

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

2ex
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

MODIFICATION & MISE EN MARCHÉ
D'UN BANC D'ESSAI DE SYSTEME
D'ASSERVISSEMENT A ELEMENT
NON LINEAIRE

Proposé par :

A. Werner

Maitre assistant à l'ENP.

Etudié par :

M.H. Tchanderli-Braham

Dirigé par :

A. Werner



PROMOTION : JUIN 84

Борисов, Мухоморовский -

Laorange - théorie de petits oscillations évolue plus tard - théorie des oscillations linéaires
 Méthode symbolique de Heaviside
 Melinoltz
 Rayleigh
 Carson
 Dents
 Van der Pohl (Liénard, Kirstein) - autoentretien - Rensuki Usui 1835
 Den Hartog 1836
 Liénard 1828
 Duffing 1818
 Kufner - Bogolubov 1838 et Méthodes approchées de la Mécanique non linéaire

partir
 par fonctionnel ?

- 00) Définition d'amortissement et leur présentation dans votre cas.
- 01) Différence entre transformation de Laplace et Fourier
- 02) § 3.3 page 15 on a cité 3 méthodes de investigations d'instabilité
 Connaissiez-vous les autres méthodes basées sur la fonction de transfert

Vous ne citez pas aucune position canonique, alors
 Où vous savez tous ça ?

Dirichlet 1805-59

- 1) str. 1 вычисли автовоин i laly
- 2) pouvez-vous sur la base de Fig. 4.4 désigner système en bloc
- 3) page 18-20 (soit en français et/ou en russe) et formule ?
 - 1) 21
 - 5) 45 Niquist ?
 - 6) 53 les jeu consome ~~plus de~~ ^{près de} 90% de l'amplitude
 - 7) 24 x = ? y = ?

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A tous ceux que j'aime
A tous ceux qui croient en Dieu
L'Unique et le Miséricordieux ALLAH
et en son Envoyé Mohamed

je dédie ce modeste travail

Mohamed-Hicham.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation d'ingénieur et en particulier ceux du département de Génie Mécanique qui m'encouragèrent et m'aidèrent de leur mieux.

J'exprime ma vive reconnaissance aux agents et techniciens des ateliers et de la maintenance pour leur sympathique et confiante assistance technique, matérielle et morale.

Je réitère mes remerciements à M. Andrzej Werner pour ses conseils et son suivi constant qu'il m'a prodigué tout le long de mon travail.

Que tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la mise en forme de ce projet trouveront ici l'expression de ma profonde gratitude.

Alger, mai 1984

Nom et prénom: Tchanderli-Braham Mohamed-Hicham

Département de Génie Mécanique

Promoteur: Andrzej Werner

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

RESUME

Sujet:

Ce projet consiste à réaliser et à étudier un asservissement possédant un élément non linéaire (à hystérésis). On se base sur un banc de régulation d'un processus thermique. On modifie une certaine partie de la chaîne en introduisant un mécanisme tout nouveau permettant d'obtenir une course réglable à volonté. Ce mécanisme, ainsi que les modifications apportées, l'équipement et l'installation électrique ont été conçus et réalisés de manière à offrir un banc d'essais et de démonstration prêt à servir à des fins pédagogiques très diversifiées.

SUMMARY

Subject:

Construction and study of an automatic control system including a non-linear element (hysteresis) is the point of this work. The system was based on the existing thermal process control stand. A part of this installation has been modified to introduce a new mechanism of adjustable backlash. All the modifications, the electric equipment and installation have been invented and realized to prepare a demonstration and research rig ready to fulfill many various didactic purposes.

ملخص

موضوع:

يتمثل هذا المشروع في دراسة وإحراز عملية تسخير ذات عنصر لاهطي (دي تخلفية) وقد أطلقنا من منصة تحكم هوائي لصيرورة حرارية. كما عدلنا بعض أجزاء المنصومة بإدخال آلية جديدة من شأنها أن تسمح بالحصول على منسوان يمكن التحكم فيه إراديا. إن هذه الآلية والتعديلات الواردة والنهجر والتركيب الكهربائي قد تم ابتكارها وإجازها بصفة أن نحصل على منصة تجريب يمكن استخدامها في أغراض تربوية متنوعة.

TABLE DES MATIERES.

I INTRODUCTION	
1.1 Historique.....	1
1.2 Parcours bibliographique.....	1
1.3 Description générale du problème.....	2
II GENERALITES SUR LES SYSTEMES ASSERVIS NON LINEAIRES	
2.1 Limitations des méthodes linéaires.....	4
2.2 Définition des systèmes non linéaires.....	4
2.3 Les non-linéarités les plus fréquentes.....	5
2.4 Classification des non-linéarités.....	8
2.5 Système asservi ayant un élément non linéaire.....	8
III L'APPROXIMATION DU PREMIER HARMONIQUE	
3.1 Principe de la méthode.....	11
3.2 Fonction de transfert généralisée, gain équivalent...	12
3.3 Stabilité et autooscillations des asservissements à un organe non linéaire.....	15
3.4 Une des autres méthodes: la méthode du plan de phase.	18
3.4.1 Le plan d'extension en phase.....	18
3.4.2 Construction pratique des trajectoires.....	18
3.4.3 Interprétation des trajectoires.....	18
3.5 Application à un élément non linéaire à hystérésis..	19
IV CONCEPTION DE NOTRE SYSTEME ASSERVI NON LINEAIRE	
4.1 Agencement de l'asservissement non linéaire.....	24
4.1.1 But.....	24
4.1.2 Place de l'organe non linéaire sur le banc.....	24
4.1.3 Schéma opérationnel de la boucle de régulation du système ainsi modifié (simplifié).....	24
4.2 Analyse du comportement dynamique du processus thermique.....	25
4.3 Non-linéarités accidentelles présentes dans le système asservi.....	27
4.3.1 Transformation d'une course rectiligne en course angulaire.....	27
4.3.2 Transmission par engrenage.....	29
4.3.3 Puissance de chauffage.....	29
V TRAVAUX EFFECTUES	
5.1 Anomalies & dégats constatés.....	31
5.2 Solutions, améliorations apportées & travaux effectués.....	33
5.3 Conception & fabrication du mécanisme à jeu.....	36
5.3.1 Description & explication de son fonctionnement..	41

5.3.2 Fabrication du mécanisme.....41

VI ESSAIS

-6.1 Mode de fonctionnement.....42

-6.2 Recherche du point de travail, mise au point.....45

-6.3 Manipulation.....50

-6.4 Interprétation des courbes obtenues.....50

CONCLUSION.....56

APPENDICES.....57

TABLE DES FIGURES

Fig 1.1 Schéma de principe du système de régulation de la température du bac d'eau.....3

Fig 2.1 Linéaire idéale.....6

Fig 2.2 Courbure.....6

Fig 2.3 Seuil ou intervalle mort.....6

Fig 2.4 Saturation.....6

Fig 2.5 Hystérésis.....6

Fig 2.6 Plus ou moins.....6

Fig 2.7 Seuil & saturation.....6

Fig 2.8 Courbure & hystérésis.....6

Fig 2.9 Tout-ou-rien et seuil.....6

Fig 2.10 Tout-ou-rien, seuil & hystérésis.....6

Fig 2.11 Caractéristique avec plusieurs discontinuités...7

Fig 2.12 Caractéristique non symétrique.....7

Fig 2.13 Système sous forme canonique à un élément non linéaire.....9

Fig 2.14 Exemple de système non linéaire.....9

Fig 2.15 Réduction du système sous forme canonique.....9

Fig 3.1 Famille de lieux de transfert.....14

Fig 3.2 Lieux critique & de transfert.....17

Fig 3.3 Règle de Loeb.....17

Fig 3.4 Courbe de la caractéristique à hystérésis.....20

Fig 3.5 Trajectoire de phase d'un système asservi du second ordre.....22

Fig 3.6 Trajectoire de phase d'un asservissement non linéaire à hystérésis.....22

Fig 3.7 Schéma d'un système asservi non linéaire.....22

Fig 3.8 Trajectoire de phase d'un système asservi du second ordre non linéaire: jeu. Représentation du cycle limite.....23

Fig 4.1 Réponses indicielles du processus thermique pour

des débits différents.....	28
Fig 4.2 Caractéristique du système bielle-manivelle.....	30
Fig 4.3 Caractéristique puissance-tension.....	30
Fig 5.1 Schéma du bac d'eau définitivement équipé.....	32
Fig 5.2 Schéma du guide de la tige du servomoteur.....	35
Fig 5.3 Schéma du secteur denté avant modification.....	35

TABLE DES TABLEAUX

Tableau des valeurs des pressions et tensions.....	54
--	----

TABLE DES DESSINS & NOMENCLATURES

Mécanisme à jeu.....	37
Sa nomenclature.....	38
Bielle.....	39
La nomenclature de la bielle.....	40

LEGENDE DES SYMBOLES UTILISES

- τ : constante de temps.
- ψ : déphasage (phase).
- ω : pulsation angulaire.
- Δ : jeu.
- \mathcal{R} : $\pi = 3.14...$
- ρ : masse volumique.

ABREVIATIONS

- NL: non linéaire (dans le premier et deuxième chapitre nous avons employé cette abréviation pour désigner un état: non linéaire et un nom: non-linéarité puis on l'a réservée au premier strictement.)
- SA: système asservi.
- PI: proportionnel & intégral
- I: intégral.
- Transfo: transformateur ou autotransformateur.

I INTRODUCTION

1.1 Historique

La dynamique des systèmes NL constitue un vaste et difficile chapitre de la mécanique. Dans notre école, l'asservissement NL n'est pas au programme d'étude.

On considère que la mécanique NL fut fondée à la fin du dix-neuvième siècle par le mathématicien français Henri Poincaré (sur les courbes définies par les équations différentielles 1881-1886; Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste 1892-1899). Il y a lieu de citer aussi le mathématicien russe Ljapunov fondateur de la théorie de la stabilité (Le problème général de la stabilité du mouvement 1892)

Dans les travaux techniques du vingtième siècle, nous distinguerons schématiquement trois courants:

Entre les deux guerres mondiales les ingénieurs s'intéressèrent dans plusieurs pays, au problème des oscillations. Le chercheur russe Andronov trouva en 1929 dans les travaux de Poincaré le fondement de sa théorie des oscillations 1938.

Après la seconde guerre, plusieurs chercheurs soviétiques précisèrent et appliquèrent les travaux de Ljapunov sur la stabilité, notamment Lur'e, Malkin...

Vers 1950, des chercheurs de tous pays s'inspirèrent des méthodes d'étude et de synthèse des systèmes linéaires continus (fonction de transfert, techniques graphiques utilisant les réponses unitaires ou en fréquence) et échantillonnés (transformée en z), méthodes devenues classiques, pour élaborer des techniques applicables aux systèmes NL. (J. Dutilh, C. Ecary en France, R. Kochenburger aux USA, L. Gol'dfarb en URSS...)

L'avènement des ordinateurs a permis l'emploi de méthodes rigoureuses mais très complexes dans le domaine des asservissements NL.

1.2 Parcours bibliographique

Les applications techniques des méthodes générales aux problèmes d'asservissement NL sont présentés dans de nombreux ouvrages. L'extension des méthodes des réponses en fréquence aux systèmes NL, à donner naissance à de nombreuses méthodes telles que:

La méthode du premier harmonique

Exposée la première fois dans les travaux de chercheurs français, américains et russes: J. Dutilh "Théorie des servomécanismes à relais." C. Ecary "Etude graphique du régime transitoire d'un système NL" R. Kochenburger "Analyzing contactor servomechanisms

by frequency-reponses methods" L.Gol'dfarb "O nekotorykh nelinejnostjakh v sistemakh avtomaticeskogo regulirovanija"

Depuis ces premières publications la méthode du premier harmonique a donné lieu à de nombreuses recherches.

Citons quelques unes en passant:

La méthode du plan de phase

Introduite par H.Poincaré, elle aide à traiter de nombreux problèmes de mécanique linéaire et NL.

La méthode topologique (dite de Poincaré)

C'est un outil puissant, elle est plus rigoureuse, s'applique seulement aux systèmes à deux variables, c'est une méthode qualitative.

Des chapitres complets, avec des exemples intéressants, sont consacrés à ces méthodes dans les ouvrages tels que:

J.Truxal "Automatic feedback control system synthesis"

Y.Ku "Analysis and control of nonlinear systems", Otto Smith

"Feedback control systems" . . .

1.3 Description générale du problème

Nous possédons dans notre laboratoire de thermique un banc d'essais de régulation automatique de la température d'un bac d'eau. Ce système d'asservissement réalisé avec des éléments pneumatiques est inutilisé depuis longtemps, cependant il a été remis en état de marche, provisoirement par M.Abdessettar au cours de son projet.

C'est un assemblage d'appareils montés sur un cadre de cornière perforée, il comprend les éléments suivants:

- un transmetteur de mesure, à tension de vapeur
- un régulateur proportionnel et intégral (P.I)
- un servo-moteur secondé d'un positionneur
- un autotransformateur à curseur rotatif
- un bac calorifugé possédant un thermoplongeur et un agitateur électriques.

Le banc d'essais devra être modifié pour l'étude d'un certain genre de non-linéarité (NL). Un nouveau élément non linéaire (NL) à hystérésis sera donc introduit dans le système asservi (SA)

Il nous faudra aussi effectuer des réparations pour le bon fonctionnement de l'ensemble.

Ceci permettra alors de procéder à des essais, à des observations (à des enregistrements éventuellement) pour l'étude des phénomènes qui découlent de la présence de l'élément NL et du comportement dynamique du processus de régulation.

II GENERALITES SUR LES SYSTEMES ASSERVIS NON LINEAIRES

2.1 Limitations des méthodes linéaires

Les méthodes d'étude des systèmes linéaires à partir de la notion de fonction de transfert et de ses représentations (réponse en fréquence, configuration des pôles et zéros) constituent un outil extrêmement puissant pour l'étude et la synthèse des systèmes asservis. Elles ont été perfectionnées par les méthodes d'optimisation et permettent d'obtenir le meilleur système (sous l'hypothèse de linéarité) selon les données du problème. Ces méthodes fondées sur la notion de fonction de transfert supposent formellement la linéarité du système étudié. Mais :

- Les systèmes physiques qu'on considère comme linéaires ne sont réellement linéaires que dans une certaine plage où s'applique le principe de superposition.

- Certains systèmes existants, ne sont absolument pas linéaires, même de façon approchée; exemple: asservissement par tout-ou rien. Donc, les notions linéaires sont incapables de rendre compte d'un certain nombre de phénomènes très importants dans la théorie et la pratique des systèmes asservis par exemple :

- La limitation de la précision par le seuil des différents organes.

- L'existence de cycles limite, comme le pompage des asservissements saturés...

Ces raisons rendent indispensable, en matière de systèmes asservis de ne pas se limiter à l'aspect linéaire des phénomènes.

2.2 Définition des systèmes non linéaires

Rappel de la définition des systèmes linéaires

On désigne par systèmes linéaires, tous systèmes physiques représentés par des équations différentielles linéaires à coefficients constants (app. 1). L'hypothèse de linéarité équivaut au principe de superposition.

Les systèmes physiques NL contrairement aux linéaires, ne sont pas régis par des équations linéaires. C'est à dire que le principe de superposition ne s'applique pas. Remarquons que l'appellation de "système NL" touche des systèmes divers n'ayant à peu près rien de commun du fait du vaste champ quasi illimité de la mécanique NL.

Cela a pour conséquence qu'on ne possède pas de méthode générale applicable aux SNL alors que les systèmes linéaires en ont (basée sur la notion de fonction analytique).

Mais par bonheur nous pouvons réduire l'étendue du problème de l'étude des asservissements NL car les NL les plus fréquemment

rencontrées appartiennent à un nombre de types relativement réduit.

2.3 Les NL les plus fréquentes

N'importe quel organe d'un système asservi (détecteur, réseau correcteur, amplificateur, servomoteur, système à asservir) peut posséder une ou plusieurs NL.

Un organe parfaitement linéaire a sa caractéristique d'amplitude de sortie/entrée rectiligne pour toutes les valeurs de l'amplitude d'entrée de zéro à l'infini (fig. 2.1)

Cela exprime la propriété d'homogénéité et traduit l'équation $s(t) = Ke(t)$ en régime statique permanent, où K est le gain statique de l'organe.

Un organe n'a jamais sa caractéristique d'amplitude parfaitement rectiligne. Il y a toujours une courbure plus ou moins prononcée (fig. 2.2)

Tout système physique (même réputé linéaire) a un seuil de sensibilité (fig. 2.3) et une saturation (fig. 2.4)

Les phénomènes d'hystérésis peuvent donner naissance à une caractéristique en forme de boucle (fig. 2.5)

Un organe travaillant par plus ou moins à une caractéristique (fig. 2.6) définie par l'équation $s(t) = M \text{signe}(t)$ avec la fonction

$$\text{signe} = +1 \text{ si } e > 0$$

$$-1 \text{ si } e < 0$$

Toutes ces caractéristiques sont dites types fondamentaux de NL. Elles peuvent alors s'associer au hasard pour donner toutes les combinaisons possibles telles que:

- seuil et saturation, limitant le domaine de linéarité du système (fig. 2.7)

- courbure et hystérésis (fig. 2.8)

- tout-ou-rien et seuil (fig. 2.9)

- tout-ou-rien, seuil et hystérésis (fig. 2.10)

Mais il existe d'autres NL plus complexes ayant des caractéristiques: avec plusieurs discontinuités (fig. 2.11)

non symétriques (fig. 2.12)

Toutes les NL qui viennent d'être décrites, ont en commun la propriété que la sortie dépend seulement de l'entrée: elles sont complètement caractérisées par leur caractéristique statique. On les appelle NL statiques (par opposition aux "NL dynamiques", où la sortie dépend aussi des dérivées successives de l'entrée.)

Les modes fondamentaux de non-linéarité

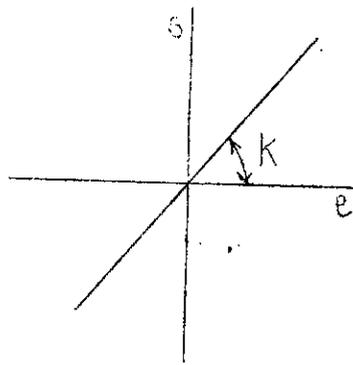


Fig. 2.1 Linéaire idéal

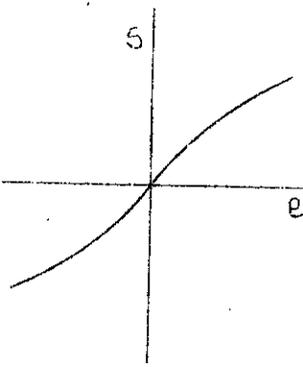


Fig. 2.2 Courbure

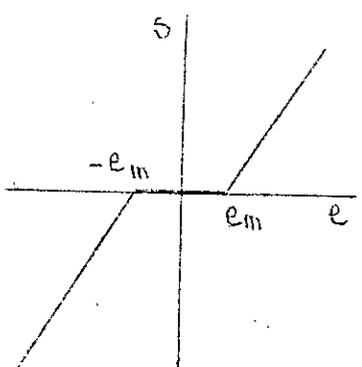


Fig. 2.3 Seuil (ou intervalle mort)

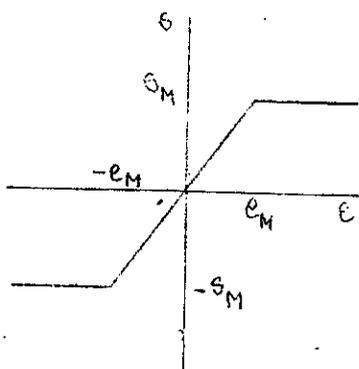


Fig. 2.4 Saturation

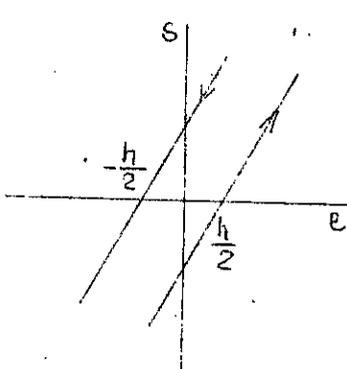


Fig. 2.5. Hystérésis

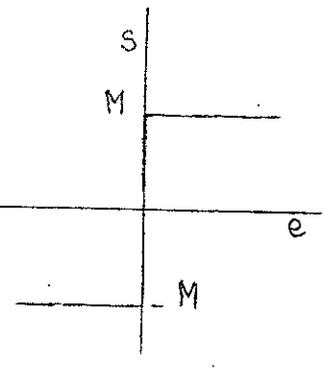


Fig. 2.6 Plus ou moins

Combinaisons fréquentes des modes fondamentaux de non-linéarité

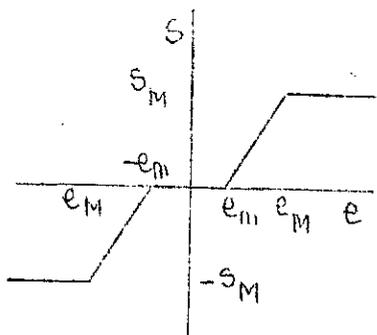


Fig. 2.7. Seuil et saturation

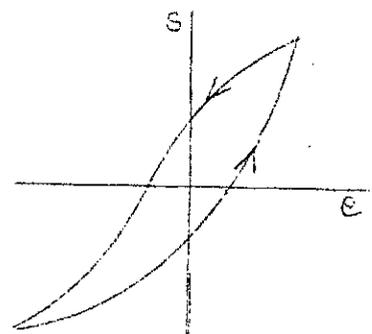


Fig. 2.8. Courbure et hystérésis

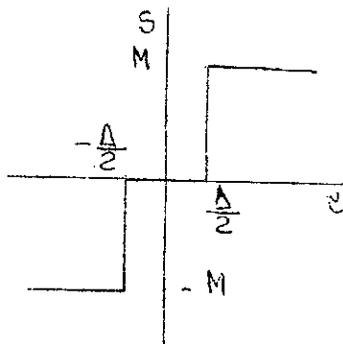


Fig. 2.9 Plus ou moins avec seuil

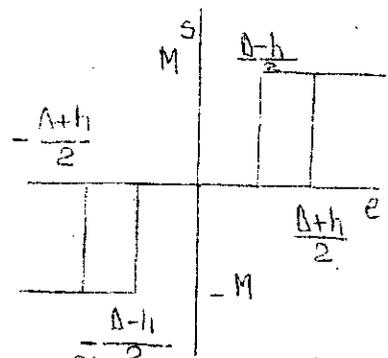


Fig. 2.10 Plus ou moins avec seuil et hystérésis

Exemples de non-linéarités complexes

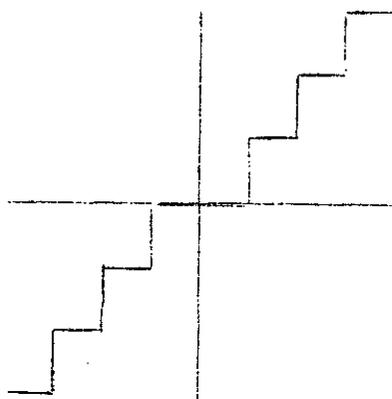


fig. 2.11

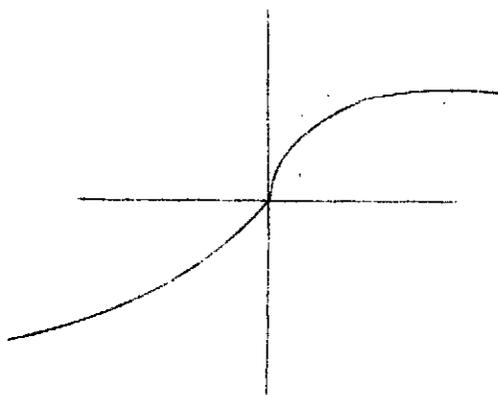


fig. 2.12

2.4 Classification des non-linéarités

Il existe plusieurs critères de classification

A. Les non-linéarités continues et discontinues

Cette notion est importante pour l'application des méthodes mathématiques, exemple: la courbure, le seuil et la saturation qui sont continues, le plus ou moins est discontinu.

B. Les non-linéarités à relation biunivoque et à relation non uniforme entre l'entrée et la sortie, exemple, la présence d'hystérésis qui provoque une caractéristique d'amplitude en forme de boucle.

C. Les non-linéarités parasites ou accidentelles et celles dites essentielles. Les premières découlent des limitations des matériels, imperfection de la réalisation, les secondes, proviennent de l'intention délibérée de la personne qui a fait le projet du système.

2.5 Systèmes asservis ayant un élément non linéaire

En matière d'asservissement non linéaire, on rencontre le plus souvent le problème d'un système asservi ayant des éléments supposés presque linéaires sauf un seul, qui est NL.

On analyse alors l'influence de la non-linéarité, quelque soit sa nature accidentelle ou essentielle sur les performances du système.

L'étude d'un système possédant un élément NL, où qu'il se trouve (dans la branche directe), à caractéristique statique, se ramène à l'étude du système à retour représenté sur la figure 2.13 ayant les deux propriétés suivantes:

- retour unitaire

- branche directe munie, en cascade, d'un élément NL et d'une "boite" linéaire, ayant une fonction de transfert $L(p)$, regroupant un ensemble d'organes linéaires.

Traitions le cas de l'exemple suivant: (voir figure 2.14)

Nous pouvons ramener ce système asservi à un autre système équivalent schématisé sur la figure 2.15. La fonction $L(p)$ a pour expression:

$$L(p) = F G H$$

et les entrée, sortie du système équivalent sont:

$$E_1(p) = E(p) F \quad \text{et} \quad S_1(p) = F H S(p)$$

Il faut remarquer que les entrées, sorties du système équivalent ne sont pas celles du système réel.

La place de l'élément NL influe évidemment sur le comportement du système. Exemple: si un organe par plus-ou-moins est placé à

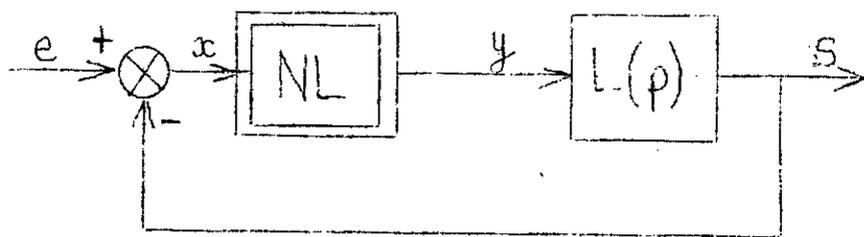


fig. 2.13

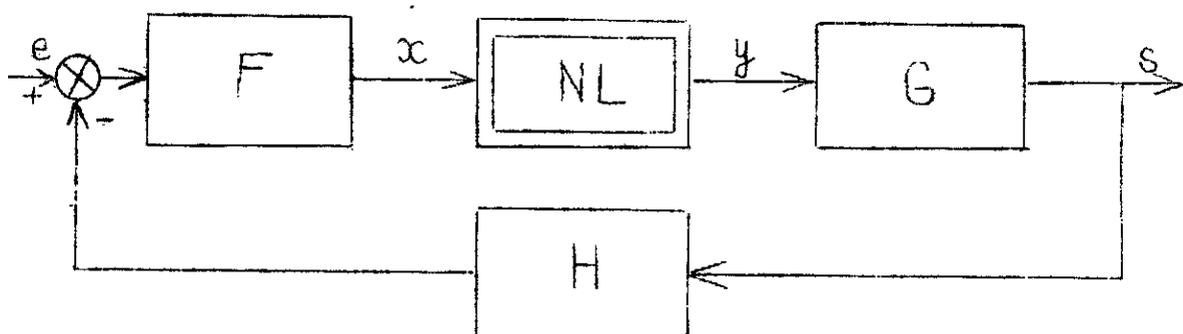


fig 2.14

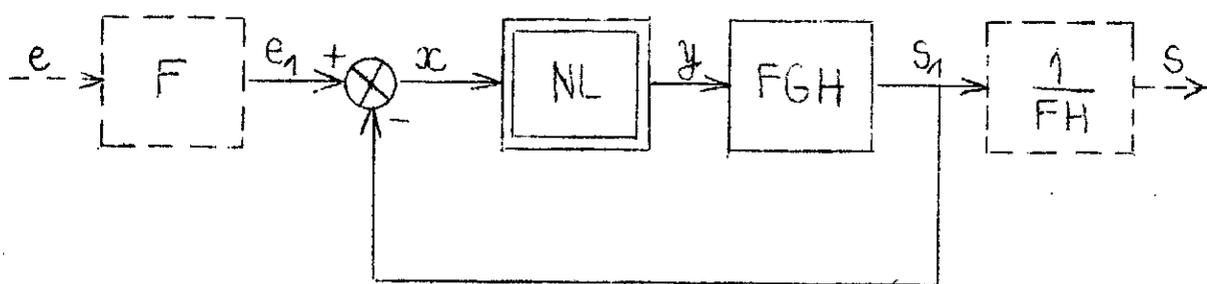


fig. 2.15

l'étage détecteur, les étages suivants (correcteur, étage de puissance) adouciront son action par plus-ou-moins: la sortie sera une fonction suffisamment continue pour suivre finement l'entrée. Si c'est le contraire l'étage de puissance qui fonctionne par plus-ou-moins, on aura affaire à un asservissement grossier, ayant toutes les chances d'osciller à grande amplitude autour de la valeur prescrite.

Ces différences, toutefois, sont seulement quantitatives. Elles ne sont pas structurelles, au sens suivant: où que soit placé (dans la branche directe) l'élément NL et même s'il existe des retours auxiliaires, l'étude du système se ramène à l'étude du système à retour représenté par la figure 2.13

Cette propriété de pouvoir ramener un système comportant un élément NL en un système canonique est primordiale, car elle unit et développe des méthodes d'étude pour l'ensemble des systèmes asservis possédant un élément NL, où qu'il se trouve (dans la branche directe).

III L'APPROXIMATION DU PREMIER HARMONIQUE

3.1 Principe de la méthode

La méthode du premier harmonique dite aussi méthode de l'équivalent harmonique a pour principe l'application de l'analyse harmonique dans le domaine des asservissements NL. On essaye alors, de généraliser l'emploi de la notion de fonction de transfert aux systèmes NL, qui en toute rigueur n'est pas applicable.

Un système linéaire soumis à une entrée harmonique d'amplitude e_0 et de pulsation ω :

$$e(t) = e_0 \sin(\omega t)$$

a sa sortie harmonique, avec la même fréquence, mais déphasée de ψ :

$$s(t) = s_0 \sin(\omega t + \psi)$$

La fonction de transfert de ce système est définie par le rapport des transformées de Laplace de la fonction de sortie à celle de l'entrée respectivement:

$$L(p) = S(p)/E(p)$$

qui peut encore s'écrire pour une pulsation ω par:

$$L(j\omega) = A \exp.(j\psi)$$

(dite fonction de transfert spectrale.) où A et ψ sont respectivement le module et la phase de la fonction $L(j\omega)$, fonctions de la pulsation de l'entrée uniquement (pas de l'amplitude de l'entrée), c'est à dire que la fonction de transfert dépend de ω seulement.

Pour un système NL, on étudie alors la sortie pour une entrée harmonique (cf fig. 2.13)

$$x(t) = x_1 \sin(\omega t)$$

Nous avons en général, une sortie périodique, de même période que l'entrée (dans certains cas, la sortie peut être périodique avec une fréquence différente de celle de l'entrée, comme dans la résonance sous harmonique, ou si le système oscille à sa fréquence propre d'oscillation. Elle peut ne pas être périodique, si l'entrée a une amplitude trop faible pour synchroniser le système.) mais non sinusoidale. Cette sortie est développable en série de Fourier, dont on prend généralement que les trois premiers termes en rejetant tous les termes (de fréquences plus élevées.) qui viennent après.

On peut alors définir à partir de cela pour l'organe NL une fonction de "transfert équivalente ou généralisée".

Justification:

Dans la totalité des cas rencontrés, la partie linéaire (ayant $L(p)$ comme fonction de transfert) du système asservi comprend des organes inertes (lents), et se comporte, à cause de cela, en filtre passe-bas, étouffant les hautes fréquences. On parle alors de système filtré. Il en résulte que la sortie $s(t)$ du système est très sensiblement la même que si $y(t)$ ne comprenait que les trois premiers termes de la série de Fourier.

3.2 Fonction de transfert généralisée, gain équivalent

Soit une fonction harmonique du temps $x = x_1 \sin(\omega t)$, ($x_1 > 0$) appliquée à l'entrée d'un organe NL et ayant une période

$$T = 2\pi/\omega.$$

En régime établi, la sortie sera fonction du temps de période T décomposable en série de Fourier:

$$y(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + \dots$$

avec:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt ; \quad A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(n\omega t) dt ;$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(n\omega t) dt. \quad (*)$$

Si nous négligeons les harmoniques supérieurs, le fondamentale est caractérisé par les coefficients:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt ; \quad A_1 = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(\omega t) dt ;$$

$$B_1 = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(\omega t) dt.$$

Si la non-linéarité à une caractéristique symétrique par rapport à l'origine, la valeur moyenne est nulle et les termes A_1 et B_1 sont donnés par:

$$A_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} y(t) \cos(\omega t) dt ; \quad B_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} y(t) \sin(\omega t) dt$$

si on assimile $y(t)$ à son fondamentale

$$y_1(t) = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega t + \text{arc tg}(\frac{A_1}{-B_1}))$$

nous dirons que la fonction $N(x_1, \omega) = M \exp(j\psi)$ où

$$M = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{x_1} \quad \text{et} \quad \psi = \text{arc tg}(A_1/B_1)$$

est la fonction de transfert généralisée de l'organe NL. Le rapport d'amplitude M (module de la fonction $N(x_1, \omega)$) et la phase ψ sont fonctions de l'amplitude x_1 et de la fréquence de l'entrée.

La fonction de transfert est représentée par une famille de lieux de transfert généralisés gradués en x_1 , à raison d'un lieu par valeur de x_1 (fig. 3.1)

Dans de nombreux cas, M et ψ ne dépendent pas de la fréquence, mais seulement de l'amplitude de l'entrée. Tel est le cas pour tous les éléments NL statiques, comme ceux dont les caractéristiques ont été indiquées aux figures 2.1 à 2.10.

On les désigne à cause de cela, de non-linéarités indépendantes de la fréquence.

Par analogie avec le "gain complexe"

$$A(\omega) \exp.(j\psi(\omega))$$

d'un système linéaire, on appelle alors la quantité:

$$N(x_1) = M(x_1) \exp.(j\psi(x_1))$$

"gain complexe équivalent" de l'organe NL, dans le cadre de l'approximation de l'équivalent harmonique.

Lorsque x_1 varie, le point d'affixe $M \exp.(j\psi)$ décrit un lieu qu'on pourrait appeler "lieu de réponse en amplitudes" de N (par analogie avec le "lieu de réponse en fréquences" linéaire).

Un seul lieu unique gradué en x_1 remplace toute la famille de lieux de transfert généralisés.

On considère plus habituellement le lieu gradué en x_1 du point d'affixe

$$\frac{1}{N(x_1)} = \frac{1}{M(x_1)} \exp.(\psi - \psi(x_1))$$

dit lieu critique de l'organe NL (par généralisation du terme "point critique", qui désigne le point d'affixe $-1/K$ dans la théorie des asservissements linéaires.)

Si nous avons la caractéristique statique $y(t)$ de la non-linéarité pas symétrique par rapport à l'origine des coordonnées, le calcul du gain équivalent nécessite une modification, consistant à soumettre l'organe NL à une entrée sinusoïdale de valeur moyenne non nulle.

$$x(t) = x_0 + x_1 \sin(\omega t) \quad x_1 > 0, x_0 \geq 0$$

On calcule alors la valeur moyenne et le fondamental à la sortie de l'organe NL par les formules (*)

Cela conduit à considérer un gain équivalent moyen

$$N_0 = \frac{A_0}{x_0}$$

et un gain équivalent fluctuant

$$N_1(x_1) = \frac{A_1 + jB_1}{x_1}$$

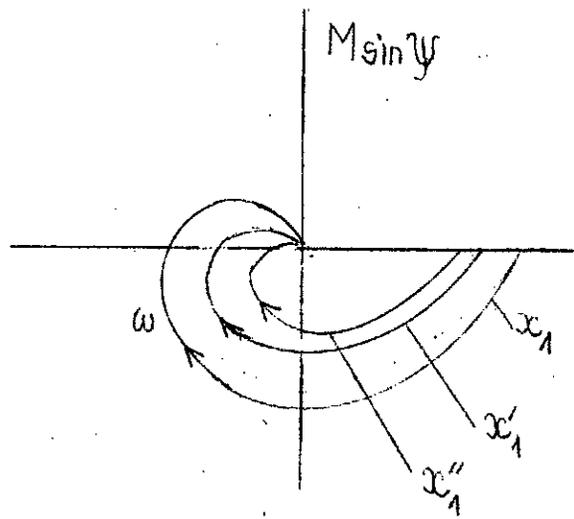


fig 3.1 famille de lieu de transfert

Conclusion

Soit un système asservi comportant un organe NL, qui admet, dans le cadre de l'approximation du premier harmonique (valide pour les systèmes filtrés) une non-linéarité indépendante de la fréquence (le système a été schématisé par la figure 2.13). Le système est alors caractérisé par les données

- du lieu de réponse en fréquence (lieu de Nyquist) $L(j\omega)$ de la "boite linéaire", gradué en fréquence .
- du lieu critique $-1/N(x_1)$ de l'organe NL, gradué en amplitude x_1

3.3 Stabilité et autooscillations des asservissements à un organe non linéaire.

Un asservissement linéaire en boucle ouverte ayant une fonction de transfert $K L(p)$ où K est indépendant de p , est stable (instable) si le lieu de Nyquist $L(j\omega)$ parcouru dans le sens des fréquences croissantes laisse à sa gauche (droite) le "point critique" $-1/K$ (règle de Revers). Si le lieu de transfert passe par ce point, le système est juste oscillant: une fois amorcée, une oscillation à la fréquence angulaire ω pour laquelle

$$L(j\omega) = -1/K$$

continue infiniment, le système étant abandonné à lui même. (c'est à dire $e(t) = 0$)

Cette propriété peut être appliquée de la manière suivante au cas d'un système contenant un élément NL ayant un gain complexe équivalent $N(x_1)$ (non-linéarité indépendante de la fréquence)

(A) Quand x_1 est fixé, $N(x_1)$ est un nombre fixé (complexe s'il y a hystérésis) et le système est assimilé à un asservissement linéaire ayant sa fonction de transfert, en boucle ouverte:

$$N(x_1) L(j\omega)$$

Si les lieux, critique $-1/N(x_1)$ et de transfert $L(j\omega)$ se coupent, on a au point correspondant

$$L(j\omega_0) = -\frac{1}{N(x_{10})}$$

Une oscillation d'amplitude x_{10} et de fréquence ω_0 , une fois amorcée, continuera indéfectiblement en l'absence d'entrée. C'est ce qu'on appelle une autooscillation ou oscillation libre du système, ou encore une oscillation du système autonome ($e(t) = 0$)

(B) Une oscillation d'amplitude $x_1 \neq x_{10}$ tendra à décroître (ou à croître) selon que le point $-1/N(x_1)$ est laissé à gauche

(ou à droite) par le lieu de transfert parcouru dans le sens des fréquences ω croissantes. Nous dirons que le système est stable (ou instable) à cette amplitude.

Le lieu critique, gradué en x_1 , se trouve ainsi partagé (fig. 3.2) en segments pour lesquels il y a respectivement stabilité et instabilité.

Sur les premiers, l'écart tend à diminuer, le point représentatif à se déplacer sur le lieu critique vers les petites amplitudes.

Sur les seconds (en trait discontinu) l'écart tend à augmenter, le point à se déplacer vers les grands x_1 .

Ces segments sont séparés par les amplitudes x_{10} des auto-oscillations.

En particulier, la position d'équilibre est stable ou instable selon que le lieu de transfert $L(j\omega)$, parcouru dans le sens des fréquences croissantes, laisse à sa droite ou à sa gauche le point de départ $x_1 = 0$ du lieu critique conformément à la règle de Revers.

(C) On en déduit qu'une autooscillation peut être stable ou instable. On voit sur la figure 3.2 que le point C'' représente une oscillation stable: en effet, si l'amplitude de l'oscillation libre diminue, le système entre dans une zone d'amplitudes instables et x_1 tend à croître; si elle augmente, le système entre dans une zone stable et x_1 tend à décroître; en somme, le système tend vers son autooscillation C''.

Au contraire, l'oscillation libre C' est instable parce que le point représentatif x_1 sitôt éloigné de C' tend à s'en éloigner davantage.

Par la règle de Loeb, on voit qu'une autooscillation (x_{10}, ω_0) est stable ou instable selon qu'en son voisinage on laisse à sa droite ou à sa gauche la direction des amplitudes x_1 croissantes sur le lieu critique quand on suit le lieu de transfert dans le sens des fréquences croissantes (fig. 3.3).

Une autooscillation stable a une existence physique. Une autooscillation instable n'apparaît pas physiquement, mais constitue une frontière de stabilité.

En conclusion

(a) On ne peut plus parler, comme en matière linéaire, de système stable sans plus: il faut préciser dans quelles conditions (à quelle amplitude.)

(b) Les zones de stabilité (x_1 tendant à décroître) ou d'ins-

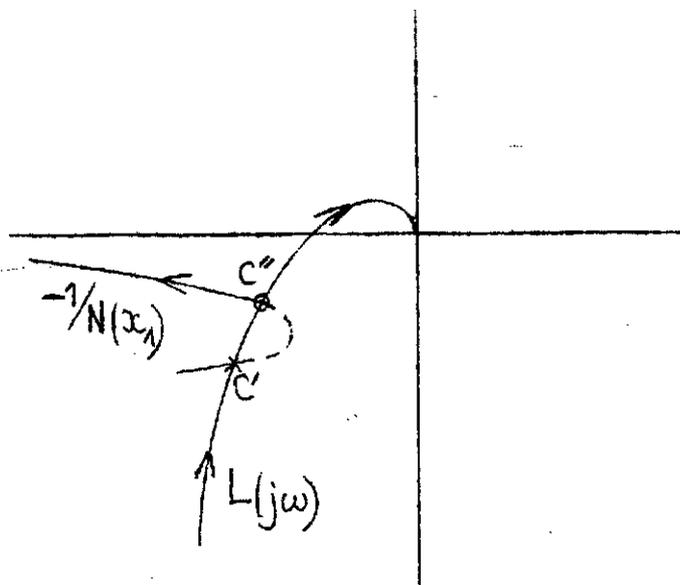


fig 3.2 Lieu critique partagé en segments stables (trait continu) et instables (discontinu)

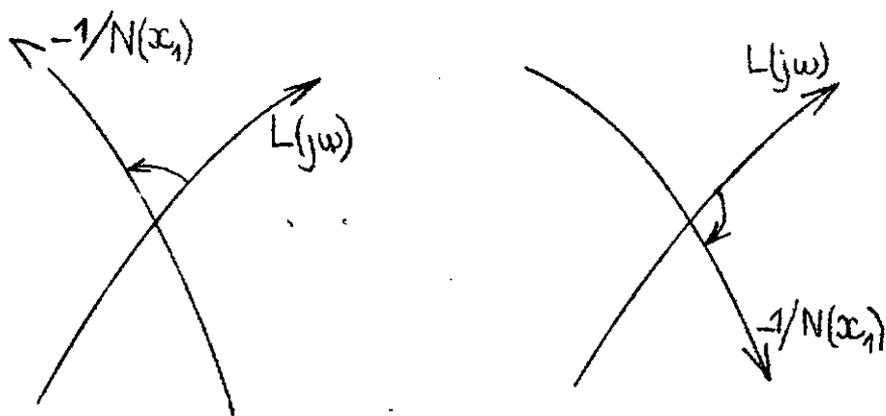


fig 3.3 Règle de Loeb
stable instable

tabilité (à croître) sont séparées par les autooscillations du système.

(c) La stabilité ou instabilité de l'équilibre résulte de la règle de Loeb.

3.4 Une des autres méthodes: la méthode du plan de phase.

3.4.1 Le plan d'extension en phase

Généralités, définition.

La notion de plan d'extension en phase, introduite par H. Poincaré aide à traiter de nombreux problèmes de mécanique linéaire et non-linéaire.

Soit un système physique à un degré de liberté régi par une équation différentielle qui s'écrit, résolue par rapport à

$$d^2x/dt^2$$

(la variable indépendante est le temps):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f(x, \frac{dx}{dt})$$

si l'on pose $dx/dt = y$ nous aurons un système équivalent à l'équation précédente

$$(A) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = f(x, y) \end{cases}$$

A chaque instant l'état physique du système est défini par la donnée de x et de dx/dt c'est à dire par la donnée d'un point dans le plan de coordonnées x et $y = dx/dt$ qu'on appelle plan d'extension en phase ou plan de phase.

L'évolution du système dans le temps est représentée par une courbe dans le plan de phase gradué en t : une telle courbe s'appelle trajectoire de phase du système, c'est une courbe intégrale du système (A)

L'étude du système peut donc se ramener à celle des trajectoires de ses points représentatifs dans le plan de phase, c'est à dire à l'étude des courbes intégrales du système (A).

3.4.2 Construction pratique des trajectoires

Il existe des méthodes ; méthode des isoclines, méthode de construction de Liénard que nous n'exposons pas et renvoyons le lecteur aux références (REF 1 et 2)

3.4.3 Interprétation des trajectoires

En suivant le déplacement du point (x, y) sur sa trajectoire graduée en t on a une idée du comportement du système dans le temps: l'abscisse indique la position du "mobile", l'ordonnée

sa vitesse.

Le temps mis par le "mobile" pour parcourir un arc AB de trajectoire de phase s'obtient par:

$$t = \int_{x_A}^{x_B} \frac{dx}{dx/dt}$$

c'est l'aire comprise entre l'axe des x, les droites $x = x_A$ et x_B , enfin la courbe $1/y$, inverse axiale de la trajectoire de phase.

3.5 Application à un élément non linéaire à hystérésis.

Illustrons ce qui vient d'être exposé par un exemple, celui d'une non-linéarité ayant une caractéristique à hystérésis.

On donne sa courbe, l'expression de sa fonction de transfert généralisée dans le cadre de l'approximation du premier harmonique et la trajectoire de phase du système asservis comportant cet élément NL selon la méthode du plan de phase.

Rappelons que notre banc d'essai possède justement un organe NL ayant la même caractéristique.

La courbe donnant l'entrée en fonction de la sortie de l'élément NL à jeu est représentée sur la figure 3.4.

Nous avons les équations suivantes (d'après REF 3):

l'entrée $x(t) = x_1 \sin(\omega t)$

$$\text{la sortie } y(t) = \begin{cases} k(x_1 \sin(\omega t) - \frac{b}{2}) & \text{pour } 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ k(x_1 - \frac{b}{2}) & \text{pour } \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi - \beta \\ k(x_1 \sin(\omega t) + \frac{b}{2}) & \text{pour } \pi - \beta \leq \omega t \leq \pi \end{cases}$$

avec $\beta = \arcsin \frac{x_1 - b}{x_1}$

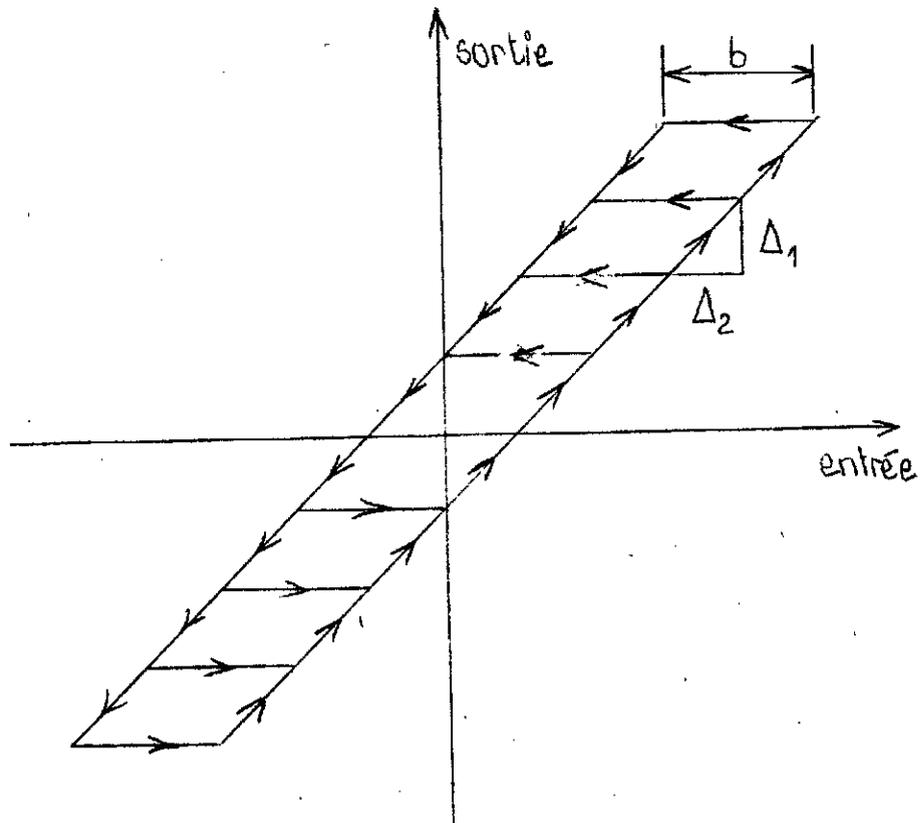
k et b ont été désignées sur la figure 3.4

La fonction de transfert généralisée est donnée par:

$$N(j\omega) = \frac{k}{\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin(1-2R) \right]^2 + 4R(1-R) + \left[\pi + 2\arcsin(1-2R) \right] 2R \right\} \times$$

$$\frac{x(1-2R) \sqrt{\frac{1-R}{R}} \left. \right\}^{1/2} \arctg \frac{4R(R-1)}{\frac{\pi}{2} + \arcsin(1-2R) + 2R(1-2R) \sqrt{\frac{1-R}{R}}}$$

avec $R \equiv \frac{b}{2x_1}$



$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \equiv k$$

Fig 3.4 Courbe de la caractéristique à hystérésis d'un élément non linéaire à jeu.

Les effets de la non-linéarité d'un organe à jeu, sont mathématiquement difficile à décrire, l'analyse des performances d'un système comportant un élément NL de ce genre, est délicate.

Beaucoup de transmission mécanique possèdent un certain jeu. L'exemple le plus courant est celui des systèmes de contrôle comportant du jeu dans les organes dentés tels que les engrenages (jeu fonctionnel).

Le train d'engrenage est monté sur deux arbres, l'un moteur et l'autre receptr. Le premier est dit arbre d'entrée et le second arbre de sortie. Ces deux organes ont une masse donc une inertie, et sont le siège de frottements du type visqueux et solide (dans leurs paliers...)

Les arbres se tordent et fléchissent sous charge car ils sont élastiques, ainsi que les dents en prise du pignon et de la roue (après rattrapage du jeu).

Tous ces facteurs toujours présent, entrent en considération lors de l'analyse mathématique des phénomènes découlant de la présence du jeu. Mais certaines hypothèses simplificatrices facilitent l'étude de systèmes bien définis, donc abordables

Les servomécanismes ont le plus souvent des instruments, des organes (des procédés) ayant une faible inertie c'est à dire réagissent d'une manière très lente et présentent des frottements visqueux négligeables devant les frottements du type solide. Cela fait que l'élément receptr. une fois entraîné par l'élément moteur, possède la même vitesse que celle de ce dernier et une fois abandonné s'arrête à cause du frottement, tout le temps que persistera le jeu.

Nous donnons un exemple de trajectoire de phase d'un système linéaire du second ordre (fig. 3.5). Pour comparer, nous représentons sur la figure 3.6, celle d'un servomécanisme du deuxième ordre (son schéma fonctionnel est sur la figure 3.7) ayant une non-linéarité du genre à hystérésis: un simple jeu.

Ils ont été puisés de la référence REF 3. L'étude de notre système asservi (du banc d'essai) ayant son organe NL à jeu (mécanisme à jeu) est analogue, et les courbe et trajectoire de phase sont similaires.

Pour parfaire, nous avons rapporter sur la figure 3.8 une trajectoire de phase d'un système NL du second ordre avec le cycle limite, celui des autooscillations stables. On montre la tendance des oscillations du système à évoluer vers les oscillations libres.

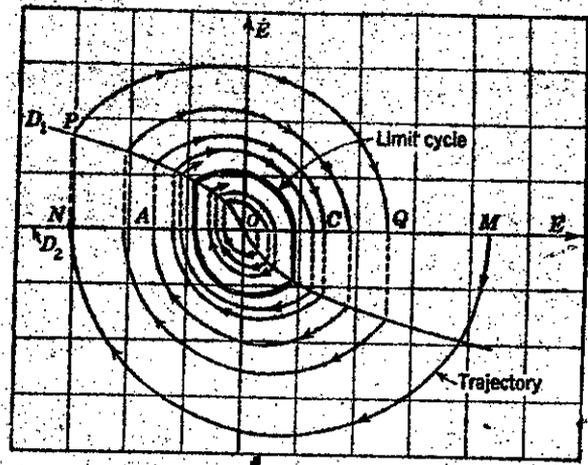


Fig.3.8 Trajectoire de phase d'un système asservi du second ordre non linéaire: jeu. Représentation du cycle limite.

IV CONCEPTION DE NOTRE SYSTEME ASSERVI NON LINEAIRE

4.1 Agencement de l'asservissement non linéaire

4.1.1 But

Nous voulons obtenir un système asservi ayant un élément NL, c'est à dire une non-linéarité essentielle. Cet organe aura une caractéristique statique du genre à hystérésis. La plus commode non-linéarité qui permet d'obtenir facilement une caractéristique à hystérésis est le jeu. Il sera localisé dans un seul élément: un mécanisme à jeu.

Pour étudier l'influence de l'organe NL sur l'asservissement ainsi que sur ses performances, il nous faut prévoir un système permettant d'annihiler à volonté l'action de l'élément NL (en ôtant le jeu).

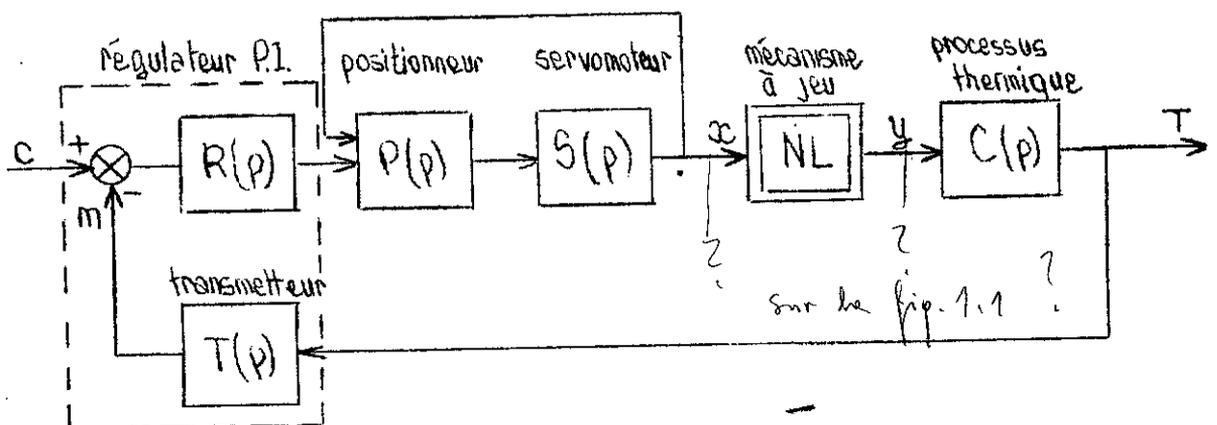
4.1.2 La place de l'organe non linéaire sur le banc.

Notre système possède un servomoteur, il est alors préférable de provoquer le jeu recherché dans la course de la tige du servo.

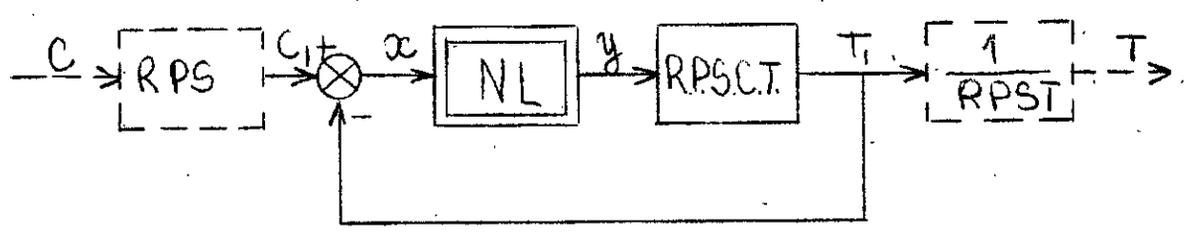
Rappelons qu'initialement la tige du servomoteur était liée à une paire d'engrenage par l'intermédiaire d'une bielle et commandait le transformateur. Nous allons simplement insérer notre élément NL, entre le servomoteur et les organes dentés.

Pour supprimer tous les jeux dans le mécanisme et dans l'engrenage au cours du fonctionnement, il existe un moyen assez simple, c'est de munir le dernier élément de la chaîne cinématique de la transmission du mouvement d'un contre poids.

4.1.3. Le schéma opérationnel de la boucle de régulation du système ainsi modifié. (simplifié)

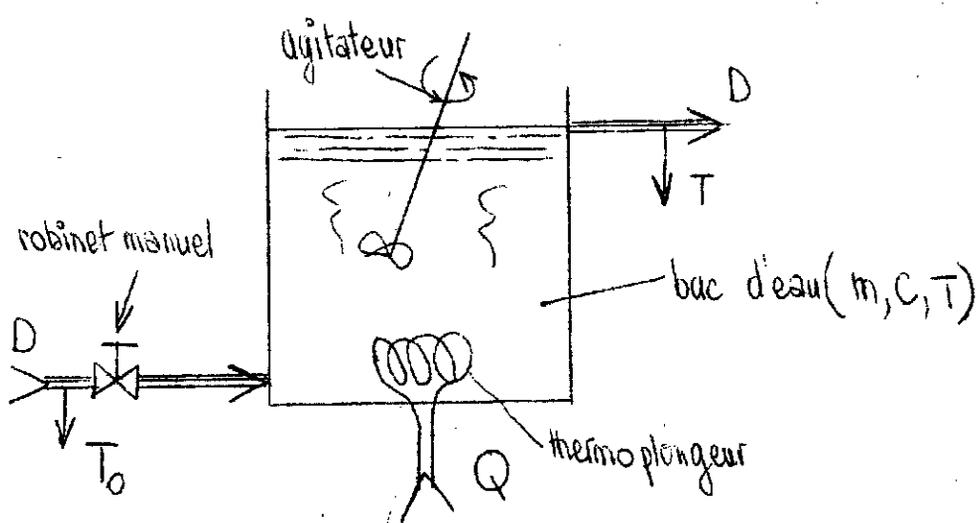


Le schéma équivalent de notre asservissement, réduit sous la forme canonique de la figure 2.13 est le suivant:



4.2 Analyse du comportement dynamique du processus thermique.

On essaye d'établir la fonction de transfert du système de chauffage de l'eau à travers le bac.



Soient:

- T: température de l'eau sortant du trop plein, c'est aussi celle de l'eau du bac. C'est la grandeur à régler.
- T_0 : température de l'eau venant de l'extérieur (froide) qui remplit le bac. C'est une grandeur perturbatrice du système.
- D: débit volumique (fixé à une valeur constante) de l'eau froide. Le trop plein laisse échapper le même débit. (Il peut être une grandeur perturbatrice s'il n'était pas fixé)
- Q: débit de chaleur dégagée par la résistance (puissance de chauffage), c'est la grandeur réglante.
- m: masse d'eau que peut contenir le bac (relativement au volume limité par le trop plein.)
- C: chaleur spécifique de l'eau.
- V: volume du bac (volume d'eau jusqu'au trop plein.)
- ρ : masse volumique de l'eau.

T en (K°), D en (m³/s), Q en (J/s), m en (kg), C en (J/kg °K)
 V en (m³) et ρ en (kg/m³)

Nous supposons que les chaleurs spécifiques, masses en eau des éléments: agitateur, thermoplongeur, thermomètre bac négligeables ainsi que les pertes.

La chaleur cédée par la résistance électrique est transmise - à l'eau contenue dans le bac
 - au débit d'eau traversant le bac.

Faisons le bilan des échanges thermiques pendant un temps infinitésimal dt:

Soient dq_r: la quantité de chaleur dégagée par le thermoplongeur par effet Joule (J)

dq_{bac}: la quantité (infinitésimal) de chaleur prise par l'eau du bac (J)

dq_{débit}: la quantité de chaleur fournie à l'eau sortant par le trop plein (J)

$$\text{donc } dq_r = dq_{\text{bac}} + dq_{\text{débit}}$$

avec

$$dq_{\text{bac}} = m C dT$$

$$dq_{\text{débit}} = dm C(T - T_0)$$

$$\text{d'où } dq_r = m C dt + dm C(T - T_0)$$

en divisant par dt

$$\frac{dq_r}{dt} = m C \frac{dT}{dt} + \frac{dm}{dt} C(T - T_0)$$

$$Q = m \dot{C}T + \dot{m} C(T - T_0) \quad \text{où } Q = \frac{dq_r}{dt}, \quad \dot{T} = \frac{dT}{dt} \quad \text{et } \dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

en divisant par $\dot{m} C$

$$\frac{Q_r}{\dot{m} C} = \frac{m}{\dot{m}} \dot{T} + (T - T_0) \quad (A)$$

On sait que la masse m est égale à:

$$\text{d'où } \begin{aligned} m &= \rho V \\ \dot{m} &= \rho \dot{V} = \rho D \end{aligned} \quad (B)$$

$$\text{on déduit: } \frac{m}{\dot{m}} = \frac{\rho V}{\rho D} = \frac{V}{D}$$

on pose: $\tau = \frac{V}{D}$ (C) constante de temps du processus thermique. (Il s'agit d'un écoulement à travers une capacité de rétention.)

Donc l'égalité (A) s'écrit avec la combinaison de (B) et (C):

$$Q \frac{1}{\rho D C} + T_0 = \tau \dot{T} + T \quad (*)$$

passons aux transformées de Laplace, en supposant que T(t=0)=0

$$\mathcal{L} \left[Q \frac{1}{\rho D C} \right] + \mathcal{L} [T_0] = \mathcal{L} [\tau \dot{T} + T]$$

$$\bar{Q} \frac{1}{D\rho C} + \bar{T}_0 = \bar{T}(\rho_p + 1)$$

d'où
$$\bar{T} = \bar{Q} \frac{1}{D\rho C} \frac{1}{\rho_p + 1} + \bar{T}_0 \frac{1}{\rho_p + 1} \quad (D)$$

Discussion:

La grandeur T dépend de deux fonctions d'entrées Q et T_0 . D est une troisième fonction d'entrée éventuelle, qui conduit à une équation non linéaire, cependant elle est éliminée en la maintenant constante.

Néanmoins, D figure dans le coefficient du gain statique et dans la constante de temps τ .

La fonction de sortie T est déterminée par la variation de T_0 par l'intermédiaire de la transmittance d'un élément à capacité, pour ce terme le gain statique est constant et égale à l'unité. Et aussi par Q , terme introduisant la variation de puissance de chauffage, constituant aussi une transmittance à capacité et ayant son gain statique dépendant du débit D d'eau et de la constante de temps.

On va discuter la réponse indicielle, à la variation de chauffage d'un échelon unité, du premier terme de l'équation (D).

D'après l'équation (*) on peut voir qu'au premier instant de la réponse indicielle, la dérivée \dot{T} de la température, proportionnelle à la valeur échelon, reste quand même indépendante de la valeur du débit D , à cause de la constance temporaire de l'expression $(T - T_0)$.

La position de l'asymptote de la réponse indicielle dépend du gain statique, plus le débit D est petit plus la variation finale de la température T est grande.

La figure 4.1 donne la comparaison de deux réponses pour des valeurs de D différentes. A la limite, si D tend vers zéro, l'élément à capacité se transforme en élément intégral.

4.3 Non-linéarités accidentelles présentes dans le système asservi.

4.3.1 Transformation d'une course rectiligne en course angulaire.

C'est un problème fréquemment rencontré dans les servomécanismes. Il est mécaniquement résolu par l'emploi du mécanisme bielle-manivelle, c'est ce que nous avons dans notre système. Il y a essentiellement deux paramètres qui relient la course rectiligne A de la tige du servomoteur et la course angulaire

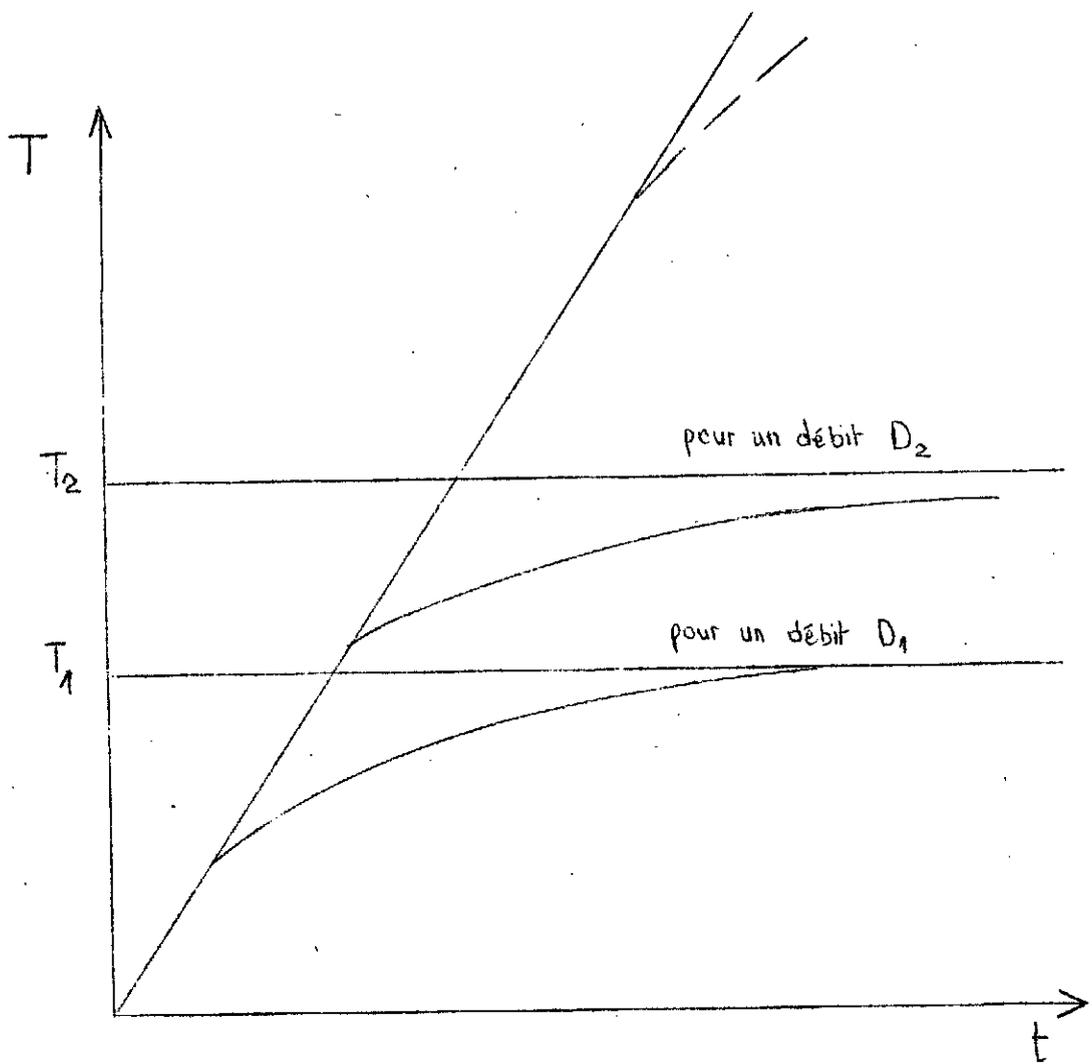


fig 4.1 Réponses indicielles du "système thermique" pour des débits différents

α du secteur denté (faisant office de manivelle).

Soient L : la longueur de la bielle

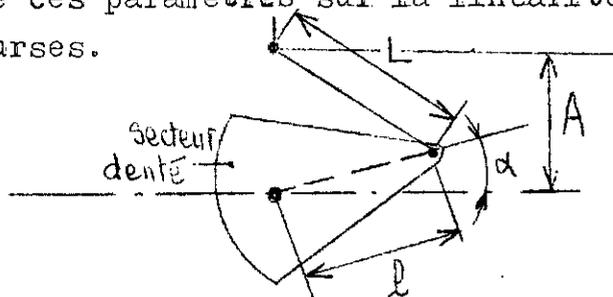
l : la longueur de la manivelle

α en ($^{\circ}$), l et L en même unité: (m).

D'après (REF 4) la formule

$$A = l \sin \alpha + \sqrt{L^2 + (l \cos \alpha - \alpha)^2}$$

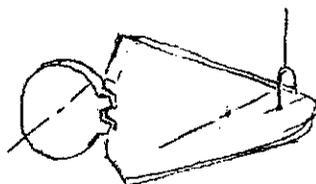
montre l'influence de ces paramètres sur la linéarité de la caractéristique des courses.



Nous avons $L = 145$ mm et $l = 45$ mm. Représentons la caractéristique A en fonction de α (fig. 4.2)

4.3.2 Transmission par engrenage.

Nous avons le curseur rotatif de l'autotransformateur mu par le servomoteur. La liaison mécanique se fait par l'intermédiaire d'organes dentés. Un pignon, solidaire à l'axe du curseur, est accouplé à un secteur denté lié à la manivelle.



Dans ce genre de transmission nous avons obligatoirement un jeu fonctionnel inévitable. Le jeu introduit une non-linéarité de caractéristique à hystérésis.

4.3.3. Puissance de chauffage.

La grandeur réglante du processus thermique est la puissance calorifique dégagée par le thermoplongeur par effet Joule. Nous avons un autotransformateur qui permet d'ajuster cette puissance, selon la position du curseur. Cette dernière est proportionnelle à la tension ou l'intensité.

La puissance développée au niveau d'une résistance pure est donnée par:

$$P = R I^2 = \frac{U^2}{R}$$

La caractéristique puissance en fonction de la tension ou l'intensité n'est pas linéaire en vue de ces égalités.

Nous avons $R = 15 \Omega$ d'où la courbe suivante (fig. 4.3)

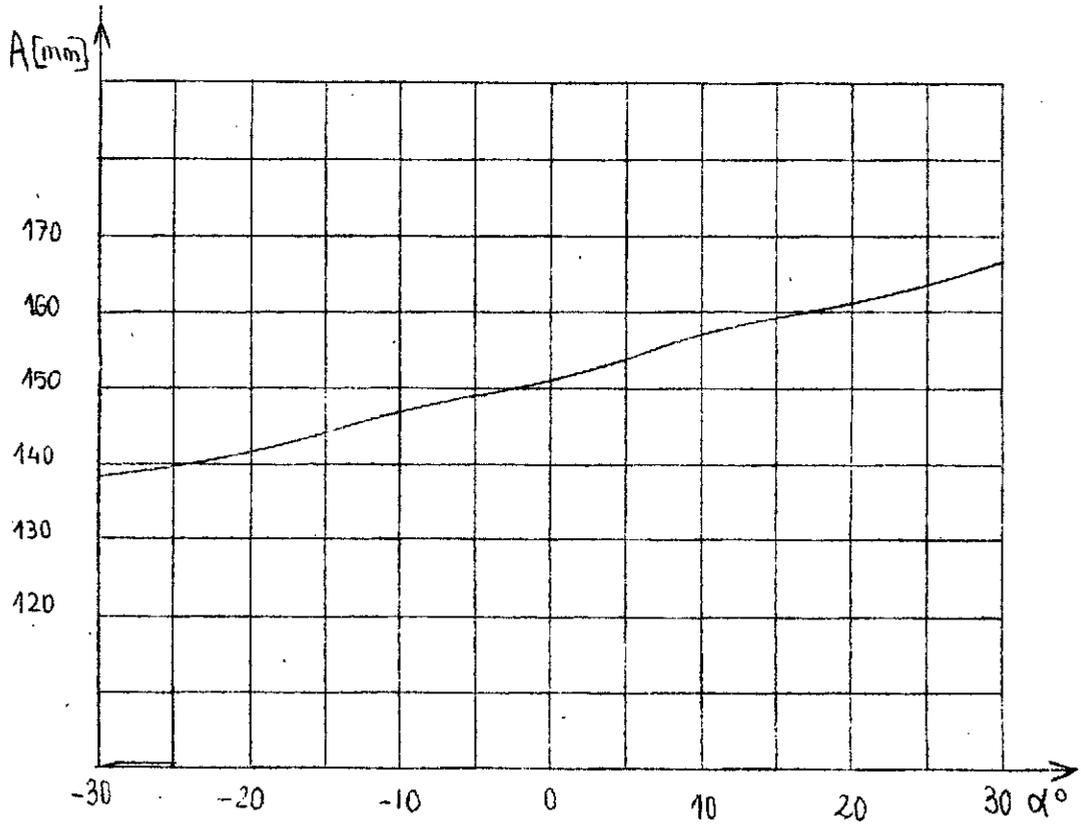


fig 4.2 Caractéristique des courses rectiligne et angulaire du système bielle-manivelle.

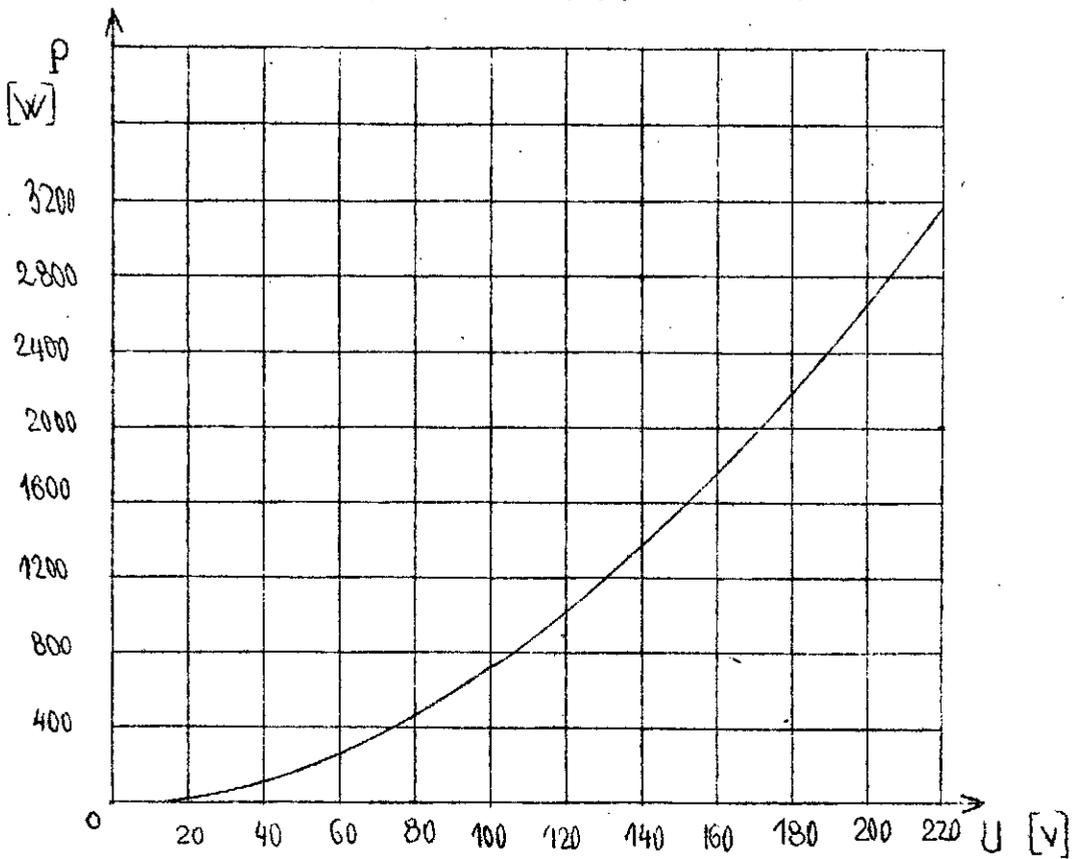


fig 4.3 Caractéristique puissance tension

V TRAVAUX EFFECTUES

5.1 Anomalies et dégats constatés.

Un moteur électrique entraine une hélice (agitant l'eau du bac) par l'intermédiaire d'une paire d'engrenages (démultipliant la vitesse du moteur.)

-Le moteur n'avait plus la grille de protection de son ventilateur, cela est du probablement à la suite d'une chute (carter supérieur brisé)

-Son interrupteur était inutilisable parceque brisé, aucun câble électrique d'alimentation, ni fiche électrique n'équipaient le moteur.

-Ses roulements étaient bruyants.

-Il lui manquait certains écrous.

La roue et son pignon sont enfermés dans un carter, contenant de l'huile.

-Le carter était dépourvus de joints d'étanchéité, ainsi que de quelques boulons (vis, écrous et rondelles-frein)

Le bac d'eau possède un couvercle supportant l'ensemble moteur-agitateur. Il a une résistance chauffante à sa base et une entrée d'eau froide par une canalisation munie d'un robinet. Le trop plein est placé, haut, sur la paroi cylindrique du bac. (fig. 5.1)

-Les bornes de branchement électrique de la résistance n'étaient pas protégées par un quelconque "cache" protecteur isolant.

-Le bac n'avait pas d'indicateur de niveau d'eau ni de canalisation de trop plein.

-L'arrivée de l'eau froide ne possédait pas d'embout pour flexible.

-Le bac était démunie de thermomètre.

-Pas de câble ni de fiche électriques.

-Aucune prise de terre ne munissait l'ensemble.

-La rouille avait attaqué l'intérieur du bac.

L'ensemble des appareils pneumatiques (régulateur, servomoteur...) fonctionnent à l'air comprimé à une pression normalisée de 1,4 bar. Le compresseur de notre laboratoire délivre de l'air à 6 bar.

-Le détendeur n'était pas branché (mais placé provisoirement) ainsi que le flexible d'alimentation.

-La tige du servomoteur n'était pas bien guidée (en translation), elle avait trop de jeu.

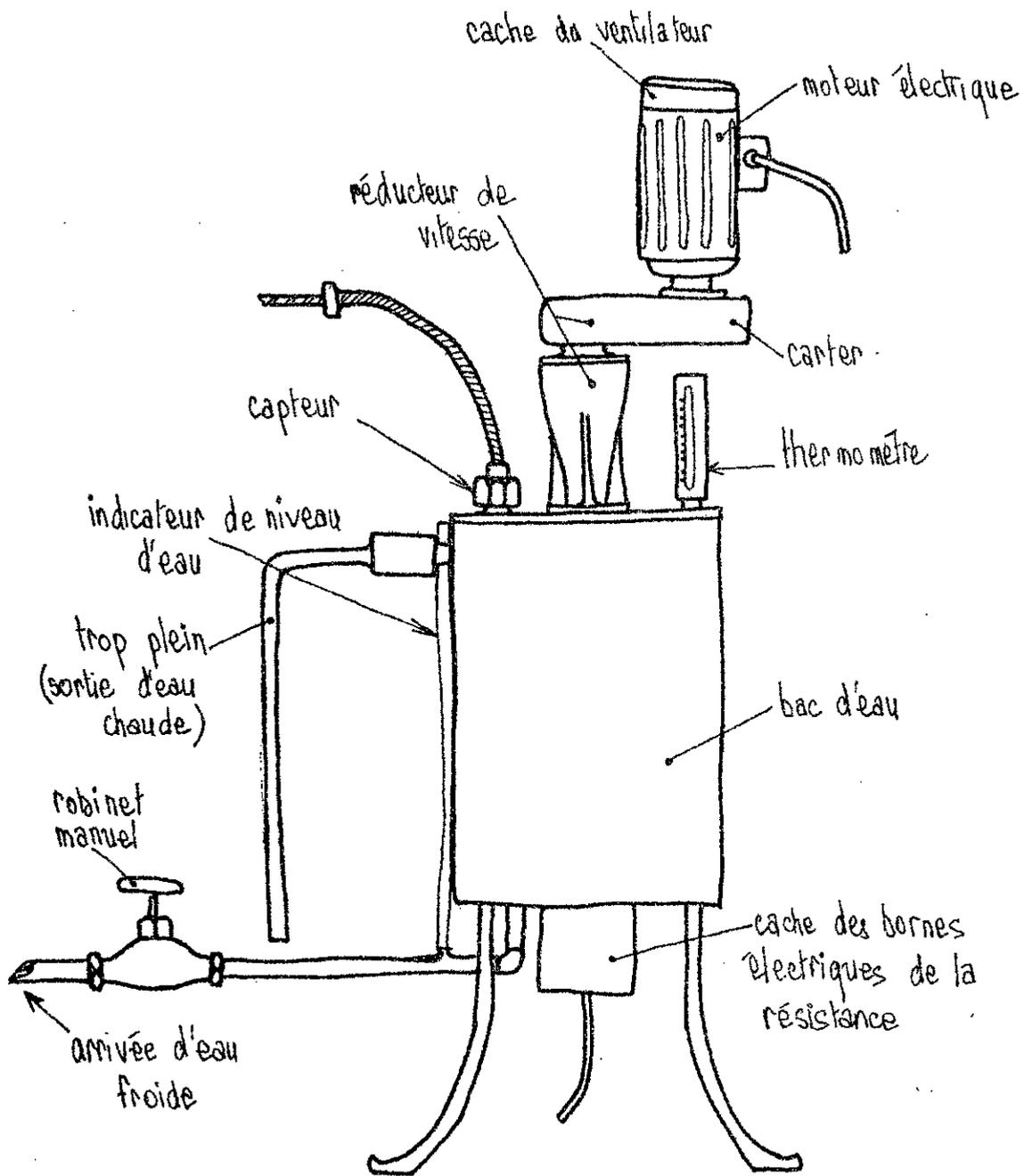


Fig. 5.1 Schéma du bac d'eau définitivement équipé.

-Le mécanisme bielle-manivelle existant présentait trop de jeu et ne convenant pas à notre modification.

-Le secteur denté était monté sur un axe en acier, de sorte qu'on avait friction acier sur acier et après usage, l'alésage s'était ovaliser. Cela se traduisait par un coincement portant préjudice au bon fonctionnement des organes dentés.

-La conception de la liaison mécanique entre le secteur denté et la manivelle ne convenait pas (introduisait une force de frottement gênante.)

L'autotransformateur permet d'ajuster la tension aux bornes du thermoplongeur

-Les bornes de connexions électriques du thermo sur l'autotransformateur n'étaient pas à l'abri des mains. (risques d'électrocution)

-Le cadre de cornière supportant tous le système manque de rigidité, notamment du côté du servomoteur.

5.2 Solutions, améliorations apportées & travaux effectués.

-Nous avons confectionner un grillage protecteur s'emboitant sur le carter supérieur du moteur électrique.

-Nous l'avons munie d'une boîte de dérivation étanche, d'un câble et d'une fiche électriques conformes aux normes (solide et protégée)

-Les roulements ont été achetés (du type 15 BC 02 Z) et soigneusement placés.

-Les divers écrous, vis, rondelles-frein ont été récupérés (des ferrailles)

-Nous avons munis et sérieusement étancher le carter d'huile avec des joints préalablement découpés et de la pâte d'étanchéité.

-On a usiner un capuchon protecteur en plexiglass venant se visser sur la résistance protégeant ainsi l'utilisateur .

-Nous avons muni le bac, d'un embout (pour placer un tuyau), déplacer le robinet de sa place et fait un indicateur de niveau d'eau très pratique. Cela à nécessiter des travaux de plomberie.

-Nous avons choisit un thermomètre à lecture facile, protégé par une gaine, nous dûmes percer le couvercle puis souder dessus un embout où vient se visser le thermomètre.

-Nous avons alimenter la résistance par un câble et fiche électriques conformes et conçu une prise de terre.

-Nous avons peint l'intérieur du bac avec de l'antirouille et

mis une "électrode fusible" d'aluminium pour une protection électrolytique.

-On a placé et branché un détendeur et un flexible sur le banc (travaux de plomberie).

-La tige du servo est guidée par l'intermédiaire d'une douille et d'un "écrou lisse" venant se visser sur la tige (qu'on a usiné). Voir schéma sur figure 5.2.

-Nous dûmes abandonner l'ancien mécanisme bielle-manivelle et usiner un autre, convenant à notre application. Il fait partie du mécanisme à jeu (ou course) qu'on décrira un peu plus loin.

Nous avons décidé de monter l'engrenage sur une douille de bronze. Pour cela il fut nécessaire de :

-Réalésér (sur une fraiseuse réglée impérativement au comparateur, par nos soins, avec une tête à alésér.) à un diamètre supérieur le secteur denté. Mais auparavant pour ne pas le désaxer il a fallu le centrer avec une fraise de diamètre convenable, puis procéder ensuite au réalésage. Ce fut une opération délicate et longue à faire.

-Usiner des rondelles de réglage (cales) en laiton pour aligner le secteur et son pignon.

-Usiner une rondelle de butée en bronze avec son écrou spécial.

-Usiner une douille en bronze ajustée pour un fonctionnement correct du secteur (ajustement ISO), montée sur l'axe, supportant l'engrenage, sans jeu. (emmanchée forcée)

Initialement le secteur denté avait un levier (placé perpendiculairement) relié à la manivelle. (fig. 5.3)

Après des essais de fonctionnement, nous constatâmes le coincement de l'engrenage, dû à une force de frottement introduite par cette liaison.

-Le levier fut supprimé et on reliâmes directement le secteur à la manivelle. Ce ne fut possible qu'après avoir avancé la tête "platine" supportant l'autotransformateur et l'axe de l'engrenage puis on l'avait fixée avec un montage de cornière perforée.

On imagina par la suite comment relier le secteur à la manivelle. Les détails seront donnés un peu plus loin.

-Nous supprimâmes l'ancien cablage électrique et les bornes de branchement. On opta pour une installation évitant tout accident. Pour cela nous montâmes :

-Un interrupteur tripolaire, général commandant toute l'installation.

-Une boîte de dérivation étanche renfermant toutes les jonctions électriques.

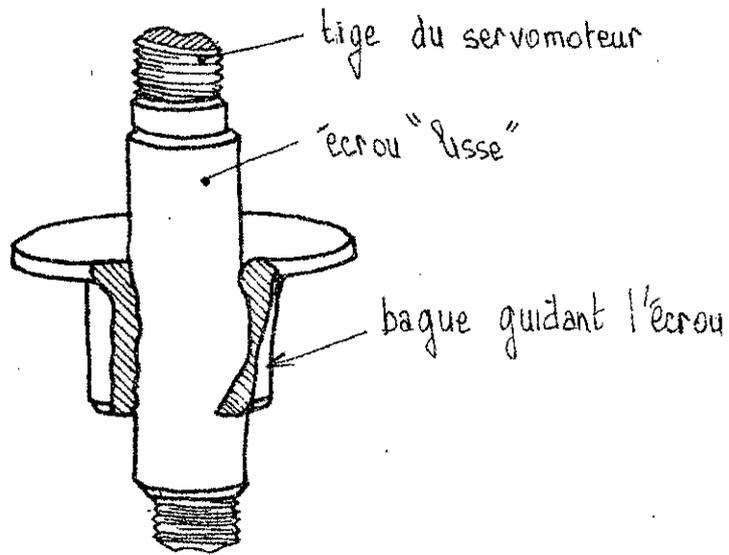


Fig. 5.2 Schéma du guide de la tige du servomoteur.

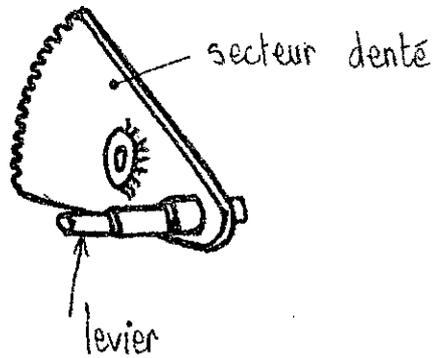


Fig. 5.3 Schéma du secteur denté avant modification.

-Des câbles électriques blindés sur le banc (cadre).

-Des prises électriques du type étanches.

-Une lampe "témoin" de mise en service.

-Des vue-mètres ampèremètre et voltemètre.

-Une prise de terre.

-Le cadre fut renforcé à l'aide de cornières additionnelles, qu'on a fixées aux bons endroits.

-On imagina un système assez simple pour éliminer le jeu dans l'engrènement et dans le mécanisme, on utilise pour cela un contrepois fixé à un fil.

Le fil est attaché et enroulé sur une poulie (fixée sur l'axe du pignon) pour passer ensuite audessus d'une autre poulie (de renvoi) et ayant à son autre extrémité le contrepois.

Ce dispositif a pour but de mettre en contact les dents des organes dentés (constamment) et de supprimer le jeu du mécanisme. On a ainsi un système asservi linéaire.

5.3 Conception & fabrication du mécanisme à jeu

5.3.1 Description et explication de son fonctionnement

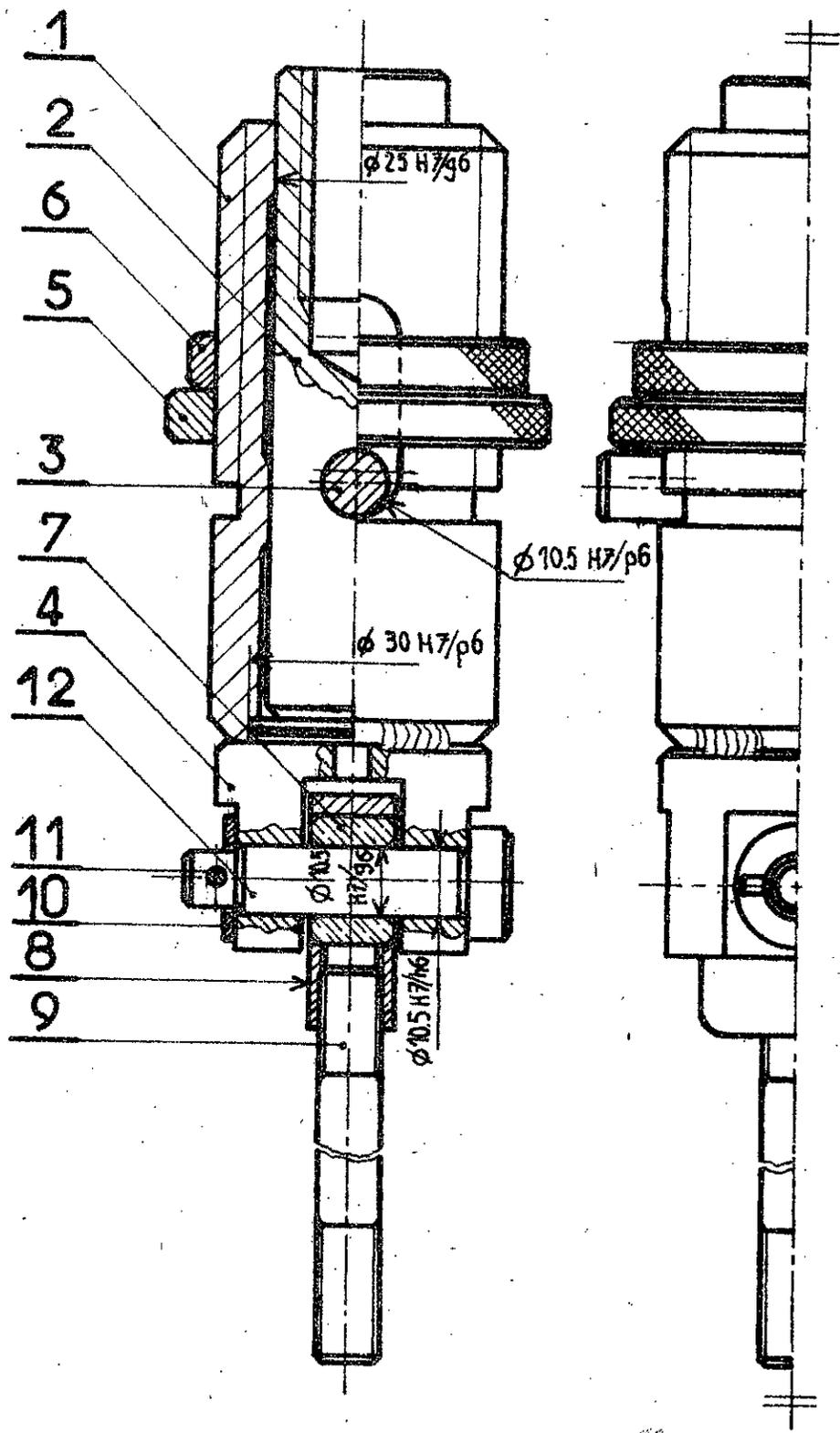
Le mécanisme se compose de deux pièces maîtresses, un piston et son cylindre appariés. Le piston coulisse librement dans le sens axial (se translate axialement dans le cylindre) mais est lié en rotation au cylindre, par un axe (solidaire au piston) se déplaçant dans une lumière usinée dans le cylindre.

La course du piston est réglable (limitée de zéro à vingt mm) grâce à un écrou se vissant sur le cylindre.

Le piston reçoit à l'une de ses extrémités la tige filtée du servomoteur venant se visser dans un trou taraudé (dans le piston). Le piston possède à sa base une chape dans laquelle est monté une bielle. La bielle est composée de trois pièces (un tenon, une chape et une tige filtée à ses deux extrémités joignant ces deux dernières pièces) relie alors le cylindre au secteur denté.

Le choix de ce type de système permettant d'obtenir un jeu réglable fut fixé en vue des avantages suivants: la simplicité d'usinage, la commodité d'utilisation, un fonctionnement correct, l'adaptation sur les organes préexistants sur le banc.

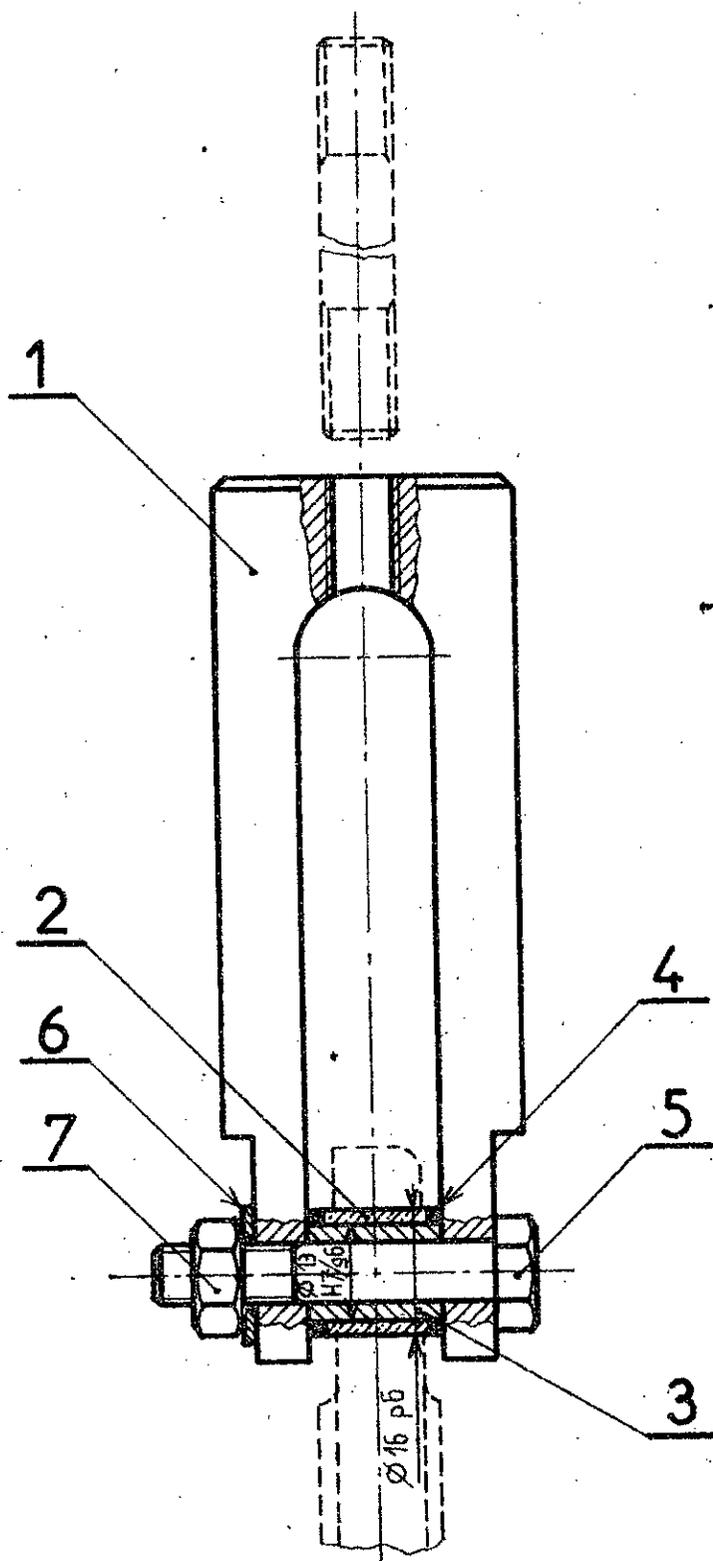
Ce mécanisme constitue à lui seul un élément NL de l'asservissement (il a été introduit exprès, c'est donc une non-linéarité essentielle.)



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		MECANISME A JEU	ENP Dép. Mécanique
1:1	1.1 kg			
Etudiant	Tchanderli	03.1284	JEU XC 18	SA 12.00
Promoteur	Werner			

12	1	Axe	XC 18	
11	1	Goupille cylindrique Ø 2.5	XC 18	
10	1	Rondelle Ø 18 Ø 8 Ep 2	XC 10	
9	1	Tige filetée M10 x 1.5	Cu Zn 15	
8	1	Biellette	XC 32	
7	1	Bague	Cu Zn 15	emmanché forcé dans la bielle
6	1	Contre-écrou moleté M42 x 3	XC 18	
5	1	Ecrou moleté M42 x 3	XC 18	
4	1	Chape	XC 18	soudée sur le cylindre par brasage
3	1	Axe	XC 18	emmanché forcé dans le piston
2	1	Piston	XC 18	taraudé en bout M 16 x 2
1	1	Cylindre fileté M42 x 3 - 6g	XC 18	
REP.	NB	DÉSIGNATION	MATIÈRE	OBS.



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		<h2>BIELLE</h2>	<h2>ENP</h2> Dép. Mécanique
1:1	0.8 kg			
Etudiant	Tchanderli	03.0684	<h2>XC 18</h2>	<h2>SA11.00</h2>
Promoteur	Werner			

7	1	Ecrou H, M 8x1.25		
6	1	Rondelle M 8 N		
5	1	Vis H, M 8x1.25 -45		
4	2	Rondelle de réglage	CuSn7Zn5Pb4	à ajuster sur place.
3	1	Axe	XC 32	
2	1	Coussinet	CuZn 15	
1	1	Chape	XC 18	
REP	NB	DÉSIGNATION	MATIÈRE	OBS.

5.3.2. Fabrication du mécanisme

Cet ensemble a été réalisé, entièrement, dans notre atelier par nos soins. La majeure partie a été usinée sur tour et fraiseuse.

Le mécanisme a nécessité un long travail très minutieux à cause de l'obtention impérative des ajustements indiqués sur le dessin d'ensemble.

Il a fallu utiliser des outils, des instruments de mesure et de contrôle, des calibres, élaborer une gamme d'usinage en fonction de l'outillage disponible pour les machines outils de notre atelier (que nous ne n'indiquons pas, par souci d'éviter de surcharger le polycopé).

Le choix des ajustements (recommandés par l'ISO) nous ont été imposés par la cinématique fonctionnelle auquel elle est destiné le mécanisme. (REF. 5)

Une difficile et longue réparation a été faite mais heureusement réussie, c'est celle du secteur denté. Car il fallait conserver la coaxialité des diamètres fonctionnels (diamètres primitif de tête, ...) sinon l'organe était perdu.

La liaison entre l'organe denté et la chape est faite par l'intermédiaire d'un coussinet et de son axe.

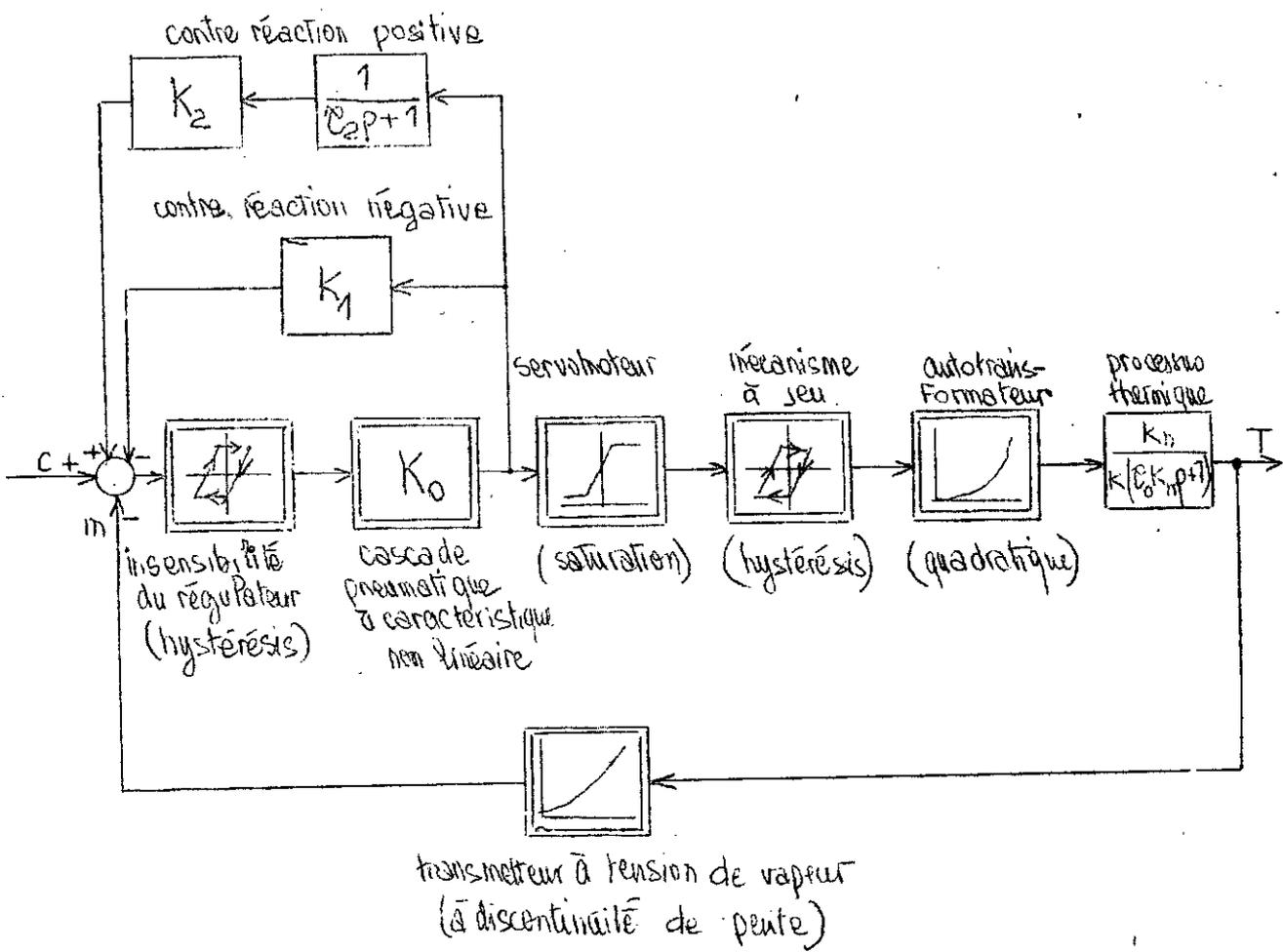
On a pratiqué un alésage dans le secteur (du côté opposé à la denture) puis emmancher de force un coussinet en laiton dans ce dernier. Le coussinet reçoit son axe apparié, l'axe étant immobilisé sur la chape.

Avant de construire le mécanisme on a pensé à vérifier certains éléments à la résistance. Celui le plus sollicité de l'ensemble est l'axe repéré par le nombre 3 sur le dessin d'ensemble du mécanisme. On a expérimentalement évalué l'effort nécessaire pour mouvoir tout le système (transfo, engrenage) à 75 N. Puis calculer la section minimale de l'axe, la section choisie vérifie largement ce critère.

VI ESSAIS

6.1 Mode de fonctionnement

Donnons le bloc diagramme réel de notre système asservi, déduit des expériences de mise en marche de l'asservissement. On a indiqué le genre de caractéristique non linéaire pour chaque organe.



Nous avons en principe, dans notre asservissement, un seul élément non linéaire mais plusieurs non-linéarités apparaissent dans notre système:

- Dans le régulateur: insensibilité.
- Dans le servomoteur: saturation.
- Au niveau de l'autotransformateur: caractéristique quadratique de la puissance électrique.
- Dans le capteur de température: caractéristique à discontinuité de pente de la pression.

Il faudra trouver un domaine de travail où les effets des non-linéarités accidentelles mentionnées ci-dessus deviendront négligeables et l'on pourra alors analyser ceux de la non-linéarité essentielle constituée par le mécanisme à jeu.

On doit observer l'instabilité du système asservi avec l'organe NL mais en éliminant le jeu par l'adjonction du contrepoids il deviendra stable.

Ceci détermine les exigences à l'égard de la partie linéaire de l'asservissement. Elle est composée par:

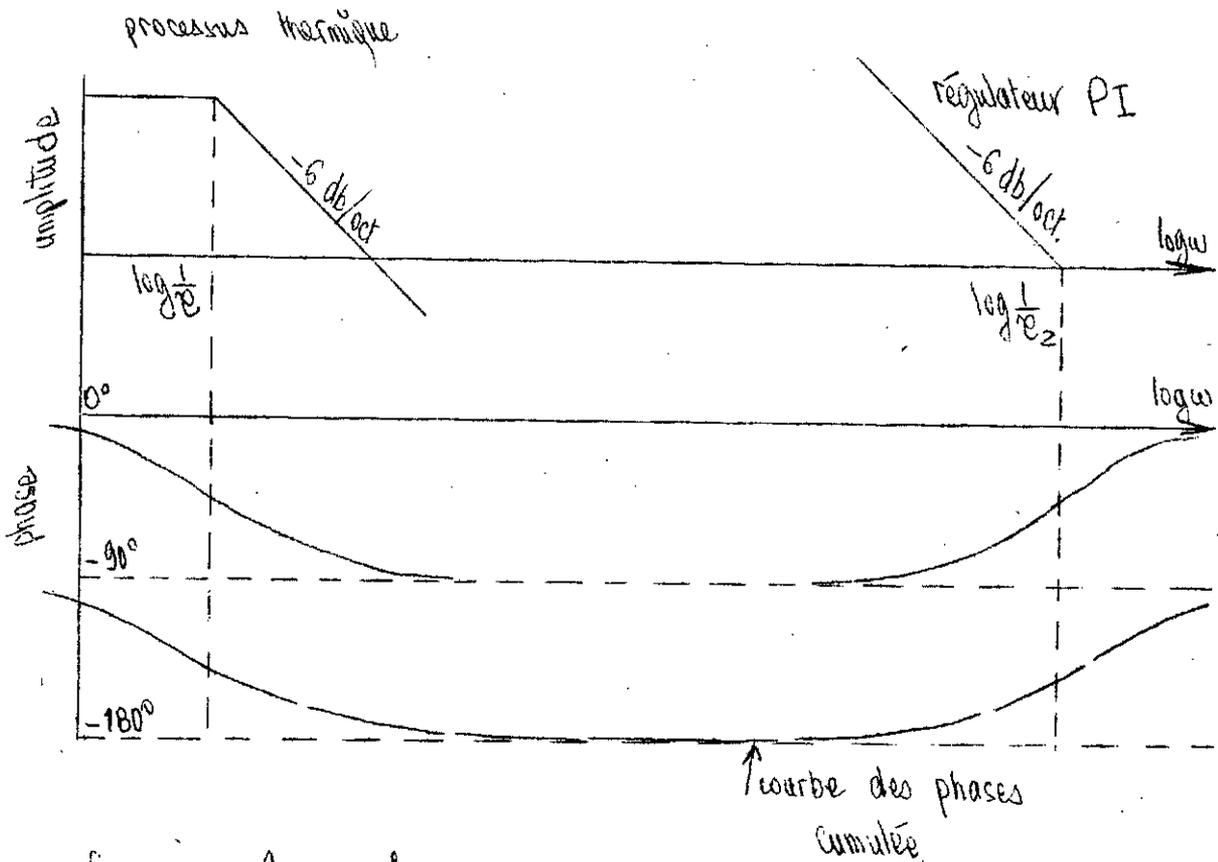
-Un élément à capacité constitué par le processus thermique (cf 4.2 page 25)

-Le régulateur PI.

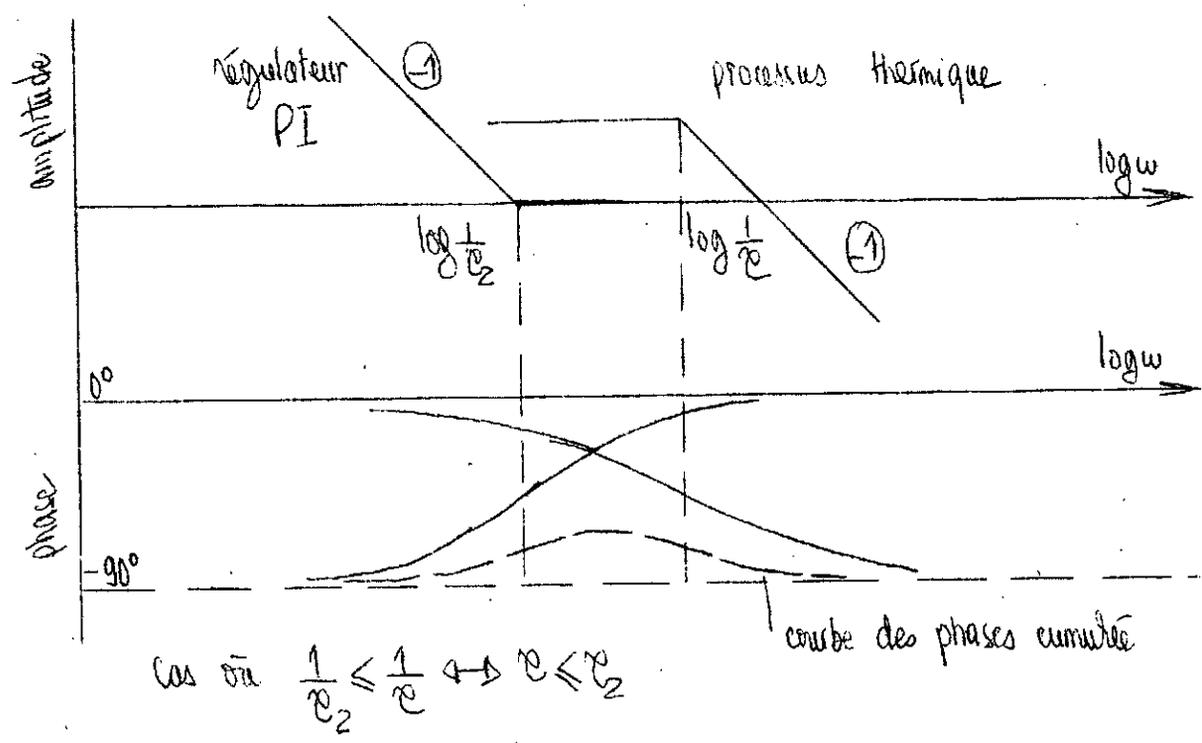
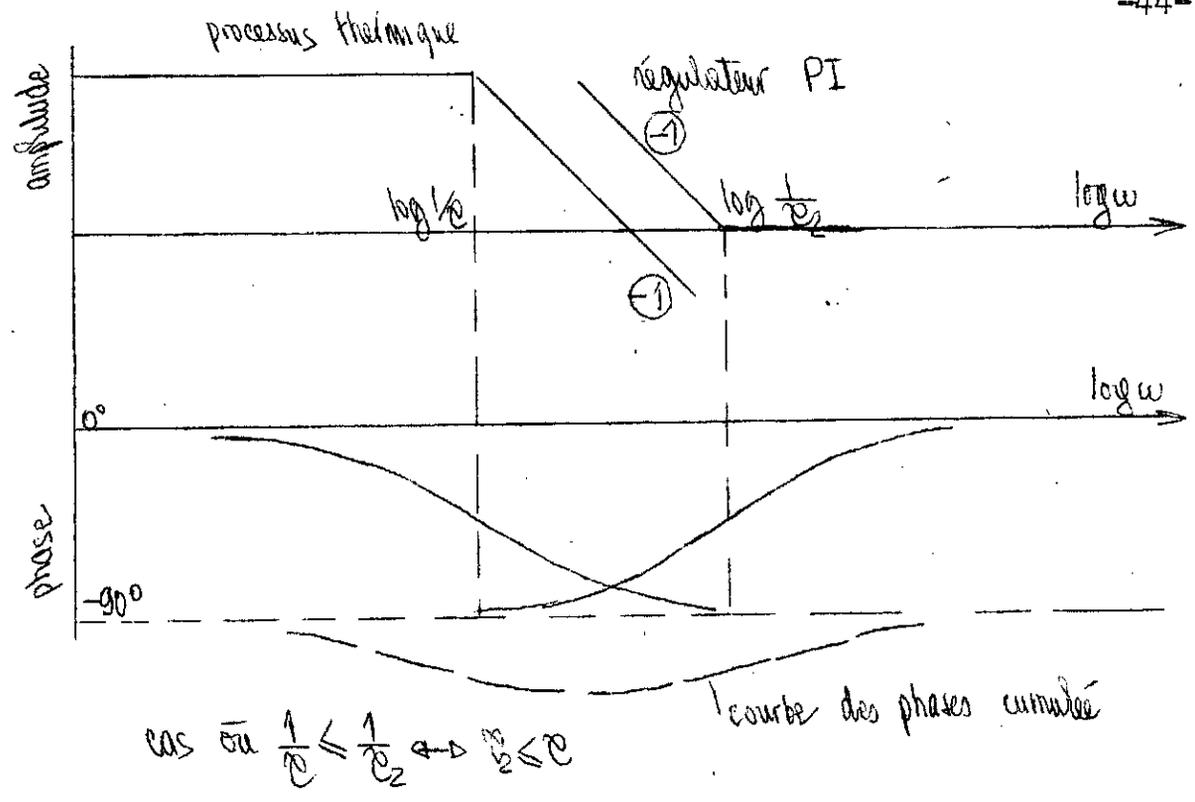
Pour observer l'instabilité (autooscillations) du système avec l'organe NL en action, il faut que le lieu de transfert $L(j\omega)$ de la portion linéaire et le lieu critique $-1/N(x_1)$ de l'élément NL, se coupent.

Donnons le diagramme de Bode de la partie linéaire du système asservi en supposant que le régulateur est idéal.

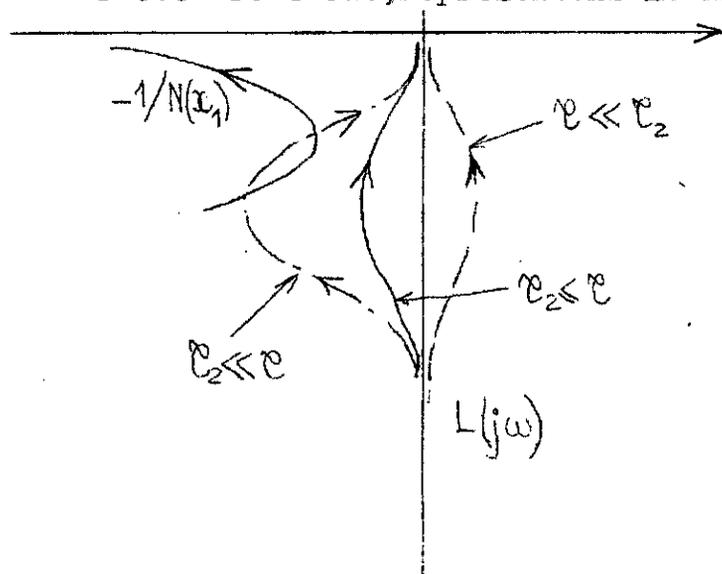
Nous avons trois possibilités:



Cas où $\frac{1}{\tau_1} \ll \frac{1}{\tau_2} \iff \tau_2 \ll \tau_1$

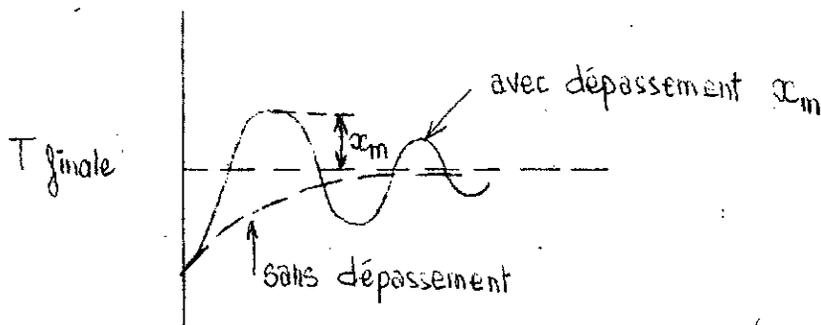


Pour ces trois cas, représentons le Niquist:



On conclut que la condition $c_2 \ll c$ est indispensable pour avoir l'intersection des lieux (instabilité du système NL). Notons que plus c_2 est court plus l'action intégrale est énergique.

Cela correspond à une réponse indicielle du système linéaire caractérisée par le dépassement de la valeur finale.



Une telle conclusion est évidente, car s'il n'y a pas de dépassement, la réponse est aperiodique, le jeu une fois rattrapé (du mécanisme) n'influe plus.

6.2 Recherche du point de travail, mise au point.

Examinons la fonction de transfert du régulateur, en ne tenant pas compte de la non-linéarité présente. Elle est donnée par: (voir le bloc schéma)

$$G(p) = \frac{K_0}{1 + (K_1 - K_2 \frac{1}{c_2 p + 1}) K_0}$$

qui s'écrit d'une autre manière, en divisant par K_0 et en multipliant par $(c_2 p + 1)$

$$G(p) = \frac{c_2 p + 1}{c_2 p (\frac{1}{K_0} + K_1) + \frac{1}{K_0} + K_1 - K_2}$$

Théoriquement pour un régulateur PI idéal, le gain K_0 est infini. Les gains K_1 et K_2 sont identiques et nous obtenons:

$$G(p) = \frac{\mathcal{C}_2 p + 1}{\mathcal{C}_2 p K_1}$$

fonction de transfert d'un régulateur PI idéal.

Mais réellement, K_0 n'est pas infini et $K_1 \neq K_2$ et la transmittance $G(p)$ dépend de ces trois coefficients. Écrivons la fonction de transfert sous une autre forme, en divisant par:

$$\left(\frac{-1}{K_0} + K_1 - K_2 \right) \text{ on obtient:}$$

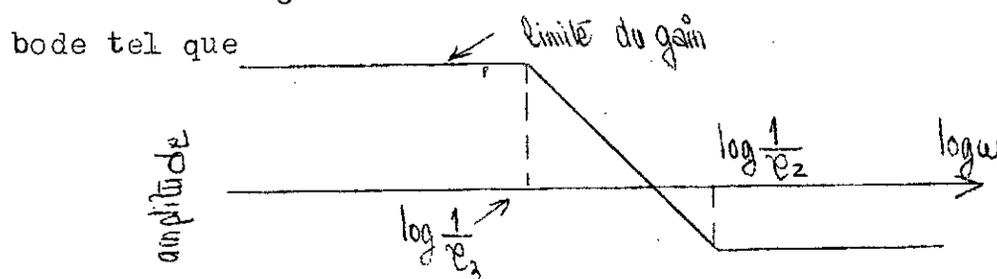
$$G(p) = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_0} + K_1 - K_2 \right)} \times \frac{\mathcal{C}_2 p + 1}{\left[\frac{\mathcal{C}_2 \left(\frac{1}{K_0} + K_1 \right)}{\frac{1}{K_0} + K_1 - K_2} \right] p + 1}$$

on pose l'expression entre $\left[\right] = \mathcal{C}_3$ et $G(p)$ s'écrit:

$$G(p) = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_0} + K_1 - K_2 \right)} \times \frac{\mathcal{C}_2 p + 1}{\mathcal{C}_3 p + 1}$$

6.2.1 Plage de fonctionnement & difficultés de mise au point.

Le terme $\frac{1}{\frac{1}{K_0} + K_1 - K_2}$ limite l'amplitude et on obtient un



Pour augmenter le gain et optimiser le régulateur (rapprocher notre régulateur au cas idéal) on peut diminuer la valeur du dénominateur: $\frac{1}{K_0} + K_1 - K_2$ en augmentant K_2 tel que $K_2 > K_1$. Mais nous sommes limité, car si on exagère on déstabilise le système à réguler. Cela est visible en analysant l'expression donnant la constante de temps \mathcal{C}_3 , si K_2 devient trop grand, \mathcal{C}_3 devient négative la racine de l'équation caractéristique est réelle positive, donc instabilité.

Alors pour rendre notre régulateur "plus idéal" il faut rame-

ner l'expression $1/(1/K_0 + K_1 - K_2)$ à une valeur positive très faible, ce qui est très difficile à cause de la manque de constance du coefficient K_0 (la cascade pneumatique n'est pas linéaire). Cela fait qu'il faut toujours laisser une marge de sécurité, on peut augmenter le gain statique, mais on ne peut jamais obtenir une action intégratrice pure.

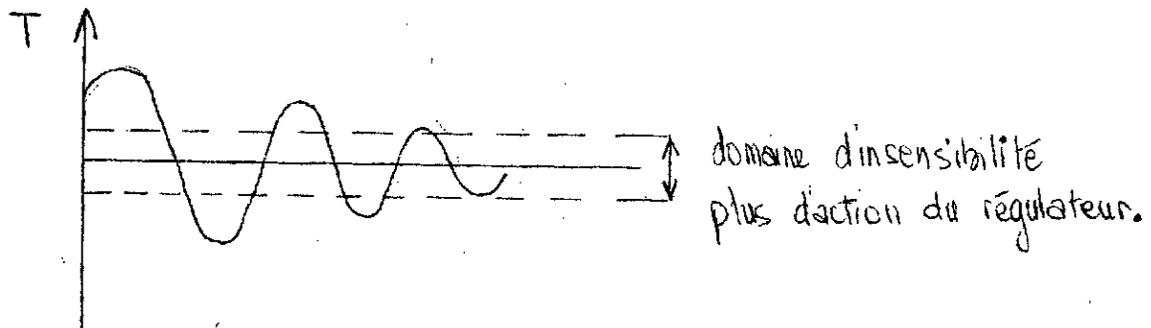
Les difficultés sont les suivantes:

(A) Le régulateur n'est pas PI

Il se comporte pour les régimes établis comme proportionnel à cause de K_0 qui n'est pas infini, puis il n'y a pas de dépassement. La solution est d'augmenter K_2 tel que $K_2 \gg K_1$ mais dans le cadre de ce qui a été dit en haut et aussi selon les remarques (c) et (d) du point suivant (C)

(B) Insensibilité du régulateur.

Cette insensibilité stabilise le système aux petites perturbations. C'est à dire si l'amplitude d'une perturbation ne dépasse pas une certaine plage de variation, le régulateur ne réagit plus.

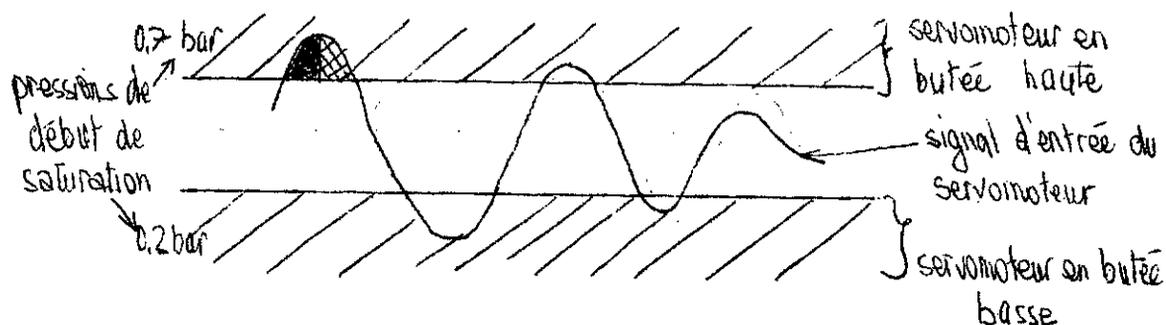


Après une petite recherche de la cause, il a fallu graisser certains pivots et endroits du côté du soufflet de mesure, notamment. L'huile a amélioré la situation mais ce n'est pas radical. On est donc conduit à envisager d'autres remèdes.

(C) Saturation du servomoteur.

Nous avons remarqué que l'organe de contrôle allait en butée haute ou basse avant que la régulation ait accompli son travail (annulation de l'erreur)

La saturation du positionneur peut conduire le système à des oscillations d'amplitude croissante, situation hautement instable (en asservissement linéaire.)



Durant la saturation en butée haute:

-Dans la zone noircie, le positionneur devrait augmenter la tension (puissance calorifique).

-Dans l'autre zone hachurée, au contraire le servomoteur doit diminuer la tension, mais il la maintient constante.

Ceci conduit à un chauffage excessif, d'où accroissement de la température de l'eau du bac.

Pour pallier à cela il faut:

(a) Introduire des perturbations d'amplitude pas trop grande à l'entrée du servomoteur afin d'éviter les zones de saturation.

(b) Agir manuellement sur la consigne pour limiter l'amplitude du signal à une valeur raisonnable, si nécessaire.

Il existe des régulateurs modernes qui éliminent par eux-même l'action I dès qu'il y a saturation de l'organe réglant. (Le nôtre est d'un type assez ancien.)

Pour remédier à ces deux maux: insensibilité du régulateur et saturation du servomoteur, il faut appliquer:

(*) -A l'entrée du régulateur, des oscillations, de grande amplitude, car les grandes amplitudes font que l'insensibilité du régulateur devient relativement faible.

-A l'entrée du positionneur, un signal dont les variations ne doivent pas empiéter sur les zones de saturation.

Pendant le cycle limite (les autooscillations) le gain total de la boucle ouverte est égale à l'unité.

Pour satisfaire alors aux exigences mentionnées ci-dessus il faut agir pour:

-Diminuer relativement le gain du régulateur.

-Augmenter les gains des autres éléments.

(c) Changement des propriétés du procédé thermique.

On augmente le gain statique K_n de la transmittance du processus par la diminution du débit d'eau D . On optimise par conséquent la réaction du procédé aux petites fluctuations.

Le coefficient K_n est donné par: (cf 4.2 page 25 et App. 2)

$$K_n = \frac{D_0}{D}$$

Pour garantir la constance de débit D , on été obliger d'alimenter le bac d'eau d'un réservoir à déversement.

(d) Augmentation de la température de sortie de l'eau.

On a élever la température de l'eau sortant du trop plein (en agissant sur la consigne), relativement à la température ambiante, d'une différence supérieur à vingt degrés celcius pour:

-Travailler avec une pente, la plus constante possible, tout le long de la plage de fonctionnement de la caractéristique du transmetteur à tension de vapeur. (cf REF.6)

-Obtenir des tensions adéquates (à la sortie du transfo) pour le même but que ci-dessus ainsi que des pentes $\frac{dP}{dU}$ assez élevées (cf 4.3.3 page 29).

Nous avons arranger le système de transmission de mouvement de telle façon qu'au départ la tension est de 70 volts.

Notons que l'augmentation du jeu du mécanisme entraine l'accroissement proportionnel de l'amplitude des oscillations auto-entretenues pour tous les points de la boucle. C'est pourquoi pour satisfaire aux exigences (*) il faut agir uniquement sur:

-Le gain du régulateur

-Le procédé thermique

-Par le choix du point de travail de l'autotransformateur.

6.3 Manipulation.

Nous avons enfin trouver un point de travail, définie par les données suivantes:

$$D = 1.66 \text{ dm}^3/\text{min}$$

Position de l'index de la restriction de l'action I du régulateur: 24.

Distances des curseurs des soufflets (par rapport à l'extrémité de leurs leviers):

-De la contre-réaction positive: 24,4 mm

-De la contre-réaction négative: 26.4 mm

Valeur de la consigne, nombre de graduations: 22.

Valeur du jeu du mécanisme (course réelle de l'axe: 9.5 mm

Température de l'eau chaude: 44° C (après régime établi)

Température de l'eau froide: 19° C.

Volume d'eau contenu dans le bac: $V = 7.8 \text{ l.}$

Constante de temps: $\tau = \frac{V}{D} = 4.7 \text{ min.}$

Nous accrochons le contrepoids pour débiter avec un asservissement linéaire (sans jeu), en laissant le système se stabilisé (il exige une demie heure environ.)

Nous détachons le contrepoids et nous perturbons le système par l'une des façons suivantes:

-En ouvrant momentanément le robinet de purge du réservoir d'intégration.

-En coupant temporairement l'eau froide.

-En poussant du doigt l'un des leviers du régulateur.

-En arrêtant provisoirement le moteur électrique de l'agitateur

Mais à condition que l'amplitude de la perturbation soit appréciable, d'où la commodité d'observer la variation résultante de la tension sur le vue mètre.

Nous avons choisit de lire les valeurs de la tension de sortie du transfo et la pression de sortie du régulateur toutes les 15 secondes. Pour pouvoir relever les pression, tension et temps, il faut être au plus à deux personnes, une troisième sera la bienvenue.

Après cela (étude de la dépendance des oscillations autoentretenus) on rattache le poids pour éliminer la non-linéarité essentielle.

6.4 Interprétation des courbes obtenues.

Les deux courbes ont été relevées pour le système NL puis tout de suite pour le système linéaire, à partir de l'instant

où l'on remet le contrepoids en place.

Le tableau donnant les différents points des courbes est sur les pages 54, 55. Les graphes ont été reproduits sur une feuille séparée.

Courbe de la pression de sortie du régulateur en asservissement NL.

L'amplitude et la fréquence des oscillations sont constantes, ceux sont des oscillations stables autoentretenues. C'est le cycle limite (dans le contexte du plan de phase.)

La sortie du régulateur est presque sinusoïdale, aux sommets des oscillations on remarque des paliers, leur présence est due à l'insensibilité du régulateur ainsi qu'à la précision de lecture de 0.01 bar sur le manomètre utilisé (celui du positionneur.)

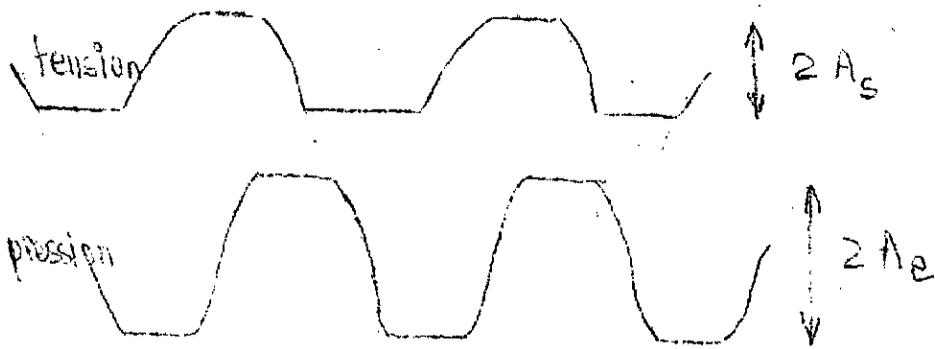
Cela s'explique par le fait que le processus thermique est lent, il fait partie de la portion linéaire du système, c'est en somme un filtre passe-bas (le système asservi est filtré.) Malgré la grande déformation de la courbe de la tension, à cause du jeu Δ , cela confirme et illustre ce qui avait été dit dans le paragraphe 3.1 ainsi que 3.2 pages 11 et 12.

Courbe de la tension aux bornes du thermoplongeur en asservissement NL.

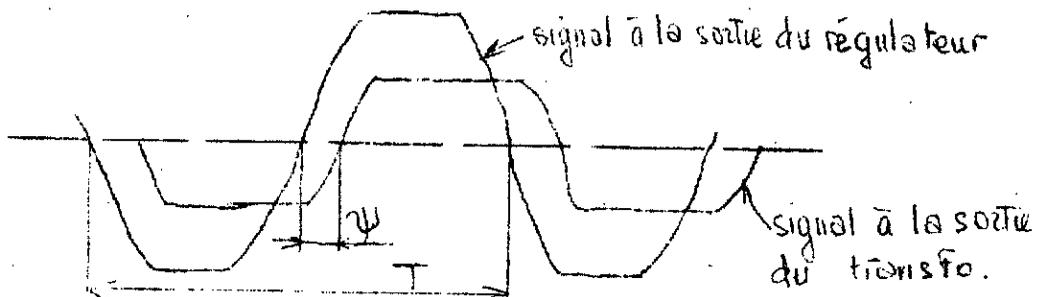
On remarque que cette courbe présente des paliers considérables qui coïncident partiellement avec ceux de la pression, ils ont pour cause principale le jeu. La sortie de ces paliers est assez brusque (la chute de la tension est brusque) car le transfo est entraîné, au moment où l'axe (du piston) entre en contact avec le cylindre (du mécanisme) après avoir rattraper le jeu, avec une vitesse non nulle. Cela est visible sur l'exemple de trajectoire de phase d'un tel système (cf fig 3.6 et 3.8 pages 22 et 23.)

Calculons le rapport de l'amplitude de sortie (du signal à la sortie du transfo) à celle de l'entrée (du signal de sortie du régulateur) de ce système asservi NL.

$$\frac{A_s}{A_e} = 153.84 \text{ volt/bar.}$$



Calculons le déphasage pour la montée et la chute de tension: Sans faire un calcul précis des premières harmoniques, on utilise pour trouver le déphasage, une méthode simplifiée consistant à comparer les instants de passage, des courbes (tension et pression) périodiques, par leurs axes.



$$\psi \text{ (rd)} = \frac{|\psi|_{\text{mm}}}{|T|_{\text{mm}}} \cdot 2\pi$$

On trouve $\bar{\psi}_{\text{montée}} = 30^\circ$ et $\bar{\psi}_{\text{chute}} = 20^\circ$

Cette différence résulte probablement d'une erreur de lecture, car nous avons relevé la tension à l'aide du vue mètre, ce dernier n'étant pas assez précis et appartenant à une classe de 2.5. L'emploi d'un voltmètre de mesure de laboratoire améliorera la situation.

Passage du système NL au système linéaire.

Pour supprimer la non-linéarité essentielle et obtenir un système linéaire il suffit d'enrouler dans le bon sens le fil, auquel est attaché le contrepoids, autour de la poulie solidaire au curseur du transfo, de telle façon que l'on maintient la même position du curseur (on ne doit pas observer un saut ou une chute de la tension.)

Après attachement du poids, on continue l'observation. On constate alors:

- Un amortissement sensible sur les deux courbes.
- Une augmentation du rapport d'amplitudes:

$$\frac{A_s}{A_e} = 250 \text{ volt/bar}$$

-Pas de déphasage notable.

Les paliers sur les deux graphiques ont pour cause probable le manque de précision de lecture (pression: 0.01 bar, tension: 10v)

Nous pouvons trouver d'autres points de travail beaucoup plus avantageux si nous évoluons dans le domaine des tensions assez élevées de l'ordre de 190 à 210 volts.

Conclusion

L'attachement du poids suffit à stabiliser le système, sa suppression le destabilise.

Le jeu consomme près de 40% de l'amplitude pour l'asservissement NL.

L'effet de la présence d'une non-linéarité dans un système évoluant dans certaines conditions particulières (cf 3.3 page 15) est prépondérant sur le comportement de l'assevissement (stabilité, instabilité.)

Tableau donnant la pression P (en bar) à la sortie du régulateur et la tension V (en volt) à la sortie de l'autotransformateur, correspondante, relevées toutes les 15 secondes.

P	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P	V
0.41	125	0.5 ⁺	133	0.39	114	0.4 ⁺	126	0.51 ⁻	134	0.46	121
0.4	122	0.5 ⁺	134	0.4	114	0.4	121	0.51 ⁻	135	0.47	123
0.39	120	0.5 ⁺	135	0.4	114	0.39	120	0.51 ⁻	135	0.47 ⁺	125
0.38 ⁺	119	0.5 ⁺	135	0.41	114	0.38 ⁺	119	0.51 ⁻	135	0.47 ⁺	126
0.38	118	0.5 ⁺	135	0.42	114	0.38 ⁻	116	0.51 ⁻	135	0.48	127
0.38 ⁻	116	0.5 ⁻	135	0.43 ⁺	115	0.37	115	0.5	134	0.48 ⁺	129
0.37 ⁺	115	0.49 ⁺	135	0.44	118	0.37	114	0.49 ⁺	133	0.48 ⁺	130
0.37	115	0.48 ⁺	135	0.45 ⁺	120	0.37 ⁻	114	0.48 ⁺	131	0.49 ⁻	130
0.37	115	0.48 ⁻	135	0.46 ⁺	123	0.37 ⁻	114	0.48 ⁻	130	0.49 ⁻	130
0.37	115	0.47	135	0.47	128	0.37 ⁻	114	0.47	129	0.49 ⁻	130
0.38	115	0.46	135	0.48	129	0.37 ⁻	114	0.46	126	0.49	130
0.38	115	0.44 ⁺	133	0.49	130	0.37 ⁻	114	0.45 ⁺	124	0.49 ⁻	130
0.38	115	0.44 ⁻	131	0.49 ⁺	131	0.38 ⁻	114	0.45 ⁻	122	0.48 ⁺	130
0.38 ⁺	115	0.42	130	0.5 ⁻	132	0.38 ⁺	114	0.44	120	0.48 ⁺	130
0.39	115	0.41 ⁺	126	0.5	134	0.39	114	0.44 ⁻	120	0.48	130
0.4	115	0.4	122	0.5	134	0.4	114	0.43 ⁺	119	0.48	129
0.41	115	0.39 ⁺	120	0.5 ⁺	135	0.41	114	0.43	117	0.47	129
0.42	115	0.38 ⁺	119	0.51 ⁻	135	0.42	114	0.43	117	0.46 ⁺	126
0.43	115	0.38 ⁺	118	0.5 ⁺	135	0.43	114	0.43 ⁻	116	0.46	125
0.44	115	0.38 ⁻	116	0.5	135	0.44	115	0.43	115	0.46	123
0.45	119	0.37	115	0.5 ⁻	135	0.46	121	0.43	116	0.46	122
0.46	121	0.37	114	0.49	135	0.47	123	0.43	116	0.45	120
0.47	124	0.37	114	0.48	135	0.48 ⁻	125	0.43 ⁺	116	0.44 ⁺	120
0.48	126	0.37	114	0.47 ⁻	135	0.48 ⁺	129	0.44 ⁻	117	0.44	120
0.48 ⁺	129	0.37	114	0.46 ⁻	135	0.49	130	0.44	118	0.44	120
0.49	131	0.37 ⁺	114	0.44 ⁺	135	0.5 ⁻	131	0.45 ⁻	120	0.44	119
0.5 ⁻	132	0.38 ⁻	114	0.43	133	0.5	133	0.45	120	0.44	119
0.5 ⁻	133	0.38	114	0.42	129	0.51 ⁻	134	0.46 ⁻	120	0.44	119

(Suite du tableau)

<u>P</u>	<u>V</u>
0.44	119
0.44	119
0.44	119
0.44	119
0.44	119
0.44	119
0.44	119
0.45	120
0.45	120
0.46	121

On a souligné le couple de valeurs à partir duquel le jeu avait été supprimé.

CONCLUSION

Toutes les espérances ont été satisfaites, le banc a été mis en marche et prêt à fonctionner, enrichissant ainsi notre laboratoire d'un TP très utile. Le système comprend des éléments peu courants dans l'application industrielle moderne, c'est en fait un appareillage unique en son genre et inestimable, que les étudiants découvriront lors de leur manipulation.

Les modifications apportées au banc ont permis l'étude de l'influence de la non-linéarité dans un système asservi.

J'ai acquis une abondante expérience au contact des gens du métier et au cours des différents travaux d'atelier que j'ai effectués. En collaboration étroite avec les différents ateliers de l'Ecole, avec de la volonté et de simples moyens, la mise en marche d'équipements de laboratoire est très possible. Un effort est à faire en ce sens, dans les projets futurs.

"Et s'il est une Science qui mérite, pour être bien comprise, le "contact industriel", c'est la Régulation envisagée comme telle, dans son contexte réel, et non comme un cas particulier de la théorie trop classique des Systèmes Asservis....

Les applications dans le domaine industriel et les problèmes pratiques doivent être progressivement inclus sous forme pédagogique dans des Travaux Dirigés et complétés sous forme manuelle dans des Travaux Pratiques, avec une synthèse finale sous forme d'un stage prolongé de deux ou trois mois dans l'industrie."

Extrait d'un préface de
Lefteri SIDERIADES .

APPENDICES

Appendice 1:

Les systèmes représentés par les équations linéaires à coefficients variables (fonctions du temps) sont, pour les mathématiciens, des systèmes linéaires. Les ingénieurs les appellent "systèmes linéaires à coefficients variables", réservant la qualification de "systèmes linéaires" aux systèmes régis par des équations linéaires à coefficients constants.

Appendice 2:

La température de l'eau chaude est donnée par: (cf 4.2 page 25)

$$\bar{T} = \bar{Q} \frac{1}{D \rho C} \frac{1}{\epsilon_p + 1} + \bar{T}_0 \frac{1}{\epsilon_p + 1}$$

Si la température de l'eau froide T_0 demeure constante, la grandeur T ne dépend que du débit de chaleur Q et on a:

$$\bar{T} = \bar{Q} \frac{1}{D \rho C} \frac{1}{\epsilon_p + 1}$$

qu'on transforme en posant:

$$\epsilon_0 = \frac{V}{D_0} \quad D_0 \text{ étant un débit initial arbitrairement choisi, fixe.}$$

$$\epsilon = \frac{V}{D} = \frac{V}{D_0} \frac{D_0}{D} = \epsilon_0 \frac{D_0}{D} \quad \text{posons } \frac{D_0}{D} = K_n$$

et il vient que:

$$\frac{1}{D \rho C} \times \frac{1}{\epsilon_p + 1} = \frac{K_n}{D_0 \rho C} \times \frac{1}{\epsilon_0 K_n p + 1}$$

Si on pose $D_0 \rho C = K$, la forme finale est:

$$\bar{T} = \bar{Q} \frac{1}{K} \frac{K_n}{\epsilon_0 K_n p + 1}$$

BIBLIOGRAPHIE

- REF 1: Méthodes d'étude des systèmes asservis non linéaires.
J. CH. GILLE DUNOD 1967
- REF 2: Introduction aux systèmes asservis non linéaires
J. CH. GILLE DUNOD 1977
- REF 3: Analysis and design of nonlinear feedback control systems.
THALER & PASTEL Mc GRAW-HILL 1962
- REF 4: Instrumentation industrielle
MICHEL CERR TECHNIQUE & VULGARISATION 1976
- REF 5: Guide du dessinateur industriel
A. CHEVALIER HACHETTE 1978
- REF 6: Technique de la régulation industrielle.
DANIEL DINDELEUX EYROLLES 1981