

Titre: Techniques de mise au point de la régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale autonome
Title:

Auteurs: André B. Turgeon
Authors:

Date: 1978

Type: Rapport / Report

Référence: Turgeon, A. B. (1978). Techniques de mise au point de la régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale autonome. (Technical Report n° EP-R-78-02).
Citation: <https://publications.polymtl.ca/6245/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6245/>
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-78-02
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:



DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
SECTION AUTOMATIQUE, COMMUNICATION, INFORMATIQUE

RAPPORT TECHNIQUE No. EP78-R-2

Classification: Library of Congress no.....

TECHNIQUES DE MISE AU POINT DE LA REGULATION
DE FREQUENCE ET DE TENSION D'UNE MINI-CENTRALE AUTONOME

par

André B. Turgeon
Professeur Titulaire

Janvier 1978

Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ
UP4
78R02
FRE

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



**Bibliothèque
École
Polytechnique
MONTREAL**

CLASSIFICATION

CA2PQ

No D'ENTRÉE

UP4

78R02

FRE

TECHNIQUES DE MISE AU POINT
DE LA REGULATION DE
FREQUENCE ET DE TENSION
D'UNE MINI-CENTRALE AUTONOME

préparé par

André B. TURGEON
Professeur Titulaire
Département de Génie Electrique

Section Automatique, Communication, Informatique

Janvier 1978

don

SOMMAIRE

Ce projet consiste en l'application de techniques classiques pour la mise au point des boucles de régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale.

La mise en équations et la paramétrisation du système sont faites en détails. La synthèse est abordée comme si le système était découplé. La sensibilité face aux perturbations dépend de la bonne mise au point des boucles d'asservissement.

Le calcul du correcteur rencontrant une sensibilité donnée est fait à l'aide de l'abaque de Nichol et des lieux de transfert dans le plan de Black.

PRESENTATION

Ce projet s'insère dans les études faites au département de Génie Electrique dans le cadre de l'action concertée sur l'Analyse et la Commande des Processus Industriels par Ordinateurs: Projet CRP-378-76 du Ministère de l'Education du Québec. Nous tenons à souligner le travail de pionnier et de leadership que notre collègue Romano M. De Santis a assumé dans ce domaine.

Tous les étudiants de notre cours de Synthèse des Automatismes Industriels verront là un problème qu'ils ont eu à aborder avec une modélisation plus simple.

Nous tenons à souligner que l'assistance de M. Anh Tu nous a été précieuse.

1. INTRODUCTION

Ce projet est consacré à l'étude dynamique et statique de la commande d'une mini-centrale électrique fonctionnant dans un réseau isolé. La source d'énergie provient d'un moteur à courant continu, commandé par l'induit, l'excitation est indépendante et fixe. Le moteur entraîne une génératrice triphasée dont l'inducteur est commandable.

Le problème fondamental consiste en la mise en place des boucles utiles à la régulation de fréquence (vitesse angulaire du moteur) et de tension de sortie de la génératrice malgré les variations de la charge. Cette solution se développe en trois étapes

- l'identification du système: mise en équations du moteur, de la génératrice avec sa charge;
- le choix et la mise au point de la structure de commande: choix des boucles, calcul des paramètres, propriétés statiques et dynamiques, simulation;
- les essais expérimentaux: comparaison des résultats théoriques et pratiques.

Les méthodes de base découlent de la théorie classique des asservissements. Toutefois des méthodes plus récentes seront présentées et discutées: particulièrement une méthode qui permet l'analyse fréquentielle de la sensibilité des diverses boucles par l'utilisation pratique du principe d'invariance. Cette technique a été développée par le professeur R. De Santis et ses collaborateurs. [1] , [2] , [3] .

2. IDENTIFICATION

2.1 Présentation du système

Le système est composé des éléments qui suivent

- moteur à courant continu, à excitation séparée - TAMPER modèle M1422 puissance 3 HP vitesse nominale 1750 t.p.m excitation séparée: 120 volts;
- génératrice triphasée - TAMPER modèle SG1020 puissance de 2.5 kva - vitesse de 1800 t.p.m fréquence 60 hz, tension 120 - 208 - 240 volts inducteur: 120 volts;
- amplificateur de puissance Hewlett-Packard modèle SCR-10, puissance 10 kVA, tension maximale 240 volts;
- amplificateur de puissance moyenne McFadden à gain réglable 2 à 10. tension maximale de sortie ± 62 volts;
- Panneaux d'instrumentation et de câblage permettant les mesures de tension, ampérage, puissance, fréquence, etc. des divers éléments et leurs interconnexions.

Le diagramme de l'ensemble est présenté en Figure 1.

2.2 Description mathématique

L'identification détaillée du système exigerait des essais nombreux et diversifiés et des calculs plus ou moins complexes. Aussi, est-il plus direct d'identifier globalement les fonctions de transfert par des tests du type échelons. Cependant, cette méthode n'est pas toujours possible et il faut faire des tests harmoniques.

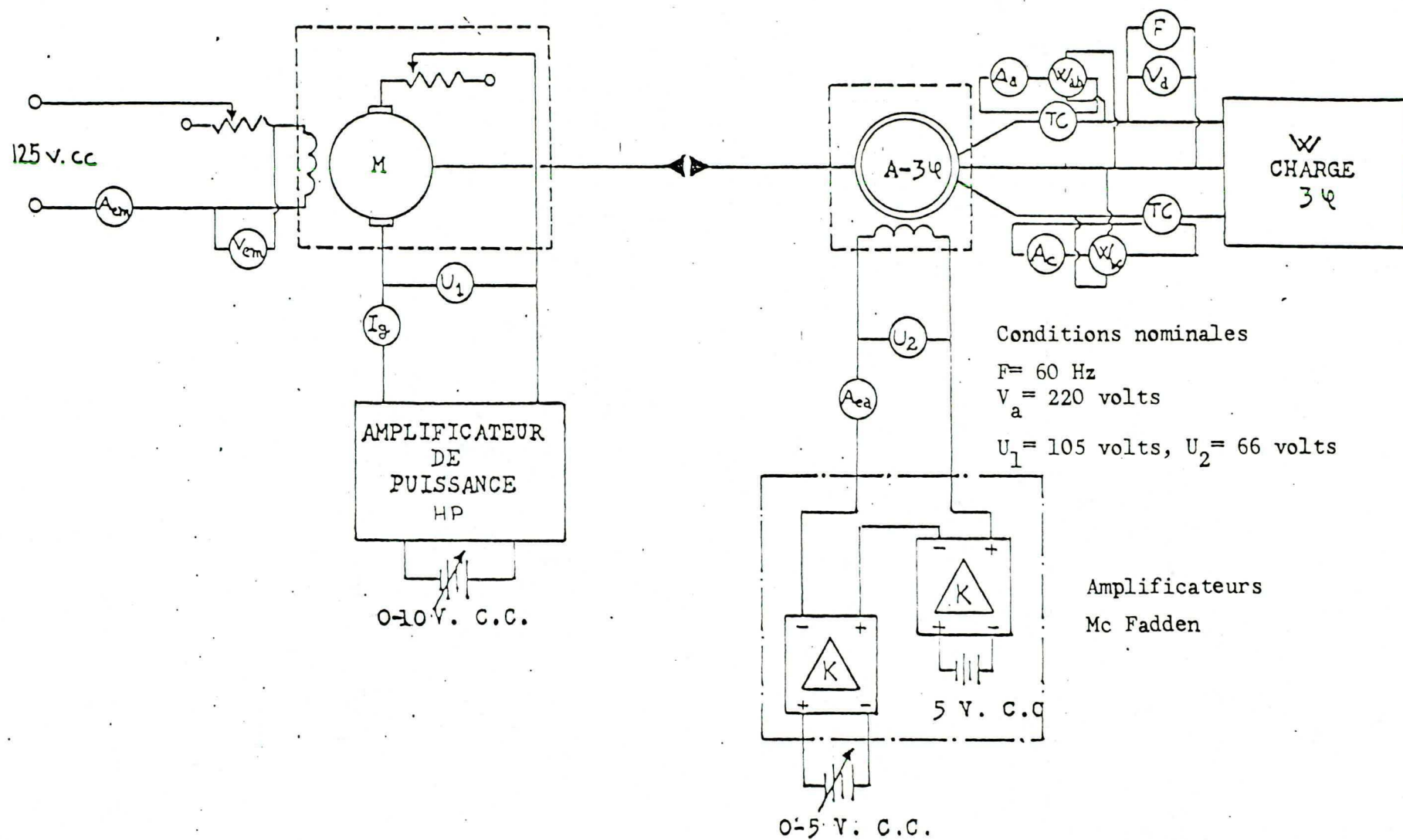


Figure 1 Moteur-Générateur

Posons

- C_1 - tension à l'induit du moteur C.C
 f - fréquence de sortie de la tension générée
 C_2 - tension de l'inducteur de la génératrice
 V - tension de sortie de la génératrice
 h - perturbation de charge en watts

Les équations de base sont

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

avec

$$G_{11}(s) = \frac{f(s)}{C_1(s)} \quad (2) \quad G_{21}(s) = \frac{V(s)}{C_1(s)} \quad (3)$$

pour $C_2 = 0$ ou constant

$$G_{22}(s) = \frac{V(s)}{C_1(s)} \quad (4) \quad G_{12}(s) = \frac{f(s)}{C_1(s)} \quad (5)$$

pour $C_1 = 0$ ou constant.

De plus au niveau des perturbations de puissance exigées à la charge on écrit

$$\frac{\Delta f}{\Delta h} = F_1(s) \quad (6) \quad \text{avec } C_1 \text{ et } C_2 \text{ constants}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = F_2(s) \quad (7) \quad \text{avec } C_1 \text{ et } C_2 \text{ constants}$$

La représentation du système est donnée en Figure 2.

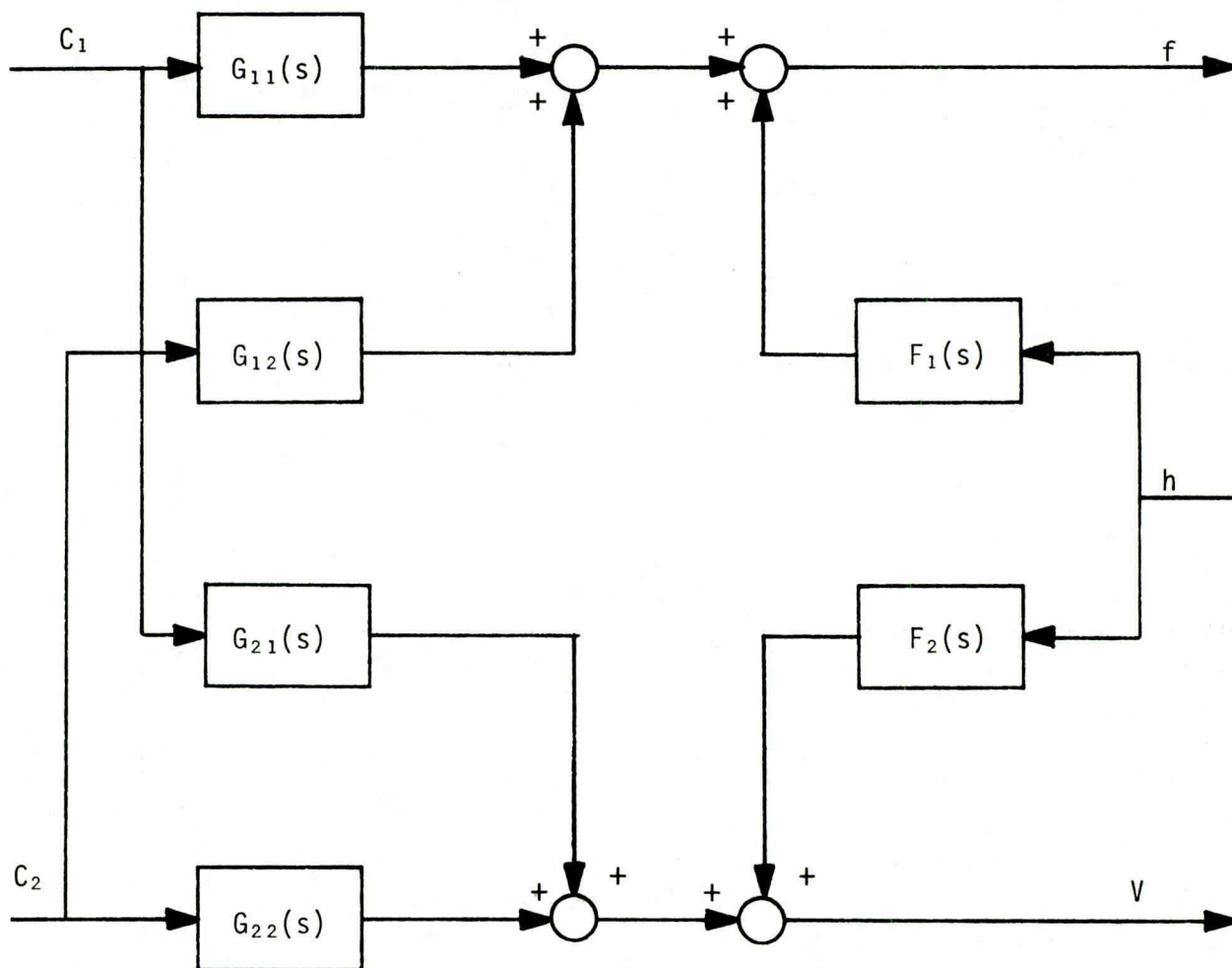


Figure 2 Diagramme fonctionnel du système

Les fonctions $G_{11}(s)$ et $G_{21}(s)$ sont obtenues à partir des réponses $\Delta f(t)$ et $\Delta v(t)$ à un échelon de variation ΔC_1 . De même pour $G_{22}(s)$ et $G_{12}(s)$ et $F_1(s)$ et $F_2(s)$ à partir de ΔC_2 et Δh . Des études harmoniques ont été faites lorsque nécessaire.

2.3 Les boucles classiques

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 ou qui réagit à moyen terme.

Une boucle de régulation de tension qui fait intervenir les variations de tension générée sur l'excitation de la génératrice. L'action est relativement rapide.

Pour notre système le découplage des deux sous-systèmes n'est pas évident, les boucles peuvent intervenir simultanément.

3. LA COMPENSATION

3.1 Position du problème

Dans les boucles classiques les compensateurs sont du type PI puisque l'on désire aucune erreur en régime permanent sur la tension et la fréquence.

Nous allons toutefois étudier la compensation la plus simple; le type proportionnel. La Figure 3 présente le diagramme fonctionnel de base pour un type de régulation.

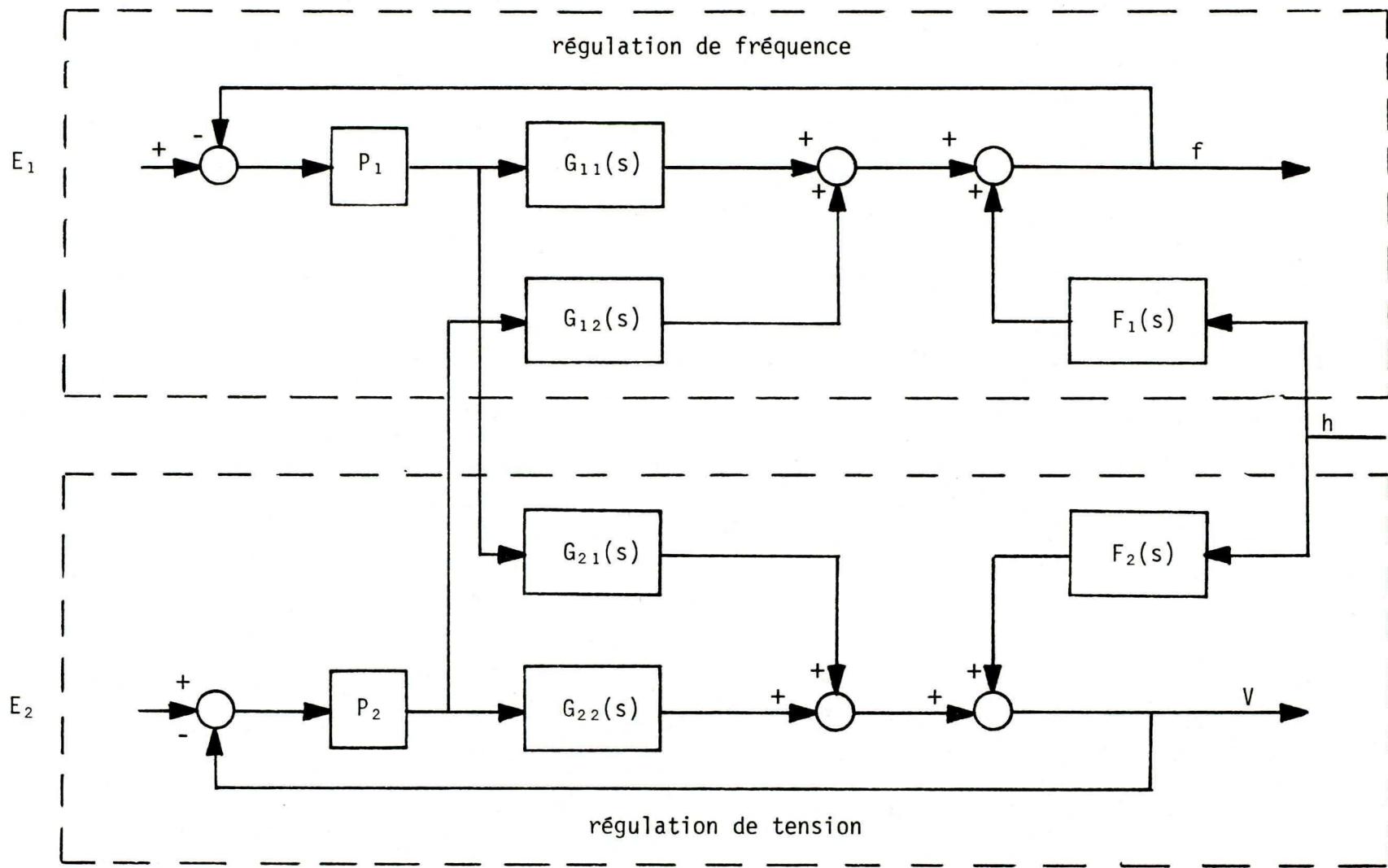


Figure 3 Régulation de tension et de fréquence du type P

En posant d'abord $P_2 = 0$ il vient

$$\frac{\Delta f}{\Delta E_1} = \frac{P_1 G_{11}(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = H_{11}(s) \quad \text{boucle fermée isolée} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta E_1} = \frac{P_1 G_{21}(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = H_{21}(s) \quad \text{nouveau couplage} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta f}{\Delta h} = \frac{F_1(s)}{1 + P_1 G_{11}(s)} = F_1(s) \left(\frac{H_{11}(s)}{P_1 G_{11}(s)} \right) \quad (10)$$

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

$$= [F_2(s) - F_1(s) H_{21}(s)] \quad (12)$$

La boucle de régulation de fréquence influence la perturbation sur les deux variables à commander. La réduction de l'influence sur la première sortie est possible mais il y a accroissement possible sur la seconde sortie.

Posons $P_1 = 0$ les équations sont déduites par analogie avec la boucle de régulation de fréquence

$$H_{22}(s) = \frac{P_2 G_{22}(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} = \frac{\Delta V}{\Delta E_2} \quad (13)$$

$$H_{12}(s) = \frac{P_2 G_{12}(s)}{1 + P_2 G_{22}(s)} = \frac{\Delta f}{\Delta E_2} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = F_2(s) \left(\frac{H_{22}(s)}{P_2 G_{22}(s)} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\Delta f}{\Delta h} = F_1(s) - F_2(s) H_{12}(s) \quad (16)$$

Maintenant si le système possède deux boucles il existe

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{\Delta E_1} &= \frac{P_1 G_{11}(s) [1 + P_2 G_{22}(s)] - P_1 P_2 G_{12}(s) G_{21}(s)}{[1 + P_1 G_{11}(s)] [1 + P_2 G_{22}(s)] - P_1 P_2 G_{12}(s) G_{21}(s)} \\ &= \frac{H_{11}(s) - H_{12}(s) H_{21}(s)}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \end{aligned} \quad (17)$$

Vis à vis la perturbation h, on a

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{\Delta h} &= \frac{F_1(s) [1 + P_2 G_{22}(s)] - F_2(s) P_2 G_{12}(s)}{[1 + P_1 G_{11}(s)] [1 + P_2 G_{22}(s)] - P_1 P_2 G_{12}(s) G_{21}(s)} \\ &= \frac{F_1(s) - F_2(s) H_{12}(s)}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \left[\frac{H_{11}(s)}{P_1 G_{11}(s)} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

De la même manière on obtient

$$\frac{\Delta V}{\Delta E_2} = \frac{H_{22}(s) - H_{12}(s) H_{21}(s)}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \quad (19)$$

et

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{F_2(s) - F_1(s) H_{21}(s)}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \left[\frac{H_{22}(s)}{P_2 G_{22}(s)} \right] \quad (20)$$

3.2 Considérations de base

Du point de vue stabilité

- les boucles $H_{11}(s)$ et $H_{22}(s)$ doivent être stables. Elles sont étudiées indépendamment en fonction des paramètres P_1 et P_2 ;
- la boucle d'intercouplage représentée en Figure 4 doit aussi être stable. Sa stabilité dépend de P_1 et P_2 choisis précédemment.

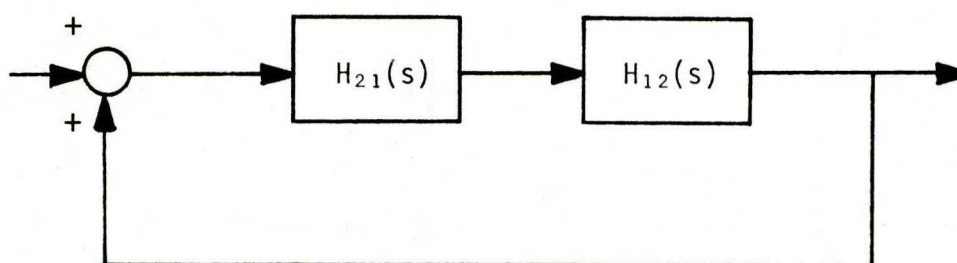


Figure 4 Boucle d'intercouplage

Du point de vue précision et sensibilité

- la sensibilité face aux perturbations dépend du produit de deux fonctions comme l'indiquent les équations (18) et (20).

Le second membre correspond à l'atténuation produite par l'adjonction d'une seule boucle. Ces fonctions sont données en (10) et (15).

Dans les premiers membres apparaît au numérateur la perturbation résultante provoquée par le bouclage d'une boucle seulement. Par exemple, l'influence de la deuxième boucle sur la première {Equation (16)}. L'influence de la première boucle sur la seconde {Equation (12)}.

Le dénominateur est toujours le même et il correspond à la boucle d'intercouplage qui intervient dans l'étude de la stabilité (Figure 4).

3.3 Les données du problème

Il est logique d'aborder le problème de la compensation en trois étapes.

- a) Compensation de la boucle de fréquence seulement en fonction d'une précision sur l'erreur de fréquence permise et de l'obtention d'un bon facteur de surtension ou d'une bonne bande passante.

Par exemple posons une condition sur le facteur de surtension en boucle fermée

$$Q < 1.3 \text{ ou } 2.3 \text{ db}$$

La précision de la boucle de régulation exigera le gain le plus élevé.

- b) De mêmes exigences valent pour la boucle de régulation de tension.
- c) En troisième étape se pose le problème de la stabilité de la boucle d'intercouplage telle que définie en Figure 4. Il serait logique d'exiger un même facteur d'amortissement pour les modes complexes de cette boucle.

La solution du problème de la compensation étant réalisée avec l'objectif de maintenir le système avec un facteur de surtension donné il ne reste qu'à examiner les réponses harmoniques faces aux perturbations. Comme nous l'avons dit en 3.2 les études harmoniques de chaque étape sont utiles en dernière analyse.

4. SOLUTION DU PROBLEME

4.1 L'identification

Paramétrisation de $G_{11}(s)$

L'examen de la réponse indicielle de la fréquence pour une variation de la tension d'induit du moteur permet de conclure que le système est d'ordre élevé. La fonction de transfert du traducteur de fréquence est du premier ordre avec une constante de temps de $\tau = 0.18$ sec. Des essais harmoniques ont produits les données de la Figure 5a. En tenant compte du traducteur il vient que le système possède aussi un second ordre et on a

$$G_{11}(s) = \frac{0.51}{(1+0.18s)(1+0.31s+0.021s^2)}$$

Il faut déduire $1/1+0.18s$ puis calculé à la phase restante à -90° les valeurs de ω_n et ζ

$$G_{11}(\omega_n) = \frac{1}{2\zeta} = -6.7\text{db} \quad \omega_n = 6.9 \quad \zeta = 1.08$$

A la Figure 5b on montre que le mobile et le système ont des réponses individuelles similaires.

Paramétrisation de $G_{12}(s)$

Une procédure semblable à la précédente donne

$$G_{12}(s) = \frac{-0.145}{(1+0.18s)(1+0.55s+0.045s^2)}$$

$$\omega_n = 4.7 \quad G_{12}(\omega_n) = \frac{1}{2\zeta} \Rightarrow -8.3 \text{ db} \quad \zeta = 1.29$$

Les Figures 6a et 6b donnent les réponses harmoniques et temporelles.

Paramétrisation de $G_{22}(s)$

Toujours la même procédure mais cette fois il faut générer par un réseau d'avance de phase le dépassement de la réponse indicielle. Le régime de retour après dépassement donne la constante de temps du retour. On indique à la Figure 7b la manière utilisée pour calculer le zéro.

$$G_{22}(s) = 0.675 \frac{(1+0.62s)}{1+0.48s} \left\{ \frac{1}{1+0.12s+0.0022s^2} \right\}$$

$$\omega_n = 21.4 \quad G_{22}(\omega_n) = -8.3 \text{ db} \quad \zeta = 1.28$$

Les Figures 7a et b donnent les réponses.

Paramétrisation de $G_{21}(s)$

C'est un deuxième ordre avec

$$\omega_n = 8.2 \quad G_{21}(\omega_n) = -8. \text{ db} \quad \zeta = 1.26$$

$$G_{21}(s) = \frac{1.775}{1+0.31s+0.015s^2}$$

Les Figures 8a et b donnent les réponses fréquentielles et temporelles.

Paramétrisation de $F_1(s)$

Dans ce cas on ne peut se permettre la réponse fréquentielle. La méthode de calcul des paramètres du second ordre est celle proposée par Gille, Pelegrin et Decaulne [4]. Il s'agit d'évaluer les paramètres à l'aide de courbes normalisées (Figure 9). Pour une réponse moyennement amortie $0.5 < \zeta < 2$ on calcule

le temps de réponse	t_3 à 80%	\Rightarrow	0.72 sec
"	"	\Rightarrow	0.48 sec
"	"	\Rightarrow	0.24 sec

Ensuite on calcule

$$\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1} = 1$$

la courbe normalisée donne alors

$$\zeta = 1 \qquad \omega_n t_1 = 1 \qquad \omega_n = 4.17$$

Puis $t_2/t_1 = 2$

la deuxième courbe normalisée vérifie

$$\zeta = 1 \qquad \omega_n t_2 = 2 \qquad \omega_n = 4.17$$

et enfin $t_3/t_1 = 3$

avec le même résultat $\zeta = 1 \quad \omega_n = 4.17$

Donc
$$F_1(s) = \frac{-0.188}{1+0.48s+0.058s^2}$$

La Figure 10 donne la réponse indicielle de ce système.

Paramétrisation de $F_2(s)$

Dans ce cas on calcule rapidement que

$$\begin{array}{lll} t_3 \text{ à } 80\% & \Rightarrow & 0.40 \text{ sec} \\ t_2 \text{ à } 59\% & \Rightarrow & 0.20 \text{ sec} \\ t_1 \text{ à } 26\% & \Rightarrow & 0.04 \text{ sec} \end{array}$$

Avec les courbes normalisées on constate que $\zeta \gg 1$. Il existe donc un mode du premier ordre très lent

$$F_2(s) = \frac{-1.2}{1+0.24s}$$

Cette fonction correspond à la réponse indicielle du système réel avec une bonne précision.

4.2 Mise au point des boucles

Boucle de régulation de tension

La représentation de $G_{11}(j\omega)$ dans un plan de Black est faite en Figure 11. Pour obtenir un facteur de surtension de $Q = 2.3\text{db}$ il faut

$$P_1 = 5.75$$

On a alors $f_R = 1.2$, $\omega_R = 7.5 \text{ rad/sec}$

La marge de gain est $\Delta G_M = 9.8 \text{ db}$

La marge de phase $\Delta \phi_M = 46^\circ$

Boucle de régulation de tension

La représentation est en Figure 12.

Dans ce cas on a

$$\begin{aligned} P_2 &= 12.6 \\ \Delta G_M &= \infty \\ \Delta \phi_M &= 45^\circ \end{aligned}$$

La pulsation de résonance est de 62.8 rad/sec.

Boucle d'intercouplage

Comme le montre la Figure 13 la boucle d'intercouplage est fortement amortie. Ses modes transitoires plutôt lents auront des résidus très faibles donc ils auront peu d'influence sur les transitoires temporelles.

4.3 Etudes simulées de la sensibilité

Notre propos est l'étude progressive de la sensibilité de chaque boucle. A chaque adjonction de boucle l'influence sur l'une et l'autre des sorties est vérifiée.

Boucle de fréquence seulement

Le bouclage de la fréquence avec un gain $P_1 = 5.75$ améliore la tenue en fréquence par une atténuation de la perturbation de -12db (Figure 14) en régime statique et sur toutes les fréquences. A cause de cette même boucle la tenue de la tension est aussi améliorée de -4.5db (Figure 15).

Boucle de tension seulement

La boucle de tension avec un gain $P_2 = 12.6$ rejette bien la perturbation (-19.5db) comme l'indique la Figure 15. Cependant la régulation de la fréquence n'est pas effectuée (+9db) Figure 14.

Boucle de tension et de fréquence

La mise en place des deux boucles est avantageuse dans le maintien de la fréquence -6.5db et de la tension -27.5db. Les diagrammes des Figures 14 et 15 montrent que la rapidité de réponse de la boucle de tension domine même si on a deux boucles (bande passante de 10 hz) pour le rejet de la perturbation. Il en est ainsi de la boucle de fréquence qui se limite à 1 hz même avec les deux boucles simultanées.

5. UTILISATION DE L'ABAQUE DE NICHOL ET DU PRINCIPE D'INVARIANCE

5.1 Notions préliminaires

L'abaque de Nichol peut aussi bien faire la transformée de la réponse en boucle ouverte à boucle fermée en asservissement que celle à réponse en atténuation en régulation. Les Figure 16 indique l'utilisation de l'abaque pour le premier cas et la Figure 17 donne la disposition pour le deuxième problème.

Dans notre étude d'une centrale nous avons mené la solution du problème en fonction de la stabilité et d'un bon amortissement de la réponse en asservissement. Il est possible de développer une solution pour obtenir une bonne immunité face aux perturbations. Avec cette optique il sera possible d'évaluer les influence d'un bouclage sur les performances de la sortie non-régulée.

5.2 Le problème de base

Le principe d'invariance a été préconisé par V.G. Shtchipanov et Luzin [5] dans les années 40. D'abord une notion mathématique les implications pratiques et techniques ont été présentées par Petrov [5] et Tchinaev [6]. Récemment De Santis et Lefebvre ont utilisé ce principe pour le découplage dans les systèmes multivariables. [1] [2] [3]

Pour en rendre compte simplement il faut reprendre dans notre application les équations (10) et (12) de la boucle de fréquence et les équations (15) et (16) de la boucle de tension.

Boucle de fréquence

L'atténuation sur la sortie de fréquence lors de la mise en place d'une boucle P_1 donne

$$\frac{\Delta f}{\Delta n} = F_1(s) \frac{1/P_1(s)}{1/P_1(s) + G_{11}(s)} \quad (21)$$

Posons $\alpha_{11} = \frac{1/P_1(s)}{1/P_1(s) + G_{11}(s)} \quad (22)$

Pour la tension on a

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = F_1(s) \frac{1/P_1(s) + P^{11}(s)}{1/P_1(s) + G_{11}(s)} \quad (23)$$

$$P^{11}(s) = \frac{F_2(s) G_{11}(s) - F_1(s) G_{21}(s)}{F_2(s)} \quad (24)$$

et on reconnaîtra que

$$P_1(s) = -1/P^{11}(s) = P_{11}(s) \quad | \quad I \quad (25)$$

c'est la forme que devrait prendre la compensation dans la boucle de fréquence pour inhiber toutes perturbations sur la tension. C'est le compensateur à invariance absolue.

Posons
$$\frac{1/P_1(s)}{1/P_1(s) + P^{11}(s)} = \gamma_{11} \quad (26)$$

Ainsi
$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{\alpha_{11}}{\gamma_{11}} = \beta_{11} \quad (27)$$

β_{11} est la sensibilité de la tension face à la boucle de fréquence.

Boucle de tension

Par un même raisonnement on a

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = F_2(s) \frac{1/P_2(s)}{1/P_2(s) + G_{22}(s)} \quad (28)$$

$$\frac{1/P_2(s)}{1/P_2(s) + G_{22}(s)} = \alpha_{22} \quad (29)$$

$$P^{22}(s) = \frac{F_1(s) G_{22}(s) - F_2(s) G_{12}(s)}{F_1(s)} \quad (30)$$

$$P_2(s) = -1/P^{22}(s) = P_{22}(s) |_I \quad (31)$$

C'est le compensateur d'invariance pour la perturbation sur la fréquence.

Et il vient
$$\frac{1/P_2(s)}{1/P_2(s) + P^{22}(s)} = \gamma_{22} \quad (32)$$

$$\frac{\Delta f}{\Delta h} = \frac{\alpha_{22}}{\gamma_{22}} = \beta_{22} \quad (33)$$

Boucles de tension et de fréquences

Ainsi la mise en place des deux boucles procure les sensibilités suivantes

$$\frac{\Delta F}{\Delta h} = F_1(s) \left[\frac{1}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \right] \beta_{11} \cdot \alpha_{22} \quad (34)$$

découlant directement de l'équation (18) la fonction en parenthèses est l'intercouplage entre la boucle 1 et la boucle 2. Ensuite il vient

$$\frac{\Delta V}{\Delta h} = F_2(s) \left[\frac{1}{1 - H_{12}(s) H_{21}(s)} \right] \alpha_{22} \cdot \beta_{11} \quad (35)$$

qui découle de (20).

Notre mise au point doit donc avoir pour but de rendre aussi petit que possible les produits $\alpha_{11} \cdot \beta_{22}$ et $\alpha_{22} \cdot \beta_{11}$. Il faut cependant respecter les conditions impératives concernant la stabilité.

5.3 Evaluation de la solution

Quelque peu inspiré par la solution que nous avons déjà développée nous constatons que la réduction en régime statique ($\omega = 0$) est importante.

En fait cette atténuation se maintient pour une bonne plage de fréquence avant de chuter.

Boucle de fréquence

Dans un plan de Black traçons les lieux de transfert de $G_{11}(j\omega)$ et $P^{11}(j\omega)$ (Figure 18). Définissons la plage permissible de gain pour avoir sur la boucle #1 $Q \leq 2.3\text{db}$. Plaçons le centre de l'abaque de Nichol sur $G_{11}(0)$ et lisons $\alpha_{11}(s)$

$$\alpha_{11}(0) = - 12 \text{ db}$$

Pour un gain plus faible que $P_1 = 5.75$ l'atténuation se détériore.

Plaçons le centre de l'abaque en $P^{11}(0)$ et lisons $\gamma_{11}(0)$

$$\gamma_{11}(0) = - 7.5 \text{ db}$$

$$\lg \beta_{11} = \lg \alpha_{11} - \lg \gamma_{11} = - 4.5$$

Pour un gain plus faible que $P_1 = 5.75$ on a $\beta_{11} > - 4.5$ donc dégradation.

Le gain le plus élevé est un bon choix pour cette boucle puisqu'il rend α_{11} et β_{11} minimum.

Boucle de tension

Le tracé des lieux de transfert de $G_{22}(j\omega)$ et $P^{22}(j\omega)$ est fait en Figure 19. La gamme de gain P_2 permise est indiquée.

Du point $G_{22}(0)$ on lit avec l'abaque au point $-1/12.6$, $\alpha_{22}(0) = -19.5 \text{ db}$

Du point $P^{22}(0)$ il vient $\gamma_{22}(0) = - 28.5 \text{ db}$

$$\lg \beta_{22}(0) = \lg \alpha_{22} - \lg \gamma_{22} = 9.5 \text{ db}$$

Pour une réduction du gain il y a rapidement α_{22} qui augmente et β_{22} qui diminue. Il y a là un dilemme ou bien on réduit les variations de tension et on laisse augmenter les variation de fréquence ou on ne régularise pas la tension du tout. Le choix nous semble venir de soi puisque nous avons établi la façon de commander le système, à savoir: régulariser les deux variables.

Boucle de tension et de fréquence

Le calcul de l'atténuation due au couplage nous donne

$$20 \lg \left| \frac{1}{1 - H_{21}(0) H_{12}(0)} \right| = \underline{-3.5 \text{ db}}$$

par une lecture directe avec l'abaque de Nichol sur la Figure 13. Il vient alors pour l'atténuation de fréquence

$$\begin{aligned} \lg \alpha_f &= \lg \alpha_{11} - \lg \beta_{22} - 3.5 \text{ db} \\ &= -12.4 + 9.5 - 3.5 = -6.5 \text{ db} \end{aligned}$$

Pour la tension il existe $\lg \alpha_v = \lg \alpha_{22} - \lg \beta_{11} - 3.5$

$$= -19.5 - 4.5 - 3.5 = -27.5 \text{ db}$$

Ces données sont toutes vérifiables aux Figures 14 et 15.

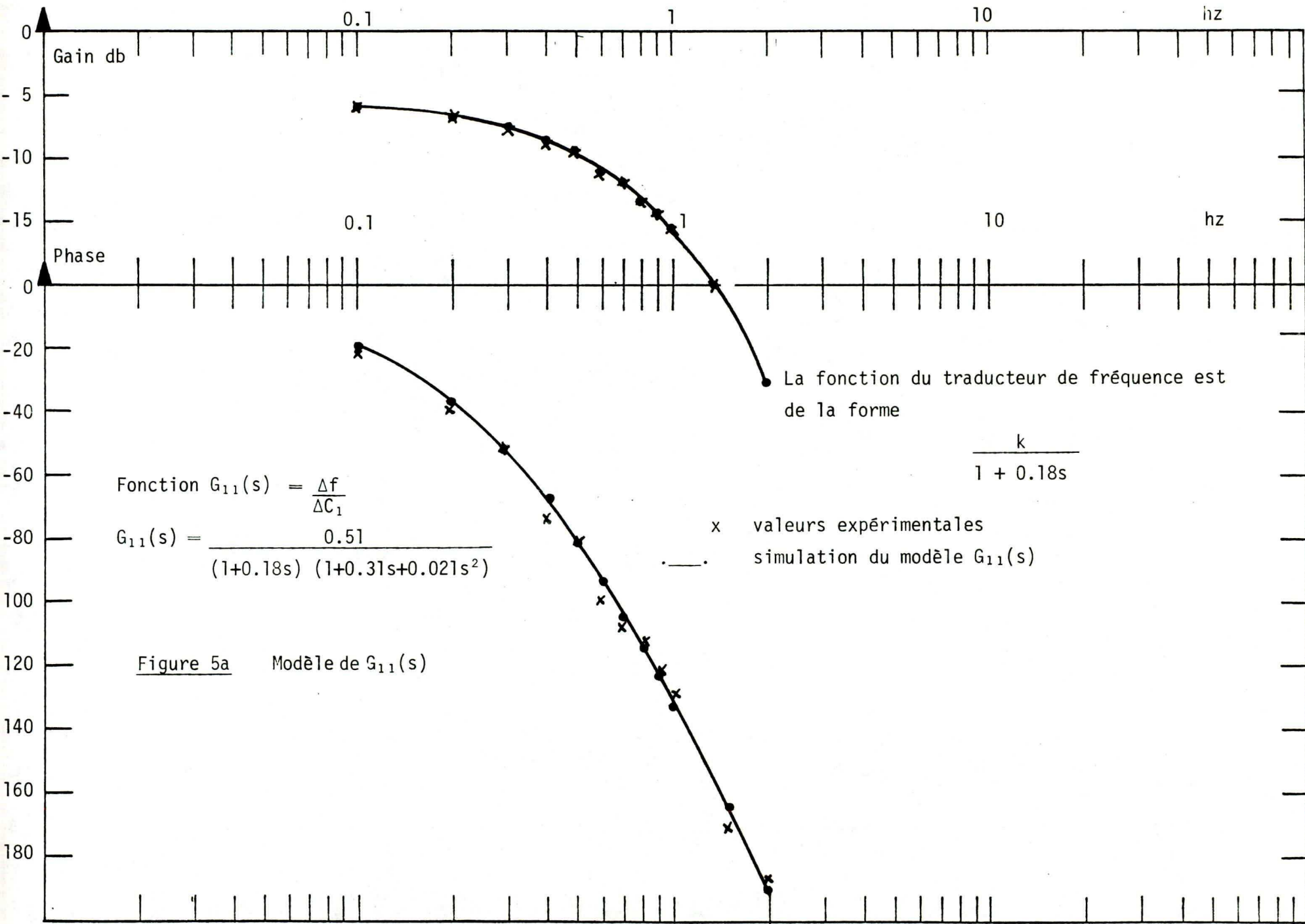
5.4 Commentaires

Au niveau de ce projet nous n'avons pas abordé le choix rationnel des boucles; ce sont les boucles usuellement mise en place que nous avons analysées. Un projet est maintenant en cours pour élucider cet aspect du problème.

Il est aussi sous projet de compenser le système de manière à obtenir une meilleure précision et un meilleur temps de réponse.

6. CONCLUSION

Ce projet démontre qu'il est possible d'analyser un système multivariable avec des méthodes orthodoxes. L'identification apparaît comme étape fondamentale tant du point de vue stabilité que du point de vue sensibilité. Il est maintenant possible de calculer des compensateurs en tenant compte des différences entre les deux boucles: la boucle de tension étant rapide et exigeant peu de puissance, la boucle de fréquence étant lente à cause de son besoin en énergie. C'est donc à partir de ces notions que l'on peut résoudre pratiquement les problèmes de la compensation.



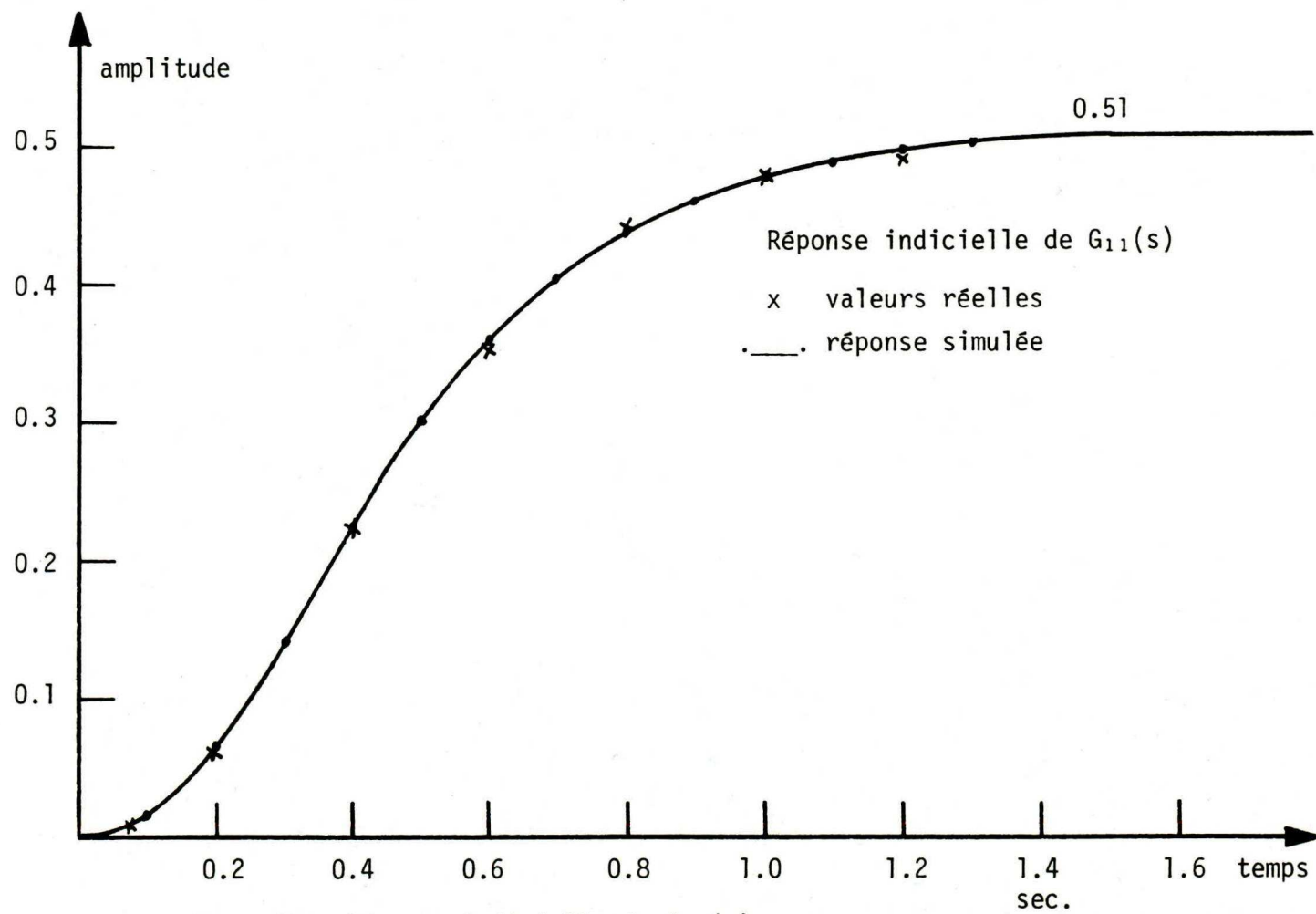
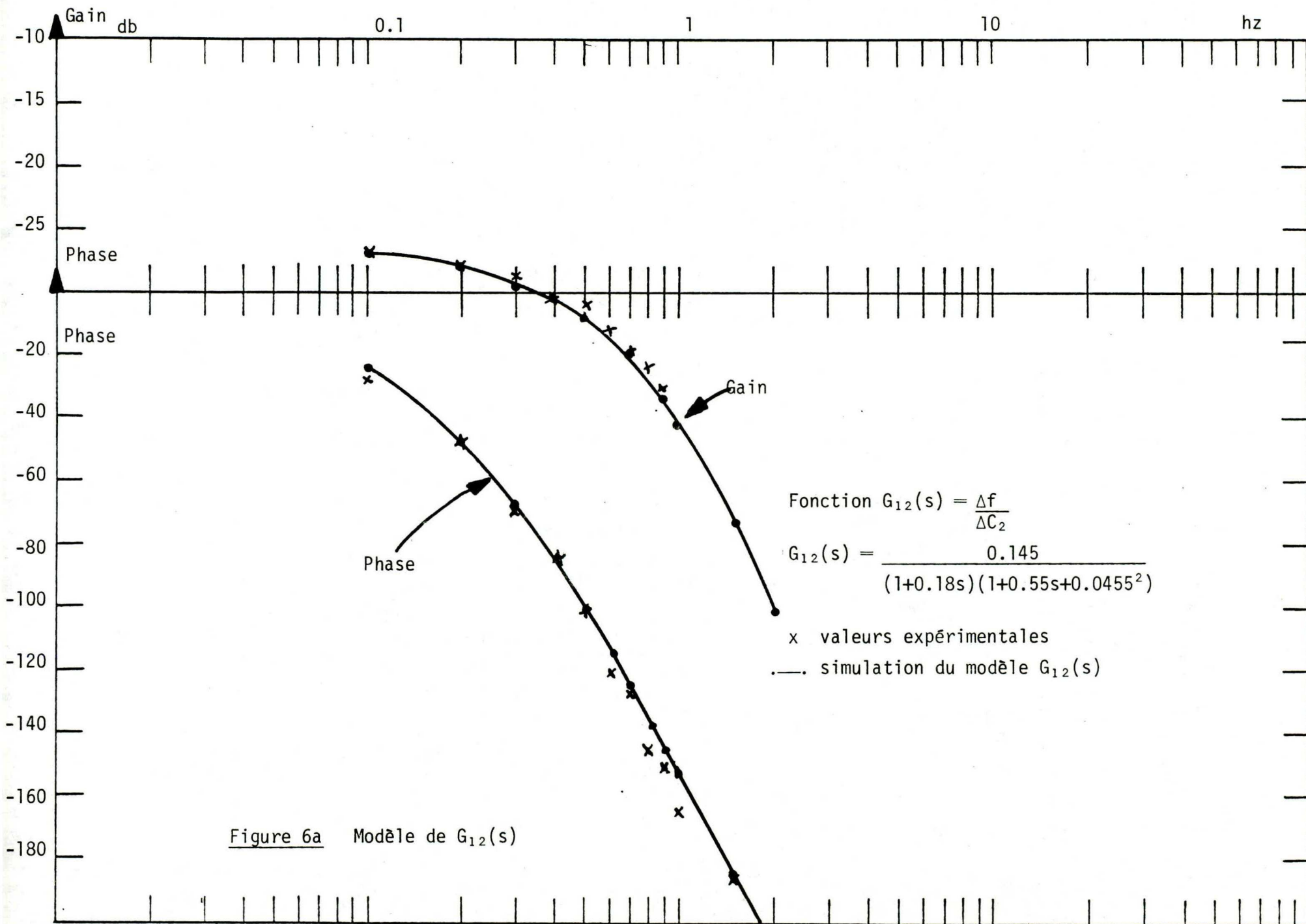


Figure 5b Réponse indicielle de $G_{11}(s)$



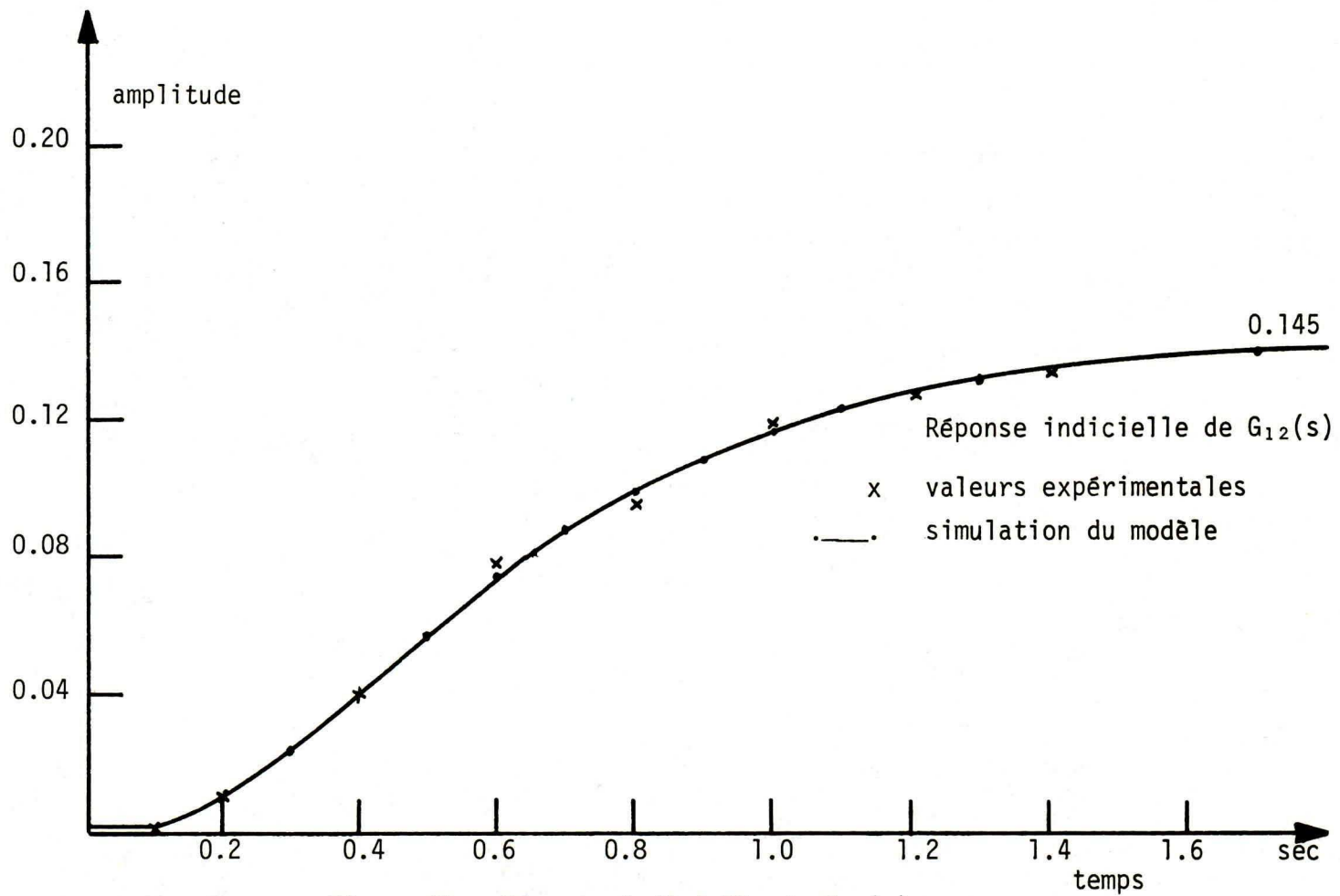


Figure 6b Réponse indicielle de $G_{12}(s)$

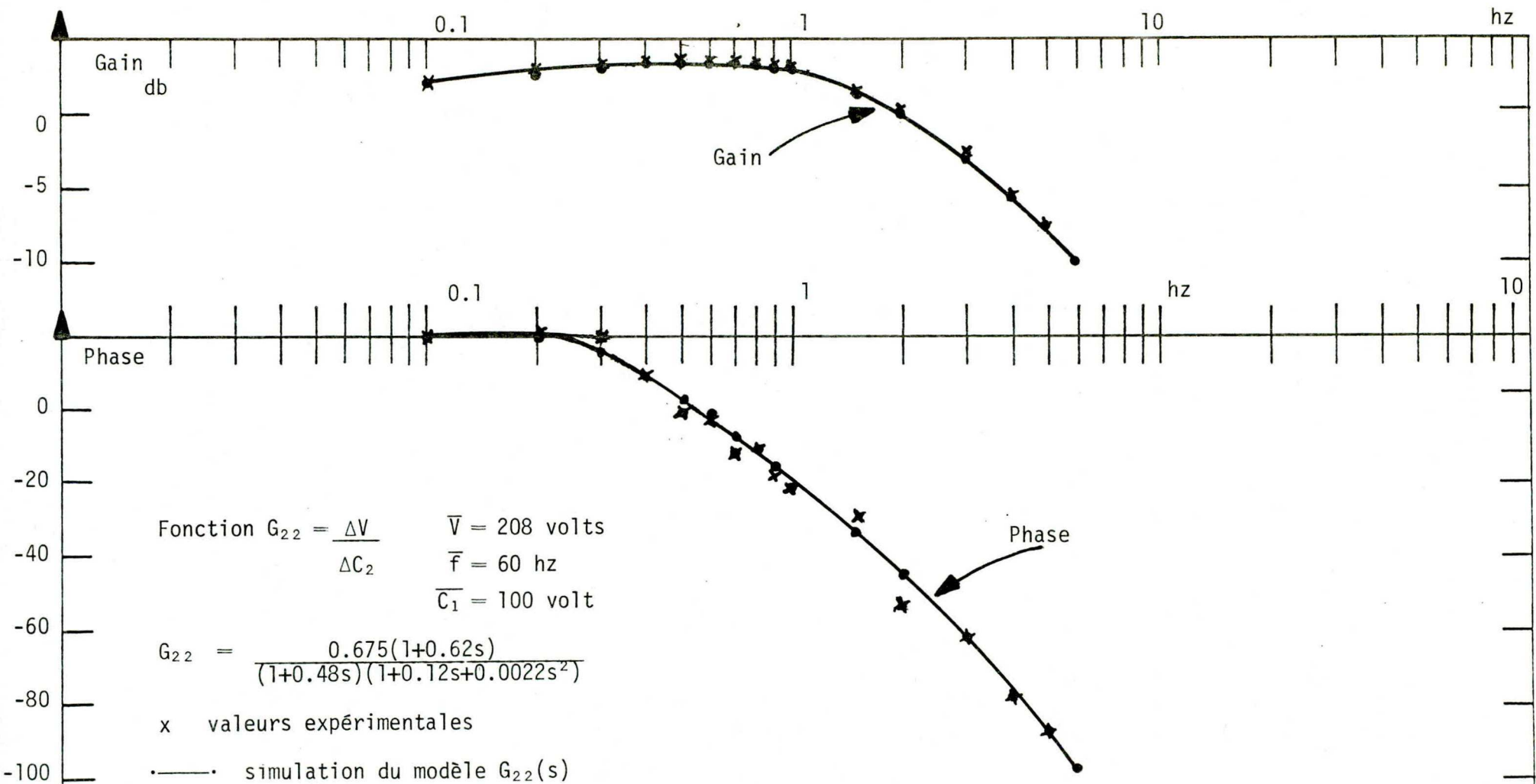


Figure 7a Réponse harmonique de $G_{22}(s)$

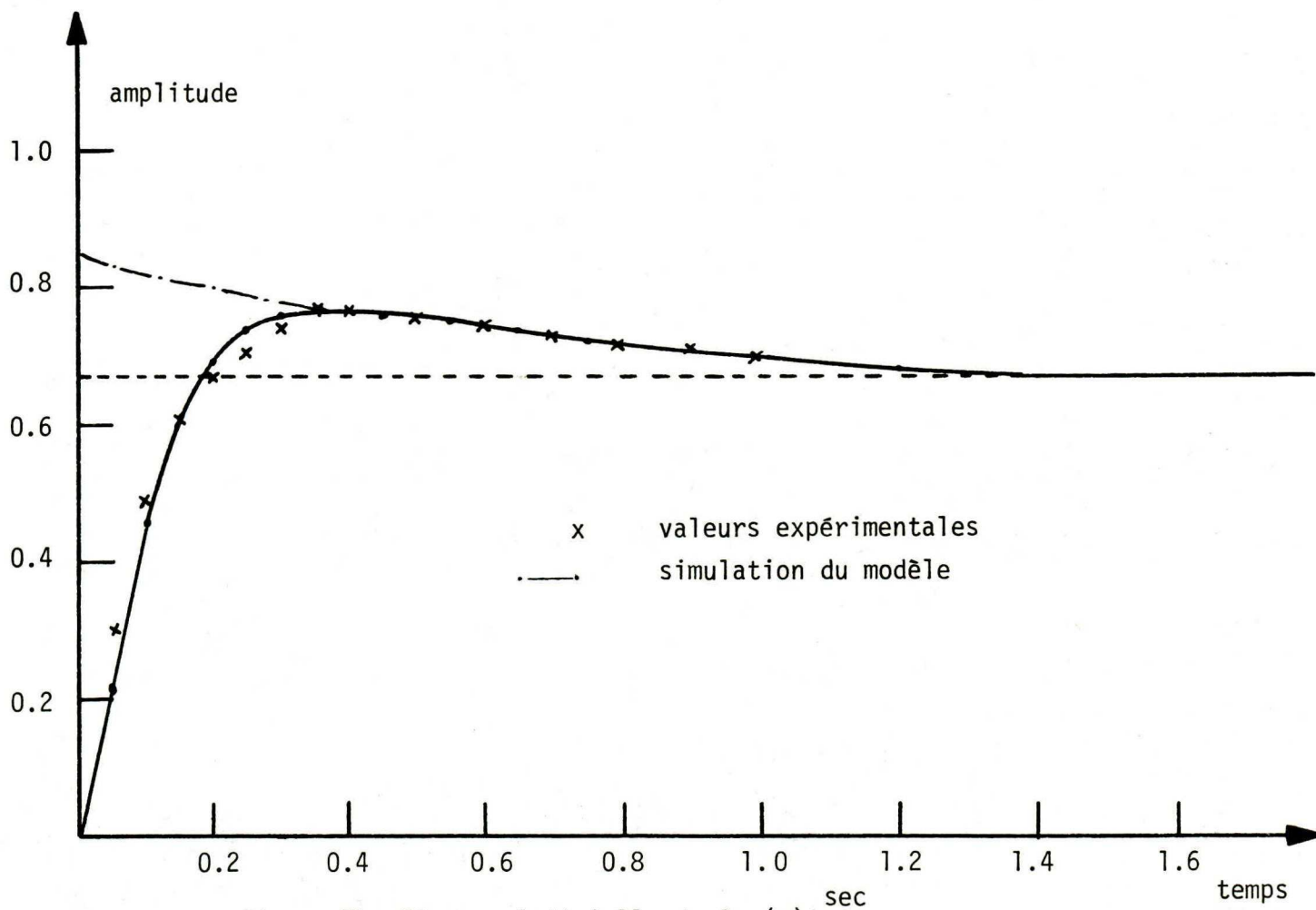
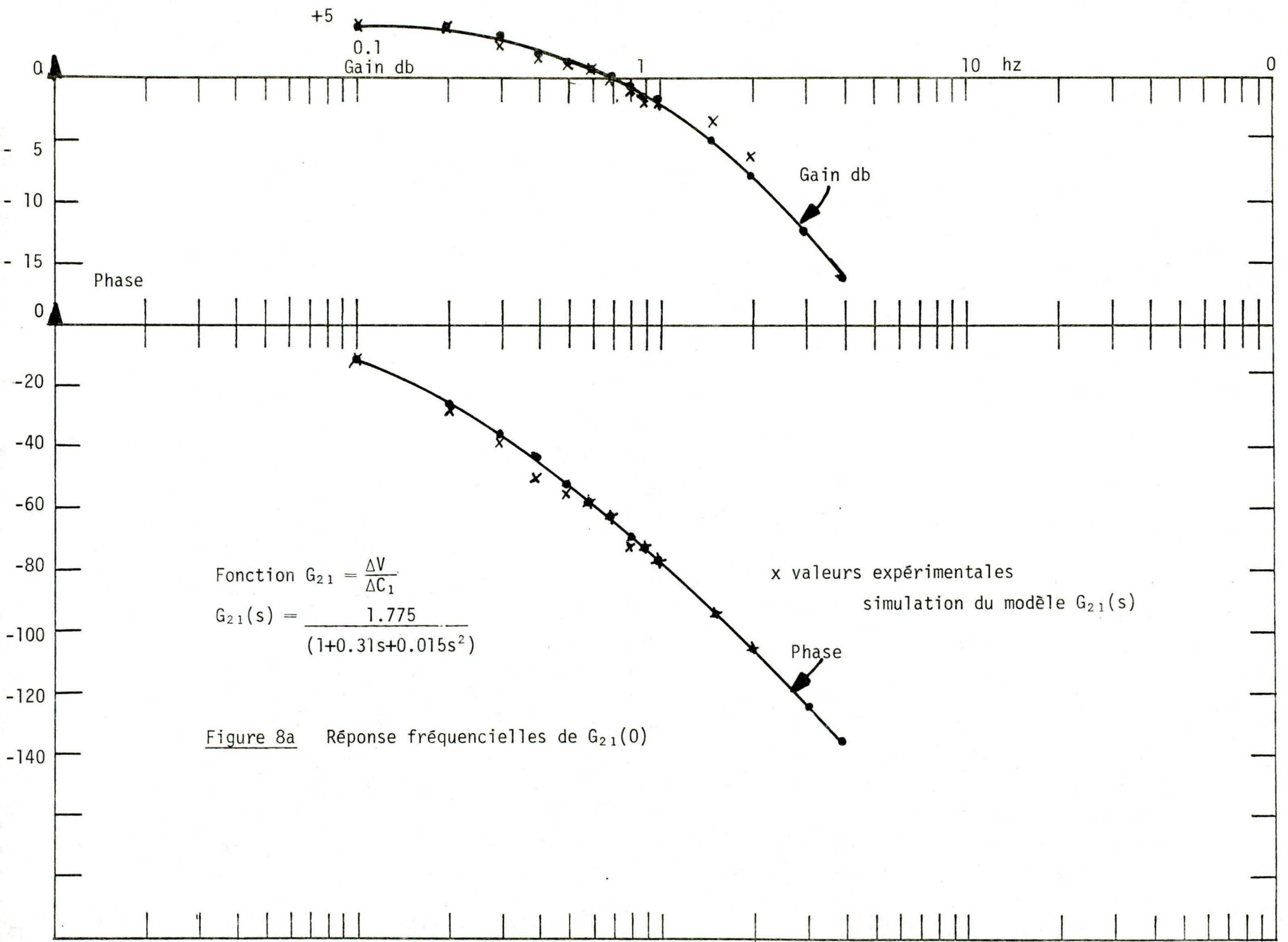


Figure 7b Réponse indicielle de $G_{22}(s)$



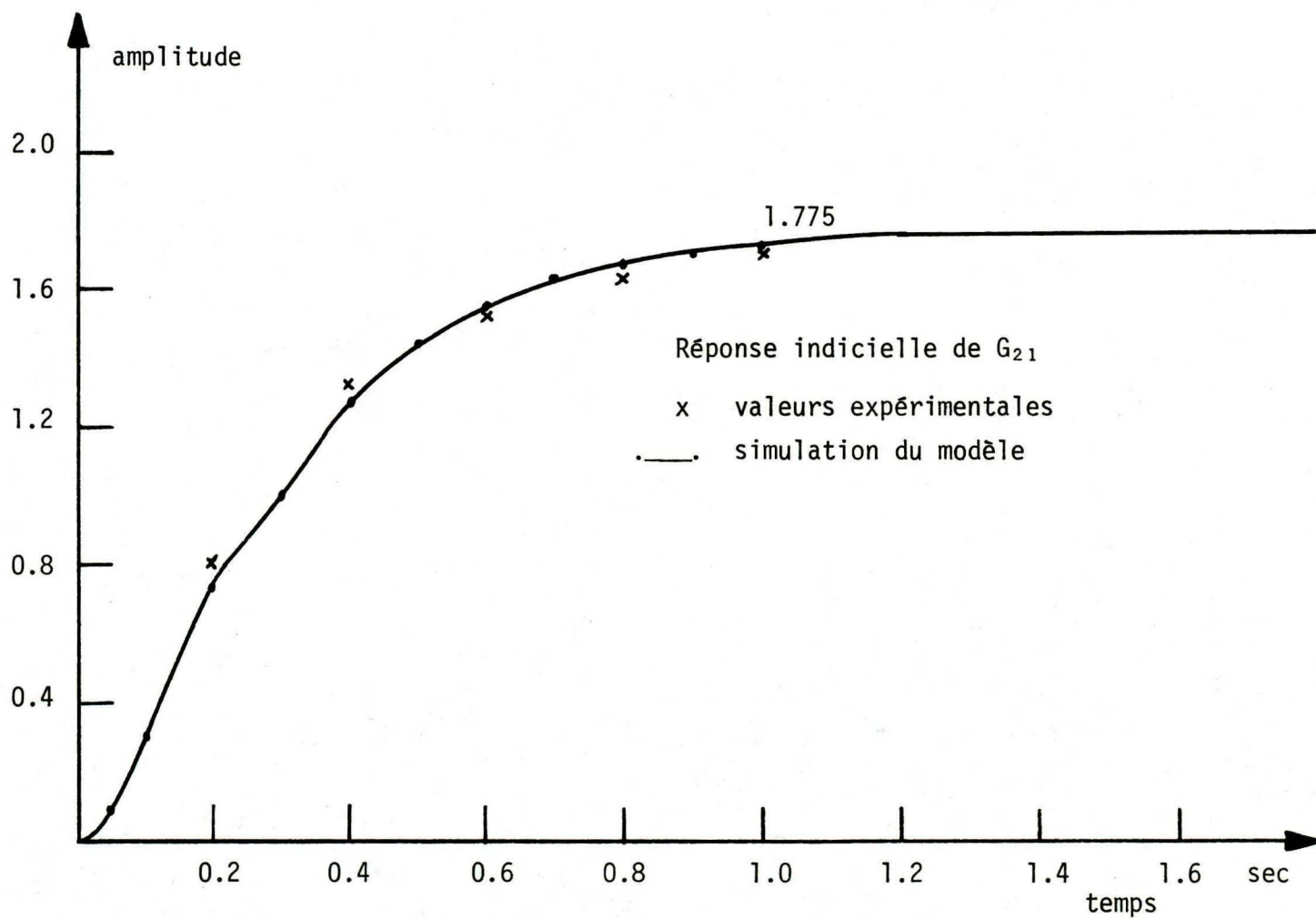


Figure 8b Réponse indicielle de $G_{21}(s)$

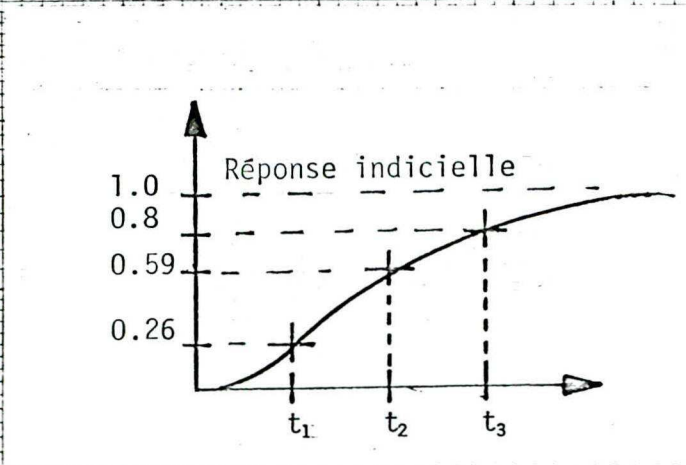
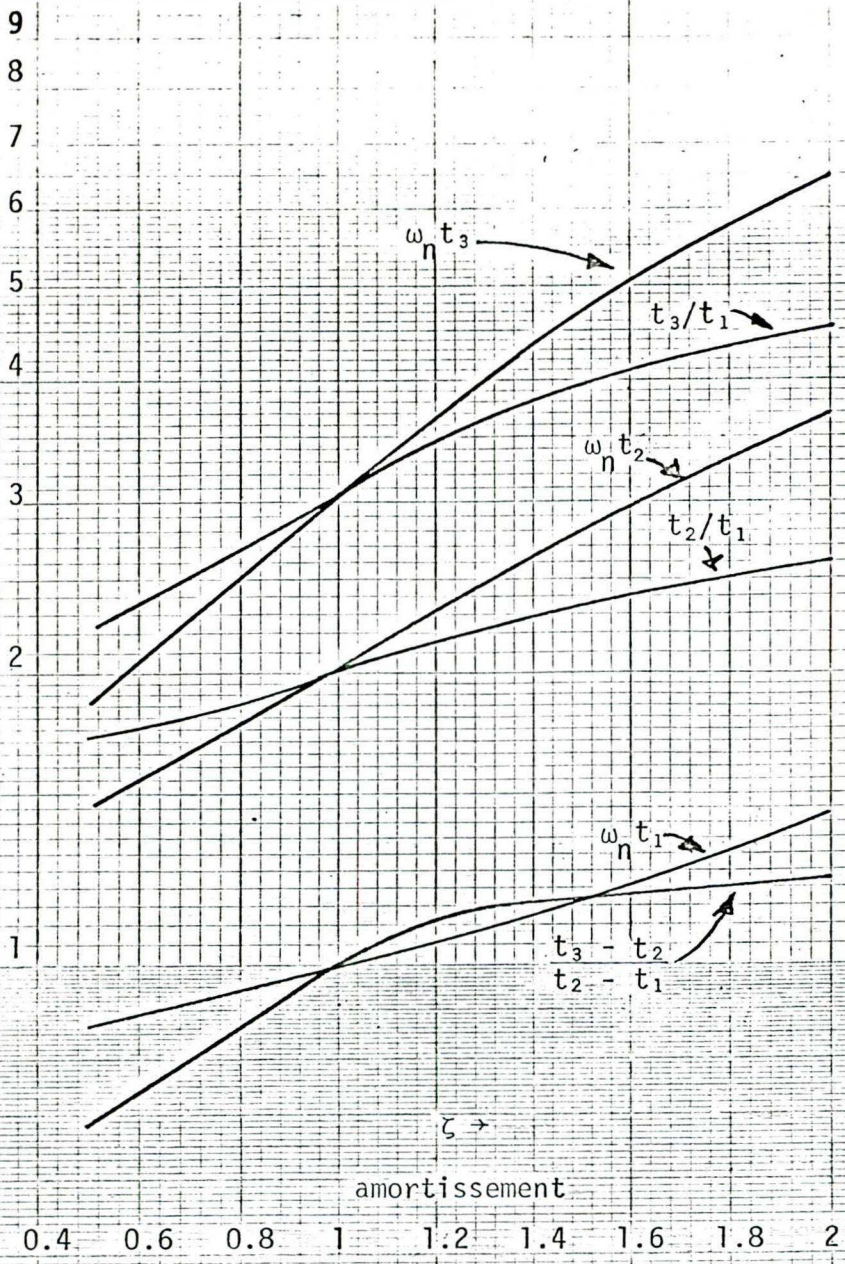


Figure 9 Paramètres z et ω_n d'une réponse indicielle faiblement oscillatoire

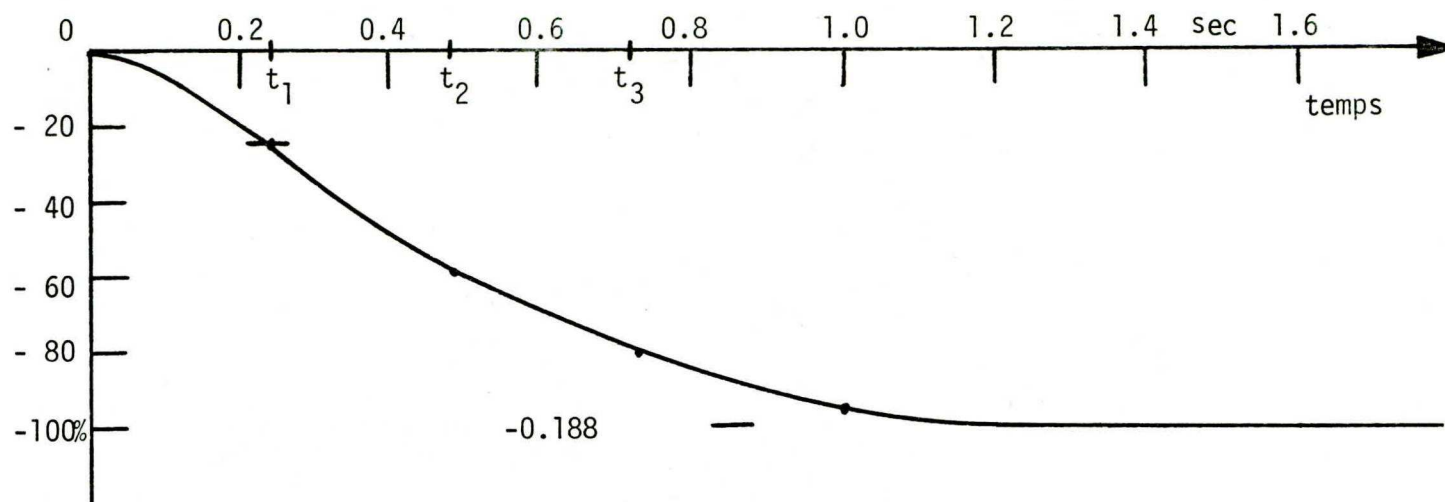


Figure 10 Réponse indicielle de perturbation sur la fréquence $[F_1(s)]$

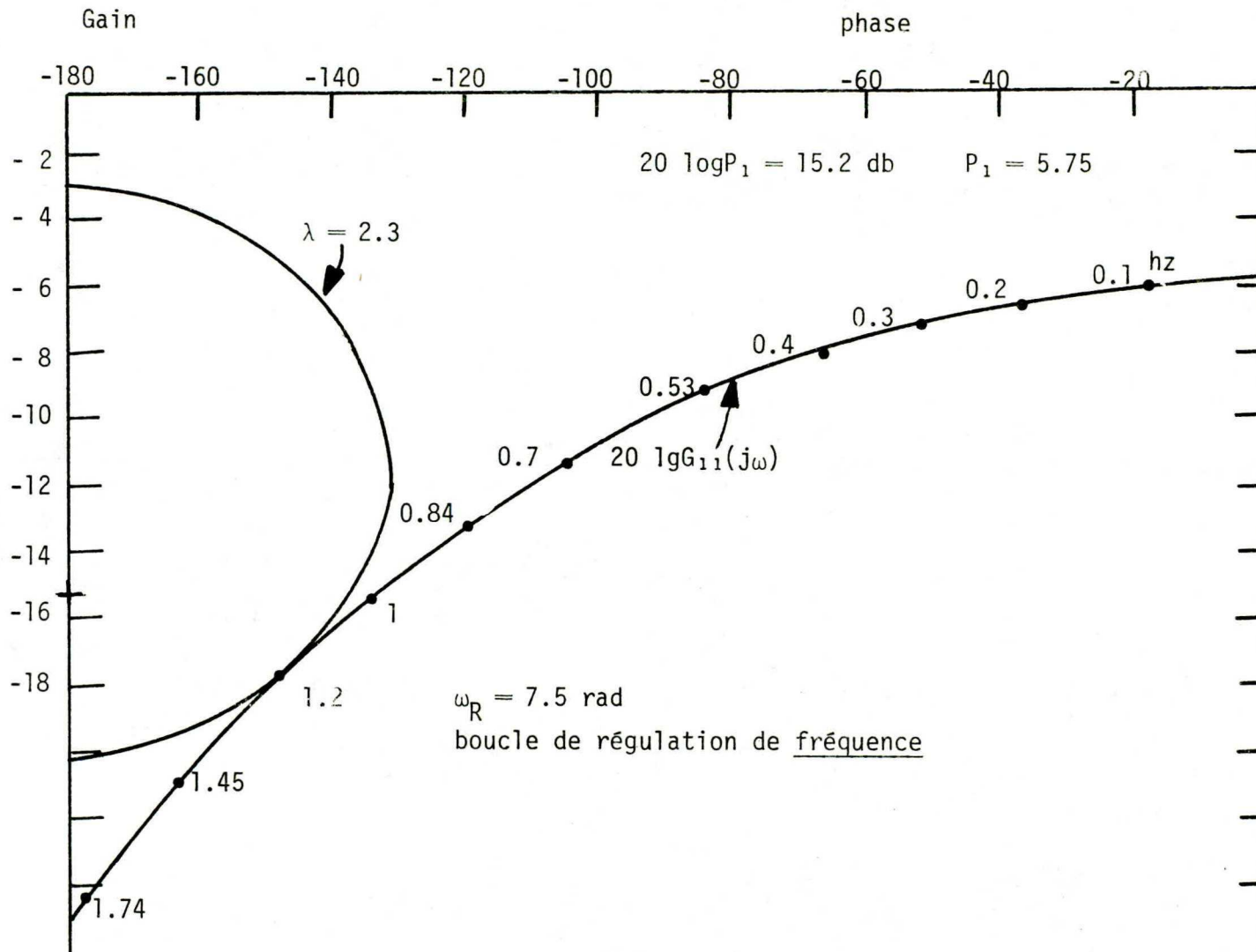


Figure 11 Diagramme de Black
Amortissement avec $Q = 2.3 \text{ db}$

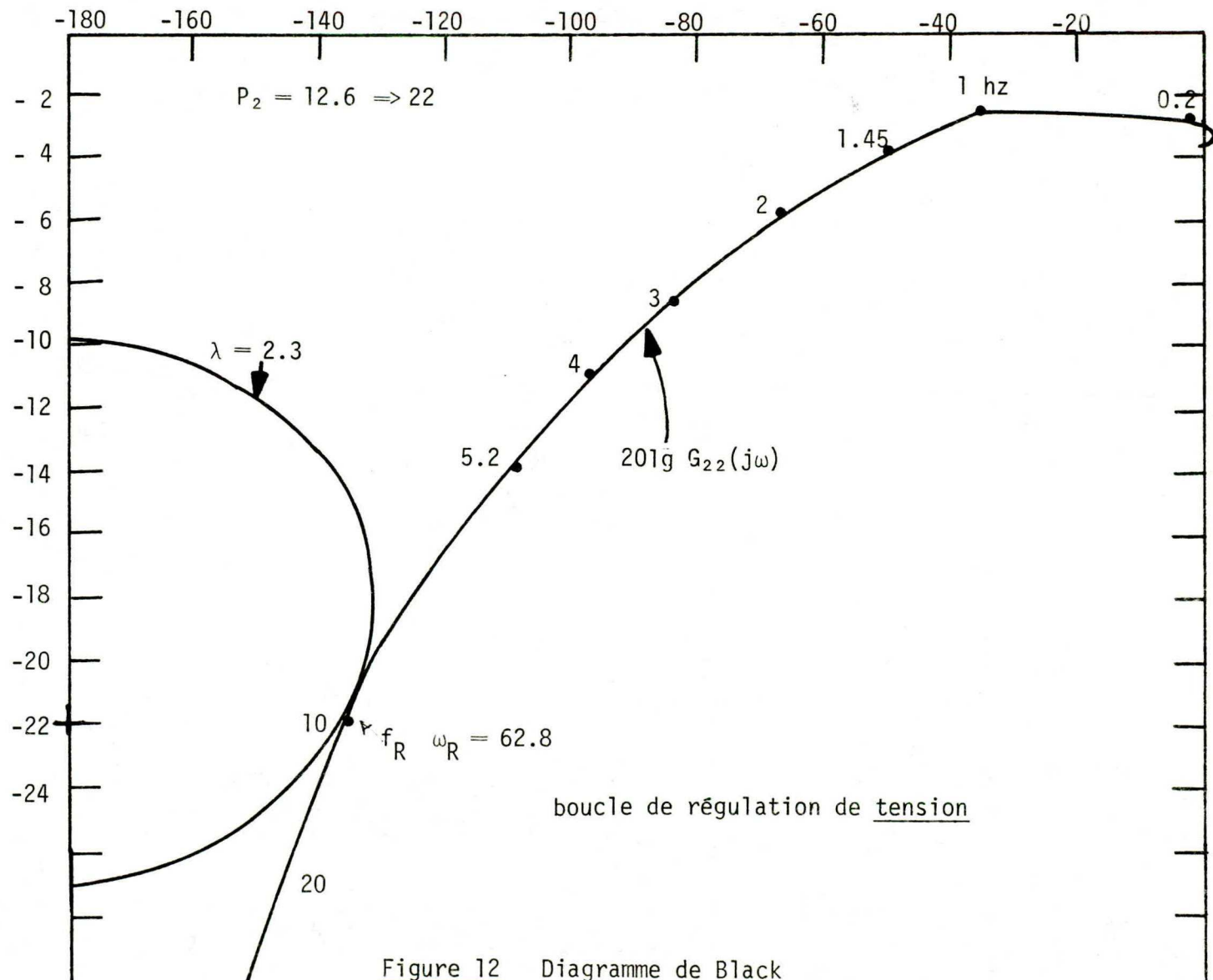


Figure 12 Diagramme de Black
 Amortissement avec $Q = 2.3$ db

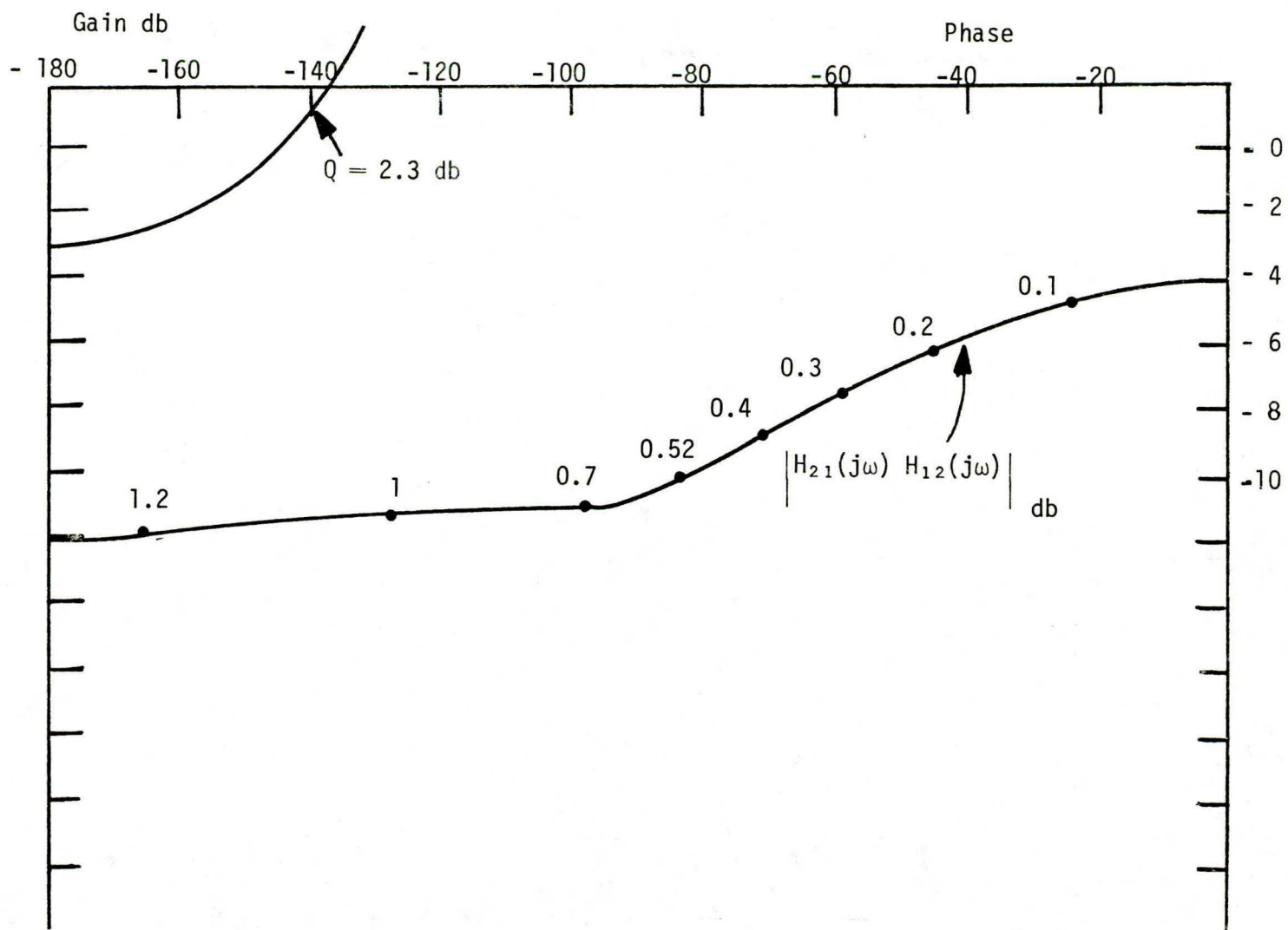


Figure 13 Boucle d'intercouplage

$$H_{21}(s) H_{12}(s) \quad P_1 = 5.75 \quad P_2 = 12.6$$

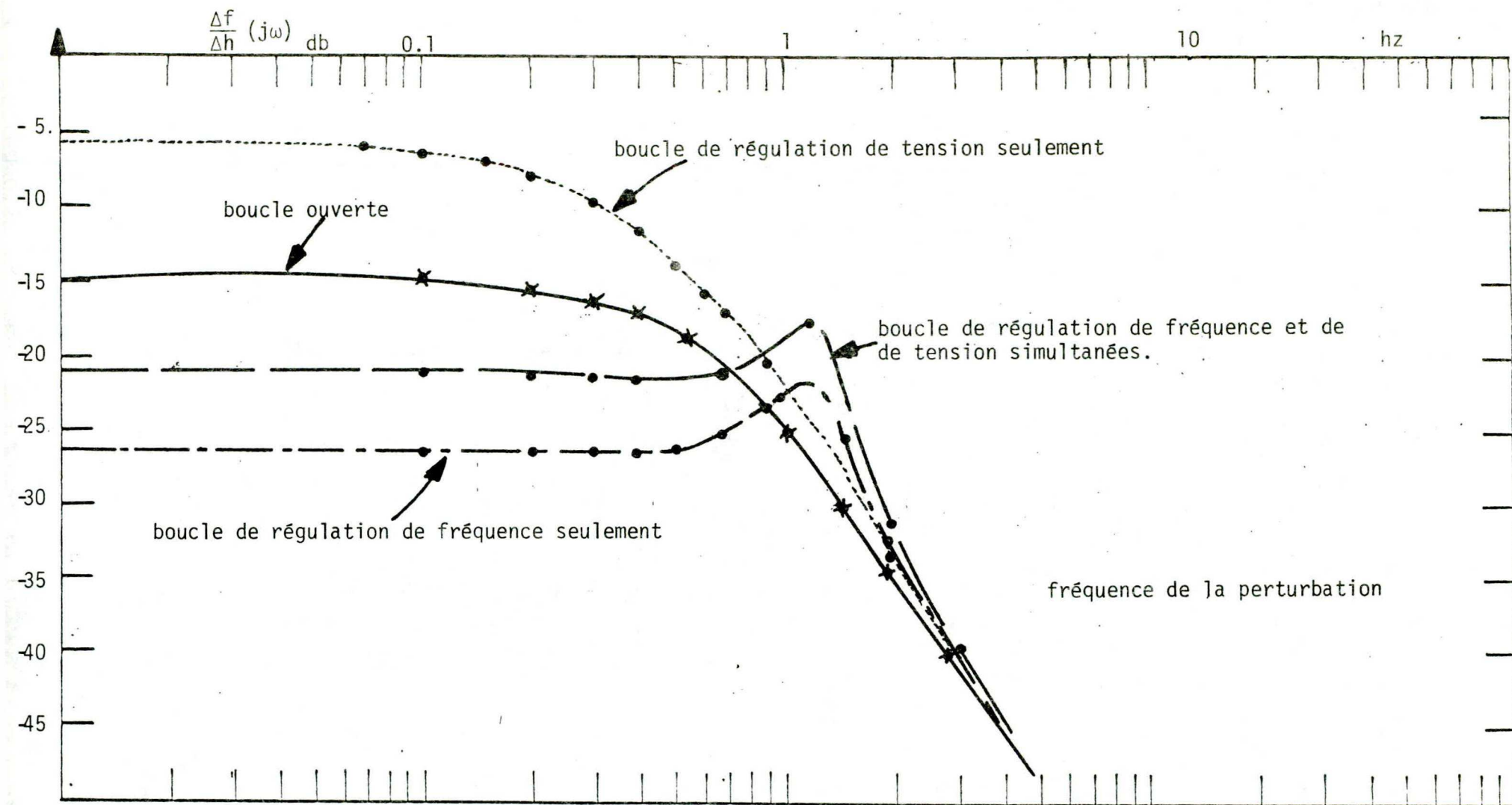


Figure 14 Fonction de sensibilité de la fréquence face aux perturbations de charge de type sinusoidale.

Commande de type proportionnel

$P_1 = 5.75$

$P_2 = 12.6$

$Q < 2.3$ db

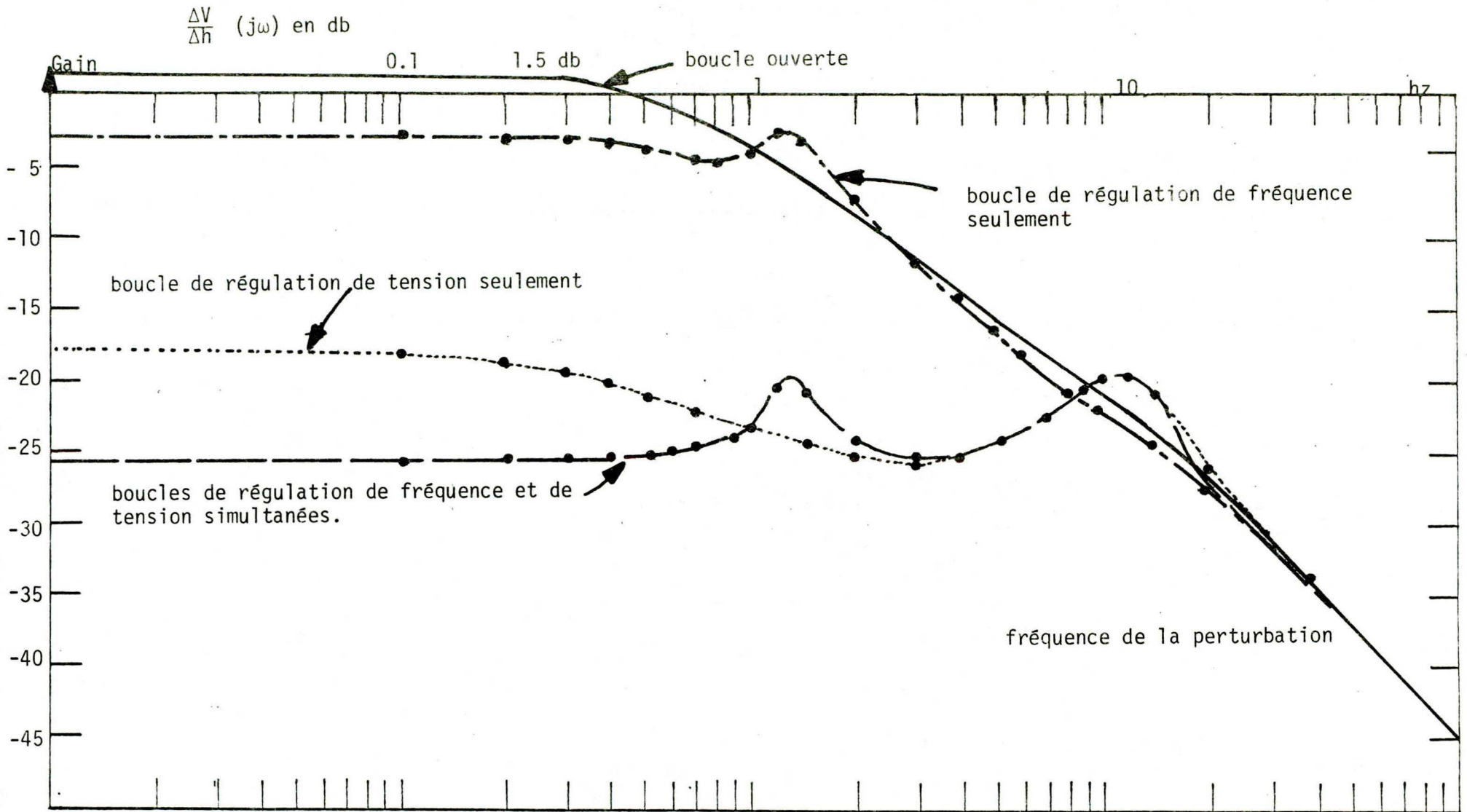


Figure 15 Fonction de sensibilité de la tension face aux perturbations de charge sinusoïdale.
 Commande de type proportionnel $P_1 = 5.75$ $P_2 = 12.6$

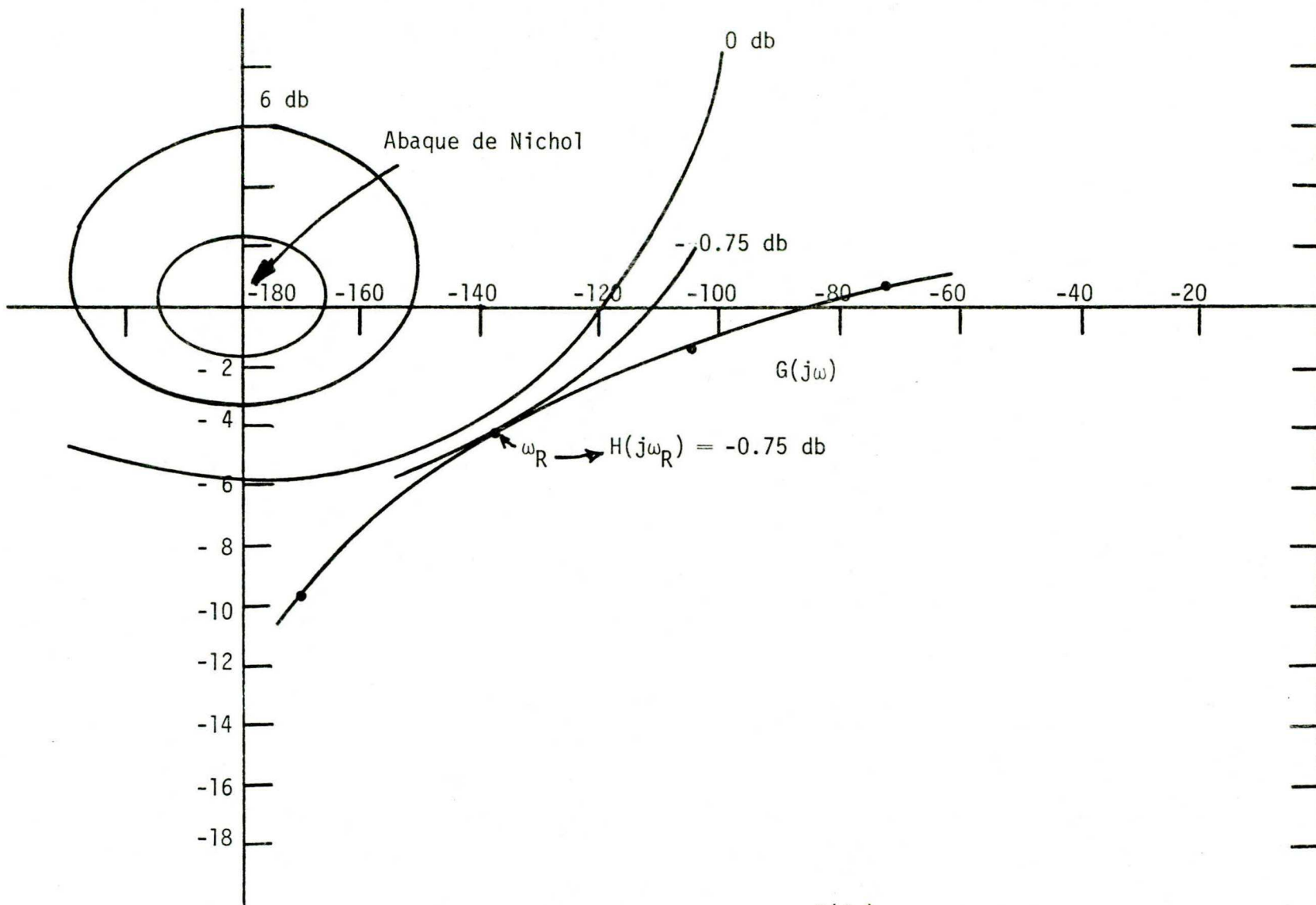


Figure 16 Transformation $\frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} = H(j\omega)$

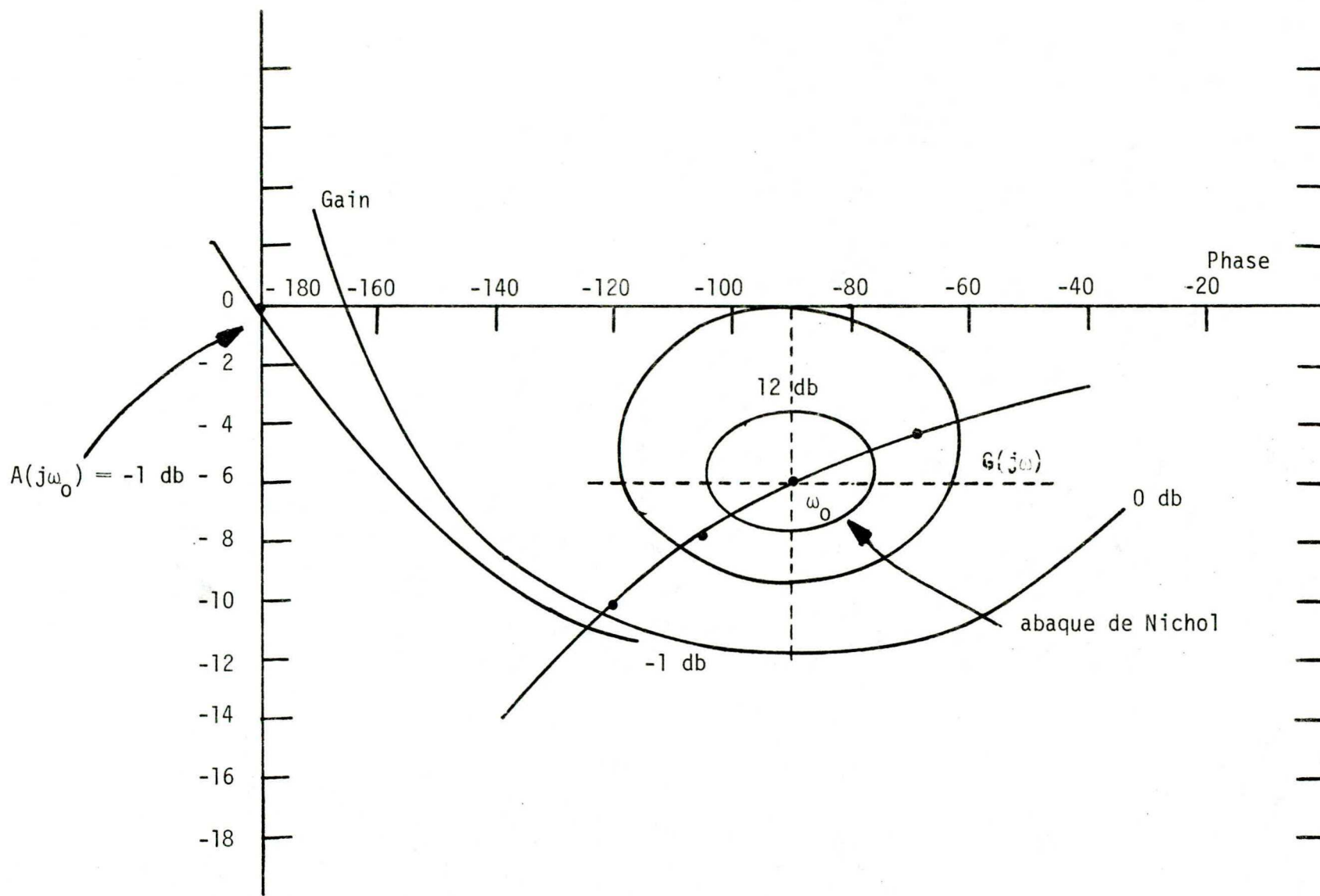
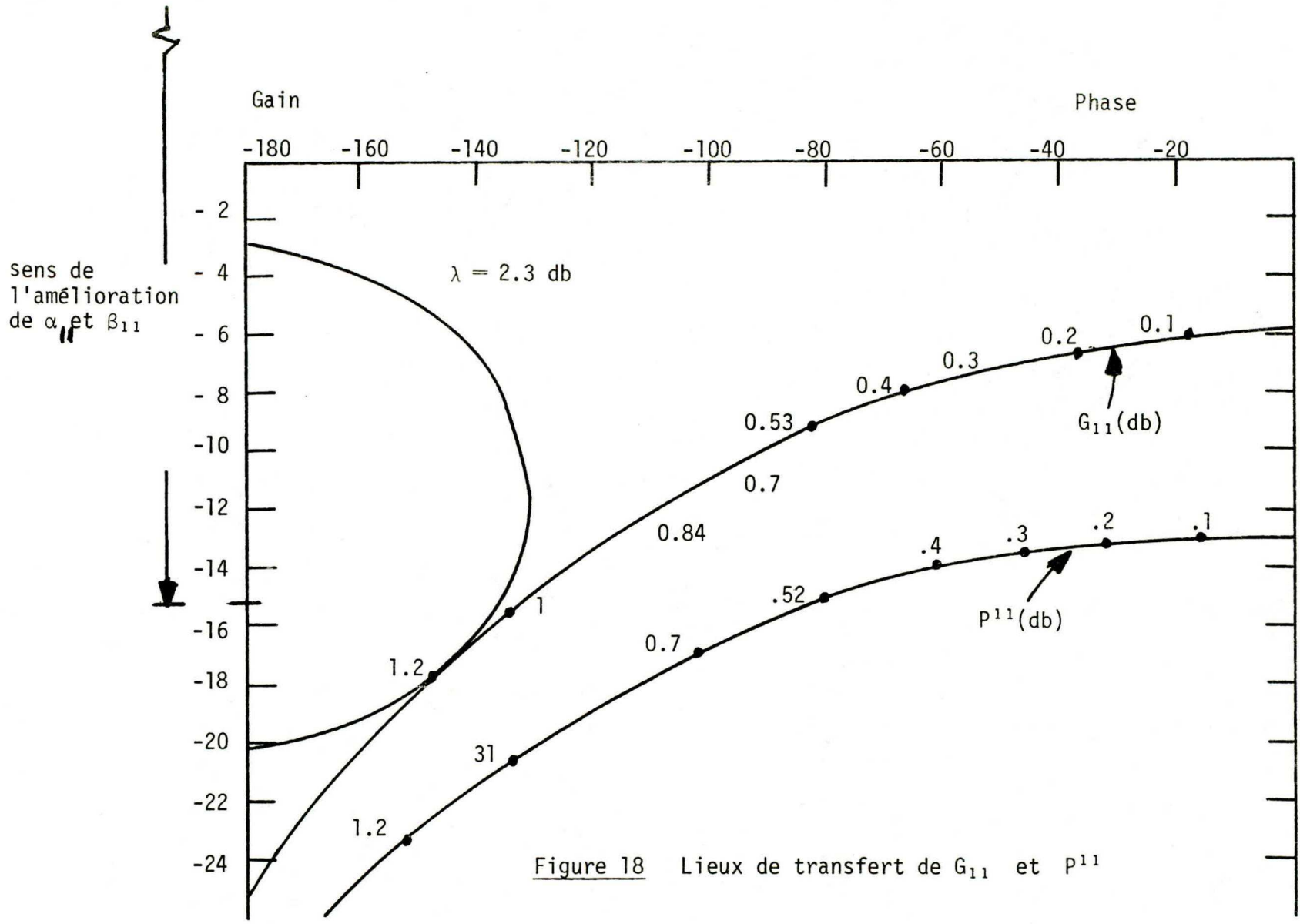


Figure 17 Transformation $A(j\omega) = \frac{1}{1+G(j\omega)}$



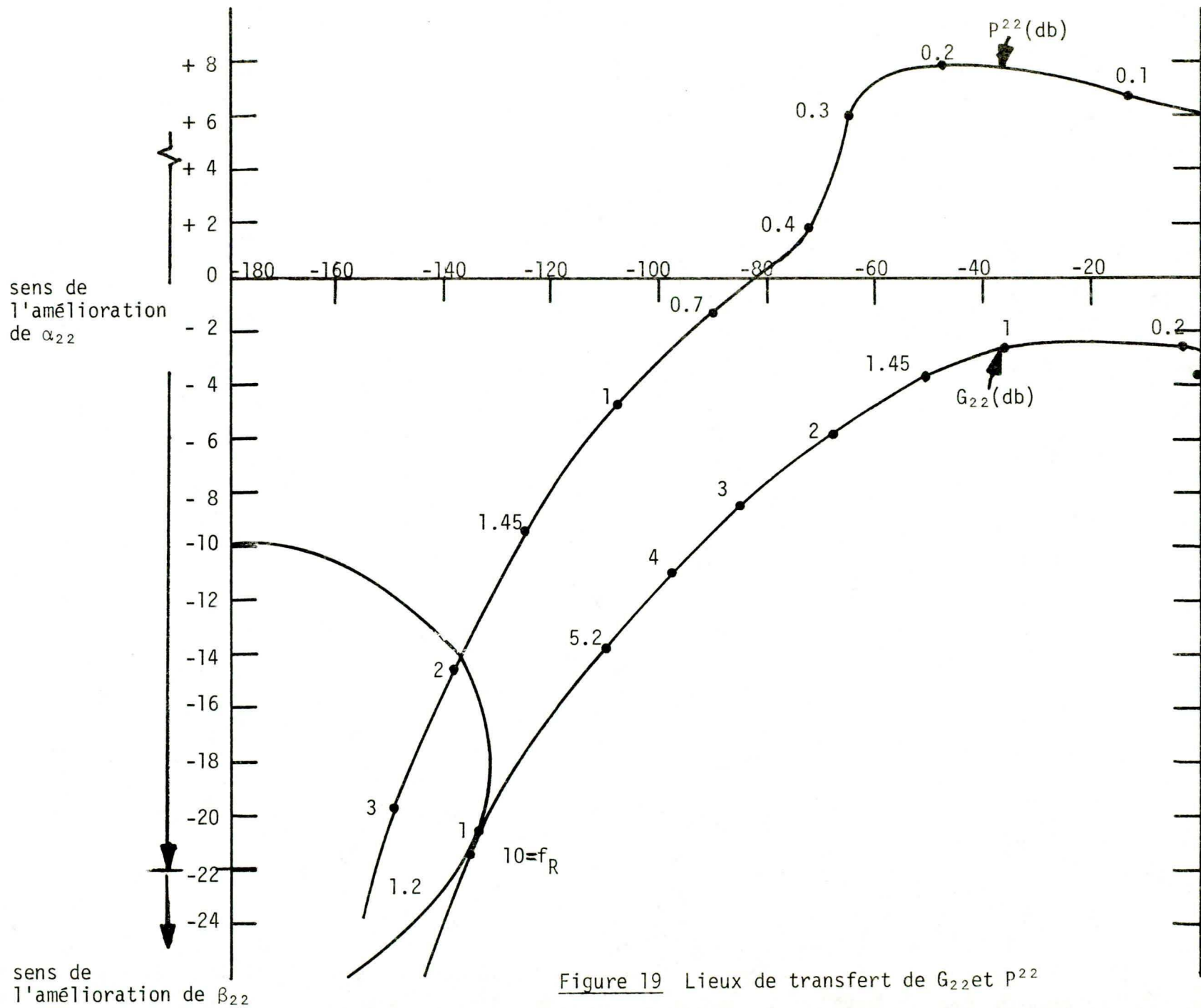


Figure 19 Lieux de transfert de G_{22} et P^{22}

BIBLIOGRAPHIE

- 1- Practical Sensitivity Reduction Tests with Application to Power System, R.M. DE SANTIS, J. CONAN, Int. J. Systems Sci, Vol. 8 - #9, pp. 1067-1080, 1977.
- 2- Le Principe d'Invariance Appliqué au Design des Systèmes Multivariables, S.LEFEBVRE, Mémoire de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, sept. 1972.
- 3- Comparative Sensitivity and Absolute Invariant Compensators with Application to a DC-AC Convertes, R.M. DE SANTIS, S. LEFEBVRE, 14th Allerton Conference, University of Illinois, October 1976.
- 4- Théorie et Technique des Asservissements, J.C. GILLE, M. PELEGRIN, P. DECAULNE, pp. 153-155, Dunod 1956.
- 5- The Invariance Principle and the Conditions for its Application during the Calculation of Linear and Non Linear Systems, B.N. PETROV, Proceeding of IFAC, Automatic and Remote Control, pp. 117-125, Vol. 2, Moscou 1960.
- 6- Systèmes Auto-Adaptatifs, TCHINAEV, Dunod, Paris, 1966.

A CONSULTER
SUR PLACE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00288914 3