

**Titre:** Manipulation sur la régulation en fréquence et en tension dans le cadre des travaux pratiques sur la "Synthèse des automatismes industriels"  
Title:

**Auteurs:** L. Audette, & Jules O'Shea  
Authors:

**Date:** 1980

**Type:** Rapport / Report

**Référence:** Audette, L., & O'Shea, J. (1980). Manipulation sur la régulation en fréquence et en tension dans le cadre des travaux pratiques sur la "Synthèse des automatismes industriels". (Rapport technique n° EP-R-80-39).  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/6013/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6013/>  
PolyPublie URL:

**Version:** Version officielle de l'éditeur / Published version

**Conditions d'utilisation:** Tous droits réservés / All rights reserved  
Terms of Use:

## Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

**Institution:** École Polytechnique de Montréal

**Numéro de rapport:** EP-R-80-39  
Report number:

**URL officiel:**  
Official URL:

**Mention légale:**  
Legal notice:

BIBLIOTHÈQUE

OCT 31 1980

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL



# DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

## SECTION AUTOMATIQUE

EP80-R-39

Classification of Library Congress No.....

— Manipulation sur la régulation en fréquence  
et en tension dans le cadre des  
Travaux Pratiques sur la  
"Synthèse des Automatismes Industriels"

par

L. AUDETTE

et

J. O'SHEA

JUIN 1980

# Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ

UP 5

R80-39

ex.2

Campus de l'Université  
de Montréal  
Case postale 6079  
Succursale 'A'  
Montréal, Québec  
H3C 3A7

Bibliothèque

COTE

CA2PQ

UP 5

R80-39

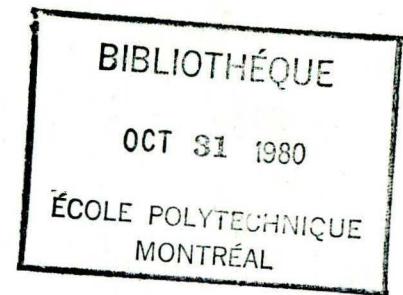
CH. 2

Ecole  
Polytechnique

MONTRÉAL

131438-X





EP80-R-39

Classification of Library Congress No.....

— Manipulation sur la régulation en fréquence  
et en tension dans le cadre des  
Travaux Pratiques sur la  
"Synthèse des Automatismes Industriels"

par

L. AUDETTE

et

J. O'SHEA

JUIN 1980

## 1. Objectifs

Ce projet de travaux pratiques consiste en l'application de techniques classiques des asservissements pour la mise au point des boucles de régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale électrique fonctionnant dans un réseau autonome.

Les étapes principales de cette étude sont:

- 1) l'identification du système en boucle ouverte
- 2) l'étude du comportement du système en boucle fermée
- 3) la mise au point des boucles de régulation de fréquence et de tension.

## 2. Présentation du système

Le système décrit schématiquement à la figure I est composé des éléments suivants:

- Moteur à courant continu TAMPER modèle M 1422

puissance 3 HP  
vitesse nominale 1750 tpm  
excitation séparée 120 volts

- Générateur triphasé TAMPER modèle SG 1020

puissance 2.5 kVA  
vitesse 1800 tpm, fréquence 60 Hz  
tension 120 - 208 - 240 volts  
inducteur 120 volts

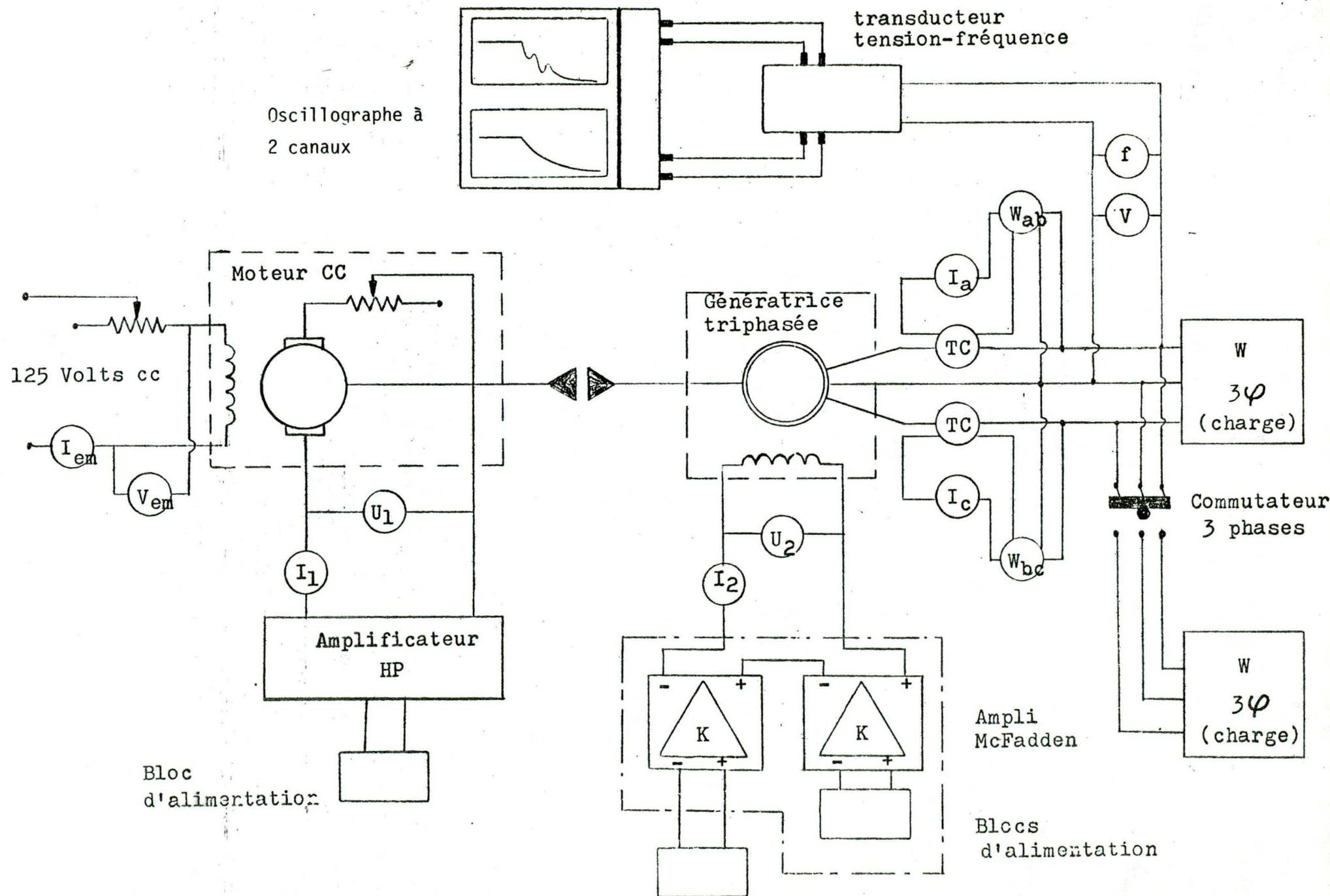
- Panneaux d'instrumentation et de câblage
- Amplificateur de puissance Hewlett-Packard modèle SCR-10
  - puissance 10 kVA
  - tension maximale 250 volts
- Amplificateur de moyenne puissance McFadden à gain réglable de 2 à 10
  - tension maximale de sortie 62 volts
- Blocs d'alimentation HP (fournissent les tensions de référence)
- Transducteur de tension - fréquence

D'autres appareils sont nécessaires mais ne font pas partie intégrante du système: appareils de mesures, oscilloscopes, etc. De plus, une calculatrice analogique est nécessaire pour la construction des compensateurs.

Dans ce système, le moteur agit comme la turbine d'une centrale électrique, entraînant un alternateur qui débite de la puissance à un réseau de distribution. Ce réseau est simulé ici par une charge triphasée constituée de lampes et, possiblement, d'un autotransformateur et de condensateurs. Dans un réseau électrique, la charge varie constamment, à cause des machines, appareils et dispositifs d'éclairage qui sont mis en service ou hors service. Cette variation de la charge sera simulée au moyen d'une charge supplémentaire qui sera soit ajoutée à la charge nominale, soit par un commutateur triphasé. Un diagramme de l'ensemble de ce système est présenté à la figure 1.

Le problème à résoudre consiste à maintenir pour la clientèle une tension et une fréquence constantes malgré les variations de la charge. Il s'agit donc de construire les compensateurs nécessaires pour atteindre

Figure I - Schéma de principe du montage



cet objectif.

## 2.1 Transducteur de tension - fréquence [Référence 2]

Le système de commande ou de compensation du groupe moteur-alternateur nécessite un capteur intermédiaire dans les boucles de retour pour produire des signaux des variables surveillées (tension et fréquence) compatibles aux blocs de traitement. De plus, l'identification du système suppose une méthode simple de mesure et d'enregistrement de ces variables. Le transducteur de tension-fréquence montré à la figure II est un appareil qui satisfait ces exigences.

Le transducteur de tension est indépendant de celui de fréquence. Il fournit un signal continu (DC) en échantillonnant et en bloquant la valeur des maxima instantanés du signal alternatif préalablement redressé (double alternance).

Le transducteur de fréquence dépend du premier en ce qu'il y tire son information d'échantillonnage. La sortie est une tension continue proportionnelle à la fréquence et réévaluée à toutes les demi-périodes du signal alternatif.

Les niveaux d'entrée peuvent varier entre 0 et 250 volts et la fréquence entre 30 et 90 hertz.

Par exemple, si on calibre le transducteur pour un point de fonctionnement de 120 volts et 60 Hz, les relations entrées-sorties seront caractérisées par les courbes ci-dessous:

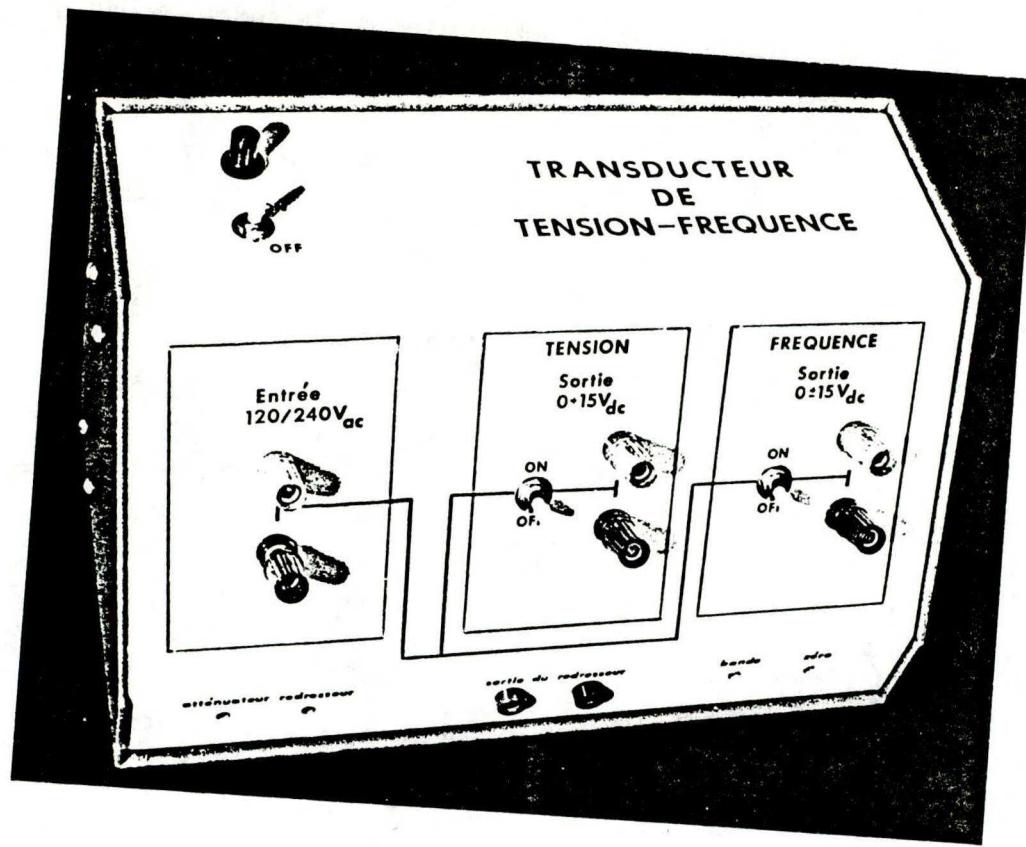
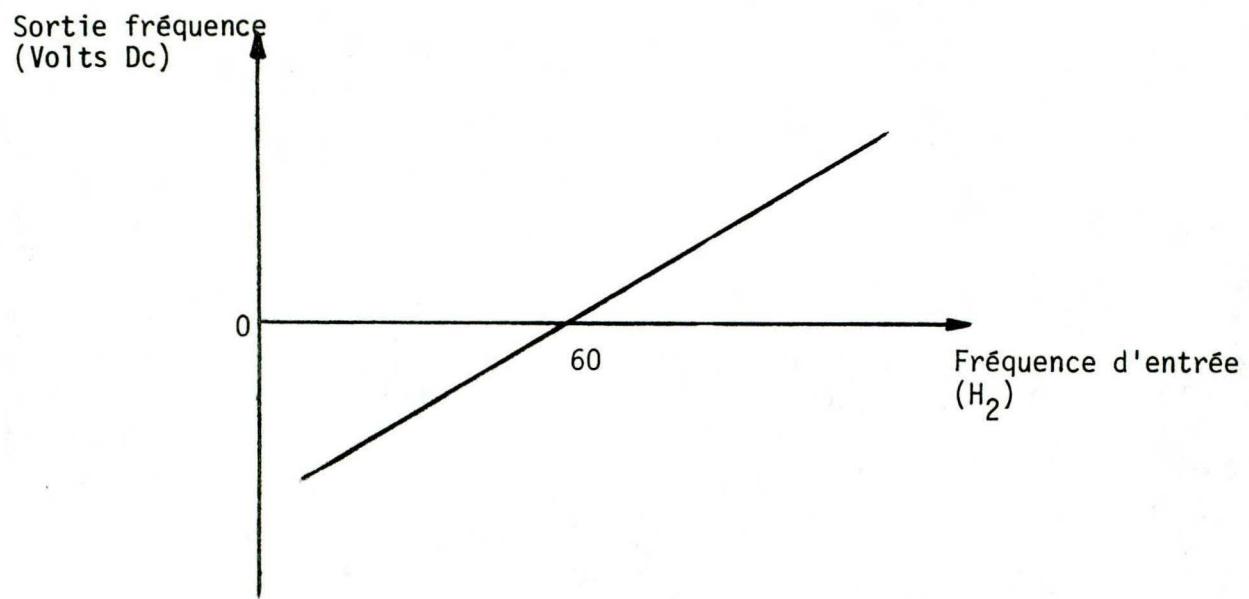
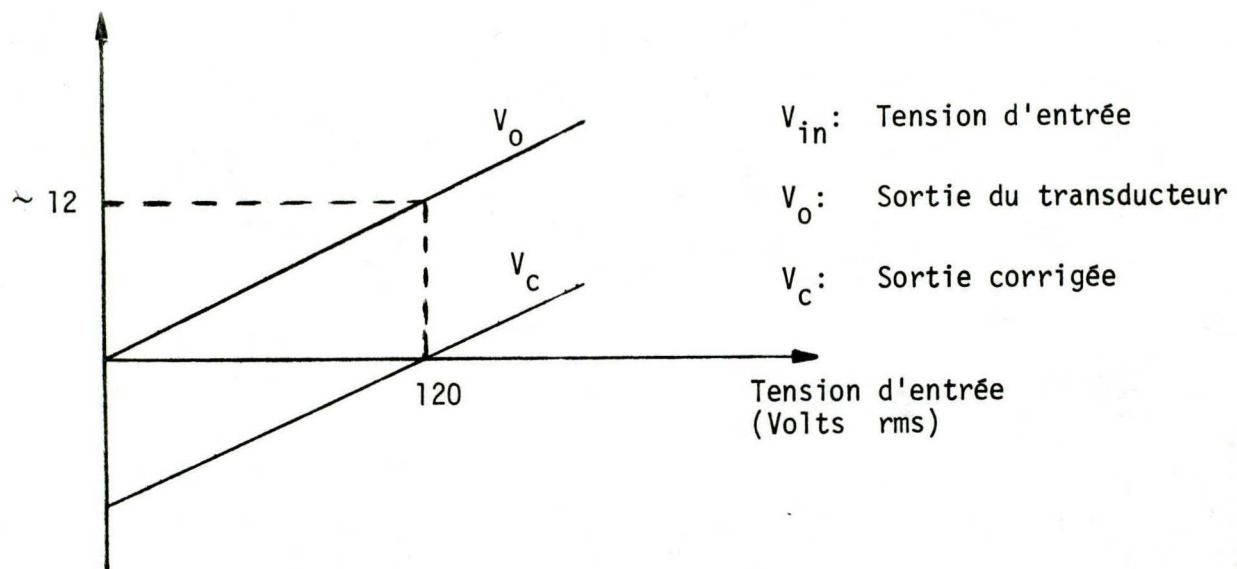
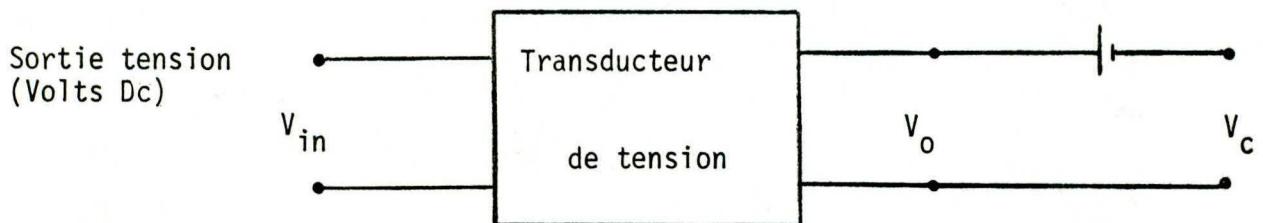


Figure II - Transducteur de tension - fréquence



Lorsque l'on fait de la compensation, on est intéressé à obtenir un signal qui soit proportionnel à l'écart entre la quantité réelle et la quantité nominale de la variable surveillée, avec une valeur nulle pour la valeur nominale. Le transducteur de fréquence satisfait cette exigence. Par contre, il faudra soustraire au signal de tension une valeur DC (ici environ 12 volts) en plaçant une source DC en série avec cette sortie, de façon à déplacer la courbe comme indiqué sur les figures précédentes. Cette correction est également pratique pour obtenir de bons enregistrements au moyen de l'oscilloscophe.

### 3. Identification du système

L'identification détaillée du système à partir des caractéristiques des machines et appareils exigerait de nombreux essais et calculs. Aussi, est-il plus simple de considérer le système comme une boîte noire à trois entrées et deux sorties dont on identifie les fonctions de transfert, à partir desquelles on peut trouver un modèle du système dans le domaine temporel ("équations d'état"). Le système est alors représenté tel que ci-dessous:

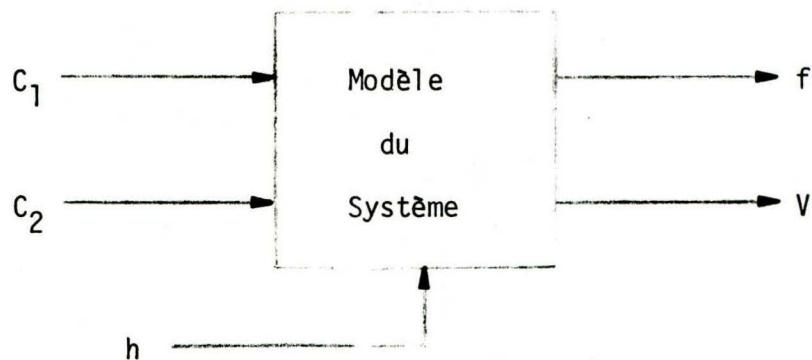


Figure III

où

$C_1$  = entrée de l'amplificateur de puissance (HP) qui génère la tension d'induit du moteur C.C.

$C_2$  = entrée de l'amplificateur moyenne puissance (McFadden),  
qui produit la tension d'inducteur de la génératrice

$h$  = charge en watts

$f$  = sortie "fréquence" du transducteur (volts DC)

$V$  = sortie "tension" du transducteur (volts DC)

Le système physique étant très non-linéaire, le modèle est linéarisé autour d'un point de fonctionnement  $C_1 = C_{10}$ ,  $C_2 = C_{20}$ ,  $h = h_0$ .  
Alors les équations de base de ce système sont:

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & F_1(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & F_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1(s) \\ C_2(s) \\ h(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(s) \\ V(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec, pour  $C_2 = C_{20}$  et  $h = h_0$

$$G_{11}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta C_1(s)} \quad (2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta C_1(s)} \quad (3)$$

de même, pour  $C_1 = C_{10}$  et  $h = h_0$

$$G_{22}(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta C_2(s)} \quad (4)$$

$$G_{12}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta C_2(s)} \quad (5)$$

et, pour  $C_1 = C_{10}$  et  $C_2 = C_{20}$

$$F_1(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta h(s)} \quad (6)$$

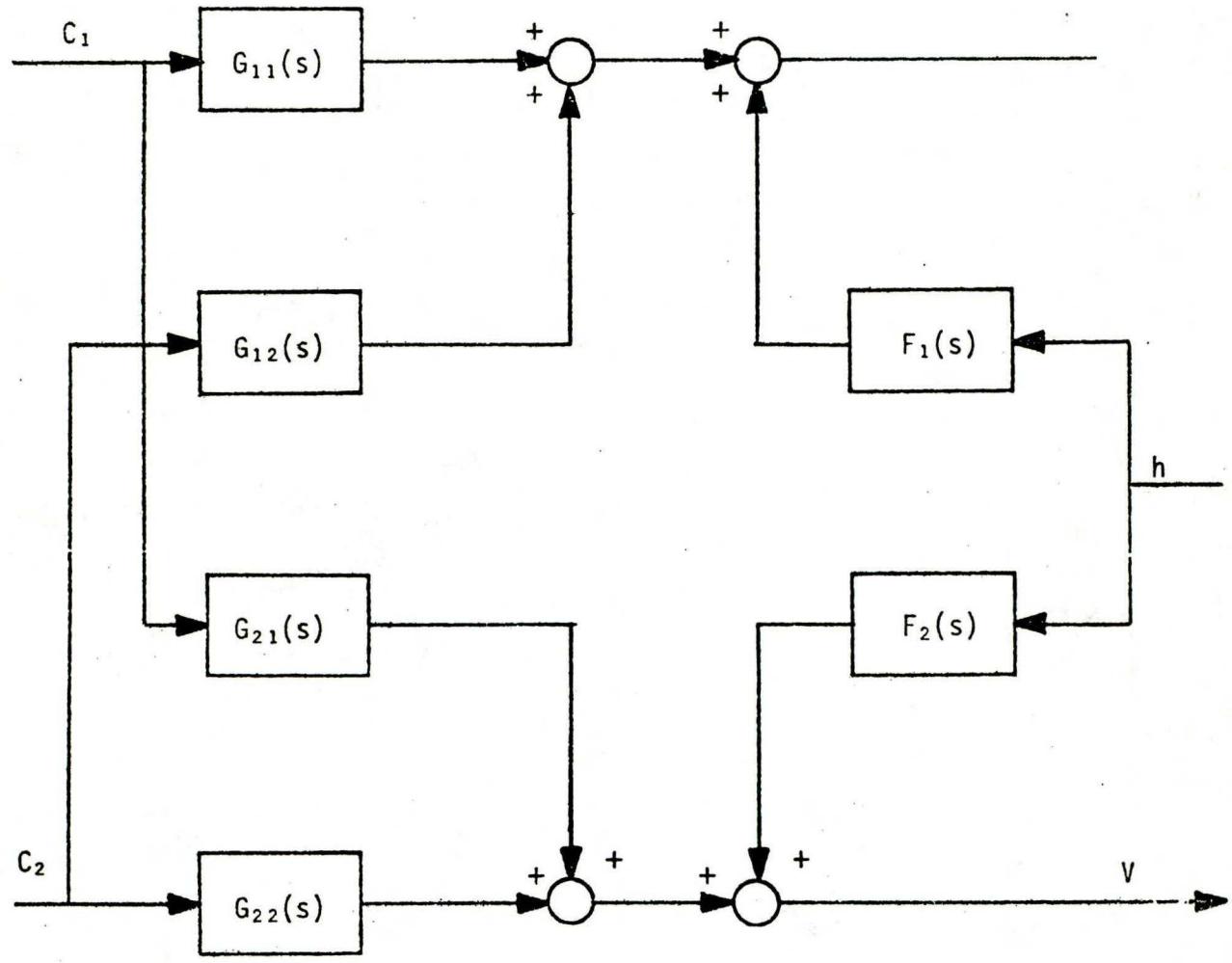
$$F_2(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta h(s)} \quad (7)$$

On obtient alors le diagramme fonctionnel du système tel que montré à la figure IV.

Il convient de rappeler que les fonctions de transfert obtenues pour un point de fonctionnement ne sont pas valables pour un point de fonctionnement différent du premier puisque le système est non-linéaire.

L'identification des fonctions de transfert de type G est effectuée à l'aide de tests harmoniques (réponses en fréquence) et de réponses à l'échelon.  $F_1$  et  $F_2$  sont identifiées à partir des réponses à un échelon de charge, appliquée par le commutateur triphasé.

Pour obtenir la réponse en fréquence d'une sortie par rapport à une entrée, il s'agit de mettre en série avec le bloc d'alimentation de référence de l'entrée concernée, un générateur de basse fréquence (les fréquences d'intérêt se situent entre 0 et 10 Hz). En reliant à un canal de l'oscilloscopie la sortie du générateur de fréquence et à l'autre canal la sortie appropriée du transducteur, on obtient l'information nécessaire pour établir les courbes de gain et de phase de la réponse en fréquence. Il est préférable d'utiliser un générateur de fréquence avec un décalage DC ou "offset", variable; ceci permet de faire les tests de réponse à l'échelon sans modifier le circuit.



Les fonctions de transfert trouvées à partir des différents tests sont une approximation des fonctions de transfert réelles, et il faut limiter l'ordre de ces fonctions (des fonctions d'ordre inférieur ou égal à 3 sont généralement acceptables dans ce cas-ci) pour éviter de compliquer inutilement l'analyse, la simulation et la synthèse subséquente du système de régulation.

#### 4. Compensation de type proportionnel

##### 4.1 Considérations préliminaires

Dans l'asservissement classique des réseaux, on définit intuitivement deux boucles:

- une boucle de régulation de fréquence qui fait agir par rétroaction la variation de fréquence sur la commande du sous-système moteur. C'est une boucle lente, qui réagit à moyen terme.
- une boucle de régulation de tension qui fait intervenir les variations de la tension générée sur l'excitation de la génératrice. Son action est relativement rapide.

Les compensateurs sont du type PI, puisque l'on désire aucune erreur en régime permanent sur la tension et la fréquence.

Toutefois dans le montage étudié, il existe un fort couplage entre les deux sous-systèmes, de sorte qu'une variation de  $C_1$  agit à la fois sur  $f$  et  $V$ , comme le fait aussi une variation de  $C_2$ . Aussi, est-il plus indiqué de commencer par l'étude du compensateur le plus simple: celui de type proportionnel, pour lequel l'analyse est moins complexe et la visualisation des phénomènes plus facile que dans le cas du compensateur PI.

##### 4.2 Influence des entrées sur les sorties; analyse de la stabilité

La première étape de l'étude du système compensé consiste à déterminer les expressions qui relient chacune des sorties du système à chacune des entrées, et à déterminer quelles valeurs de  $P_1$  et de  $P_2$  (définis à la figure V) assurent la stabilité du système. Il s'agit

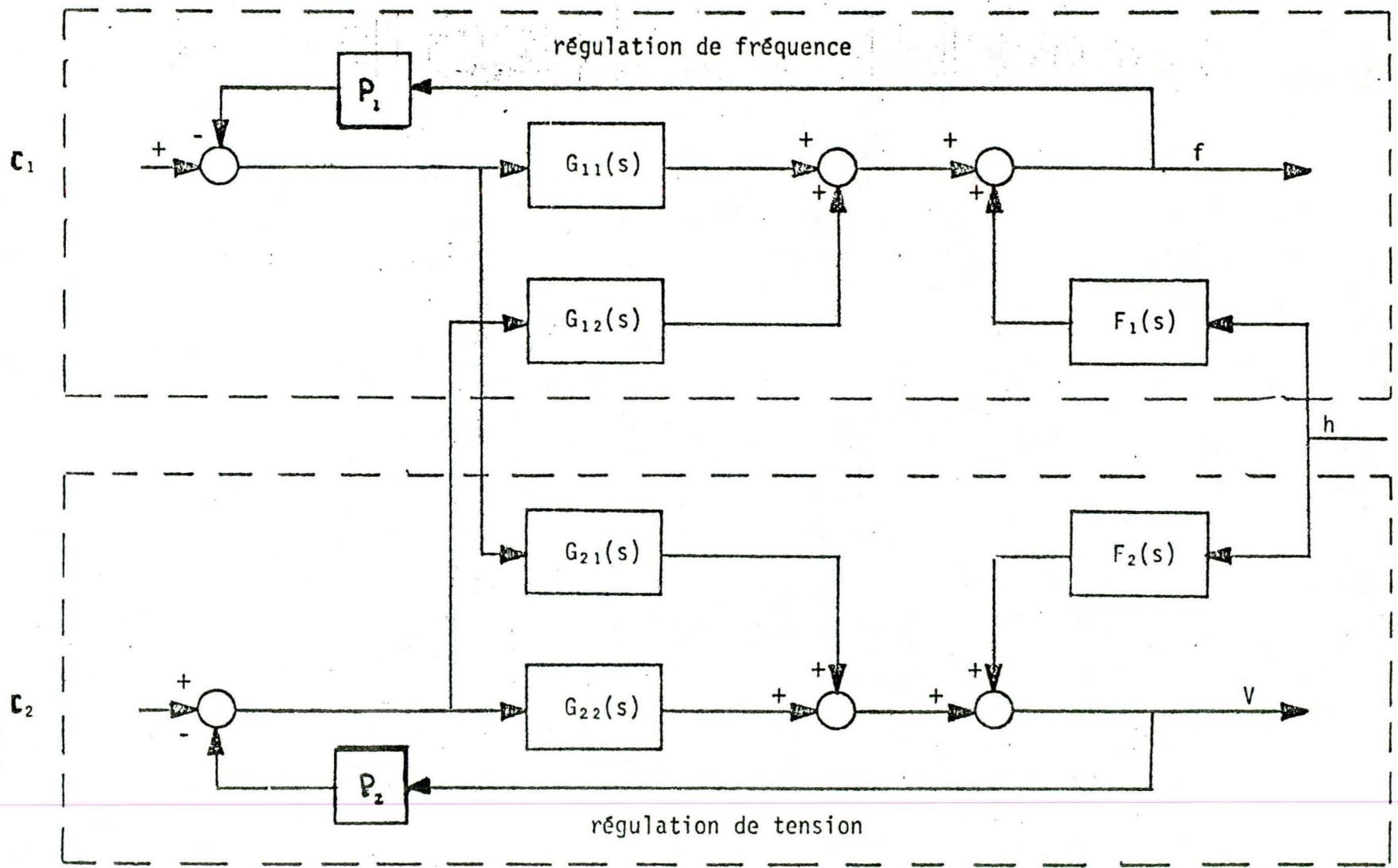


Figure V - Régulation de tension et de fréquence du type P

donc de:

1) trouver pour  $P_2 = 0$

$$\frac{\Delta f}{\Delta C_1}, \frac{\Delta V}{\Delta C_1}, \frac{\Delta f}{\Delta h}, \frac{\Delta V}{\Delta h}$$

On peut alors déterminer quelles valeurs de  $P_1$  assurent la stabilité en l'absence de contre-réaction de tension

2) trouver pour  $P_1 = 0$

$$\frac{\Delta V}{\Delta C_2}, \frac{\Delta f}{\Delta C_2}, \frac{\Delta V}{\Delta h}, \frac{\Delta f}{\Delta h}$$

On peut déterminer les valeurs de  $P_2$  qui assurent la stabilité en l'absence de contre-réaction de fréquence

3) trouver pour  $P_1 \neq 0, P_2 \neq 0$

$$\frac{\Delta f}{\Delta C}, \frac{\Delta f}{\Delta C_2}, \frac{\Delta f}{\Delta h}, \frac{\Delta V}{\Delta C_1}, \frac{\Delta V}{\Delta C_2}, \frac{\Delta V}{\Delta h}$$

C'est à partir des expressions trouvées en (1), (2) et (3) que l'on peut déterminer quelles valeurs de  $P_1$  et de  $P_2$  assurent la stabilité du système avec deux boucles de contre-réaction.

Le lecteur trouvera en [1] un exemple de ces calculs qui demeure utile même si la configuration du système utilisée est différente de celle de la figure V (localisation différente des compensateurs).

Les expressions en (1), (2) et (3) peuvent être obtenues à partir de l'analyse du diagramme fonctionnel ou du diagramme de fluence.

Les expressions trouvées en (3) permettent d'acquérir une bonne connaissance du comportement du système en présence de variations des différentes entrées. Ces expressions peuvent être vérifiées de façon qualitative (grandeur et signe) au laboratoire. De plus, la comparaison du système réel compensé (pour  $P_1$  et  $P_2$  quelconques, assurant la stabilité) au système simulé compensé (pour les mêmes valeurs de  $P_1$  et  $P_2$ ) permet de vérifier la précision du modèle mathématique utilisé.

#### 4.3 Calcul du compensateur optimal

La deuxième étape de l'étude du système compensé consiste à calculer les gains  $P_1$  et  $P_2$  "optimaux" satisfaisant certaines contraintes, et à vérifier au laboratoire que le comportement du système réel est équivalent à celui du système simulé pour lequel la commande a été calculée.

La notion de gain optimal (ou de commande optimale en général) dépend de la technique utilisée. Il restera donc à préciser la technique employée au laboratoire, avec l'objectif d'appliquer dans une situation réelle les techniques exposées dans le cadre du cours théorique.

#### 5. Compensateur de type proportionnel intégral

Comme on l'a vu précédemment, les compensateurs dans les boucles classiques sont du type PI, puisque l'on désire une erreur nulle en régime permanent sur la tension et la fréquence.

L'analyse complète du système et l'étude de la stabilité sont passablement plus complexes que dans le cas des compensateurs de type proportionnel et ne seront pas exigées ici. Cependant le calcul des expressions  $\frac{\Delta f}{\Delta h}$  et  $\frac{\Delta V}{\Delta h}$  est utile pour prévoir le comportement du système. On pourra s'assurer de la stabilité du système compensé par simulation.

Une démonstration sera faite de compensateurs PI optimaux. L'étudiant devra pouvoir simuler le système compensé et établir l'influence de chacun

des paramètres des compensateurs sur le comportement du système.

#### 6. Etude du système à un point de fonctionnement particulier

Dans le cadre du laboratoire de « Synthèses des automatismes industriels », une étude a été faite de la centrale au point de fonctionnement suivant:

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$V = 120 \text{ volts}$$

$$h = 616 \text{ watts}$$

La configuration du système était celle indiquée à la figure VI, avec

$$V_{em} = 60 \text{ volts}$$

$$U_1 = 105 \text{ volts}$$

avec 8.5 volts à l'entrée de l'ampli de puissance (HP), dont le gain = 12.35

$$U_2 = 27.5 \text{ volts}$$

avec 1.85 volts à l'entrée de l'ampli de moyenne puissance (McFadden), dont le gain = 14.75

D'autre part, le transducteur de tension-fréquence avait été ajusté de la façon suivante:

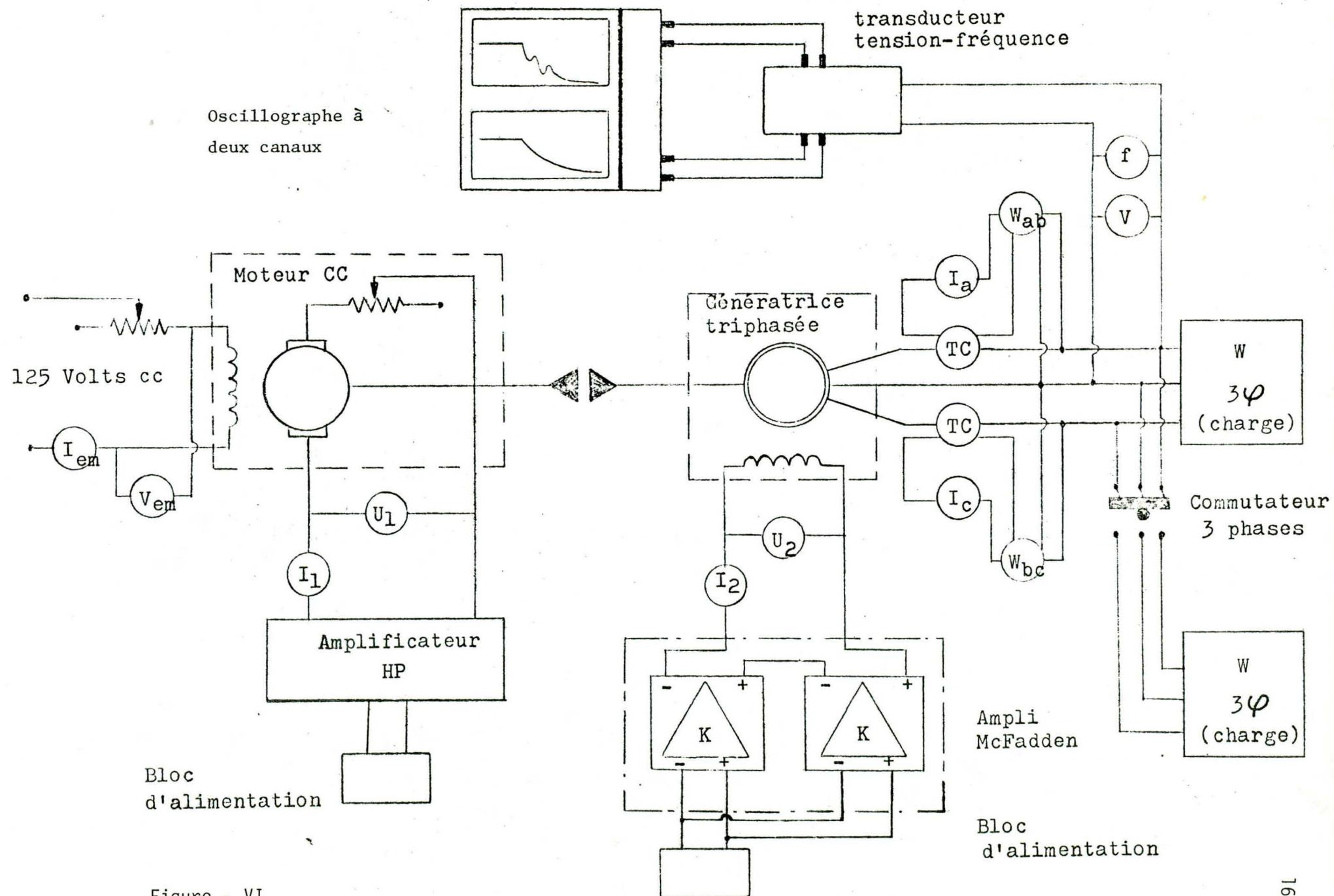
$$\text{Gain fréquence : } | 2 \text{ volts / hertz} |$$

avec 0 volt à 60 hertz

$$\text{Gain tension : } | 0.08 \text{ volt DC / volt AC} |$$

avec 10 volts DC de sortie pour une entrée de 120 volts AC

Une source DC était placée en série avec la sortie du transducteur de tension de façon à compenser le 10 volts DC, pour obtenir 0 volts DC de sortie pour 120 volts AC d'entrée.



On verra dans les pages qui suivent les résultats de l'identification du système en boucle ouverte, l'analyse du système avec compensation proportionnelle, la réalisation d'un compensateur proportionnel et finalement, à titre de comparaison, la réalisation d'un compensateur PI.

### 6.1 Identification

Les fonctions de transfert du système ont été obtenues à partir des essais de réponses en fréquence.  $F_1(s)$  et  $F_2(s)$  ont été déterminées à partir des réponses à un échelon de charge de 80 watts.

$$G_{11}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta C_1(s)} = \frac{12.6}{(1 + 0.42s)(1 + 0.0142s + 0.000753s^2)}$$

$$G_{21}(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta C_1(s)} = \frac{1.33}{(1 + 0.40s)(1 + 0.035s + 0.00125s^2)}$$

$$G_{22}(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta C_2(s)} = \frac{3.89}{1 + 1.7s + 0.0816s^2}$$

$$G_{12}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta C_2(s)} = \frac{-4.95(1 + 0.032s)}{(1 + 0.42s)(1 + 0.24s)}$$

$$F_1(s) = \frac{\Delta f}{\Delta h} = \frac{-0.0138}{1 + 0.35s}$$

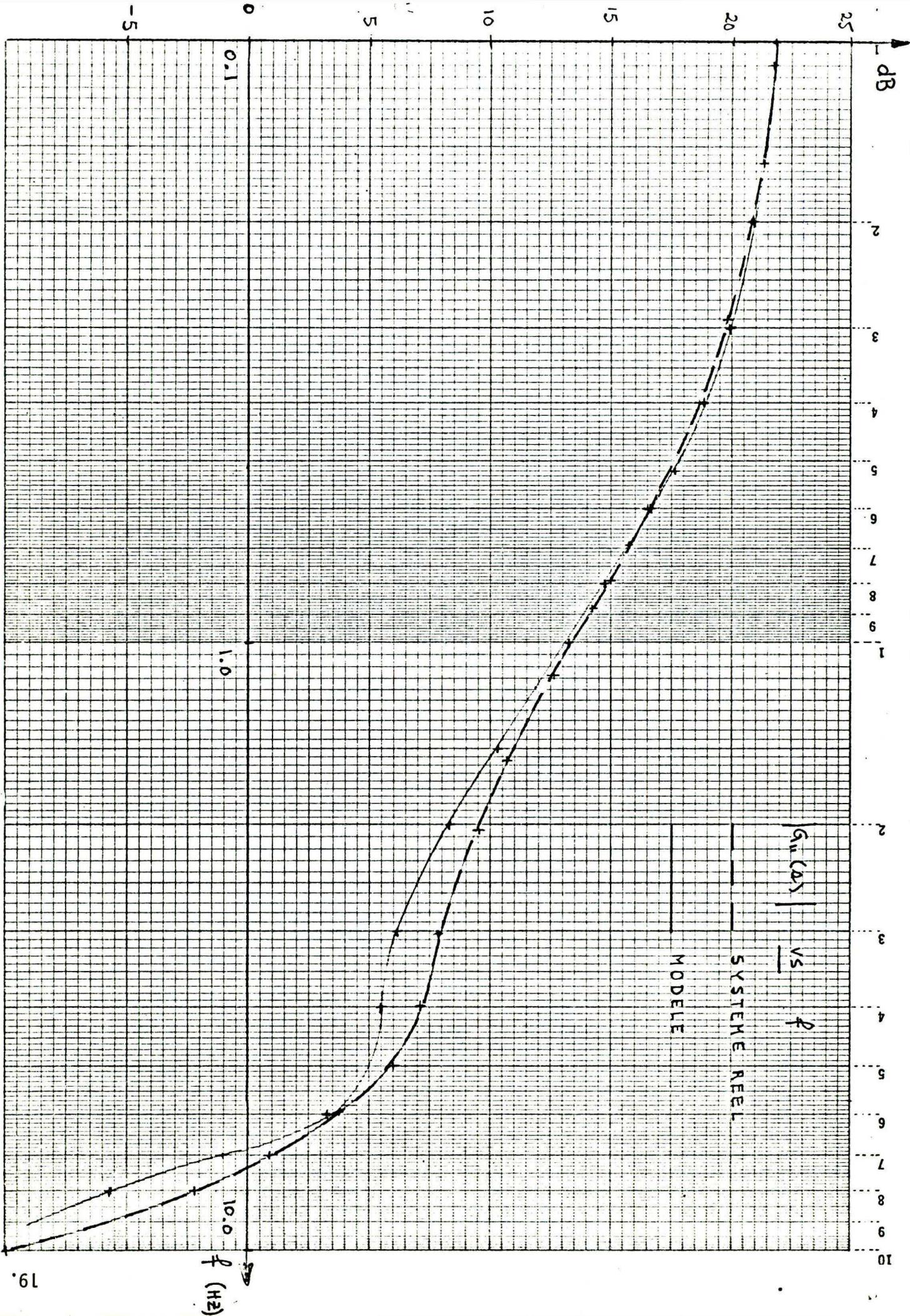
$$F_2(s) = \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{-0.00375}{1 + 0.285s}$$

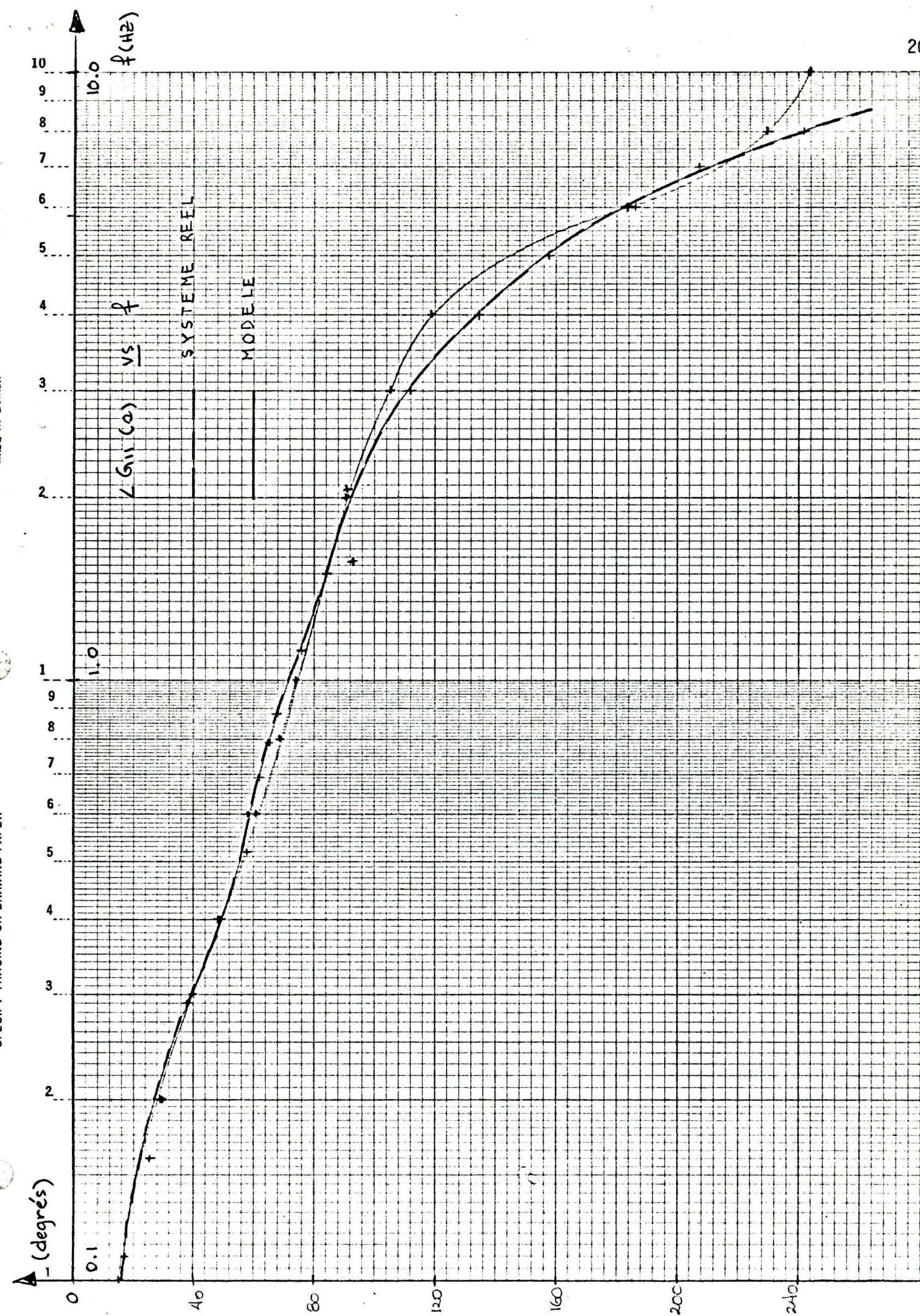
Toutes les valeurs numériques qui ont conduit à ces expressions pour les fonctions de transfert se trouvent dans les tableaux et les courbes des pages 18 à 30.

### 6.1.1 Détermination de $G_{11}(s)$

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX

f (Hz)	GAIN		DEPHASAGE (degrés)
	ABSOLU	dB	
0.11	12.15	21.69	- 16.7
0.16	11.70	21.36	- 24.7
0.20	10.94	20.78	- 29.3
0.29	9.77	19.80	- 38.4
0.40	8.51	18.60	- 48.4
0.52	7.63	17.65	- 57.5
0.60	6.68	16.49	- 57.9
0.69	6.13	15.74	- 62.1
0.79	5.57	14.92	- 65.6
0.88	5.13	14.21	- 68.5
1.14	4.26	12.59	- 76.1
1.57	3.41	10.66	- 93.5
2.04	2.98	9.49	- 91.8
3.03	2.45	7.79	- 111.8
4.00	2.27	7.13	- 136.8
5.00	2.00	6.00	- 158.4
5.95	1.53	3.70	- 186.4
6.96	1.11	0.88	- 226
7.91	0.77	- 2.26	- 242

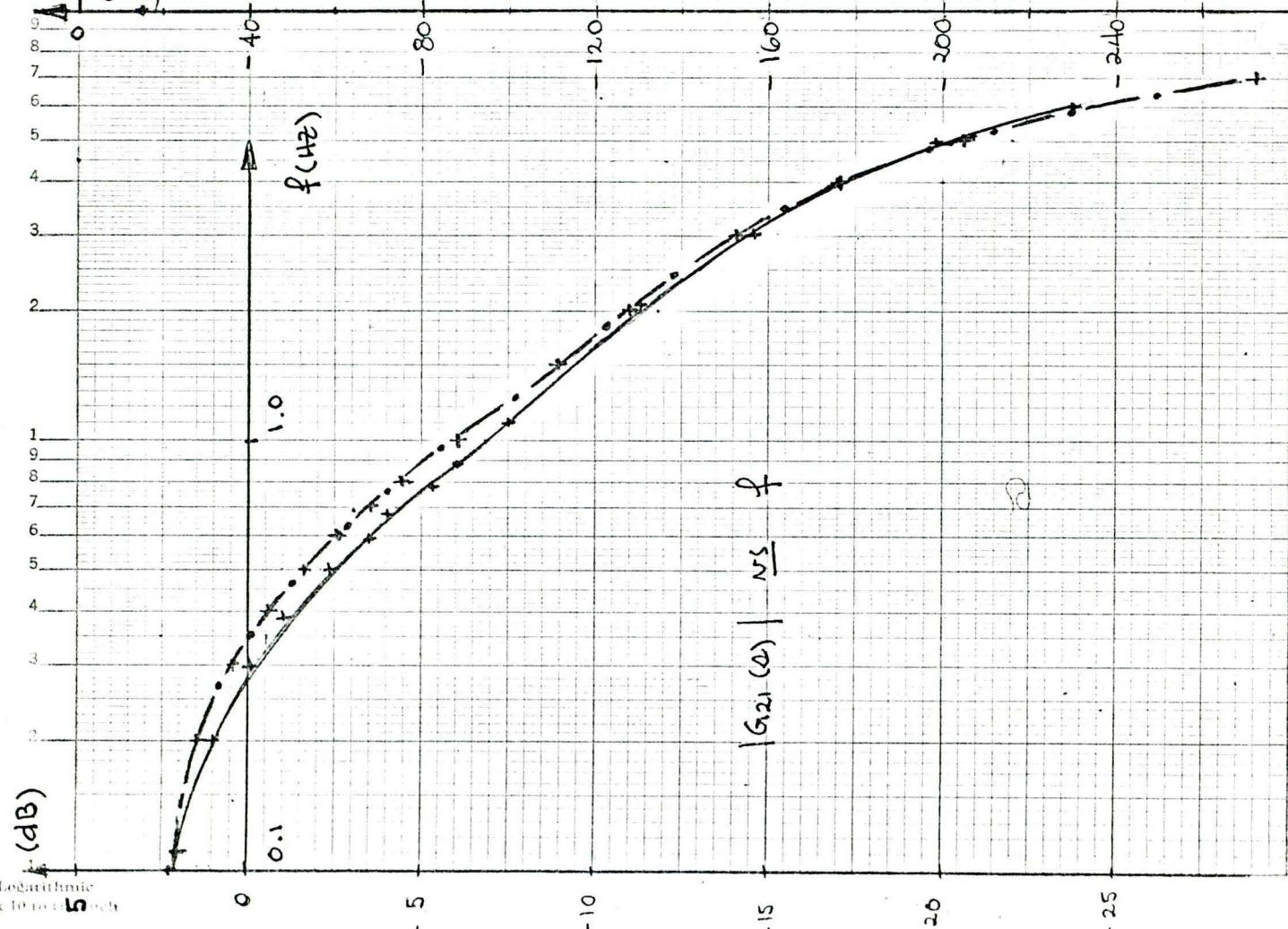
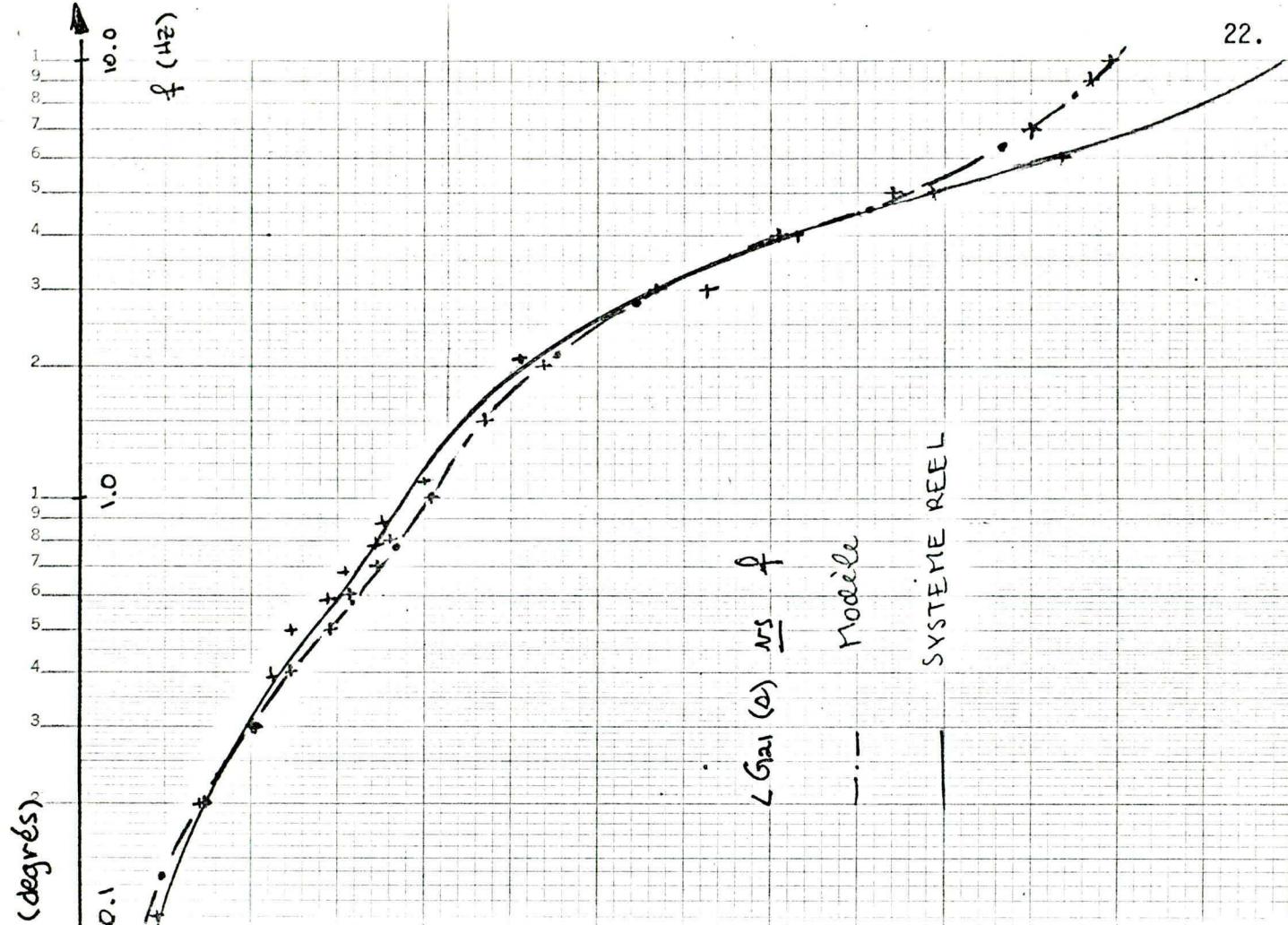




### 6.1.2 Détermination de $G_{21}(s)$

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX

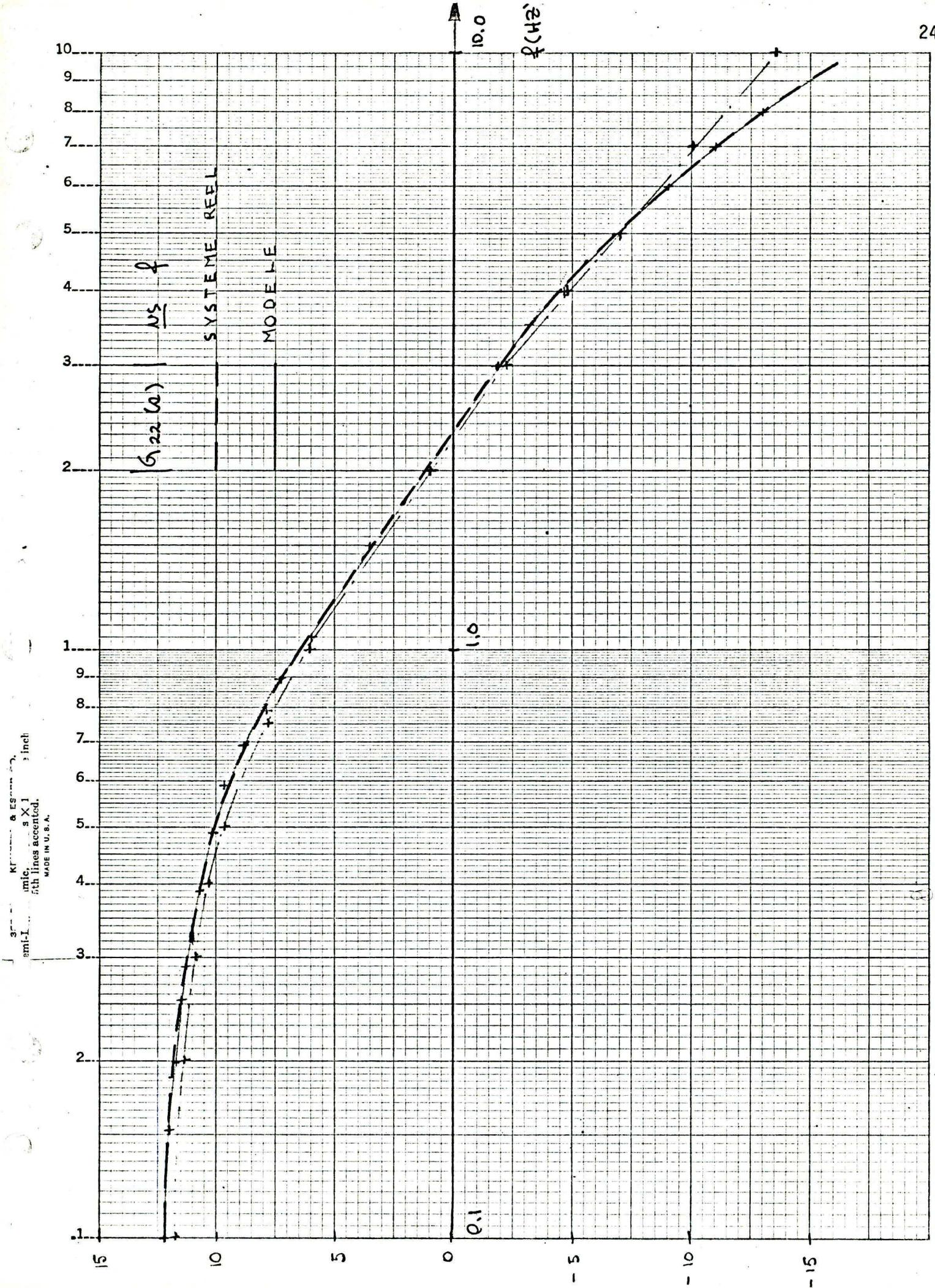
F (Hz)	GAIN		DEPHASAGE (degrés)
	ABSOLU	dB	
0.05	1.33	2.47	—
0.11	1.25	1.94	- 17.9
0.20	1.14	1.10	- 27.9
0.30	0.99	- 0.08	- 41.0
0.39	0.88	- 1.11	- 45.2
0.50	0.76	- 2.34	- 49.4
0.59	0.67	- 3.51	- 57.3
0.68	0.63	- 4.05	- 61.2
0.78	0.54	- 5.29	- 67.5
0.88	0.50	- 6.09	- 69.8
1.12	0.42	- 7.45	- 80.4
2.07	0.27	- 11.31	- 102.4
3.03	0.19	- 14.63	- 145.1
4.0	0.14	- 17.01	- 165.6
5.0	0.10	- 19.93	- 198
6.0	0.06	- 23.8	- 227

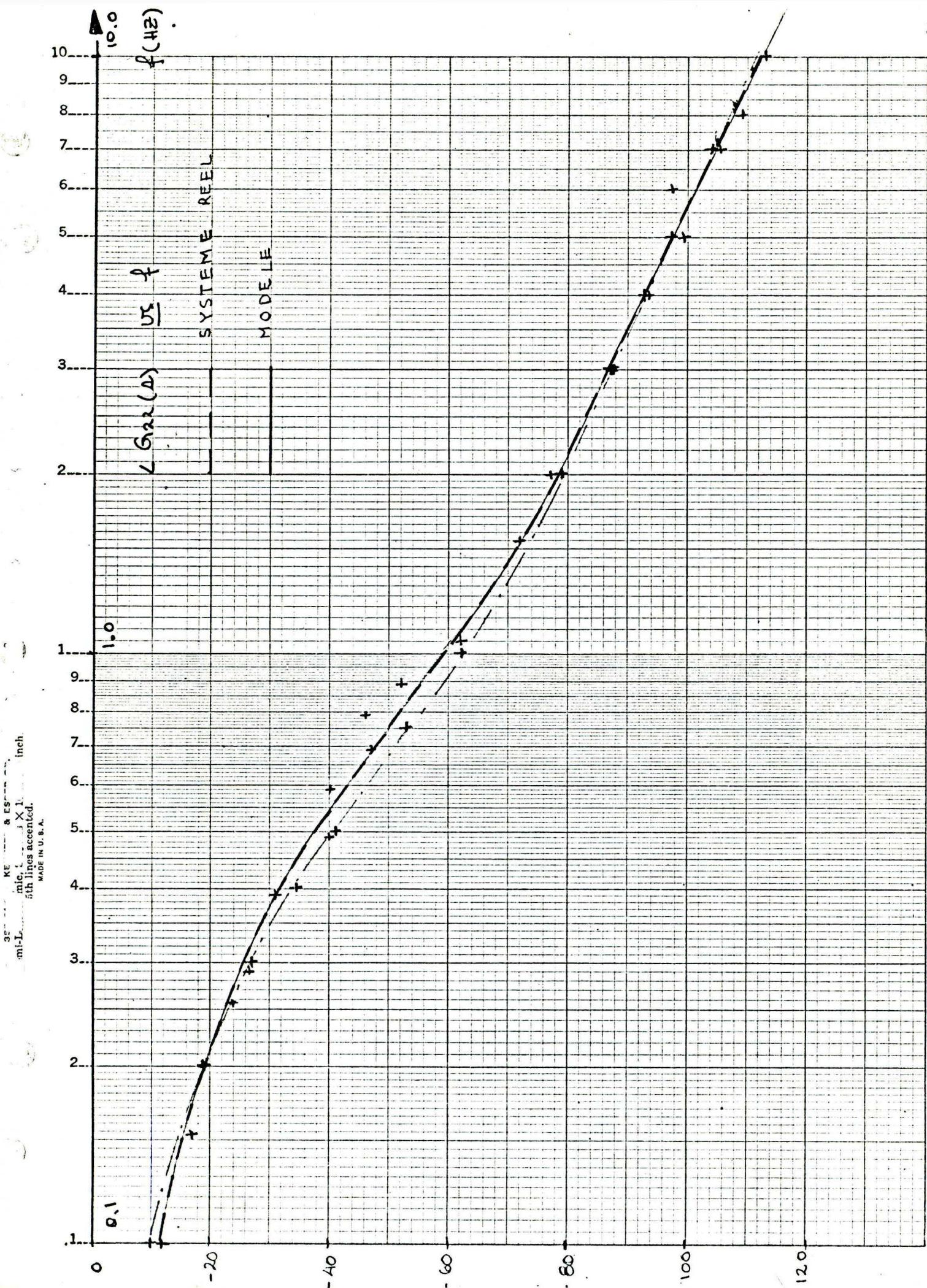


### 6.1.3 Détermination de $G_{22}(s)$

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX

f (Hz)	GAIN		DEPHASAGE (degrés)
	ABSOLU	dB	
0.05	4.21	12.49	—
0.10	4.07	12.19	- 12.1
0.16	3.99	12.01	- 16.9
0.20	3.83	11.67	- 19.0
0.26	3.75	11.48	- 24.0
0.29	3.67	11.29	- 26.6
0.39	3.44	10.74	- 31.2
0.49	3.21	10.13	- 40.2
0.59	3.03	9.64	- 40.5
0.69	2.75	8.79	- 47.1
0.79	2.44	7.76	- 46.7
0.88	2.33	7.36	- 52.3
1.12	2.01	6.06	- 62.7
1.60	1.50	3.51	- 71.8
2.01	1.13	1.06	- 77.1
3.04	0.80	- 1.89	- 87.6
4.00	0.59	- 4.61	- 93.6
5.00	0.45	- 6.98	- 99.0
6.00	0.36	- 8.92	- 97.2
6.94	0.28	- 10.95	- 105
8.00	0.22	- 13	- 109

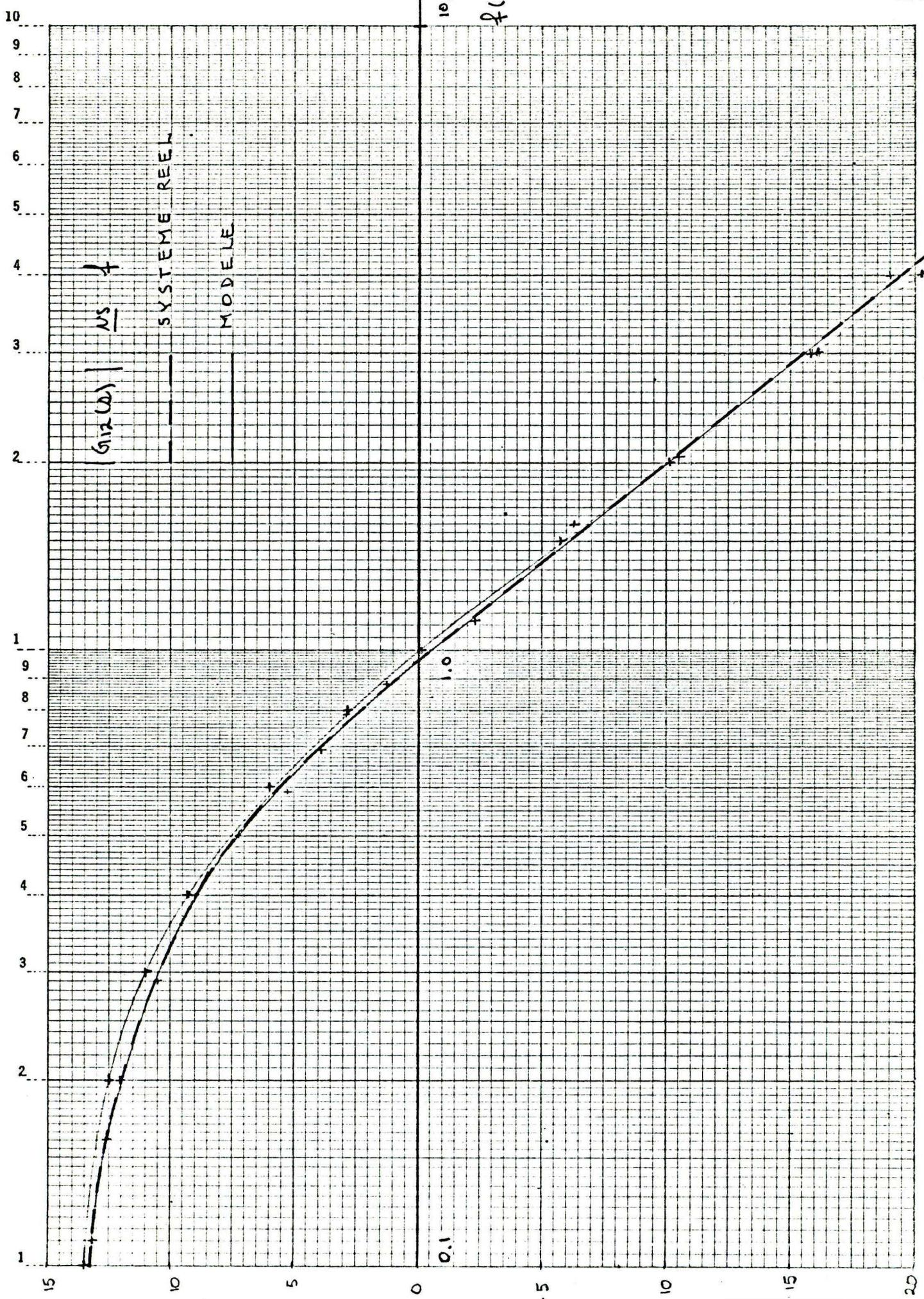




### 6.1.4 Détermination de $G_{12}(s)$

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX

f (Hz)	GAIN		DEPHASAGE (degrés)
	ABSOLU	dB	
0.11	4.58	13.21	- 28.1
0.16	4.28	12.63	- 38.5
0.20	4.01	12.07	- 43.3
0.29	3.34	10.48	- 58.2
0.40	2.80	8.94	- 76.6
0.50	2.29	7.18	- 83.8
0.59	1.83	5.24	- 91.6
0.69	1.54	3.77	- 96.8
0.79	1.38	2.82	- 100.6
0.88	1.14	1.16	- 101.1
1.12	0.77	- 2.25	- 110.0
1.59	0.49	- 6.27	- 114.3
2.05	0.30	- 10.46	- 116.5
3.02	0.16	- 15.76	- 116.3
3.97	0.11	- 18.84	- 125.7



— RAPID — NITRO — NADA —  
MADE IN CANADA

SEMI-RITH CYC 70 INC  
SPECIFY RACING OR DRAWING PAPER

SEMILOGRAPH CYC 70 INC  
SPECIFY TRACING OR DRAWING PAPER

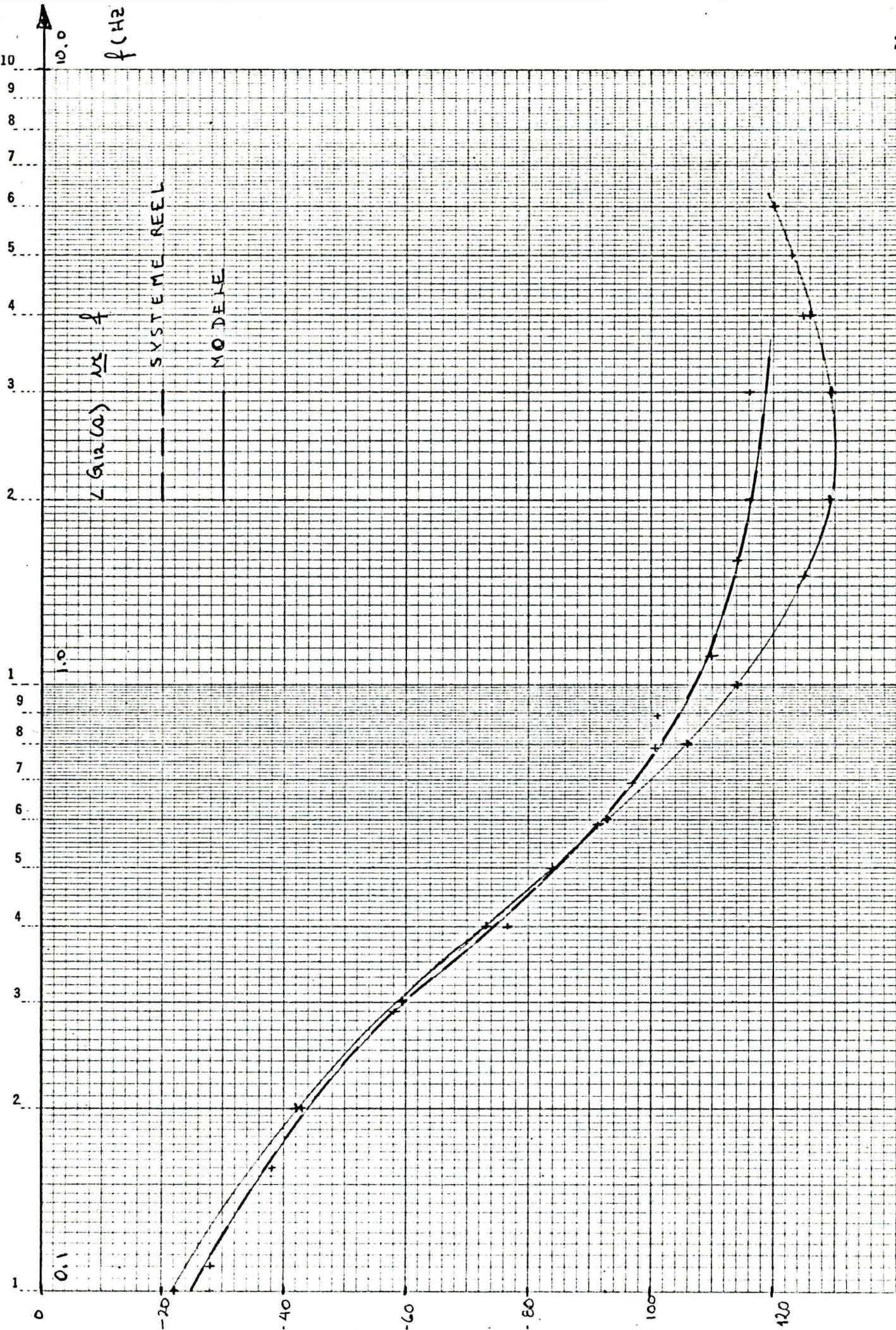
RAPID NITRIC MADE IN CANADA

$L(G_{12}(s)) \approx 4$

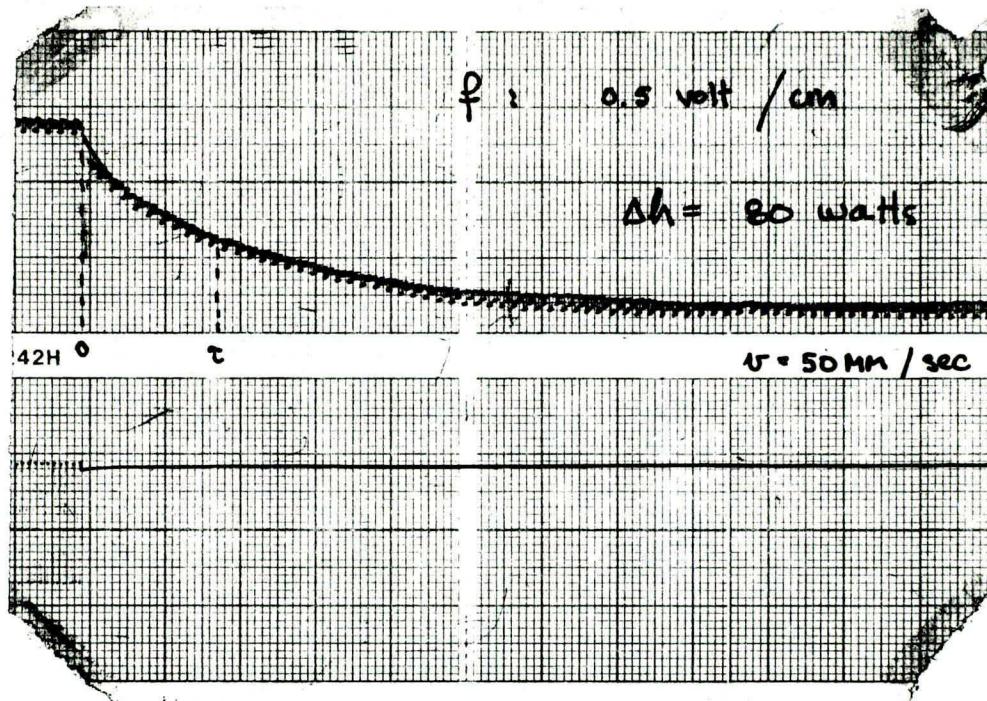
$f(\text{Hz})$

SYSTEME REEL

MODELE



### 6.1.5 Détermination de $F_1(s)$



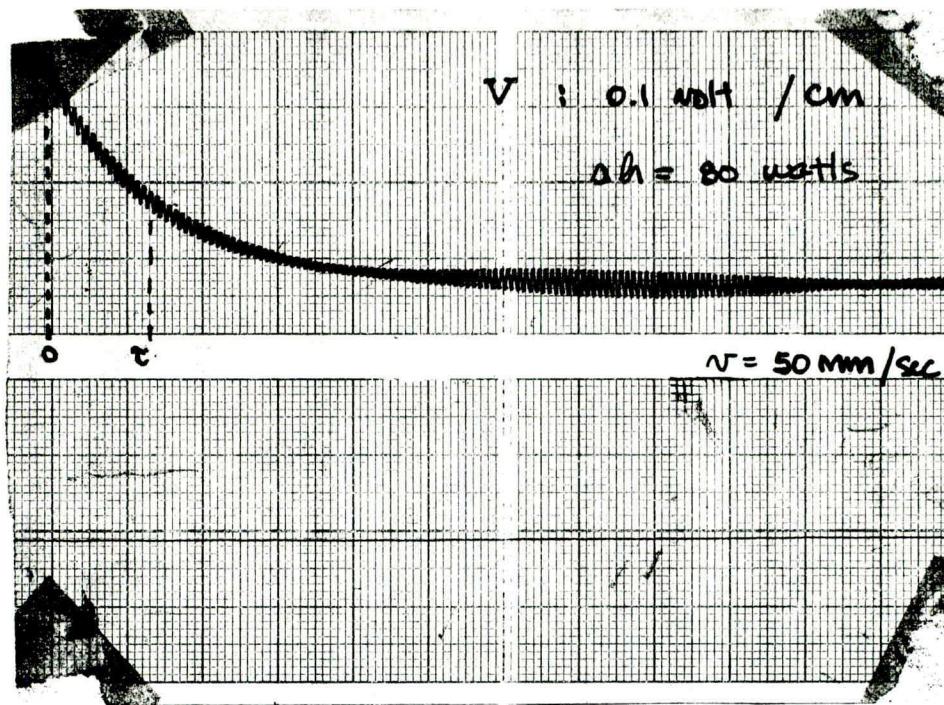
Etant donné l'amortissement élevé de la réponse, un modèle du premier ordre est suffisant. Plusieurs essais ont été effectués pour calculer la moyenne de la constante de temps (l'état du système immédiatement avant la perturbation influence la constante de temps. Il faut veiller à ce que le système soit bien en régime permanent).

$$\text{Ici, } \tau = 18/50 = 0.36 \text{ sec.}$$

Plusieurs essais ont permis d'établir une moyenne de  $\tau$

$$\tau_m = 0.35 \text{ sec.}$$

### 6.1.6 Détermination $F_2(s)$



$$\text{Ici, } \tau = 13.5/50 = 0.27 \text{ sec.}$$

Plusieurs essais ont permis de calculer une moyenne de  $\tau$ :

$$\tau = 0.285 \text{ sec.}$$

## 6.2 Influence des entrées sur les sorties; analyse de stabilité

En posant d'abord  $P_2 = 0$ , on obtient

$$(1) \quad \frac{\Delta f}{\Delta C_1} = \frac{G_{11}(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = H_{11}(s)$$

boucle fermée isolée

$$(2) \quad \frac{\Delta V}{\Delta C_1} = \frac{G_{21}(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = H_{21}(s)$$

nouveau couplage

$$(3) \quad \frac{\Delta f}{\Delta h} = \frac{F_1(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = F_1(s) \cdot \left[ \frac{H_{11}(s)}{G_{11}(s)} \right]$$

$$(4) \quad \frac{\Delta V}{\Delta h} = F_2(s) - \left[ \frac{P_1 F_1(s) G_{21}(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} \right] \\ = F_2(s) - P_1 F_1(s) H_{21}(s)$$

En posant maintenant  $P_1 = 0$

$$(5) \quad \frac{\Delta V}{\Delta C_2} = \frac{G_{22}(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} = H_{22}(s)$$

$$(6) \quad \frac{\Delta f}{\Delta C_2} = \frac{G_{12}(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} = H_{12}(s)$$

$$(7) \quad \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{F_2(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} = F_2 \cdot \left[ \frac{H_{22}(s)}{G_{22}(s)} \right]$$

$$(8) \quad \frac{\Delta f}{\Delta h} = F_1(s) - \left[ \frac{P_2 F_2(s) G_{12}(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} \right] \\ = F_1(s) - P_2 F_2(s) H_{12}(s)$$

Si maintenant le système possède deux boucles, on obtient les résultats suivants:

$$(9) \quad \frac{\Delta f}{\Delta C_1} = \frac{H_{11}(s) - P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)}{1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)}$$

$$(10) \quad \frac{\Delta V}{\Delta C_1} = \frac{H_{12}(s) H_{21}(s)}{G_{12}(s) [1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)]}$$

$$(11) \quad \frac{\Delta V}{\Delta C_2} = \frac{H_{22}(s) - P_1 H_{12}(s) H_{21}(s)}{1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)}$$

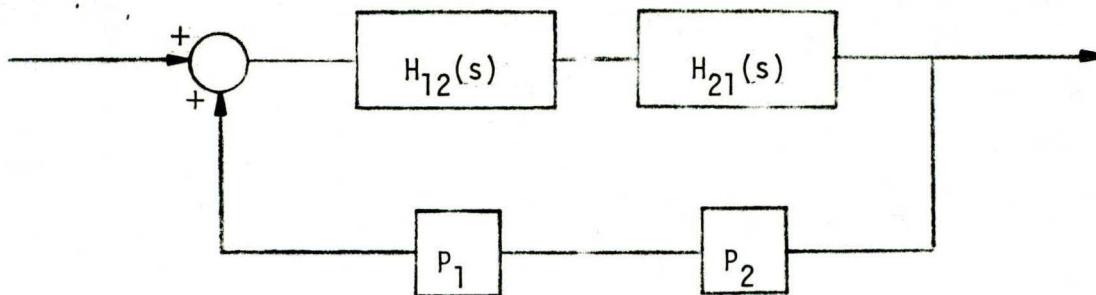
$$(12) \quad \frac{\Delta f}{\Delta C_2} = \frac{H_{12}(s) H_{21}(s)}{G_{21}(s) [1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)]}$$

$$(13) \quad \frac{\Delta f}{\Delta h} = \frac{F_1(s) - P_2 F_2(s) H_{12}(s)}{1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)} \cdot \left[ \begin{array}{c} H_{11}(s) \\ G_{11}(s) \end{array} \right]$$

$$(14) \quad \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{F_2(s) - P_1 F_1(s) H_{21}(s)}{1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)} \cdot \left[ \begin{array}{c} H_{22}(s) \\ G_{22}(s) \end{array} \right]$$

#### Du point de vue stabilité

- les boucles  $H_{11}(s)$  et  $H_{22}(s)$  doivent être stables. Elles sont étudiées indépendamment l'une de l'autre, en fonction des paramètres  $P_1$  et  $P_2$
- D'autre part, l'examen des expressions (9) à (14) révèle que le terme  $[1 - P_1 P_2 H_{12}(s) H_{21}(s)]$  se trouve toujours au dénominateur. Ce terme peut être associé au couplage qui existe dans le système. On le représentera donc schématiquement comme une "boucle d'inter-couplage", telle qu'indiquée à la figure VII. Evidemment, cette boucle doit être stable.

Figure VIIa) Stabilité de  $H_{11}(s)$ 

L'analyse de  $H_{11}(s)$  et l'application de la méthode de Routh-Hurwitz permettent de dire que  $H_{11}(s)$  est stable si:

$$-0.079 \leq P_1 \leq 0.652$$

b) Stabilité de  $H_{22}(s)$ 

$H_{22}(s)$  est stable si:

$$P_2 \geq -0.257$$

c) Stabilité de la boucle d'intercouplage

L'équation caractéristique de la boucle d'intercouplage est du 9e ordre. Il est plus simple de démontrer par simulation que cette boucle est stable pour les conditions ci-dessus que d'en faire la preuve analytiquement.

6.3 Essai d'un compensateur de type proportionnel6.3.1 Stabilité

Des essais ont été réalisés avec un compensateur de type proportionnel.

On a pu montrer que le système réel est stable dans les conditions suivantes, avec  $P_1$  et  $P_2$  positifs:

a)  $P_1 < 0.125$  et  $P_2 = 0$

Ceci est le critère de stabilité de la boucle  $H_{11}$  [voir équations (1) à (4)]

b)  $P_1 = 0$   $P_2$  quelconque  $\in [0, \lambda[$

où  $\lambda$  est une valeur très grande (un gain infini n'est pas réalisable). Ceci est le critère de stabilité de la boucle  $H_{22}$  (voir équations (5) à (8)).

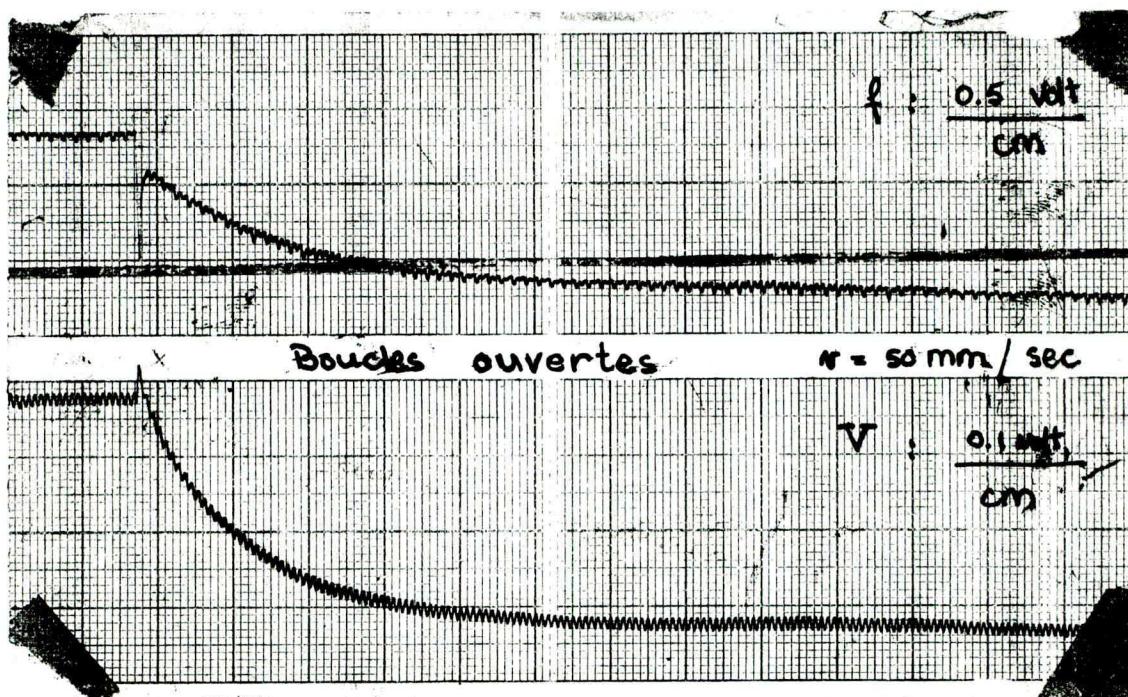
c)  $P_1 < 0.125$  et  $P_2$  quelconque  $\in [0, \lambda[$

où  $\lambda$  est très grand. Ceci signifie que la "boucle d'intercouplage" est stable si  $H_{11}$  et  $H_{22}$  sont stables.

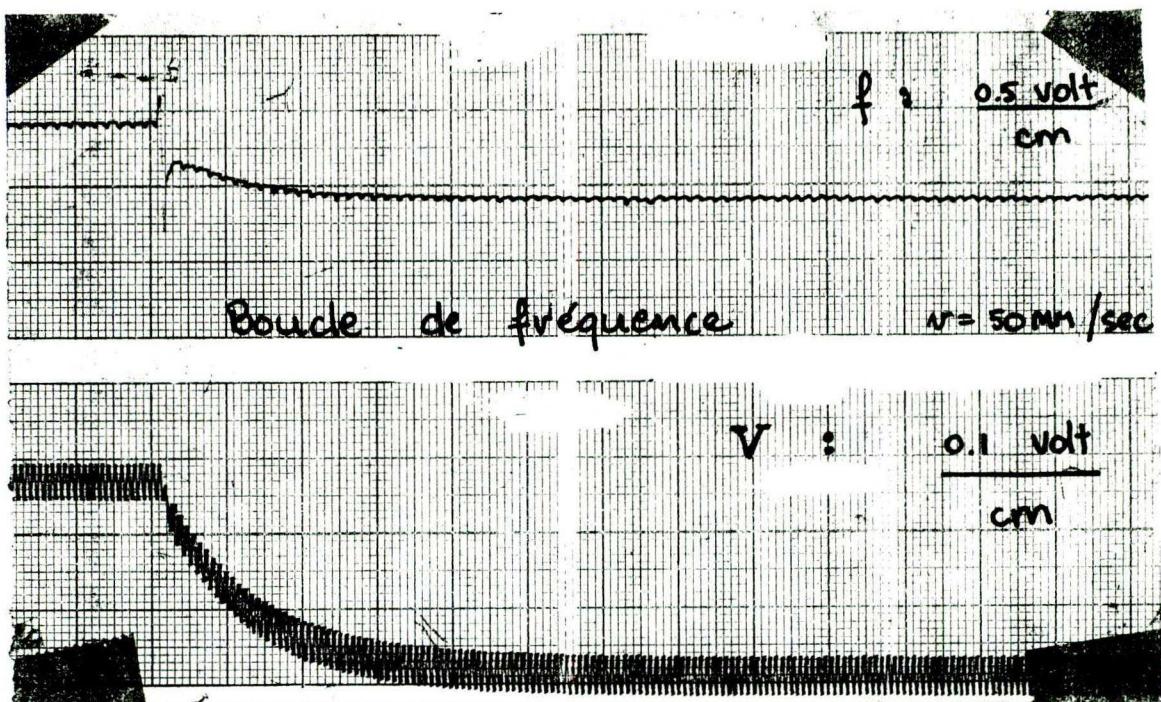
### 6.3.2 Résultats des essais

Des essais ont été réalisés pour des valeurs arbitraires de  $P_1$  et  $P_2$ . Les résultats font état du comportement en fréquence et en tension du système pour des échelons de charge de - 80 watts, appliqués au moyen d'un commutateur triphasé.

a) boucles ouvertes:  $P_1 = 0$ ,  $P_2 = 0$ ,  $\Delta W = -80$  watts



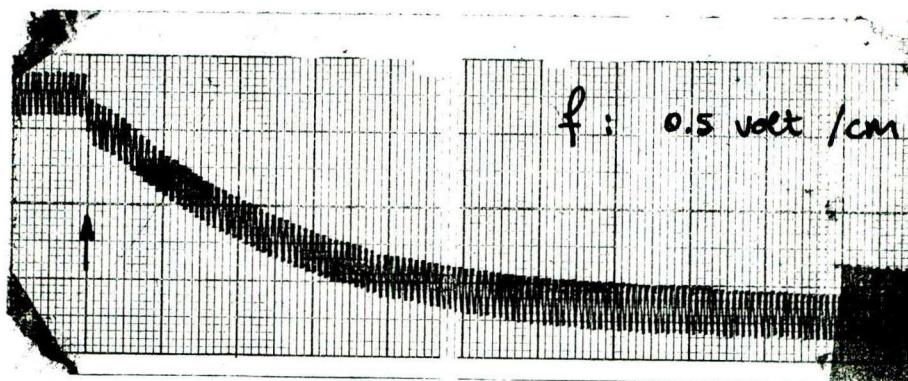
b) boucle de fréquence seule:  $P_1 = 0.077$ ,  $P_2 = 0$ ,  $\Delta W = -80$  watts



c) boucle de tension seulement:  $P_2 = 9.4$

$$P_1 = 0$$

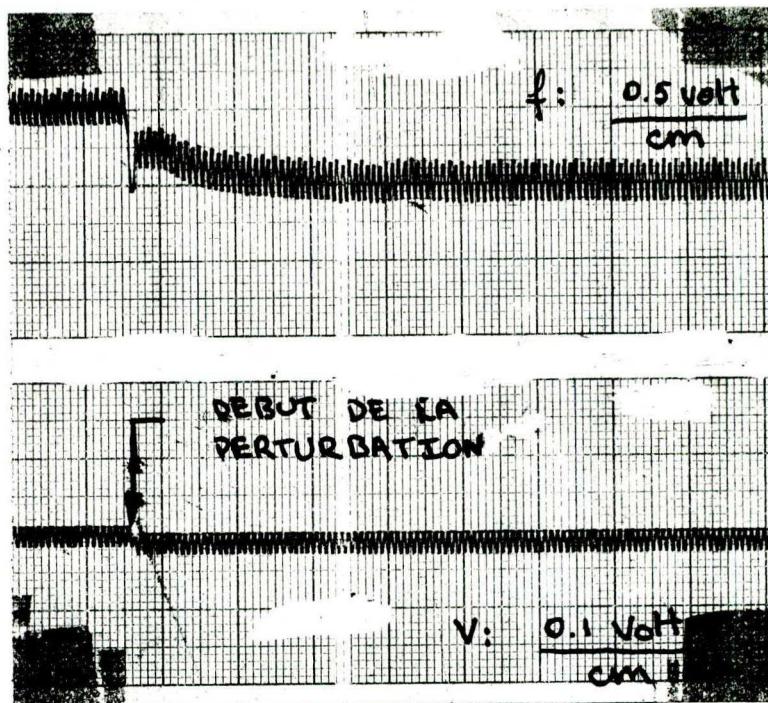
$$\Delta W = -80 \text{ watts}$$



d) deux boucles:  $P_1 = 0.106$

$$P_2 = 4.9$$

$$\Delta W = -80 \text{ watts}$$



Il est bon de noter ici que pour obtenir un comportement de la fréquence semblable à celui obtenu avec la boucle de fréquence seule, il a fallu augmenter  $P_1$  de 0.077 à 0.106 et diminuer  $P_2$  de 9.4 à 4.9. Ceci est dû aux caractéristiques suivantes du système:

- l'augmentation de la puissance du moteur produite par l'augmentation de la tension d'induit entraîne une augmentation de la vitesse du moteur (donc de la fréquence) et de la tension débitée par l'alternateur. Cette caractéristique se reflète dans le modèle du système par les fonctions  $G_{11}(s)$  et  $G_{21}(s)$ , qui sont de même signe: positif.
- par contre l'augmentation de la tension d'excitation de l'alternateur produit une augmentation de la tension débitée par l'alternateur et une diminution de la vitesse du moteur (fréquence). Les fonctions  $G_{22}(s)$  et  $G_{12}(s)$  sont alors de signes contraires.

Donc, augmenter  $P_1$  améliore le comportement du système en fréquence et en tension; alors qu'une augmentation de  $P_2$  contribue à améliorer le comportement en tension mais à détériorer celui en fréquence.

Finalement, une remarque importante: dans tous les cas, le système simulé par le modèle mathématique avait un comportement assez semblable à celui du système réel. Un compensateur optimal calculé d'après le modèle devrait donc donner de bons résultats.

#### 6.4 Essai d'un compensateur de type PI

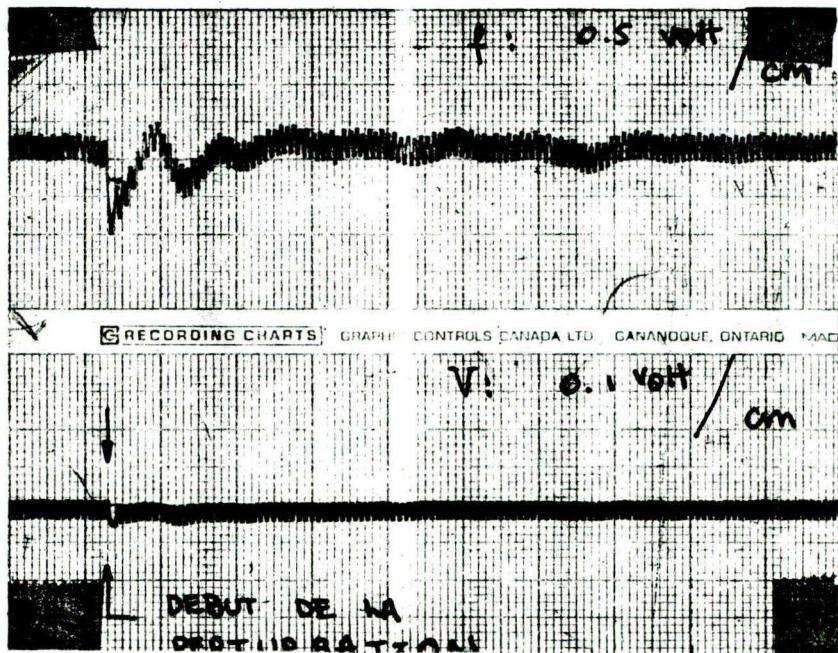
A titre de comparaison, un compensateur de type PI, tel qu'il-lustré aux figures VIII et IX, a été monté et testé. Aucune analyse théorique n'a été effectuée.

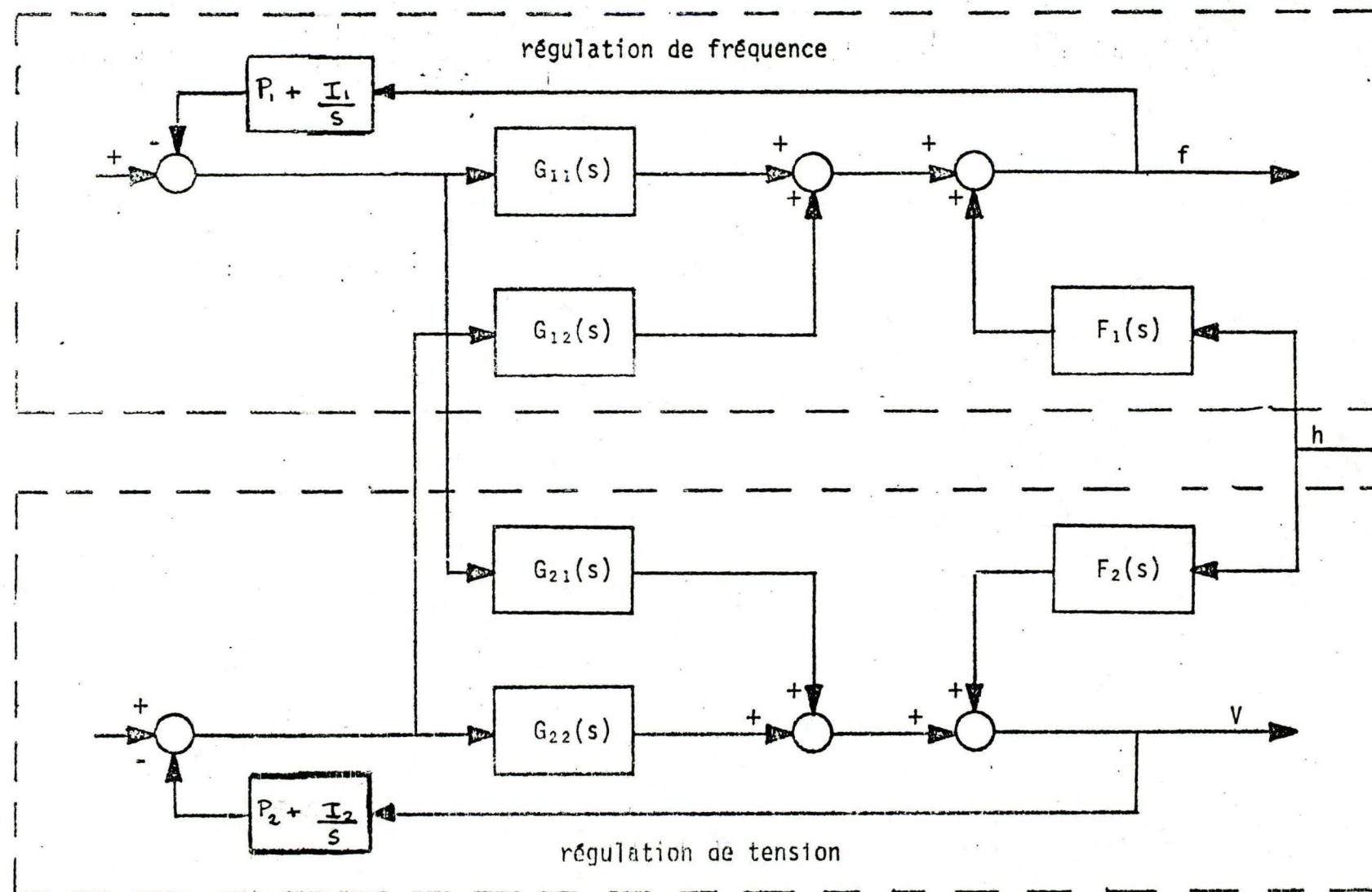
- boucle de fréquence:  $P_1 = 0.3$   
 $I_1 = 2.2$

- boucle de tension:  $P_2 = 5.5$   
 $I_2 = 10$

(ces valeurs ont été choisies arbitrairement,  
avec la restriction que la stabilité doit être  
assurée)

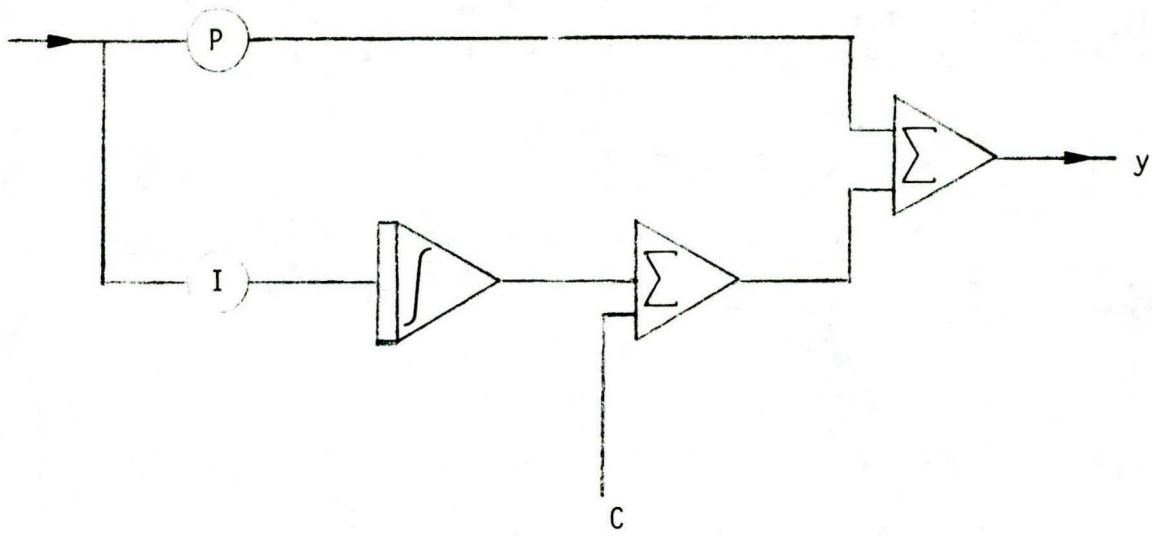
- échelon de charge: - 80 watts





Régulation de tension et de fréquence du type P

FIGURE VIII



$$y = C - Px - I \int x \, dt$$

où

$x$  = variable surveillée

$y$  = entrée de l'amplificateur

Figure IX - Schéma de principe du montage d'un compensateur de type PI

## APPENDICE A

### RENSEIGNEMENTS CONCERNANT L'APPAREILLAGE

#### 1. Groupe moteur-alternateur

Les caractéristiques du moteur et de la génératrice ont déjà été fournies.

Il faut s'assurer que les balais du moteur soient dans la bonne position et éviter d'excéder les capacités des deux machines; en particulier, ne pas dépasser 22 ampères comme courant d'excitation du moteur.

#### 2. Panneaux d'instrumentation et de câblage

Toutes les connections sur le moteur et l'alternateur se font par l'intermédiaire des panneaux d'instrumentation et de câblage. Ces panneaux reproduisent les différents points de connection du moteur et de l'alternateur (enroulements d'induit et d'inducteur du moteur, connection des enroulements de l'alternateur – étoile ou delta, inducteur de l'alternateur, sortie l'alternateur) et comportent des instruments de mesure.

Il convient toutefois de noter que les instruments de mesure situés sur ces panneaux ne sont pas très précis. Dans tous les cas où des mesures exactes sont nécessaires, il est préférable d'utiliser d'autres instruments; par exemple,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_{em}$ ,  $f$  et toutes les mesures de la charge devraient être effectuées avec des instruments supplémentaires, disponibles au laboratoire d'électrotechnique.

#### 3. Amplificateur de puissance HP SCR - 10

D'une puissance de 10 kVA, l'amplificateur HP peut fournir une tension maximum de 250 volts. L'alimentation se fait à 220 volts 3 $\phi$ . L'entrée peut varier de 0 à 10 volts et le gain de l'amplificateur de 0 à 25.

La sortie de l'amplificateur sert à alimenter l'induit du moteur cc.

A cause des transitoires produites dans le système et des court-circuits accidentels, il est souhaitable de limiter le courant débité par

l'amplificateur de puissance (HP) à la valeur maximale permise par le moteur (22 ampères). Cet ajustement, simple à faire, permet de protéger le moteur et d'éviter de faire sauter les fusibles de l'amplificateur dont le coût de remplacement atteint 75 dollars (en 1979).

#### 4. Amplificateur de moyenne puissance McFadden

L'amplificateur de moyenne puissance McFadden peut fournir à sa sortie une tension maximum de 62 volts. Le gain est réglable de 2 à 10.

On l'utilise pour fournir la tension d'inducteur de la génératrice triphasée. Selon le point de fonctionnement du système, on peut exiger une tension d'inducteur supérieure à 62 volts, dans un tel cas on utilise deux McFadden en série.

Attention: les gains des trois McFadden disponibles au laboratoire ne sont pas identiques. Si pour une raison ou pour une autre on doit changer un amplificateur, il faut tenir compte de la différence de gain. De plus, noter que l'amplificateur McFadden peut fournir un décalage ("offset") en tension continue à la sortie, avec une entrée nulle.

#### 5. Calibration du transducteur de tension-fréquence

##### a) Transducteur de tension

Les ajustements du transducteur de tension-fréquence se font au moyen de petites vis situées au bas du panneau avant de l'appareil.

Pour effectuer l'ajustement du transducteur de tension, il faut d'abord relier les bornes marquées "sortie du redresseur" à un oscilloscope.

- Ajuster la vis "atténuateur" pour avoir un niveau de signal maximum sur l'oscilloscope.
- Appliquer à l'entrée du transducteur le niveau maximum (prévu) de la tension à mesurer.
- Ajuster la vis "redresseur" de façon à ce que la sortie du transducteur de tension ne soit pas écrêtée.

b) Ajustement du transducteur de fréquence

Il y a deux ajustements à faire ici: ajuster la sortie à 0 volt pour la fréquence nominale (60 Hz), et ajuster le gain du transducteur.

- Appliquer à l'entrée du transducteur un signal de 60 Hz.
- En mesurant la sortie du transducteur de fréquence avec un voltmètre DC, ajuster la vis "zéro" de façon à obtenir 0 volt DC à la sortie.
- En variant alors la fréquence du signal d'entrée, ajuster le gain du transducteur au moyen de la vis marquée "bande".

6. Instruments de mesure. Oscilloscophe

Tel que précisé précédemment, les mesures de  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_{em}$ ,  $f$ , et toutes les mesures de la charge doivent être effectuées avec des instruments précis. Il faut donc avoir à sa disposition:

- 2 voltmètres ou multimètres (DC)
- 1 voltmètre AC 0-300 volts
- 2 transformateurs de courant
- 2 ampèremètres
- 2 wattmètres
- 1 fréquencemètre

La charge est mesurée par la méthode des deux wattmètres. Le voltmètre AC et le fréquencemètre servent de références pour ajuster le point de fonctionnement du système et pour étalonner le transducteur de tension-fréquence.

D'autre part, pour enregistrer les signaux, on utilise un oscilloscophe à deux canaux. Les sorties du transducteur de tension-fréquence sont entachées d'un bruit 60 Hz qui doit être éliminé (ou du moins atténué) pour que les courbes produites sur le traceur soient acceptables. On peut réduire ce bruit en disposant à l'entrée du traceur un filtre passe-bas RC 1er ordre qui s'avère amplement suffisant. (En plaçant la fréquence de coupure à -3dB aux environs de 6Hz, i.e.  $\tau = 0.026$ , l'erreur introduite

dans les mesures est assez réduite. Par contre, il est possible de contourner le problème causé par l'introduction du filtre en considérant tout simplement celui-ci comme faisant partie du système).

### BIBLIOGRAPHIE

(1) André B. Turgeon

"Techniques de mise au point de la régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale autonome."

Rapport technique no. EP78-R-2  
Ecole Polytechnique, Janvier 1978

(2) Michel Sanschagrin  
André B. Turgeon

"Transducteur de tension-fréquence pour systèmes de puissance."

Rapport technique no. EP78-R-30  
Ecole Polytechnique, Septembre 1978

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289049 7