2 + m \rho_x^2 \theta'^2 + m \rho_y^2 \phi'^2 \end{cases}$$

et les équations de LAGRANGE s'écrivent :

$$\begin{cases} m z'' + 3 K_z z + K_z \phi(1' - 2 l) = 0 \\ m \rho_x^2 \theta'' + 2 K_z d^2 \theta = 0 \\ m \rho_y^2 \phi'' + K_z(2 l^2 + l'^2) \phi + K_z(1' - 2 l)z = 0 \end{cases}$$



Les équations ci-dessus conduisent au système :

$$\begin{cases} m z'' + 3 K_z z = 0 \\ m \rho_x^2 \theta'' + 3 K_z \frac{r^2}{2} \theta = 0 \\ m \rho_y^2 \phi'' + \frac{3}{2} r^2 \phi K_z = 0 \end{cases} \quad \text{car } l = \frac{r}{2} ; l' = r ; d = \frac{r\sqrt{3}}{2}$$

on en déduit alors les relations suivantes :

$$\omega_z = \sqrt{\frac{3 K_z}{m}}$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{3 K_z r^2}{2 m \rho_x^2}}$$

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{3 K_z r^2}{2 m \rho_y^2}}$$

ANNEXE II

Eléments de statistique [10,11]

Une série statistique peut en général être étudiée de deux façons différentes, soit en considérant directement la suite de nombres, on dispose alors d'une série numérique, soit en choisissant intuitivement une représentation classée. Aussi nous présenterons cette étude selon ces deux dispositions, pour lesquelles nous caractériserons le comportement de la série par :

- les valeurs moyennes
- les écarts
- la concentration.

A.2.1 - Les valeurs moyennes

De façon schématique, les caractéristiques de valeurs centrales sont classées en trois catégories :

A.2.1.1 - Les moyennes de grandeur

Elles sont au nombre de quatre :

- . La moyenne arithmétique ($M = \bar{x}$)
- . La moyenne géométrique (G)
- . La moyenne quadratique (Q)
- . La moyenne harmonique (H)

mais nous ne retiendrons dans cette étude que la moyenne arithmétique M.

Pour une série numérique M est donnée par la formule :

$$M = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

pour une série classée la formule précédente devient :

$$M = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

dans laquelle nous notons : f_i fréquence de la classe considérée
 x_i valeur centrale de la classe considérée

A.2.1.2 - Les moyennes de position.

Parmi les trois moyennes de position, nous considérons plus particulièrement pour une série numérique la médiane et les quartiles ; pour une série classée nous ne calculons que la médiane.

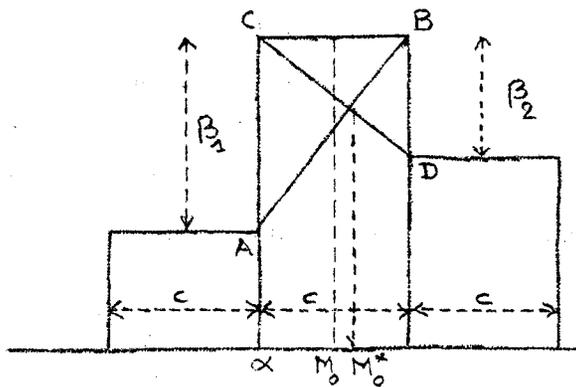
La troisième caractéristique, les déciles, n'est intéressante que pour des distributions très importantes, cas qui ne convient pas dans notre problème. Par définition la médiane, notée M_e , est le nombre occupant le milieu de la série statistique. Il est très simple de déterminer sa valeur pour une série numérique ; dans le cas d'une série classée, on la détermine à partir de la courbe de concentration ou courbe de GINI.

Les quartiles, notés Q_1 et Q_3 , sont les médianes des deux demi-séries créées par la médiane principale.

A.2.1.3 - La moyenne de fréquence ; le mode M_o

Le mode d'une série de fréquences est la valeur particulière de la variable pour laquelle la fréquence est maximum. On pourrait prendre comme mode la valeur centrale de la classe qui donne la fréquence maximale, mais théoriquement le mode est l'abscisse correspondant à l'intersection des droites AB et CD soit M_o^* . Compte tenu des notations de la figure, M_o^* est donné

par la formule :
$$M_o^* = \alpha + \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \times c$$



A.2.2 - Les écarts

Deux courbes de même valeur moyenne pouvant avoir une dispersion différente, il est nécessaire de caractériser le comportement de la courbe autour de sa tendance centrale par un certain nombre de paramètres.

On définit alors :

- Le "Range" R
- La déviation quartile
- L'écart quadratique moyen (ou écart type) σ
- La variance : σ^2
- Le coefficient de dispersion : γ
- Les moments simples et centrés.
- Le kurtosis

A.2.2.1 - Le "Range" R est l'étendue existant entre la plus haute et la plus basse notation de la série.

A.2.2.2 - La déviation quartile est une caractéristique de dispersion qui élimine l'influence des valeurs extrêmes. Elle est égale à $\frac{Q_3 - Q_1}{2}$.

A.2.2.3 - L'Écart type est défini par la formule :

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$$

La variance est égale au carré de l'écart-type, au moment centré d'ordre 2 (μ_2)

En pratique, on prend pour calculer σ une formule développée :

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right]^{1/2}$$

Dans le cas d'une série classée, la définition devient :

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n f_i} \right]^{1/2}$$

D'où

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i^2}{\sum_{i=1}^n f_i} - \bar{x}^2 \right]^{1/2}$$

A.2.2.4 - Le coefficient de dispersion γ est égal à $\gamma = \frac{\sigma}{\bar{x}}$; il s'exprime en pourcentage et permet ainsi la comparaison de distributions statistiques dont les unités sont différentes.

A.2.2.5 - On appelle moment simple d'ordre k d'une série numérique la valeur

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k}{n} ; \text{ le moment centré est alors : } \mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k}{n}$$

Pour une série classée :

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i^k}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad \text{et} \quad \mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^k}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

Remarque : On retrouve le résultat déjà énoncé : $\mu_2 = \sigma^2$

A.2.2.6 - Le kurtosis d'une distribution est l'allure plus ou moins bonne de cette distribution. Selon le degré d'aplatissement, on peut classer les courbes en :

- Leptokurtiques si elles sont aiguës
- Platykurtiques si elles sont aplaties
- Mesokurtiques si elles sont normales

Le degré de kurtosis s'exprime à l'aide du coefficient b_2 défini par :

$$b_2 = \frac{m_4}{m_2^2}$$

Pour une loi normale $b_2 = 3$, et l'on peut alors définir le nouveau coefficient $c = b_2 - 3$ si $c = 0$ la distribution est normale
 si $c > 0$ la distribution est leptokurtique
 si $c < 0$ la distribution est platykurtique

A.2.3 - La concentration

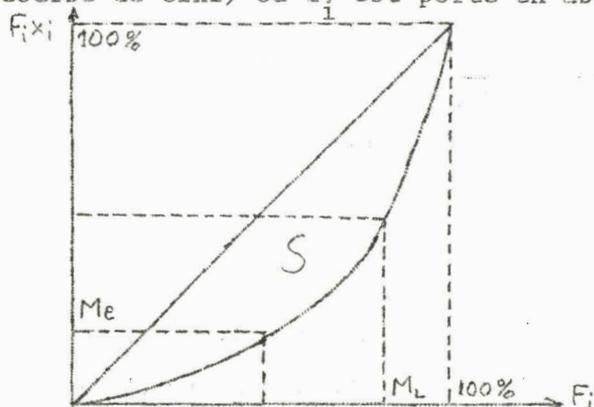
Soit un ensemble statistique dont chaque élément est affecté d'un caractère ; il est possible de faire un classement de ces éléments selon leur nombre ou selon l'importance du caractère possédé.

Cela conduit à considérer deux histogrammes :

- un histogramme donnant le nombre des effectifs (f_i) par classe.
- un histogramme donnant l'importance du caractère possédé ($f_i x_i$) par classe.

Il est possible de déterminer les médianes à partir de ces deux histogrammes. Dans le second cas, la médiane porte un nom spécial : la médiale.

La concentration résulte de la valeur de l'écart entre la médiane et la médiale, mais on peut également l'exprimer à partir d'un graphique (courbe de concentration ou courbe de Gini) où f_i est porté en abscisse et $f_i x_i$ en ordonnées.



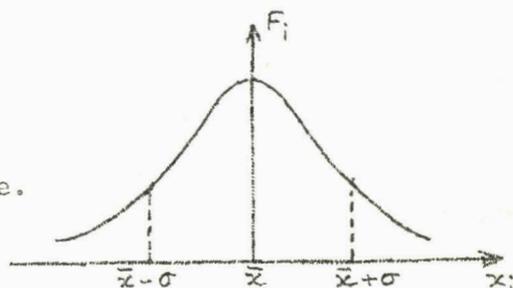
On appelle indice de concentration le rapport de S à la surface du demi-carré.

A.2.4 - La loi normale

Assez souvent, on compare les distributions empiriques unimodales faiblement asymétriques à la distribution théorique symétrique définie par la loi de LAPLACE-GAUSS ou loi normale :

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2} \right]$$

où \bar{x} est la moyenne et σ l'écart type.



Elle présente la particularité suivante :

- de posséder 68,27 % des effectifs entre $\bar{x} - \sigma$ et $\bar{x} + \sigma$
- de posséder 95,45 % des effectifs entre $\bar{x} - 2\sigma$ et $\bar{x} + 2\sigma$

Dans ce cas la série statistique empirique est définie complètement par les 2 paramètres \bar{x} et σ ; on la note $N(\bar{x}; \sigma)$

A.2.5 - Corrélation

La corrélation étudie la comparaison entre deux séries statistiques $X=f(v)$ et $Y=g(v)$.

En traçant $X = h(Y)$, on obtient un nuage de points. On remplace généralement le nuage par une droite ; l'ajustement dit linéaire s'effectue en appliquant le principe des moindres carrés.

On définit ainsi l'indice de corrélation r par la relation :

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right]}$$

r est toujours compris entre -1 et $+1$.

S'il existe une relation fonctionnelle linéaire, $|r| = 1$; et si X et Y sont indépendantes $r = 0$. Pour qu'il y ait une forte chance que X et Y soient liées, il faut que $|r|$ soit voisin de 1, tandis que, si $|r|$ est voisin de zéro, il y a de fortes présomptions pour que les variables soient indépendantes.

Remarque : Il existe des types de liaisons fonctionnelles non linéaires que le coefficient de corrélation ne permet pas de déceler, mais il permet toutefois de conclure en première approximation sur la nature de la liaison stochastique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G.MORIN - Physiologie du système nerveux central. Masson et Cie
- [2a] J.B. BARON - Présentation d'un appareil pour mettre en évidence les déplacements du centre de gravité du corps dans le polygone de sustentation. Société de médecine et d'hygiène du Travail - Séance du 14 Octobre 1963. Archives des maladies professionnelles T 25, 1964 - n° 1 - 2 (P. 41.49).
- [2b] A.SOULAIRAC - JB BARON et COLLABORATEURS - Importance des troubles de la régulation posturale, d'origine oculo-motrice, dans certains cas de syndrome subjectif post-commotionnel et leurs objectivations cliniques. Revue Neurologique 1965, 112, n° 6 P. 531.538.
- [2c] P. NAYRAC - G.MILBLED - Ph J.PARQUET : Le statokinésimètre - Etude en clinique neurologique. Communication faite à la société de Médecine du Nord - 25 Juin 1965 - Lille médical 1966, 11, 4, 476-480.
- [2d] F.THIEBAUT - F.ISCH - M.COLLARD - C.CONRAUX : La statokinésimétrie (techniques et résultats) revue neurologique 1966 - 114 n°2, p. 123-134.
- [3] I.M.GELFANG - V.S.GURFINKEL - M.L.CETLIN : Nekotoryje soobrazenija o taktikach postrojenija dvizenij - Doklady Akademii nauk SSSR. 139 (1961), 5, 1250-1253.
- [4] I.BURGER - S.NEUSCHL - V.LITVINENKOVA : Stochastické procesy v biologických systavach a vyhodnocovanie dynamických vlastnosti sustav. Problemy kybernetiky - 1965.
- [5] Y.ROCARD : Dynamique générale des vibrations - Masson 1949.
- [6] M.A. JULIEN : Technique et mise en oeuvre de l'isolation vibratoire de machines - 2e Journée d'études (3 mai 1954) sur la lutte contre les bruits et les vibrations.
- [7] U.ZELBSTEIN : Technique et utilisation des jauges de contrainte - Dunod 1956.
- [8] C.MAIZIERES - F.LAURENT : Asservissement à une grandeur quelconque d'un retard pur obtenu par échantillonnage - Inter Electronique n°3 - Avril 1967.
- [9] R.DEHORS - F.LAURENT : Simulation des fonctions de transfert discrètes sur calculatrice analogique par courants continus. C.R. Ac Sc Paris t.262, p.928-930 - (.18 Avril 1966).
- [10] J.BASS : Eléments de calcul des probabilités - Masson 1962.
- [11] C.LABROUSSE : Statistique - Dunod 1965.

- [12] RAGAZZINI : Les systèmes asservis échantillonnés - Dunod 1962.
- [13] C.MAIZIERES - F.LAURENT - P.VIDAL : Sur la dispersion des réponses des systèmes non linéaires continus ou échantillonnés - C.R. Ac Sc Paris (sous presse).
- [14] J.M.TOULOTTE - F.LAURENT - P.VIDAL : Régulation par échantillonnage et correction tachymétrique. IFAC Symposium Budapest - 9-12 Avril 1968.
- [15] L.POVY-F.LAURENT-JM.TOULOTTE : Analyse des signaux discrets fournis par des capteurs sur calculateur analogique - Application à un détecteur de centre de gravité - GAME 11 Décembre 1967.
- [16] H.T.MILHORN : The application of control theory to physiological systems - Saunders 1966.
- [17] P.VIDAL - J.M.TOULOTTE : Experimental device for physiological test in equilibration.
Symposium on spatial disorientation - Aerospace medical center Research Department U.S. Naval Air Development Center - Johnsville USA February 1967.
- [18] P.VIDAL - J.M.TOULOTTE : Experimental device for the study of the physiological functions of equilibration.
Third international simulation and Training Conference New York - April 1967.
- [19] J.M.TOULOTTE : Etude de la fonction d'équilibration chez l'homme - Congrès de l'association française pour l'avancement des Sciences - Bordeaux Juillet 1967.
- [20] P.VIDAL - J.M.TOULOTTE : Study of the human equilibration function - I.F.A.C international symposium on technical and biological problem of control - Congrès de YEREVAN (URSS) 8-12 Octobre 1968.

TABLE des MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	
<u>I^e Partie : APPAREILLAGE</u>	1
<u>I.1 PARTIE MECANIQUE</u>	5
I.1.1 Contrainte	
I.1.2 Flèche	
I.1.3 Allongement relatif	
I.1.4 Fréquence propre de la poutre	
I.1.5 Fréquence de la poutre chargée	
I.1.6 Détermination des valeurs caractéristiques de la poutre	
I.1.7 Etude des couplages	
<u>I.2 PARTIE EXTENSIOMETRIE</u>	9
I.2.1 Notions sur les jauges de contrainte	
I.2.2 Généralités sur les montages extensiométriques	
I.2.3 Etude du pont de jauges	
<u>I.3 PARTIE ELECTRONIQUE DU MONTAGE</u>	20
I.3.1 Amplification	
I.3.2 Composition des tensions	
I.3.3 Filtrage	
<u>I.4 TESTS ET ESSAIS</u>	26
<u>I.5 CONCLUSION</u>	31
<u>II^e Partie : RESULTATS EXPERIMENTAUX</u>	
<u>II.1 GENERALITES ET PRESENTATION DES EXPERIENCES</u>	32
II.1.1 Protocole de mesure	
II.1.2 Divers types d'enregistrements	
<u>II.2 PRESENTATION DES RESULTATS</u>	33

II.3 ANALYSE DES RESULTATS 33

II.4 CONCLUSION 70

III^e Partie : ETUDE DE LA FONCTION D'EQUILIBRATION

III.1 SCHEMA BLOC PHYSIOLOGIQUE 71

III.2 INTRODUCTION DU MODELE MATHEMATIQUE 72

III.3 ANALYSE DE LA REPOSE INDICIELLE OBTENUE EXPERIMENTALEMENT 75

III.4 REALISATION D'UN MODELE : CARACTERES GENERAUX

III.5 DIVERSES REALISATIONS DU MODELE 75

III.5.1 Modèles continus

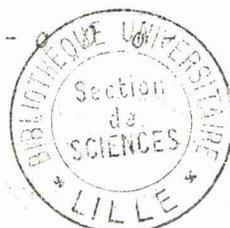
III.5.2 Modèles échantillonnés 87

III.6 CONCLUSION 95

Annexe I

Annexe II

CONCLUSION GENERALE



SECONDE THESE

Propositions données par la Faculté

- : - : -

METHODES MANUELLES et AUTOMATIQUES de SIMPLIFICATION

des FONCTIONS LOGIQUES.

- o o o -

Vu et permis d'imprimer

20 Novembre 1967

Pour le Doyen de la Faculté des Sciences, l'Assesseur

J. HEUBEL