

Titre: Synthèse fréquentielle et commande optimale des systèmes multivariables : application à une centrale électrique autonome
Title: multivariables : application à une centrale électrique autonome

Auteurs: Richard Hurteau, & André B. Turgeon
Authors:

Date: 1980

Type: Rapport / Report

Référence: Hurteau, R., & Turgeon, A. B. (1980). Synthèse fréquentielle et commande optimale des systèmes multivariables : application à une centrale électrique autonome. (Technical Report n° EP-R-80-21). <https://publications.polymtl.ca/6232/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6232/>
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-80-21
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

BIBLIOTHÉQUE

JUIN 10 1980

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL



DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

SECTION AUTOMATIQUE

Rapport technique EP80-R-21

Classification: Library of Congress no.....

Synthèse Fréquentielle et Commande Optimale
des systèmes Multivariables:

Application à une Centrale Electrique Autonome

par

Richard Hurteau

André B. Turgeon

14 mai 1980

Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ

UP 5

R80-21

ex.2

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

Bibliothèque

COTE

CA2PQ

UP 5

1780-21

ex. 2

Ecole
Polytechnique

MONTRÉAL

130454-X



BIBLIOTHÉQUE

JUIN 10 1980

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

SYNTHESE FREQUENTIELLE ET COMMANDE OPTIMALE
DES SYSTEMES MULTIVARIABLES: APPLICATION
A UNE CENTRALE ELECTRIQUE AUTONOME

par

Dr. Richard Hurteau
Professeur Adjoint
Département de Génie Electrique

Dr. André B. Turgeon
Professeur Titulaire
Département de Génie Electrique

Mai 1980

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
Sommaire	iii
Remerciements	iv
Introduction	1
1. Le problème pratique	2
1.1 Description du système	2
1.2 Etablissement du modèle	3
1.3 Asservissement et régulation face aux entrées	5
1.4 Régulation face à des perturbations extérieures	7
2. Représentations fréquentielles	8
2.1 Le plan de Black et l'abaque de Nichol	8
2.2 Le problème de la compensation	9
2.3 Les données du problème	10
3. Présentation des solutions	12
3.1 Calcul et choix des compensateurs	12
3.2 Réponses temporelles et fréquentielles	13
3.3 Précompensation statique	13
4. Commande optimale	15
4.1 Formulation du problème	15
4.2 Application du régulateur de Kalman	18
4.3 Application de la commande décentralisée optimale	19
5. Comparaison	21
Conclusion	24
Références	26
Liste des figures	28

SYNTHESE FREQUENTIELLE ET COMMANDE OPTIMALE
DES SYSTEMES MULTIVARIABLES: APPLICATION
A UNE CENTRALE ELECTRIQUE AUTONOME

Richard Hurteau *

André B. Turgeon *

SOMMAIRE

Le présent article présente différentes méthodes de synthèse de systèmes multivariables continus, dans le cadre d'une application au réglage de fréquence et de tension d'un groupe moteur-alternateur. En première partie, une méthode fréquentielle de synthèse des systèmes multivariables basée sur la notion d'invariance absolue et sur les techniques classiques, permet de calculer boucle par boucle les compensateurs en tenant compte des couplages entre boucles et de l'interaction des perturbations. Un compensateur de prédécouplage statique est également utilisé. Par la suite, le problème est analysé dans un contexte de commande optimale selon un critère quadratique. Le régulateur de Kalman et une commande décentralisée sont appliqués au système. Ces différentes approches et les solutions proposées sont analysées et comparées.

* Ecole Polytechnique, Montréal, Québec.

REMERCIEMENTS

L'étude présentée dans ce rapport a été développée dans le cadre du projet FCAC-CRP-378-76, Analyse, Gestion et Commande des processus industriels par ordinateurs: applications aux réseaux électriques, financé par le Ministère de l'Education du Québec ainsi que dans le cadre d'échange entre le département de Génie Electrique et l'Ecole Nationale Supérieure d'Aéronautique de l'Espace.

Les auteurs tiennent à souligner la collaboration de Messieurs Michel Brisson, Pierre Heng et Chahine Salam au niveau de la réalisation de l'exemple d'application ainsi que de Monsieur Romano M. DeSantis pour avoir initié ce travail.

INTRODUCTION

De nombreuses méthodes [1] [2] [3] [4] ont été préconisées dans le but de résoudre les problèmes d'asservissement et de régulation dans les systèmes multivariables. Dans les systèmes monovariables, c'est le bouclage avec "le gain le plus élevé", compte tenu de la stabilité, qui procure la réponse temporelle la plus rapide et la précision la plus grande. Les techniques fréquentielles sont avantageusement utilisées pour la solution des problèmes de synthèse dans ce cas et elles constituent le fondement des enseignements de base en automatique. Les premiers développements de systèmes industriels ont démontré la valeur pratique de ces méthodes.

Toutefois, l'application de la notion de "gain élevé" dans les systèmes multivariables rencontre de sérieux problèmes. Outre la difficulté d'obtenir un système stable, les effets de couplage entre boucles portent souvent préjudice à la sensibilité de la régulation face aux perturbations [5] [6] [7].

Le formalisme matriciel des variables d'état et son algèbre constituent une technique élégante et puissante d'écrire et de véhiculer les variables multiples et leurs interconnexions. La visualisation du problème de la synthèse ne fait pas ressortir facilement les paramètres pertinents.

En fait, la plupart des méthodes de synthèse posent le problème boucle par boucle en incorporant des techniques fréquentielles de manière à se dégager de l'obligation d'observer tous les modes du système. Les techniques développées par Rosenbrock [1] et MacFarlane [2] permettent notamment de visualiser graphiquement les influences de la compensation. En général,

les premiers compensateurs devront d'abord favoriser la dominance diagonale par une opération de découplage puis dans une seconde phase la correction sera ajustée boucle par boucle.

Notre propos est de présenter dans le cadre d'une application pratique une méthode fréquentielle de synthèse des systèmes multivariables. La méthode de l'invariance absolue [4] [6] [7] associée aux techniques fréquentielles classiques permettront de calculer boucle par boucle les compensateurs en tenant compte des couplages entre boucles et de l'interaction des perturbations. Nous montrerons qu'un compensateur de prédecouplage statique peut être souhaitable.

De plus, ce même exemple d'application est présenté dans un contexte de commande optimale selon un critère quadratique. Le régulateur de Kalman et la commande décentralisée optimale sont appliqués au système. Ces différentes méthodes et les solutions proposées sont analysées et comparées.

1. LE PROBLEME PRATIQUE

1.1 Description du système

Un montage approprié permet l'étude d'un problème fondamental des réseaux de puissance électriques à savoir: la stabilité de l'ensemble génératrice de puissance face aux fluctuations de charges complexes. Le problème est généralement bien décrit par le relevé des variations de la fréquence et de la tension vu à la charge ou au client.

Le module (Figure 1) de génération d'énergie comprend un moteur à courant continu M_1 à excitation séparée qui entraîne un alternateur triphasé G_1 . La puissance est fournie à l'induit du moteur M_1 par un amplificateur de puissance A_1 à tension commandable U_1 . Le champ de ce moteur est fixe. L'excitation de la génératrice est produite par un autre amplificateur A_2 commandé par une tension U_2 .

La charge triphasée est simulée par un moteur asynchrone M_2 lié en étoile à la génératrice synchrone G_1 . Le moteur entraîne une génératrice à courant continu G_2 dont le champ est fixe et dont l'induit est relié à une charge résistive variable. Les variables maîtresses du complexe charge sont les tensions étoilées V_2 fournies par l'alternateur et évidemment la vitesse angulaire Ω_1 du moteur de charge M_1 .

1.2 Etablissement du modèle

Dans la pratique, les modèles sont presque toujours construits à partir d'essais de type échelon. C'est donc des variations de type échelon aux amplificateurs A_1 et A_2 qui produisent les fonctions de transfert sous forme de réponses indicielles.

En posant:

U_1 , tension de commande à l'amplificateur A_1

U_2 , tension de commande à l'amplificateur A_2

V_1 , tension proportionnelle à la fréquence d'alimentation de la charge ou à la vitesse de la génératrice G_1

V_2 , tension de phase de la génératrice G_1

P , perturbation de la charge

Les équations décrivant la dynamique du système s'écrivent:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Les fonctions de transfert et les variables étant des fonctions de Laplace de la variable complexe (s); pour alléger l'écriture, nous omettons cette variable. De plus, en regardant les transitoires de retour au régime d'équilibre à partir des déviations initiales aux variables V_1 et V_2 , on trouve:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} P \quad (2)$$

Ce système est représenté par le schéma-bloc de la Figure 2.

D'où les valeurs numériques qui suivent:

$$G_{11} = \frac{-1.47}{(1 + 0.665s)(1 + 0.315s)} \quad (3)$$

$$G_{12} = \frac{0.12}{(1 + 0.665s)(1 + 0.315s)} \quad (4)$$

$$G_{21} = \frac{1.65}{(1 + 1.30s)(1 + 0.13s)} \quad (5)$$

$$G_{22} = \frac{0.300 + 0.426s}{(1 + 0.318s)(1 + 0.895s)} \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{-1.35}{(1 + 0.665s)(1 + 0.315s)} \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{1.9}{(1 + 1.2s)} \quad (8)$$

Toutes ces relations ayant été obtenues par la paramétrisation des réponses indicielles à l'aide d'une méthode présentée dans Gille et ass. [9].

1.3 Asservissement et régulation face aux entrées

L'objectif de la commande de ce système de génération de puissance est double: premièrement, maintenir la fréquence et la tension d'alimentation de la charge constante face à des fluctuations inconnues de la consommation; deuxièmement, répondre le plus rapidement possible aux variations de consigne sur la fréquence et la tension. Des considérations d'ordre technique concernant la capacité de chaque source ou entrée de fournir l'énergie requise vis-à-vis l'asservissement ou la régulation des sorties suggèrent le schéma de commande de la Figure 3. En particulier, les variations marquées et prolongées de la puissance consommée (fréquence V_1) doivent être prises en charge par le moteur (entrée E_1). Par contre, les variations de la tension (V_2) peuvent exiger de faibles et temporaires contributions d'énergie provenant de l'excitation de l'alternateur (entrée E_2).

Par algèbre matriciel ou par l'utilisation de la règle de Mason en théorie des graphes on développe les relations:

$$\frac{V_1}{E_1} = \frac{G_{11}(M_{22})}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}(M_{22})} \quad (9)$$

$$\frac{\epsilon_1}{E_1} = \frac{\frac{1}{M_{11}}}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}(M_{22})} \quad (10)$$

$$\frac{\epsilon_2}{E_1} = -G_{21} \left[\begin{array}{c} \frac{1}{M_{11}} \\ \hline \frac{1}{M_{11}} + G_{11}(M_{22}) \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \frac{1}{M_{22}} \\ \hline \frac{1}{M_{22}} + G_{22} \end{array} \right] \quad (11)$$

$$\frac{V_2}{E_2} = \frac{G_{22}(M_{11})}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}(M_{11})} \quad (12)$$

$$\frac{\epsilon_2}{E_2} = \frac{\frac{1}{M_{22}}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}(M_{11})} \quad (13)$$

$$\frac{\epsilon_1}{E_2} = - G_{12} \left[\frac{\frac{1}{M_{22}}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{11}(M_{22})} \right] \left[\frac{\frac{1}{M_{11}}}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}} \right] \quad (14)$$

avec:

$$G_{11}(M_{22}) = G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}} \quad (15)$$

et

$$G_{22}(M_{11}) = G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}} \quad (16)$$

Il vient que l'erreur en asservissement par rapport à l'entrée de commande E_1 dépend du gain M_{11} et d'une fonction de transfert qui peut tenir compte de la boucle de tension. De la manière dont se présentent les équations, on voit que les méthodes classiques sont utilisables puisque l'interaction des transitoires de la première boucle sur la seconde est doublement atténuée par des fonctions atténuantes de régulation. Le seul problème provient des modifications des fonctions $G_{11}(M_{22})$ et $G_{22}(M_{11})$ dues aux interactions entre boucles:

$$G_{11}(M_{22}) = G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}} \left[\frac{G_{22}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}} \right] \quad (17)$$

Il devient évident que la boucle dont la bande passante est la plus large va influencer le mode dominant de l'autre. En conséquence, ici il convient d'abord d'ajuster le gain de tension M_{22} et ensuite de calculer le compensateur de fréquence. Evidemment, puisque la résonance de la boucle de fréquence est bien en avant de la pulsation de coupure de la boucle de tension, on peut écrire:

$$G_{22}^{(M_{11})} = G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{11}} \left[\frac{\frac{G_{11}}{1 + \frac{1}{M_{11}}}}{G_{11}} \right] \approx G_{22} \quad (18)$$

La solution qui procure le gain le plus élevé est donc la meilleure. Remarquons aussi qu'en choisissant convenablement la boucle de tension, il y a prédisposition pour l'atténuation des transitoires; grâce au produit de deux fonctions de régulation dans l'équation (11).

1.4 Régulation face à des perturbations extérieures

En fonction d'une perturbation extérieure P , on établit les relations:

$$\frac{\epsilon_1}{P} = F_1 \left[\frac{\frac{1}{M_{11}}}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}(M_{22})} \right] \cdot \left[\frac{\frac{1}{M_{22}}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}} \right] \cdot \left[\frac{\frac{1}{M_{22}} + I^{22}}{\frac{1}{M_{22}}} \right] \quad (19)$$

$$\frac{\epsilon_2}{P} = F_2 \left[\frac{\frac{1}{M_{22}}}{\frac{1}{M_{22}} + G_{22}(M_{11})} \right] \cdot \left[\frac{\frac{1}{M_{11}}}{\frac{1}{M_{11}} + G_{11}} \right] \cdot \left[\frac{\frac{1}{M_{11}} + I^{11}}{\frac{1}{M_{11}}} \right] \quad (20)$$

avec

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

et

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

Ces dernières fonctions sont les relations qui assuraient l'invariance absolue [4] [6], c'est-à-dire l'immunité de la boucle de fréquence par un ajustement parfait du correcteur dans la boucle de tension, il faut alors:

$$M_{22} = - \frac{1}{I^{22}} \quad (23)$$

Une définition analogue vaut pour I^{11} .

Si on compare les relations (19) et (20) à celles obtenues en (11) et (14), il apparaît un terme qui représente un effet de contre régulation. Il n'est plus évident alors que le choix du meilleur gain conduit à la meilleure solution de la régulation.

2. REPRÉSENTATIONS FREQUENTIELLES

2.1 Le plan de Black et l'abaque de Nichol [7]

Pour chacune des fonctions de transfert, on peut faire une représentation dans un plan de Black. Nous rappelons que l'abaque de Nichol permet de lire la réponse en asservissement en plaçant son point critique ($0db, 180^\circ$) sur un point (ω_o) du lieu critique $(-1/M_{11})$ et en observant le lieu de transfert du système en $G_{11}(\omega_o)$. Le gain lu par l'intermédiaire des contours à gain constant de l'abaque procure:

$$A_{11}(\omega_o) = \frac{G_{11}(\omega_o)}{\frac{1}{M_{11}}(\omega_o) + G_{11}(\omega_o)} \quad (24)$$

La fonction de régulation est facile à obtenir par un simple déplacement du point critique de l'abaque. En effet, en plaçant ce point en $G(\omega_0)$ et en observant le lieu critique inverse en un point $|-1/M_{11}(\omega_0)|$, il vient la relation:

$$R_{11}(\omega_0) = \frac{\frac{1}{M_{11}}(\omega_0)}{G_{11}(\omega_0) + \frac{1}{M_{11}}(\omega_0)} \quad (25)$$

Cette relation est évidente par la seule observation de sa signification géométrique par rapport à l'opération d'asservissement. Aux Figures 4 et 5, cette double utilisation des transformations de Nichol est représentée. Remarquons que l'écriture des équations (19) et (20) avec les fonctions d'invariance permet de tirer de l'abaque:

$$\frac{1}{L_{11}(\omega_0)} = \frac{\frac{1}{M_{11}}(\omega_0)}{\frac{1}{M_{11}}(\omega_0) + I^{11}(\omega_0)} \quad (26)$$

par simple inversion d'une transformation de régulation.

Il est dès lors possible de tenir compte des compromis à faire sur le correcteur puisque tous les lieux sont tracés dans un même plan.

2.2 Le problème de la compensation

[7]

Ce sont des considérations sur la sensibilité des fonctions régulatrices, sur la bande passante et le facteur de surtension de la fonction d'asservissement qui formulent le problème. En général, ces exigences permettent d'établir des contraintes concernant chaque boucle. Il en résulte par simples examens à l'aide de l'abaque de Nichol, l'obligation de "modifier"

les lieux critiques en fonction de la pulsation (ω_o). Les correcteurs - usuels de type PD, PI et PID peuvent normalement effectuer cette compensation. Etant donné que l'intégration a une structure bien définie, il est logique de l'associer aux fonctions G_{11} , G_{12} , G_{21} et G_{22} . Ainsi, les Figures 6 et 7 reproduisent $G_{11}^*(M_{22})$, $G_{22}^*(M_{11})$, I_*^{11} et I_*^{22} en tenant compte des intégrations. Tout le problème de la compensation consistera au calcul des paramètres ω_n , ξ ou τ ainsi que les gains k_{11} et k_{22} dans les fonctions:

$$\text{S. (P1)} \quad M_{11}^* = k_{11} \left(1 + 2 \frac{\xi}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2} \right) \quad (27)$$

$$\text{S. (P2)} \quad M_{22}^* = k_{22} (1 + \tau s) \quad (28)$$

Dans ce contexte, il s'agit de choisir la portée en fréquence que doit avoir ces correcteurs: le problème est alors bien posé. L'allure de la déformation de gain et de phase est fixée; il ne faut qu'accorder celle-ci au système par un déplacement vertical adéquat et une calibration en fréquence du lieu critique. La Figure 8 donne les lieux critiques inverses de ces correcteurs.

2.3 Les données du problème

D'abord, il faut examiner les diverses fonctions du système. On est, bien sûr, intéressé par la rapidité de réponse de chaque boucle. Il est logique d'implanter cette exigence par des modèles de référence. Ainsi, la boucle de tension se comportera comme un système du premier ordre. Alors que la boucle de fréquence correspondra à un système du second ordre devant avoir une faible surtension dans sa réponse en fréquence même si le compensateur PID implique beaucoup d'avance de phase.

Les autres exigences à implanter concernent la précision. Par exemple, pour une plage de charges de puissance acceptable, le maintien de la fréquence et de la tension doit être impeccable: d'où l'inclusion de commande PI et PID pour réduire à zéro l'erreur à l'échelon de perturbation. Compte tenu de cette nouvelle structure, nous avons toute l'information nécessaire pour discuter de la précision des régimes permanents face aux entrées ou aux perturbations. Les erreurs de type vitesse pour la régulation de l'entrée seront:

$$\text{pour la tension } \epsilon_{2e} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{k_{22} G_{22}(M_{11})} = \frac{2.32}{k_{22}} \quad (29)$$

$$\text{pour la fréquence } \epsilon_{1e} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{k_{11} G_{11}(M_{22})} = \frac{0.47}{k_{11}} \quad (30)$$

Les valeurs statiques de $G_{11}(M_{22})$ et de $G_{22}(M_{11})$ ne dépendent pas des gains k_{11} et k_{22} .

Les erreurs de type vitesse pour la régulation face aux perturbations seront:

$$\text{pour la tension } \epsilon_{2p} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F_2}{M_{22} G_{22}} \cdot \frac{I^{11}}{G_{11}(M_{22})} = \frac{0.89}{k_{22}} \quad (31)$$

$$\text{pour la fréquence } \epsilon_{1p} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F_1}{M_{11} G_{11}} \cdot \frac{I^{22}}{G_{22}(M_{11})} = \frac{1.01}{k_{11}} \quad (32)$$

On constate dès lors que la recherche des plus grands gains sur chaque boucle conduit à la meilleure solution.

Voulant prolonger davantage notre analyse, il est déjà prévisible que les réponses en fréquence des fonctions régulatrices auront la forme donnée à la Figure 9. On peut inclure facilement nos exigences concernant chaque

boucle. Par exemple, par les asymptotes d'atténuation (gain de vitesse) des régimes statiques que l'on exige et par l'atténuation des fonctions régulatrices à la résonance.

3. PRESENTATION DES SOLUTIONS

3.1 Calcul et choix des compensateurs

Dans un premier temps, il faut que la boucle de tension suive le modèle de référence dont la réponse a l'allure d'un système de premier ordre avec une constante de temps de 100 msec. et un gain de type vitesse de 36db. Un compensateur de type PI rencontre cet objectif avec:

$$k_{22} = 63 \quad \text{et} \quad \tau = 0.8 \text{ sec.}$$

Ensuite, on peut entreprendre la compensation de la boucle de fréquence.

Le modèle de référence est alors un système du second ordre dont la pulsation de résonance est de 4 rad/sec. et le facteur de surtension $Q = 0.25\text{db}$. Le gain de vitesse est de l'ordre de 39db. Pour rencontrer ces exigences, il faut utiliser un PID. Une première simulation avec:

$$\zeta = 0.7 \quad \omega_n = 3.2 \text{ rad/sec.} \quad k_{11} = 89.1$$

montre un dépassement un peu élevé pour la transitoire à l'échelon dans le domaine temporel.

Une seconde simulation avec:

$$\zeta = 0.8 \quad \omega_n = 3.57 \text{ rad/sec.} \quad k_{11} = 89.1$$

procure une transitoire acceptable.

La reprise de la compensation de la première boucle ne change pas appréciablement la première étape de calcul.

3.2 Réponses temporelles et fréquentielles

Les Figures 10 et 11 montrent les réponses indicielles de chaque boucle. La boucle de tension est un peu plus rapide que le modèle de référence: la présence de l'avance de phase dans le correcteur PD explique ce fait. Comme on peut le constater dans la réponse de la boucle de fréquence les zéros du PID donnent un dépassement sans oscillation.

Les Figures 12 et 13 présentent les réponses en fréquence vis-à-vis des commandes: les modèles de références sont assez bien implantés.

La sensibilité des fonctions de régulation face à des perturbations est donnée aux Figures 14 et 15. On voit bien que les asymptotes basses fréquences sont bien implantées par le calcul approprié du gain. D'autre part, il apparaît nettement qu'en hautes fréquences les retro actions sont inopérantes de sorte que les asymptotes convergent vers F_1 et F_2 : les fonctions de sensibilité en boucle ouverte.

Les réponses temporelles face à des perturbations sont présentées aux Figures 16 et 17.

3.3 Précompensation statique

Intuitivement, on a recherché le croisement à faire sur les commandes pour découpler statiquement les sorties du système. On recherche ainsi:

$$\begin{bmatrix} \overline{G_{11}(0)} & \overline{G_{12}(0)} \\ \overline{G_{21}(0)} & \overline{G_{22}(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(0) & G_{12}(0) \\ G_{21}(0) & G_{22}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} \quad (33)$$

avec $G_{ij}(0) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ij}(s)$ (34)

et $G_{11}(0) = G_{22}(0) = 1$ (35)

$$G_{12}(0) = G_{21}(0) \approx 0 \quad (36)$$

Il vient:

$$a = -0.47 ; \quad b = 2.58 ; \quad c = 0.19 ; \quad d = 2.30$$

Ensuite, nous avons abordé la compensation de ce système avec l'intention d'améliorer les performances obtenues antérieurement. Evidemment, les problèmes de couplage sont pratiquement éliminés.

a) Pour la boucle de fréquence, on désire:

- une meilleure bande passante (0 à 40 rad/sec.);
- au moins la même précision (-30db à la résonance).

Le compensateur est alors:

$$M_{11}(s) = \frac{k_{11}}{s} \left[1 + 2 \zeta \frac{s}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2} \right] \quad (37)$$

$$k_{11} = 63.2 ; \quad \zeta = 0.7 ; \quad \omega_n = 2.83 \text{ rad/sec.}$$

b) Pour la boucle de tension, les exigences sont:

- bande passante de 0 à 40 rad/sec.;
- régulation sur la perturbation extérieure (-30 db à la résonance, au lieu de -19db).

Le compensateur PI est alors:

$$M_{22}(s) = \frac{k_{22}}{s} (1 + \tau s) \quad (38)$$

$$k_{22} = 79.6 ; \quad \tau = 0.5 \text{ sec.}$$

Les résultats obtenus pour les réponses indicielles aux Figures 9 et 10 montrent des améliorations marquées. Evidemment, les bandes passantes sont plus étendues (Figures 11 et 12) et la sensibilité de la régulation est meilleure (Figures 13 et 14).

4. COMMANDE OPTIMALE

Dans cette section, le problème de commande tel que décrit précédemment est résolu à l'aide de la théorie de la commande optimale linéaire selon un critère quadratique. Deux approches sont retenues; le régulateur de Kalman est d'abord appliqué au système, puis l'obtention d'une commande décentralisée, c'est-à-dire par retour d'état partiel est ensuite analysée. Dans les deux cas, le choix des matrices de pondération du critère quadratique est obtenu à partir de systèmes de référence, en utilisant la méthode de Schultz-Melsa.

4.1 Formulation du problème

En considérant que les perturbations de charge peuvent être représentées par des perturbations de type échelon (P_1, P_2) agissant directement sur les sorties du système, soit respectivement sur la fréquence V_1 et la

tension V_2 , le problème de commande est formulé comme un problème de régulation optimale sur un horizon infini [12]. De plus, pour annuler l'erreur en régime permanent, deux intégrateurs, agissant sur chacune des sorties, sont adjoints au système comme il est montré à la Figure 18. La représentation dans l'espace d'état de ce système s'écrit alors:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (39)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (40)$$

Le vecteur d'état est de dimension 8×1 avec notamment:

$$x_1 = V_1, \quad x_3 = \int V_1, \quad x_4 = V_2, \quad x_8 = \int V_2$$

Le vecteur de sortie s'écrit $y^T = (V_1, V_2)$ et de commande $u^T = (U_1, U_2)$.

Les matrices A, B et C sont données ci-dessous:

$$A = \left[\begin{array}{ccc|cccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.77 & -4.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -3.14 & 1.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.91 & -8.46 & 5.91 & -5.91 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad B = \left[\begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ -7.01 & 0.57 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 1.49 \\ 9.76 & 0 \\ 0 & 1.8 \\ 0 & 0.31 \\ 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$C = \left[\begin{array}{ccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Pour mettre en évidence l'existence du sous-système de fréquence et du sous-système de tension, on peut écrire le modèle comme un ensemble de deux sous-systèmes interconnectés, S_i , $i = 1, 2$. En définissant $X_1^T = (x_1 \ x_2 \ x_3)$, les variables d'état du système de fréquence et $X_2^T = (x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8)$, les variables d'état du système de tension, la représentation du système s'écrit:

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}U_i(t) + \sum_{\substack{i=j \\ i \neq j}}^2 (A_{ij}x_j(t) + B_{ij}U_j(t)), \quad i = 1, 2 \quad (41)$$

avec A_{ii} , B_{ii} = matrices blocs-diagonales

A_{ij} , B_{ij} = matrices hors-diagonales
 $i \neq j$

U_i = vecteur de commande du sous-système S_i

Cette décomposition est indiquée en pointillé sur les matrices A, B et C. On remarque que ces deux sous-systèmes sont couplés par l'intermédiaire des commandes U_1 , U_2 .

Le critère à minimiser est de type quadratique et supposé additif soit:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \int_0^\infty [x_i(t)^T Q_i x_i(t) + U_i(t)^T R_i U_i(t)] dt \quad (42)$$

Les matrices de pondération Q_i et R_i étant affectées à chacun des sous-systèmes, avec $Q_i \geq 0$ et $R_i > 0$. La détermination de ces matrices est réalisée en appliquant la méthode de Schultz-Melsa [13] à chaque sous-système considéré comme découpé ($A_{ij} = B_{ij} = 0$). Pour ce faire, un modèle de référence décrivant le comportement désiré pour chacune

des boucles de commande est choisi. Les modèles préalablement définis dans la section 2.3 sont utilisés. Pour la boucle de fréquence, un deuxième ordre de pulsation $\omega_n > 4$ rad/sec. et d'amortissement $\zeta = 0.7$ est imposé, pour la boucle de tension, un premier ordre de constante de temps de 0.8 sec. Les matrices Q_i et R_i obtenues s'écrivent:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.18 & 2.8 \\ 0.18 & 0.0324 & 0.504 \\ 2.8 & 0.504 & 7.84 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 0.64 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_1 = R_2 = 10^{-2} \quad (43)$$

4.2 Application du régulateur de Kalman

Sous forme globale, le problème de régulation optimale s'écrit:

$$\min_{u(t)} J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (44)$$

avec

$$Q = \text{diag. } (Q_1, Q_2) \quad \text{et} \quad R = \text{diag. } (R_1, R_2)$$

sous

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t); \quad x(0) = x_0 \quad (45)$$

La solution de ce problème est bien connue et est donnée par:

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T P^* x(t) = -K x(t) \quad (46)$$

où P est la solution symétrique et définie positive de l'équation algébrique de Riccati:

$$A^T P^* + P^* A - P^* B R^{-1} B^T P^* + Q = 0 \quad (47)$$

La matrice de gain P , obtenue en correspondance avec les matrices Q et R définies précédemment, s'écrit:

$$K = \begin{bmatrix} 33.0 & 5.81 & 87.97 & -2.96 & -0.07 & 0.20 & -0.07 & -3.60 \\ -3.86 & -0.68 & -10.08 & -25.90 & -0.56 & 1.96 & -0.68 & -31.42 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Les réponses indicielles de chaque boucle sont représentées aux Figures 10 et 11. Les réponses temporelles face à des perturbations sont montrées aux Figures 16 et 17 et les réponses en fréquence sont données aux Figures 14 et 15. Evidemment, pour implanter ce régulateur optimal, il faudrait recourir à un observateur d'état pour reconstituer tous les états du système. On remarque que le comportement obtenu sur chacune des sorties concorde correctement avec les modèles désirés.

4.3 Application de la commande décentralisée optimale

Pour tenir compte de la structure physique du problème, soit l'existence de deux sous-systèmes interconnectés, et de la non disponibilité de tous les états pour calculer la commande, on peut formuler le problème de commande décentralisée selon l'énoncé suivant:

$$\underset{K \in \Omega(s)}{\text{Min}} J(K) = \text{tr} \int_0^{\infty} \Phi(t, t_0) (Q + K^T R K) \Phi(t, t_0) dt \quad (49)$$

où $\Phi(t, t_0)$ représente la matrice de transition d'état du système (39)

Lorsque $u = -K x(t)$; Q est une matrice symétrique définie non négative, R est définie positive, $\Omega(s)$ définit l'ensemble des matrices de gain K , de structure choisie telle que le système soit stable.

La structure que l'on désire obtenir pour la matrice de gain K est

telle que la commande appliquée à un sous-système donné soit fonction uniquement des états de ce sous-système. Pour le problème étudié, la matrice K s'écrit:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{21} & 0 & 0 & 0 & k_{22} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Ce qui correspond à un régulateur PID pour le sous-système de fréquence et un régulateur PI pour le sous-système de tension.

Ce problème a d'abord été étudié par Levine et Athans [14] pour le cas où la loi de commande est limitée à un retour fonction uniquement des sorties du système. L'utilisation de la programmation mathématique par exemple l'algorithme du gradient et la méthode des directions admissibles telles que proposées par Geromel et Bernussou [15], permet de résoudre ce problème. L'algorithme de résolution consiste à évaluer à chaque itération la matrice du gradient:

$$\frac{\partial J(K)}{\partial K} = 2(RK - B^T W) L \quad (51)$$

où L et W satisfont les deux équations de Lyapunov:

$$W(A - BK)^T + (A - BK)W + Q + K^T R K = 0 \quad (52)$$

$$L(A - BK)^T + (A - BK)L + I = 0 \quad (53)$$

La nouvelle matrice de gain doit être telle que pour le pas $\alpha > 0$:

$$J(K + \alpha D) < J(K) \quad (54)$$

où D est la matrice des directions admissibles, c'est-à-dire satisfaisants les contraintes structurales sur K , soit $D \in \Omega(s)$. Cette matrice D est

obtenue en projetant la matrice gradient $\frac{\partial J(K)}{\partial K}$ sur le domaine $\Omega(s)$. Cette dernière opération est réalisée en annulant les termes non désirés dans la définition structurale de la matrice K (équation 50).

L'application de cette algorithme au système étudié a été réalisée en utilisant les matrices de pondération définies précédemment (43). La matrice de gain optimale s'écrit:

$$K = \begin{bmatrix} -33.17 & -5.92 & -87.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25.6 & 0 & 0 & 0 & 32.08 \end{bmatrix}$$

Les réponses indicielles obtenues en simulation sont données aux Figures 10 et 11. Les réponses temporelles face à une perturbation sont représentées aux Figures 16 et 17 tandis que les réponses en fréquence de chacun des sous-systèmes sont montrées aux Figures 14 et 15.

5. COMPARAISON

La résolution d'un même problème de commande à l'aide des différentes approches exposées précédemment permet de dégager un certain nombre d'observations sur différents points de comparaison: par exemple, les caractéristiques de chaque approche, le type de spécifications rencontrées, les problèmes de mise en oeuvre computationnelle, etc... L'objectif recherché est d'éclairer le champ d'application de chacune de ces méthodes ainsi que leurs potentiels propres face à un problème spécifique.

- Caractéristiques de l'approche

Les techniques fréquentielles et la commande optimale relèvent de deux approches nettement distinctes. Pour les premières, le problème est attaqué boucle par boucle; préalablement, la structure de commande ainsi que l'ordre de conception de chacune des boucles doivent être choisis. Puis d'une façon itérative, chaque boucle est analysée en tenant compte des interactions sur l'ensemble du système. Ce travail est facilité par le fait que les réponses fréquentielles utilisées sont riches en information à la fois sur l'ensemble du système et sur l'effet précis d'un compensateur pour obtenir une réponse conforme aux spécifications. Toutes ces informations sont condensées dans quelques diagrammes. Dans le cas de la commande optimale, le problème de l'obtention d'une réponse temporelle est abordé d'une façon globale et selon un formalisme mathématique rigoureux. Pour le régulateur de Kalman, la commande proposée possède des propriétés de stabilité et d'optimalité intéressante. Cependant, son implantation pratique nécessite généralement la réalisation d'un observateur pour reconstituer tous les états du système. Selon cette optique, la commande décentralisée possède l'avantage supplémentaire de tenir compte de la nature physique du système en permettant la synthèse de compensateurs possédant une structure particulière (PI ou PID). Dans les deux cas, la validité de la solution obtenue, tant en régulation qu'en poursuite, dépend de la pertinence du critère par l'intermédiaire du choix de des matrices de pondérations Q et R. La méthode de Schultz-Melsa offre une solution pratique à ce problème; elle manque cependant de rigueur et de généralité.

- Nature des spécifications

La diversité des spécifications et la difficulté de les transposer du domaine fréquentiel au temporel, et vice-versa, rend souvent difficile la comparaison. La commande optimale relève principalement de spécifications sur la réponse temporelle. Les caractéristiques fréquentielles (bande passante, atténuation des perturbations) doivent être analysées a posteriori. Par contre, les techniques fréquentielles permettent de traiter directement ces dernières spécifications. En effet, une dynamique donnée peut être imposée dans le choix d'un compensateur, et le comportement du régulateur vérifié immédiatement. Il est ainsi possible de dégager un bon compromis entre deux spécifications: dynamique et sensibilité.

- Mise en oeuvre sur ordinateur

Le problème de commande optimale par retour d'état complet se résout aisément; la matrice de gain est obtenue moyennant la résolution d'une équation matricielle de Riccati. L'algorithme de résolution du problème de commande décentralisée pose certaines difficultés notamment au niveau du choix d'une valeur initiale stabilisante et du pas d'avancement (α). De plus, deux équations de Lyapunov dont l'ordre égale à celui du système, doivent être résolues à chaque itération. Finalement, la non convexité du problème a pour conséquence que la satisfaction des conditions nécessaires d'optimalité permet d'atteindre un minimum simplement local. Dans le cas des techniques fréquentielles, il est nécessaire de disposer d'un logiciel permettant d'évaluer les différents diagrammes requis.

- Résultats obtenus

Les résultats comparés des trois méthodes sont donnés sur les Figures 10 à 17. On remarque d'une façon générale que les différentes courbes obtenues sont similaires à quelques différences près. Par exemple, pour les courbes de sensibilité aux perturbations (Figure 15), l'écart de l'ordre de 5db entre la commande décentralisée et les techniques fréquentielles est dû à une différence entre les gains statiques des différents compensateurs. Les courbes de réponse temporelle à un échelon de perturbations (Figures 16 et 17) mettent en évidence les différences plus marquées dans le comportement du système: le régulateur de Kalman permet une nette amélioration de la réponse temporelle pour la régulation du système mais exige évidemment plus d'informations.

CONCLUSION

La synthèse de la commande d'un système multivariable, en occurrence de réglage fréquence-tension d'un ensemble moteur-générateur, a été réalisée en appliquant trois méthodes différentes; une technique fréquentielle basée sur la notion d'invariance absolue et procédant boucle par boucle, le régulateur optimal de Kalman et la commande décentralisée optimale. Les caractéristiques de chacune de ces méthodes sont résumées dans le tableau suivant.

	COMMANDÉ OPTIMALE par retour complet (régulateur de Kalman)	décentralisée	TECHNIQUES FREQUENTIELLES
Mode d'approche	GLOBALE selon un formalisme mathématique rigoureux		BOUCLE PAR BOUCLE le choix d'une boucle est réalisé en tenant compte de l'effet de bouclages précédents
Spécifications	réponse temporelle (dépassement, amortissement, temps de réponse)		- dynamique donnée - atténuation des perturbations
Réalisabilité	nécessite un observateur d'état	selon la structure désirée	implantation de compensateurs classiques (PI, PID, avance-retard de phase)
Mise en oeuvre sur ordinateur	simple	<ul style="list-style-type: none"> - initialisation stable - choix du pas - convergence - unicité de la solution 	<ul style="list-style-type: none"> - écriture des fonctions de transfert - nombreux diagrammes à tracer

Tableau 1: Tableau récapitulatif

L'extension de ces méthodes à des systèmes d'ordre plus élevé pose différents problèmes. Les techniques de commande optimale sont, en principe, indépendantes de l'ordre du système. Cependant, au niveau de la mise en oeuvre numérique, la dimension mémoire requise et le temps de calcul augmentent d'une façon prohibitive avec la dimension du système. Dans le cas des techniques fréquentielles, la quantité des diagrammes à tracer et le nombre de boucles à manipuler augmentent aussi considérablement avec l'ordre du système. Des études ultérieures permettront d'apporter une contribution en ce sens.

REFERENCES

- [1] Rosenbrock, H.H., "State Space and Multivariable Theory", John Wiley, livre, 1970.
- [2] MacFarlane, A.G.J., "A Survey of Some Results in Linear Multivariable Feedback Theory", Automatica, Vol. #8, pp. 455-495, 1972.
- [3] Wolovich, W.A., "Output Feedback Decoupling", IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 148-149. February 1975.
- [4] Lefebvre, S. DeSantis, R.M., "Nouvelle méthode fréquentielle pour l'analyse et la synthèse des systèmes multivariables", Rapport technique EP77-R-40, Ecole Polytechnique, Montréal.
- [5] Tchinaev, P.L. "Systèmes auto-adaptatifs", Dunod, Paris, 1966.
- [6] Petrov, B.N., "The Invariance Principle and the Conditions for its Applications during the Calculation of Linear and Non-Linear Systems", Proceeding of IFAC, Automatic and Remote Central, pp. 117-125, Vol. #2, Moscou, 1960.
- [7] Turgeon, A.B., "Utilisation pratique de l'abaque de Nichol pour la synthèse des compensateurs pour des asservissements et ses régulateurs", Rapport technique EP-78-R-41, Ecole Polytechnique, Montréal.
- [8] Turgeon, A.B., "Techniques de mise au point de la régulation de fréquence et de tension d'une mini-centrale autonome", Rapport technique EP-78-R-2, Ecole Polytechnique, Montréal.
- [9] Gille, J.C. et ass., "Théorie et technique des asservissements", pp. 153-155, Dunod, Paris, 1956.
- [10] DeSantis, R.M., Lefebvre, S., "Comparative Sensitivity and Absolute Invariant Compensators with Applications to a AC-DC Converters", 14th Allerton Conference, University of Illinois, October 1976.

- [11] Bresson, M., Heng, P., "Méthode de l'invariance absolue et commande optimale: une étude comparative", Projet de fin d'études, Ecole Polytechnique, Montréal, septembre 1979.
- [12] Saint-Val, "Commande progressive sécuritaire", Thèse de Docteur ingénieur, Institut Polytechnique de Grenoble, janvier 1978.
- [13] Schultz-Melsa, "State Functions and Linear System Control, McGraw-Hill, 1967,
- [14] Levine, W.S., Athans, M., The Determination of the Optimal Constant Output Feedback Gains for Linear Multivariable Systems, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. #15, no 4, 1970.
- [15] Geromel, J.C., Bernussou, J., "An Algorithme for Optimal Decentralized Regulation of Linear Quadratic Interconnected Systems", Automatica, July 1979.

LISTE DES FIGURES

1. Configuration du système
2. Schéma-bloc du système
3. Régulation de tension et de fréquence
4. Transformation $\frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} = H(j\omega)$
5. Transformation $A(j\omega) = \frac{1}{1+G(j\omega)}$
6. Diagramme de Black $\frac{G_{22}}{s}$ et $\frac{I^{22}}{s}$
7. Diagramme de Black $\frac{G_{11}(M_{22})}{s}$ et $\frac{I^{11}}{s}$
8. Diagramme de Black pour des compensateurs PD et PDD²
9. Allure générale de la sensibilité en régulation pour des compensateurs PI ou PID
10. Réponse temporelle de la boucle de fréquence
11. Réponse temporelle de la boucle de tension
12. Réponse fréquentielle de la boucle de fréquence
13. Réponse fréquentielle de la boucle de tension
14. Sensibilité aux perturbations de la boucle de fréquence
15. Sensibilité aux perturbations de la boucle de tension
16. Réponse de la fréquence à un échelon de perturbation
17. Réponse de la tension à un échelon de perturbation
18. Introduction des perturbations d'état

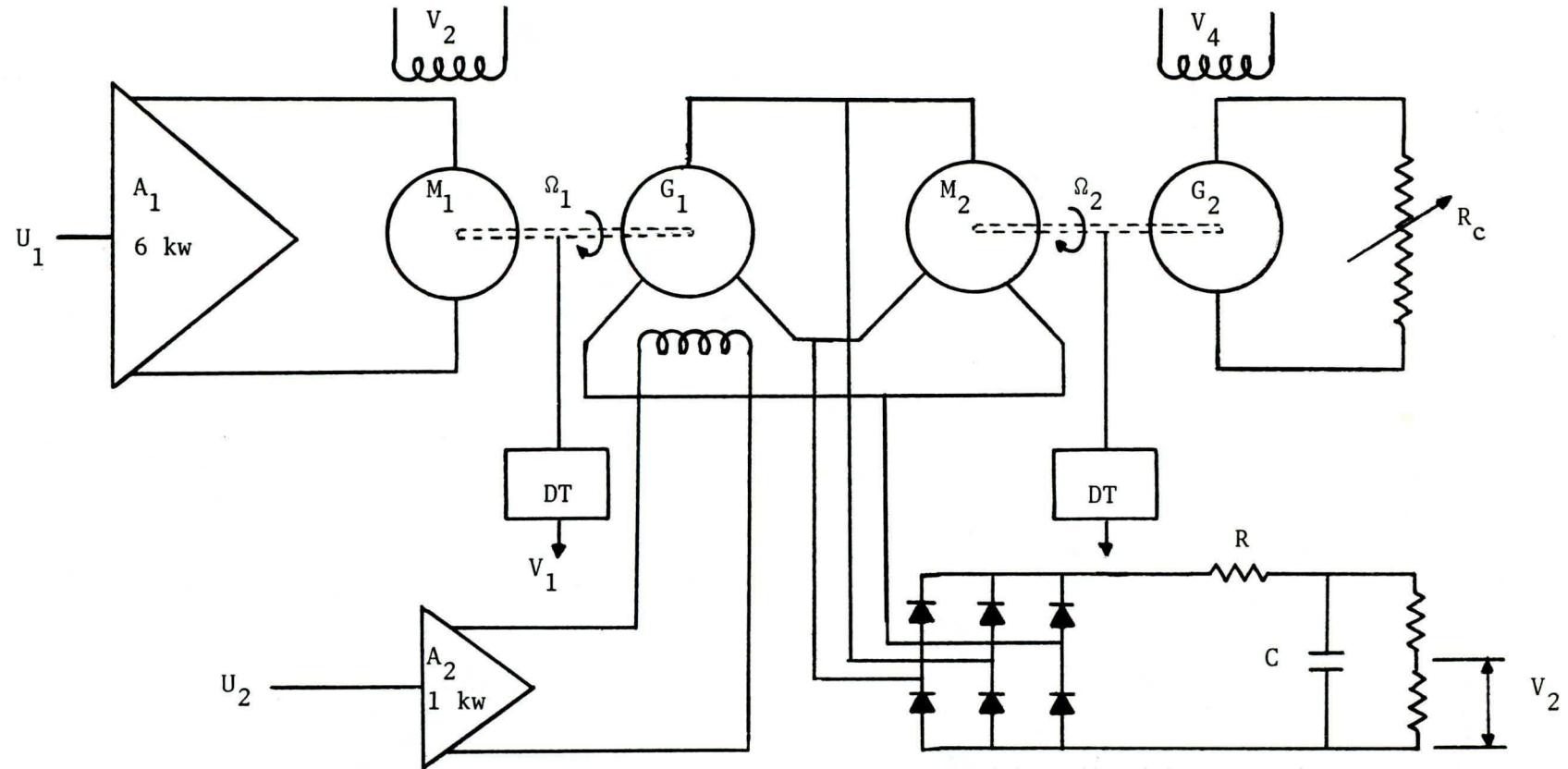


Figure 1: Configuration du système

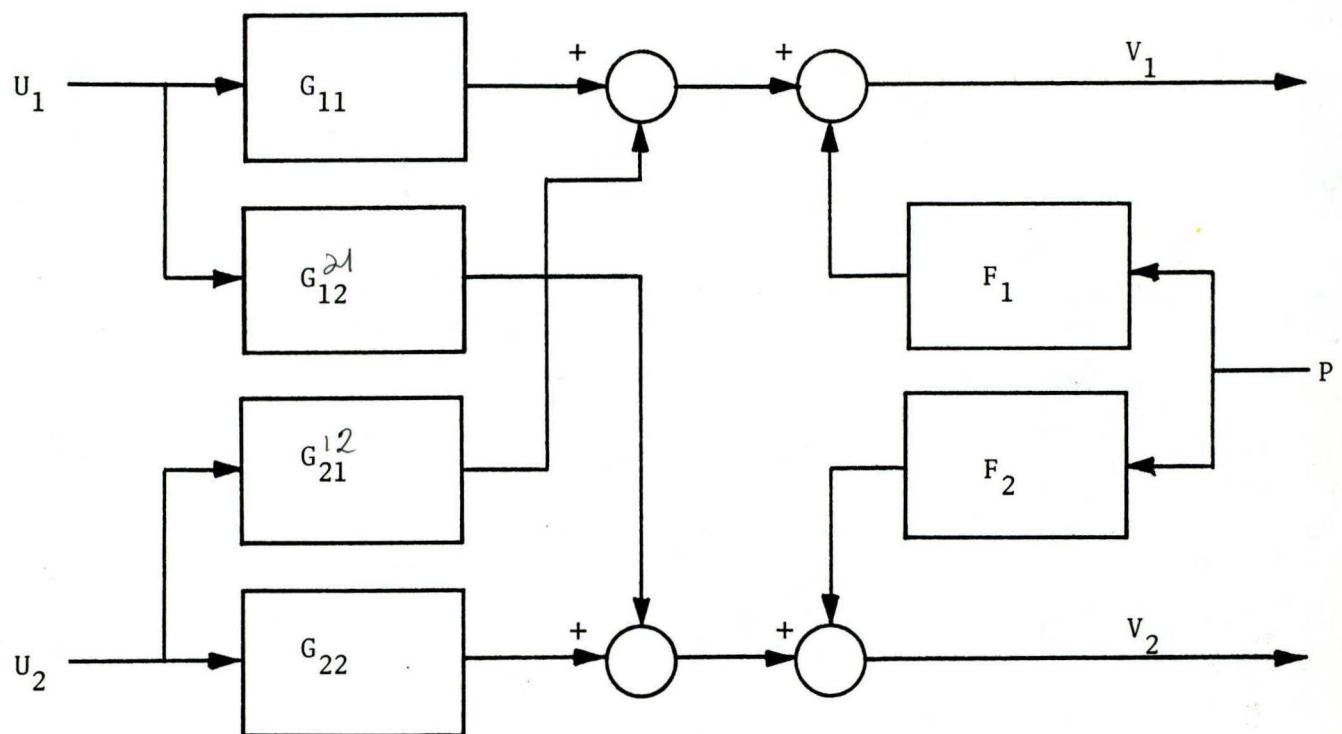


Figure 2: Schéma-bloc du système

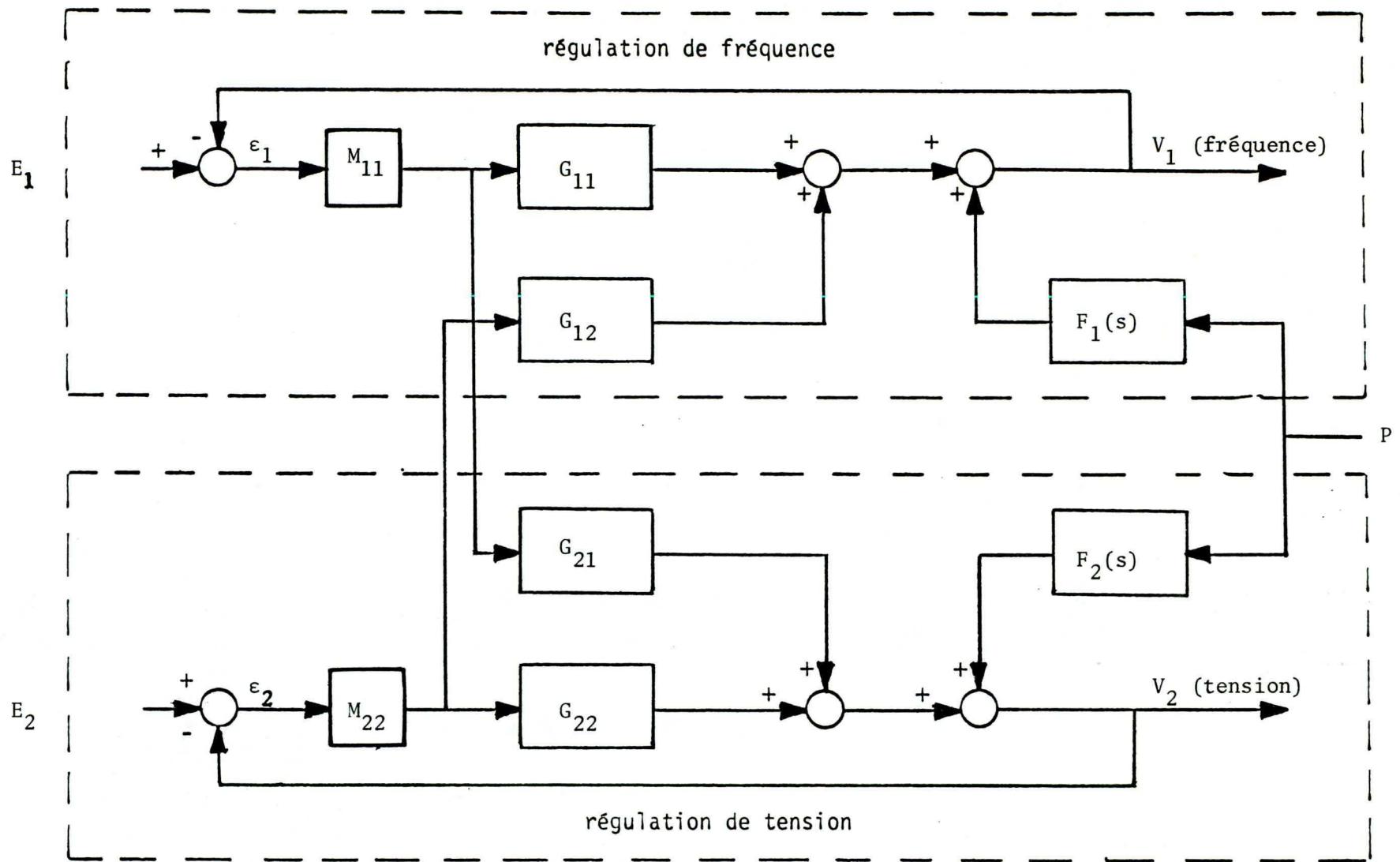


Figure 3 Régulation de tension et de fréquence

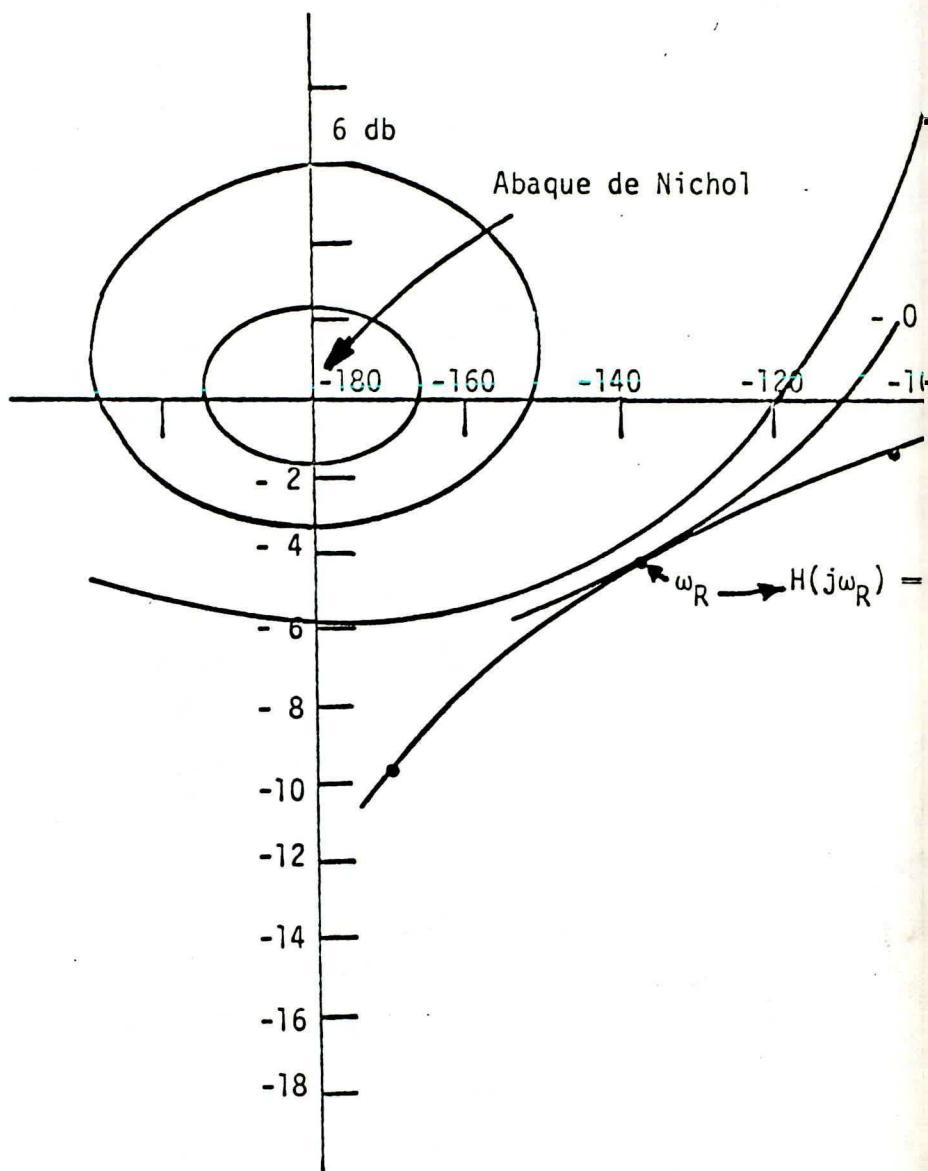


Figure 4: Transformation

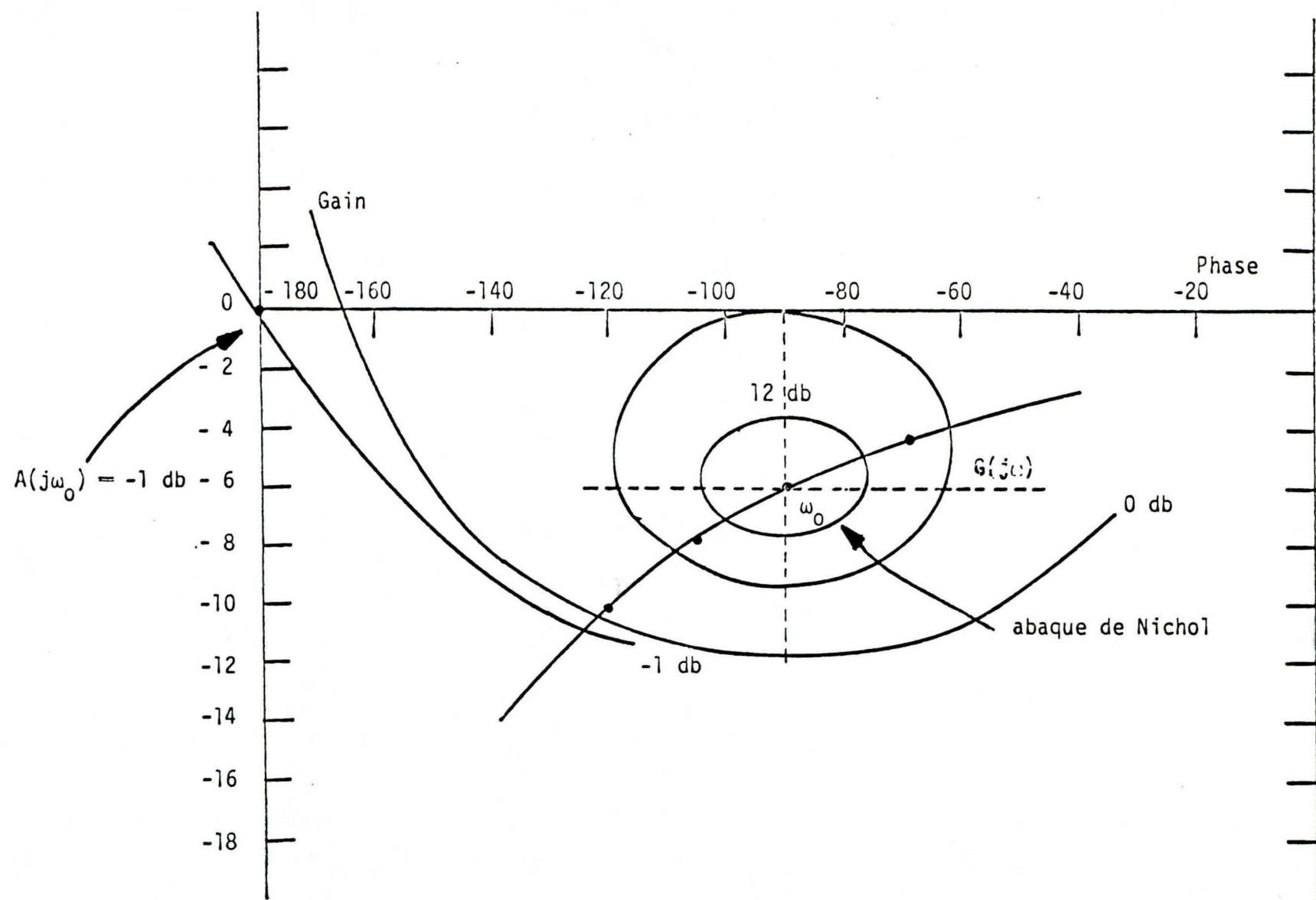


Figure 5: Transformation $A(j\omega) = \frac{1}{1+G(j\omega)}$

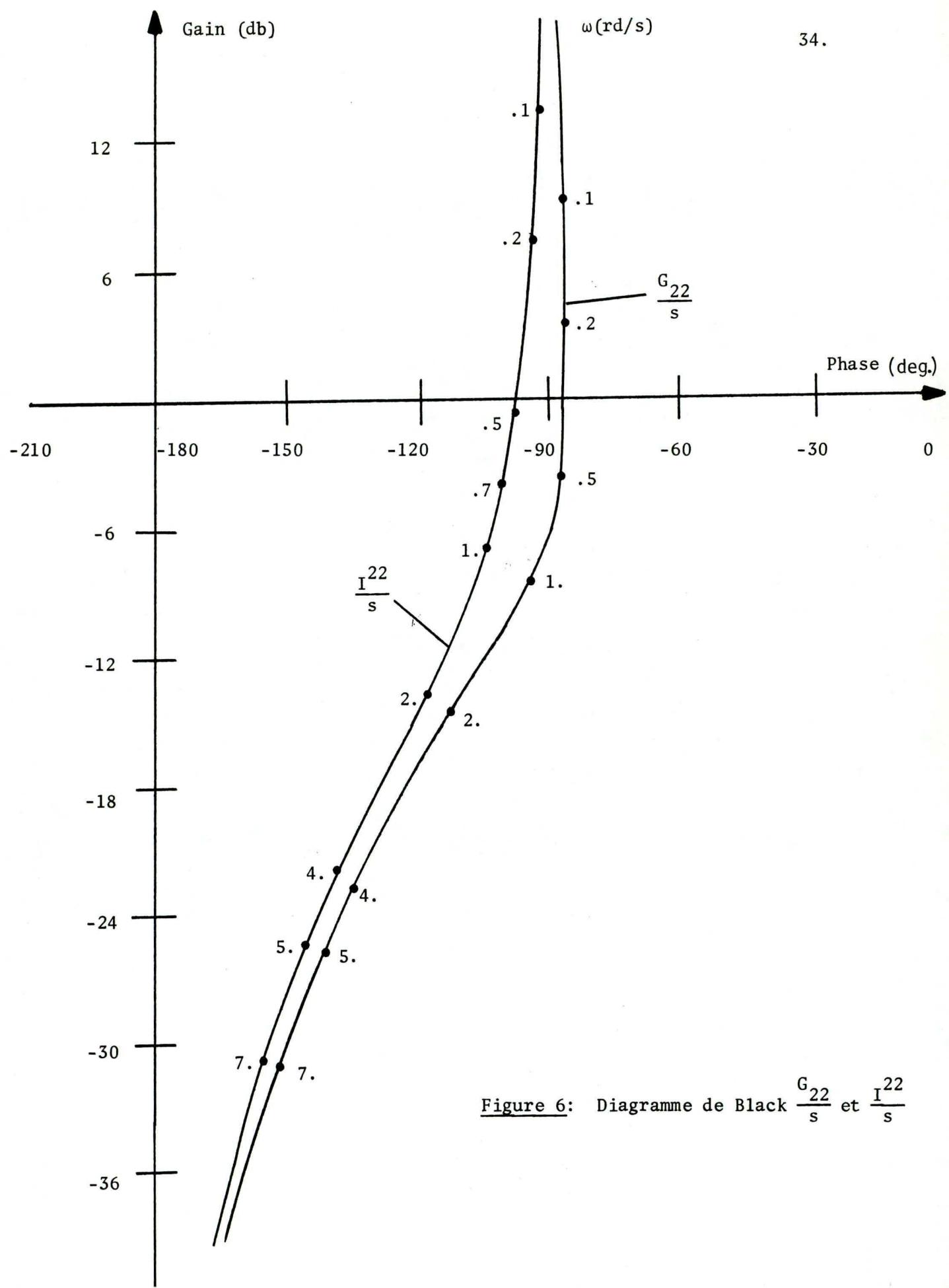


Figure 6: Diagramme de Black $\frac{G_{22}}{s}$ et $\frac{I^{22}}{s}$

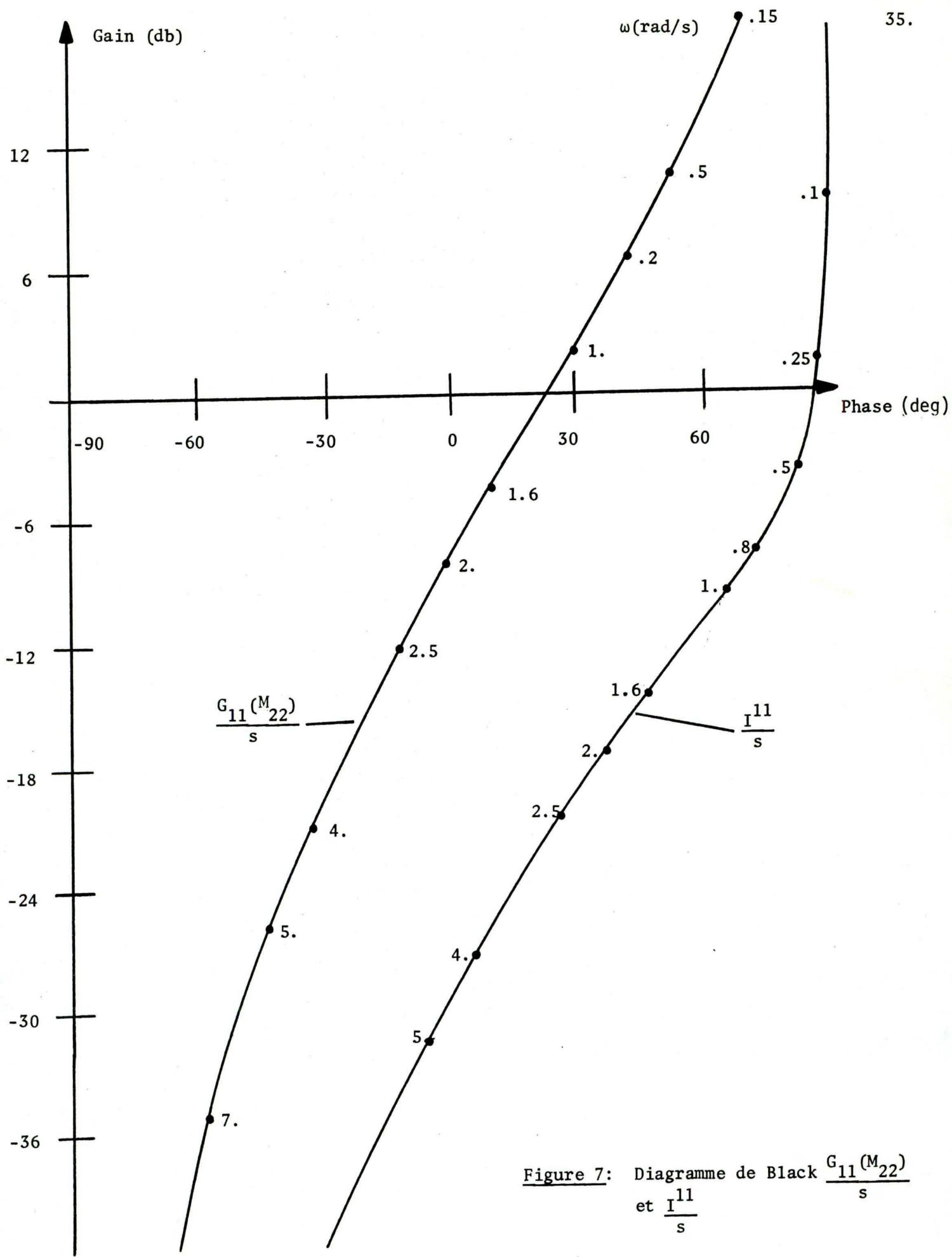
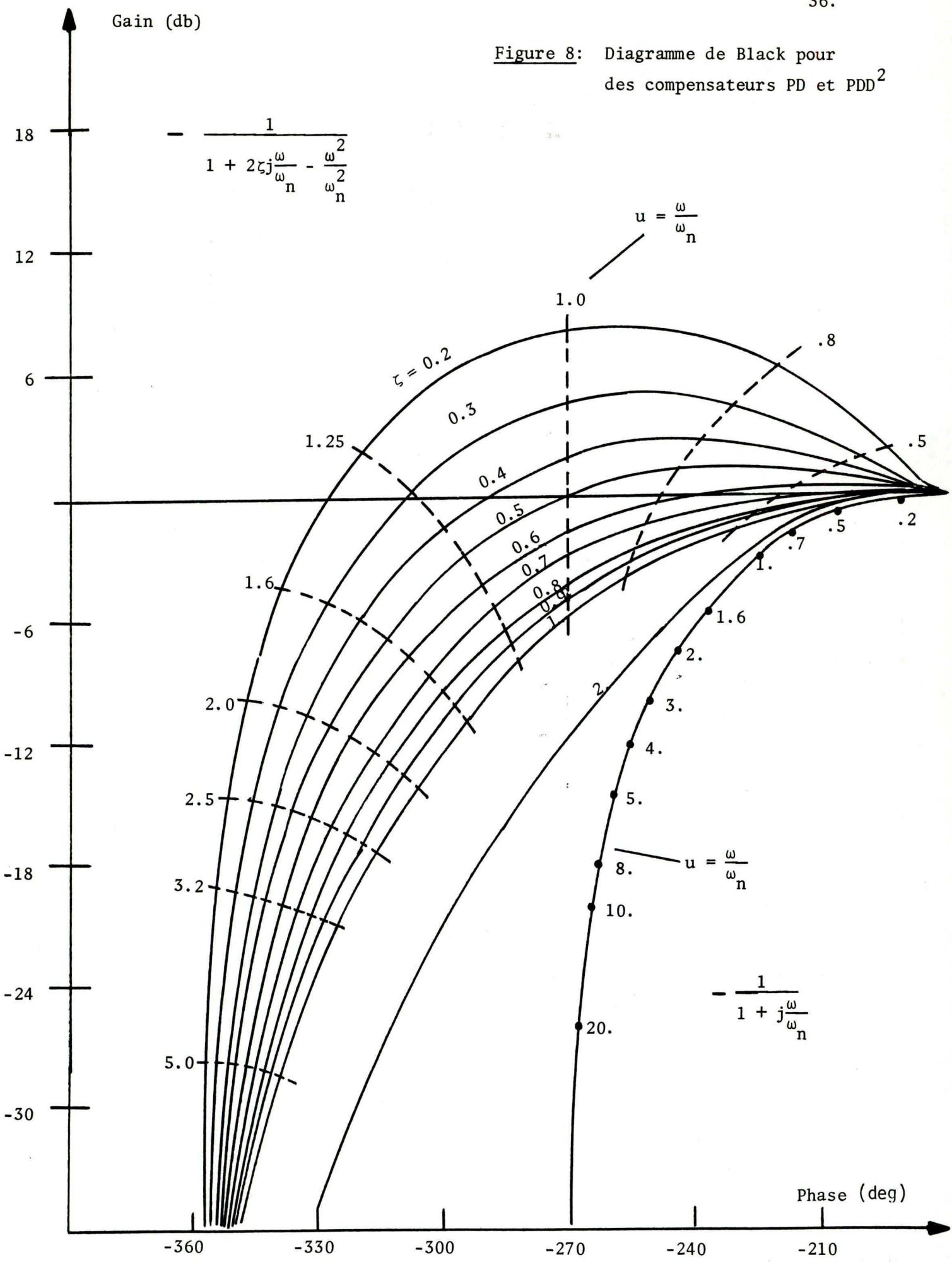


Figure 7: Diagramme de Black $\frac{G_{11}(M_{22})}{s}$
et $\frac{I^{11}}{s}$

Figure 8: Diagramme de Black pour des compensateurs PD et PDD²



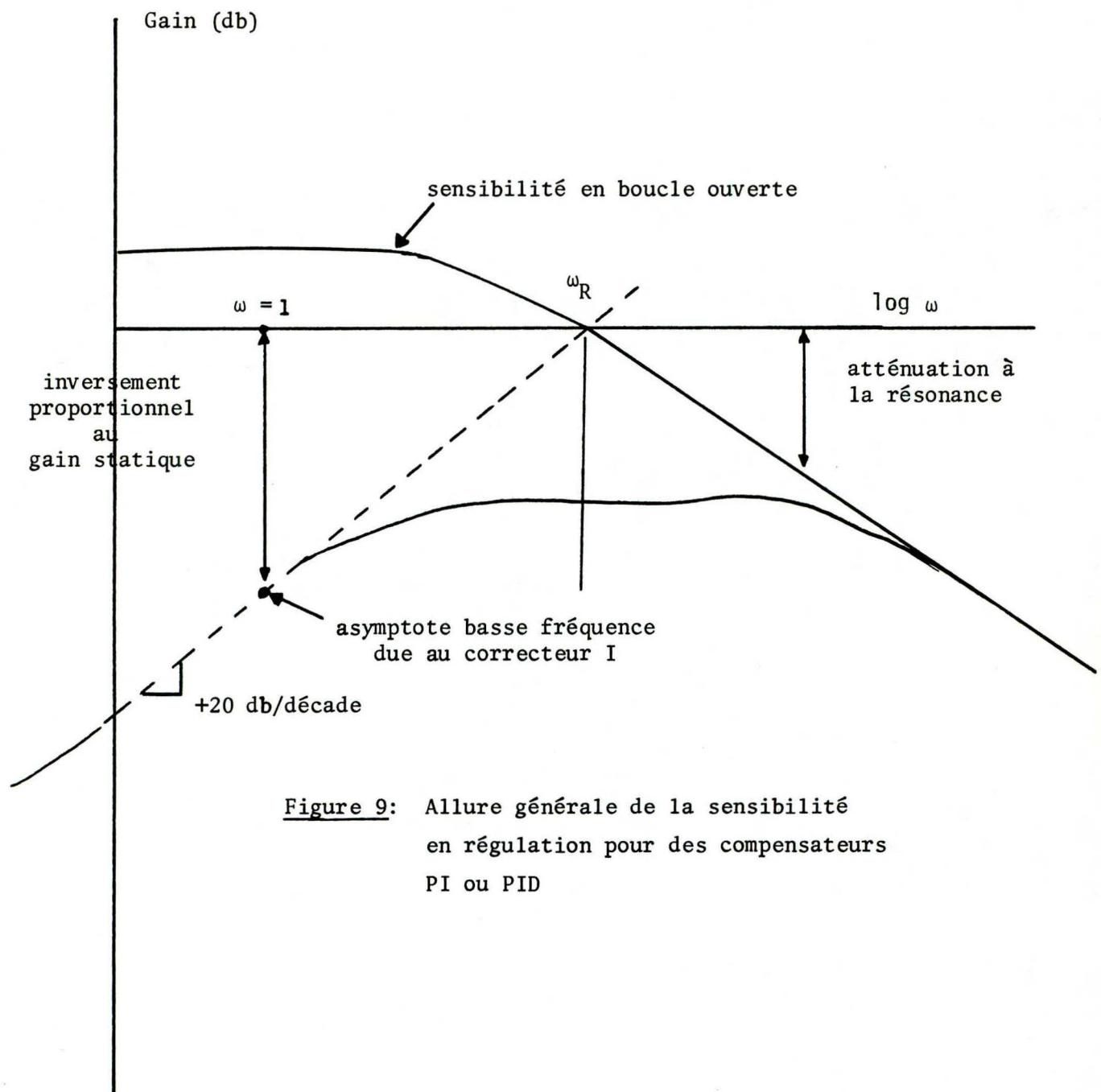


Figure 9: Allure générale de la sensibilité en régulation pour des compensateurs PI ou PID

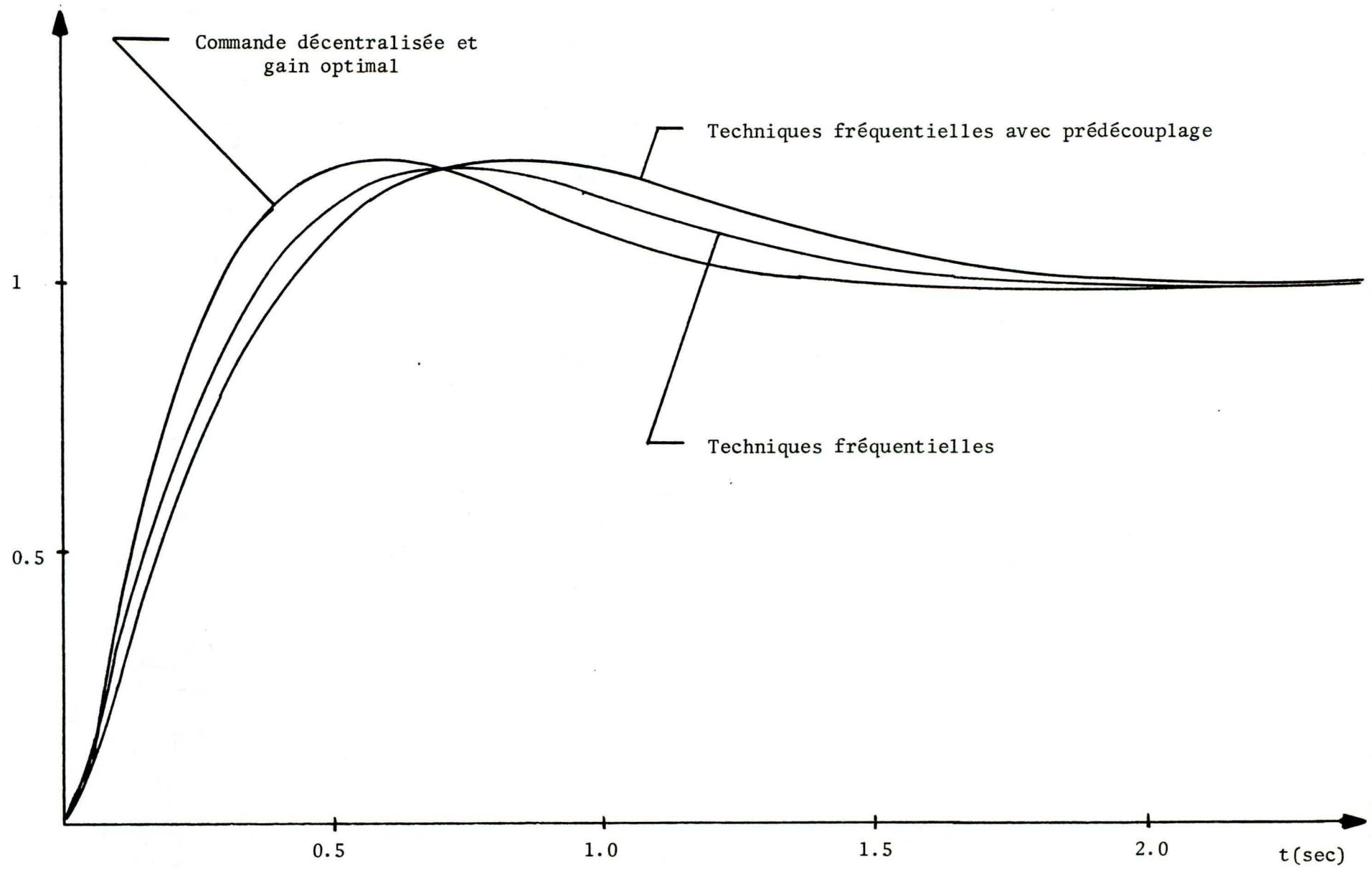
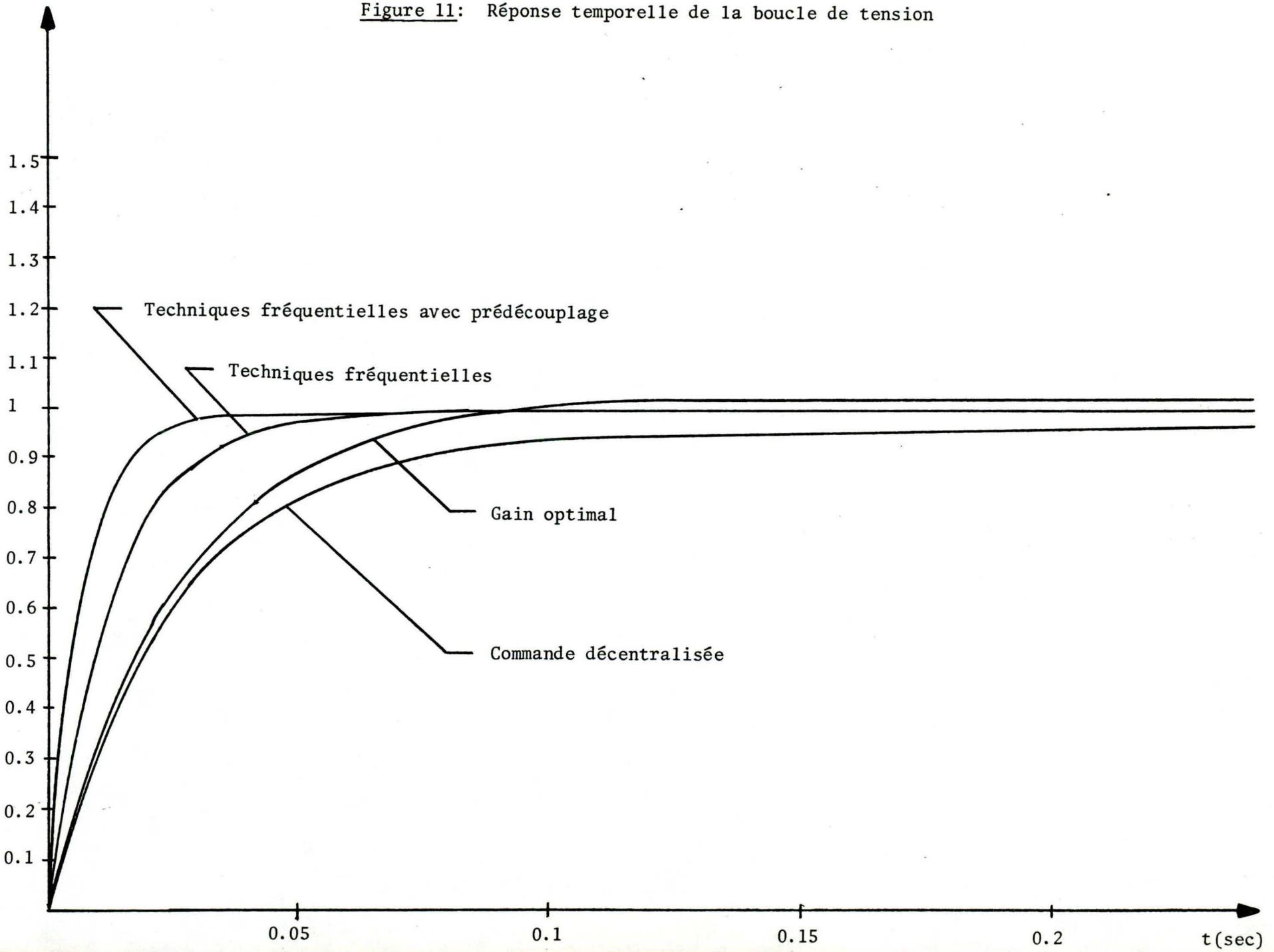


Figure 10: Réponse temporelle de la boucle de fréquence

Figure 11: Réponse temporelle de la boucle de tension



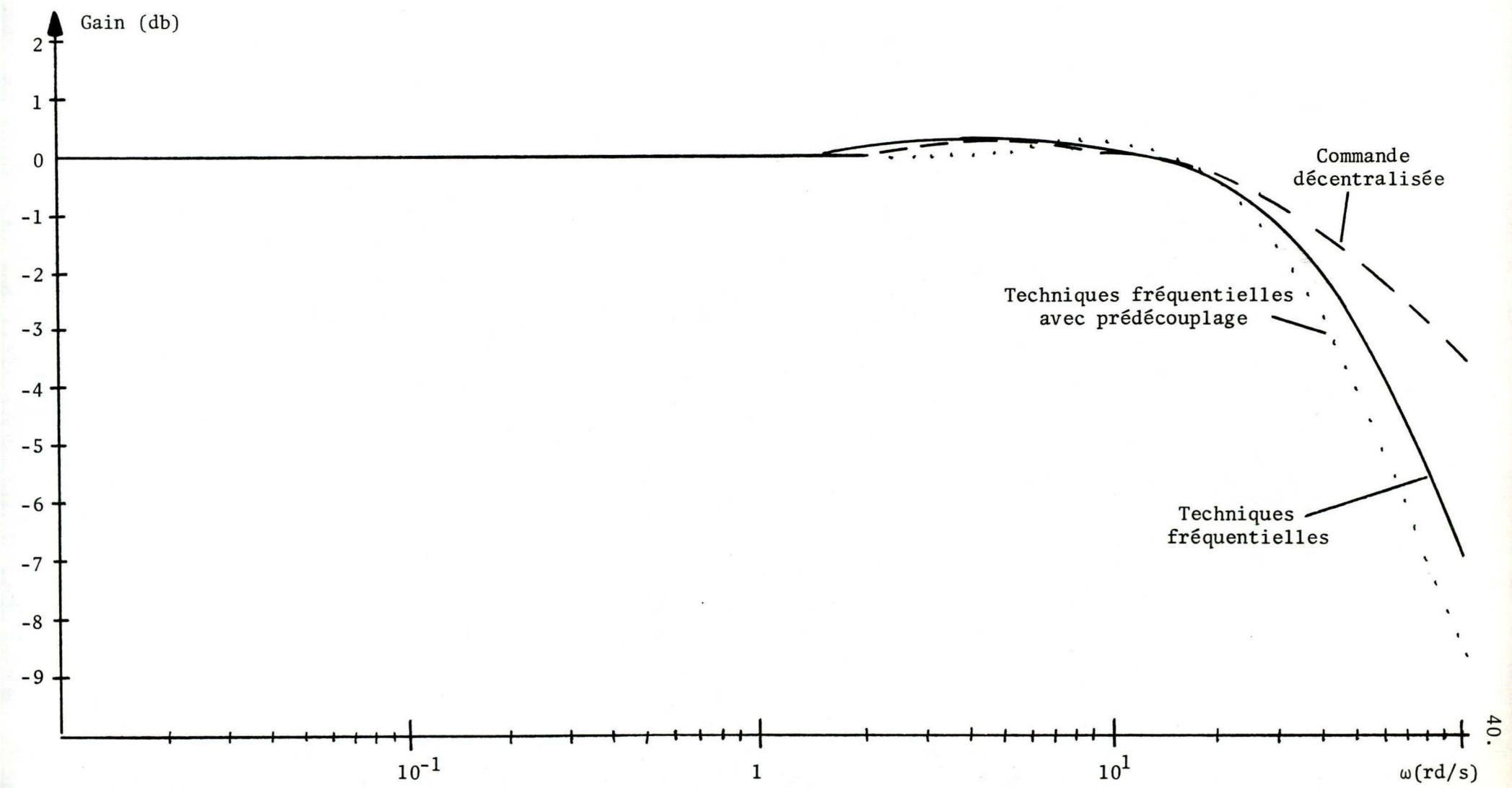


Figure 12: Réponse fréquentielle de la boucle de fréquence

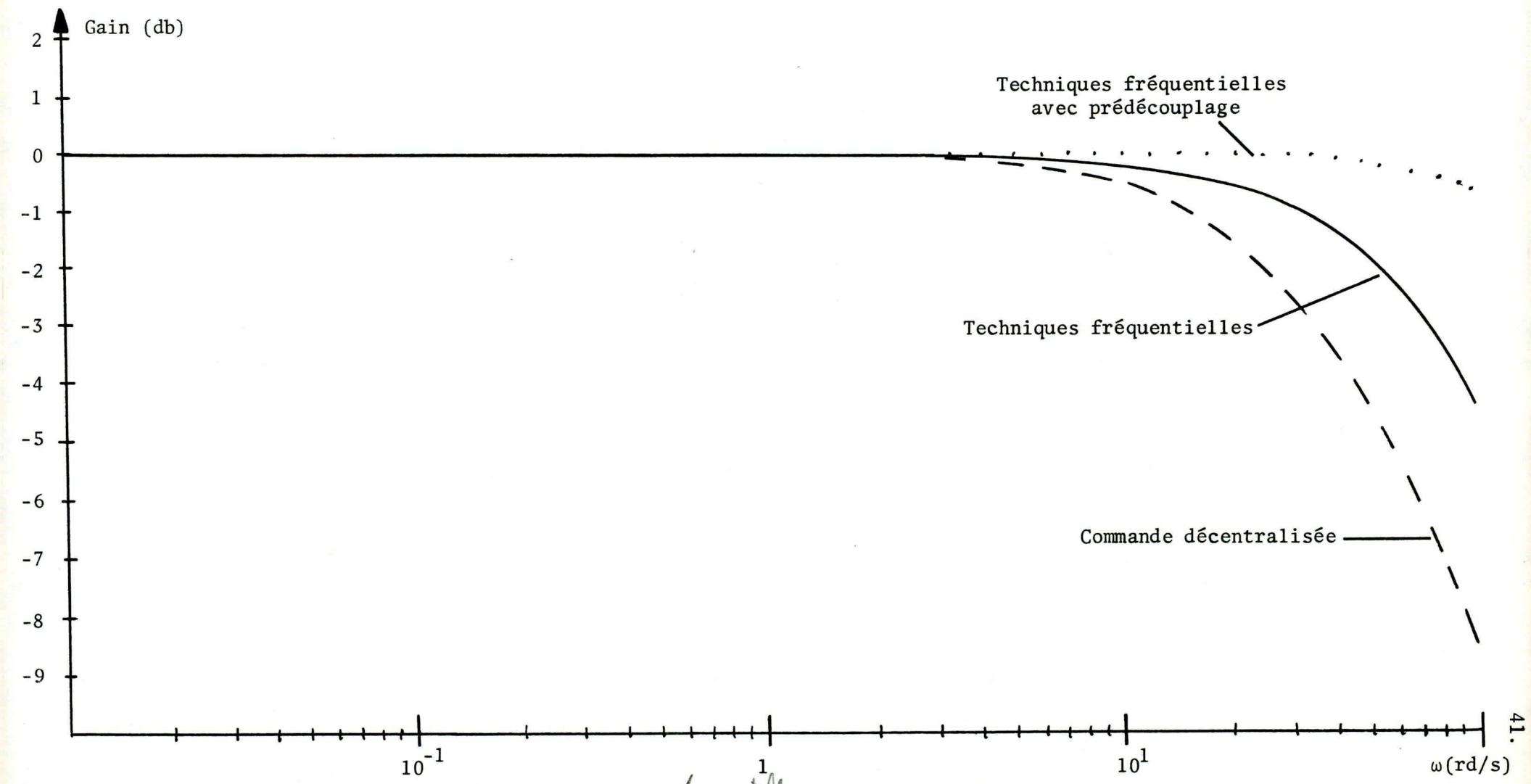


Figure 13: Réponse temporelle de la boucle de tension

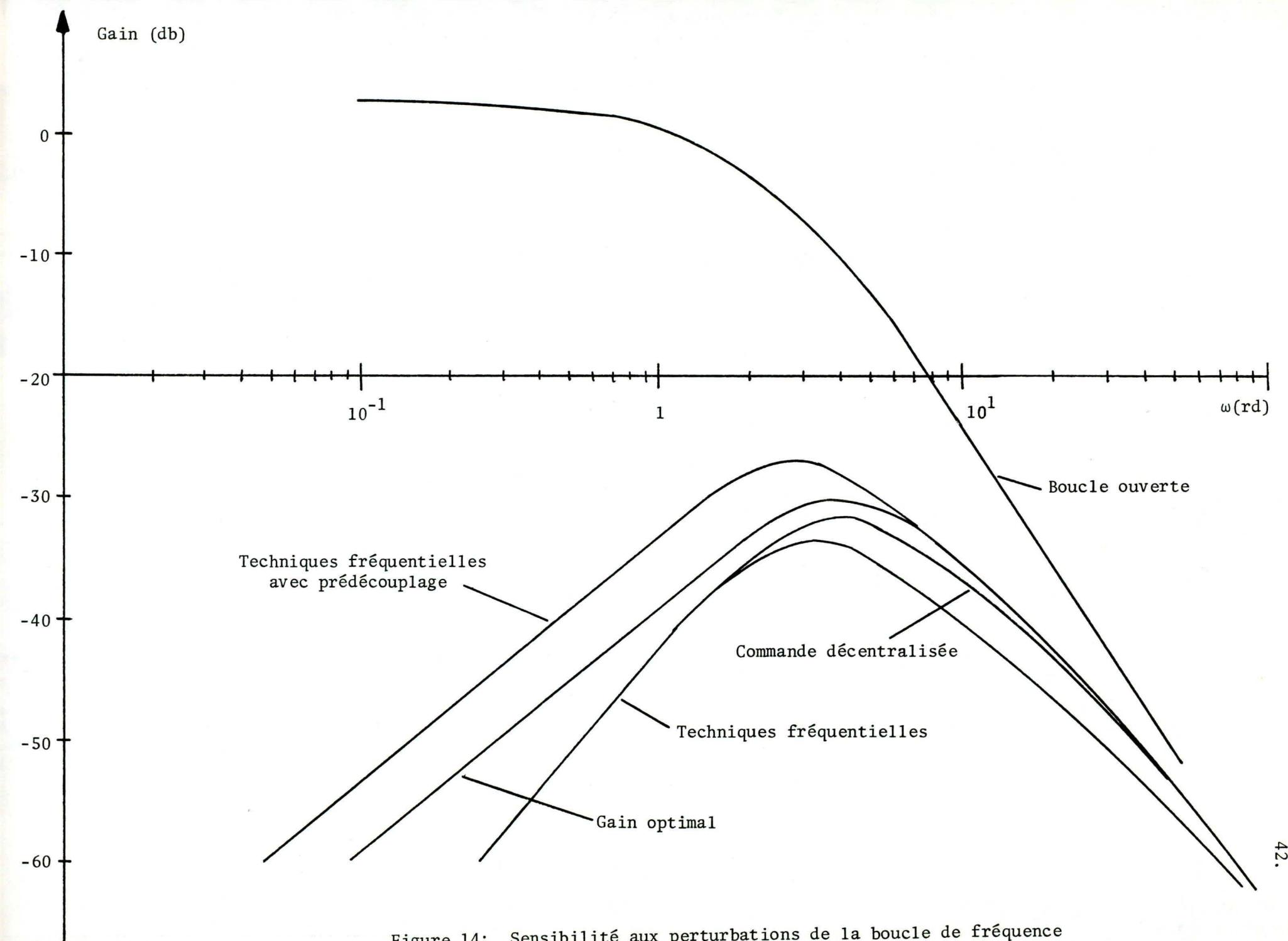


Figure 14: Sensibilité aux perturbations de la boucle de fréquence

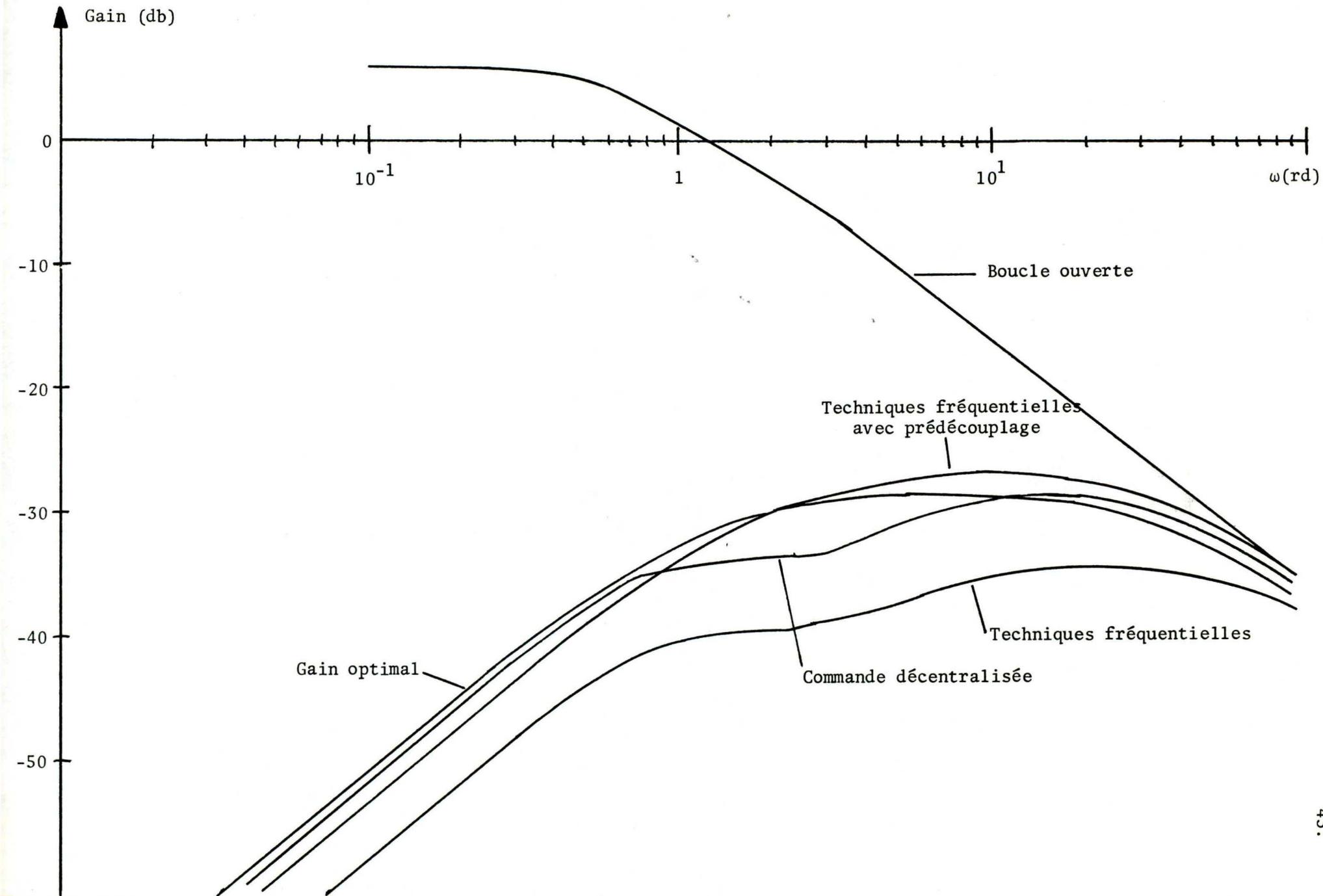


Figure 15: Sensibilité aux perturbations de la boucle de tension

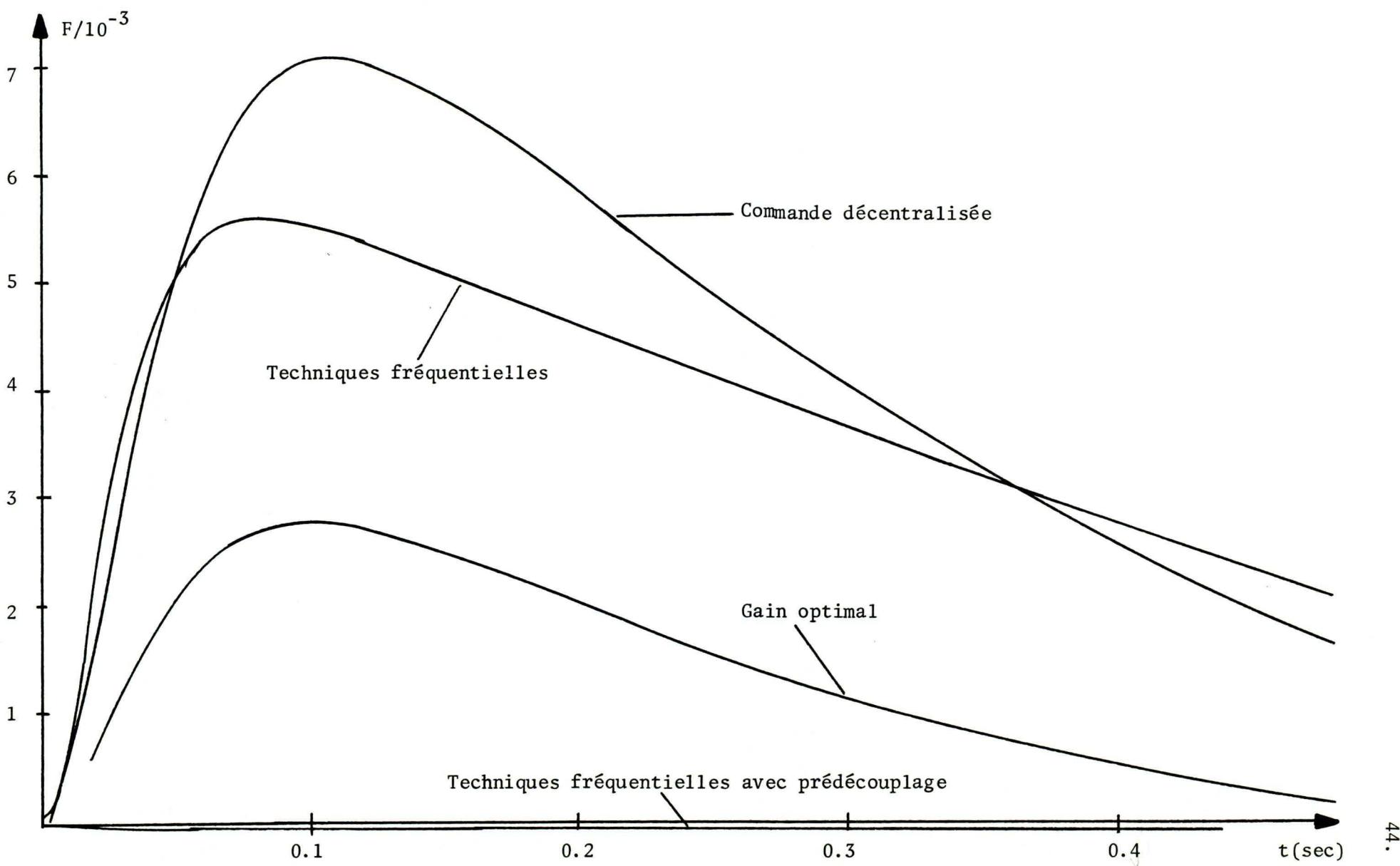


Figure 16: Réponse de la fréquence à un échelon de perturbation

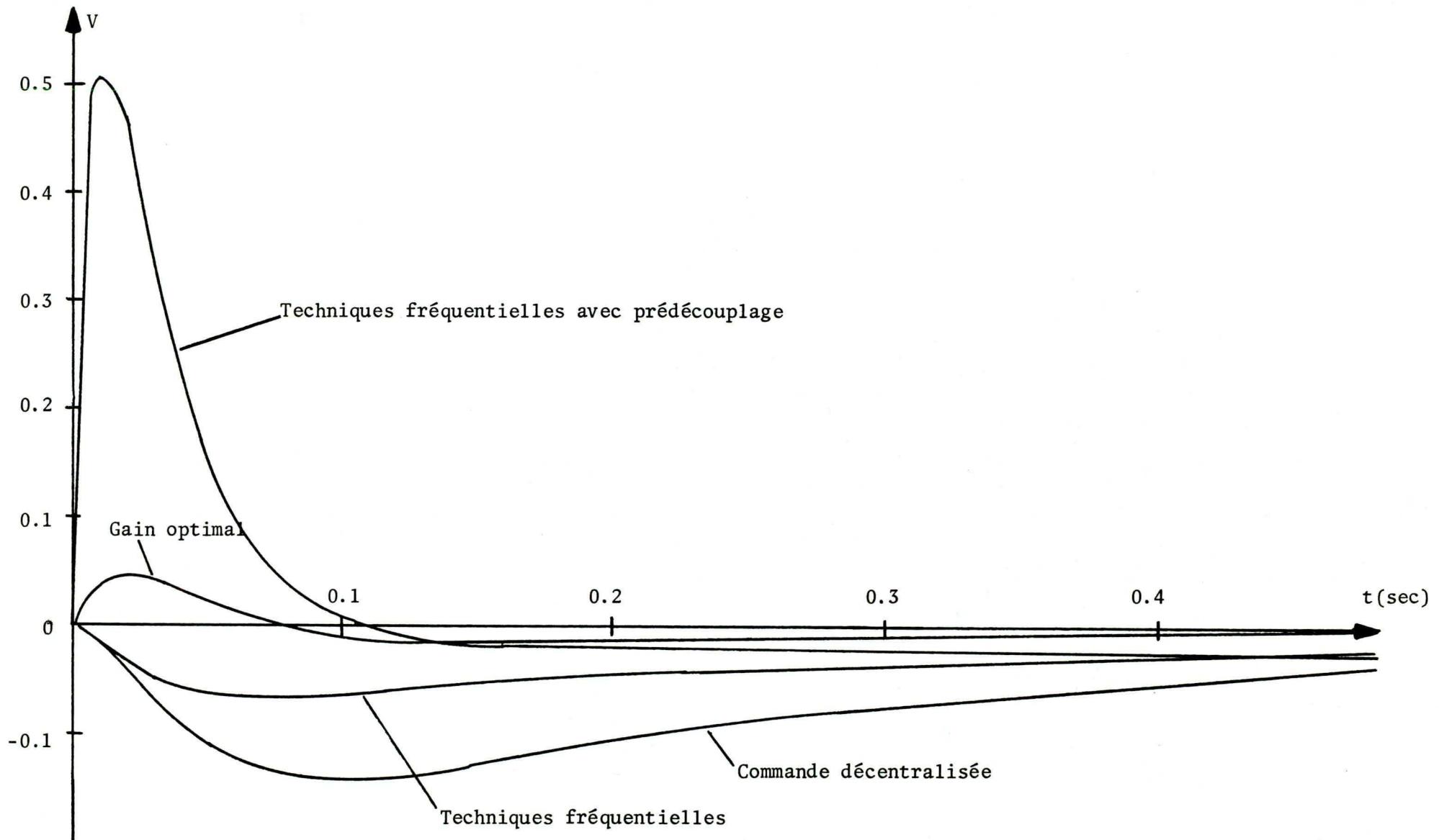


Figure 17: Réponse de la tension à un échelon de perturbation

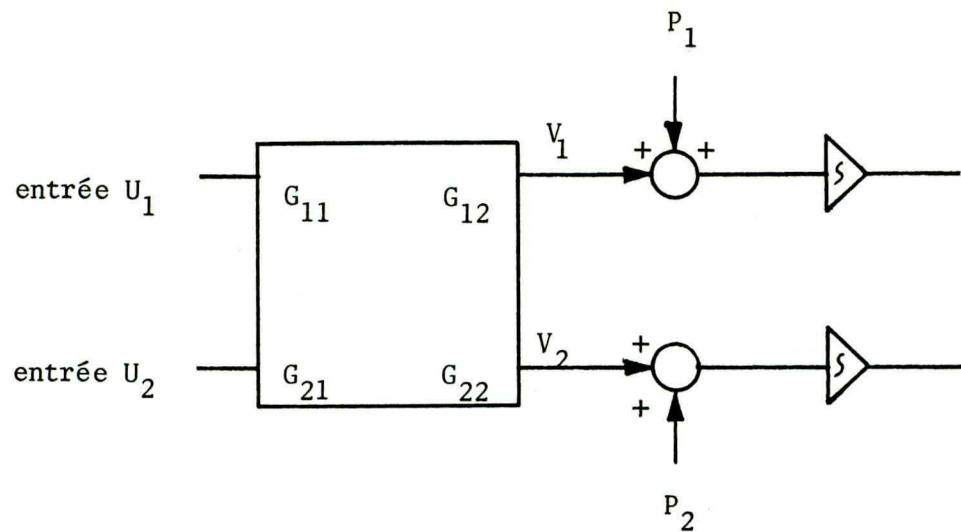


Figure 18: Introduction des perturbations d'état

Submission of Manuscripts

Prospective authors are invited to send manuscripts to the editor (see address under Publication Staff) in three copies of double-spaced typescript. Galley proofs of accepted papers will be forwarded to the authors by the publication's staff for proof reading. While more detailed instructions to authors are available from the editor, authors are encouraged to conform with the following guidelines:

- Papers should be between 3000 and 8000 words in length.
- An abstract preferably in both English and French, and of between 25 and 200 words should be prepared and sent along with the original manuscripts.
- All diagrams should be carefully drawn in black and white and in such a style that they may be reduced by photographic methods to a column width of 3½ inches.
- Photographs should be black and white and of a glossy finish.

Soumission des articles

Les auteurs sont priés de faire parvenir leurs articles au rédacteur (voir adresse à la rubrique Rédaction) en trois exemplaires dactylographiés à double interligne. Les épreuves imprimées des articles acceptés seront envoyées aux auteurs, par le service de publication, pour lecture d'épreuve. Il est demandé aux auteurs de se conformer aux directives générales suivantes et de se renseigner auprès du rédacteur pour tout autre détail.

- Les articles doivent avoir entre 3,000 et 8,000 mots.
- Un résumé d'environ 50 à 200 mots, de préférence en anglais et en français, doit accompagner les articles.
- Tous les graphiques et diagrammes doivent être soigneusement dessinés en noir et blanc, ce façon à pouvoir être réduits par photographie à une largeur de colonne de 3½".
- Les photographies doivent être en noir et blanc et glacées.

Reprints

Reprints, in minimum quantities of 100, may be purchased at the time of publication for \$15 per page per 100. Orders for reprints must be made to the publication staff prior to publication.

Réimpression

Des réimpressions (100 minimum) peuvent être achetées au moment de la publication, sur la base de \$15 la page pour 100. Les commandes doivent être adressées au personnel de publication, avant la parution des articles.

Subscriptions

Individual IEEE Members	\$15.00
Individual Non-Members	\$20.00
Institutions	\$25.00
Address for Subscriptions: CEEJ, Suite 700, EIC Building, 2050 Mansfield Street, Montréal, Québec H3A 1Y9.	

Abonnements

Membres de la IEEE	\$15.00
Non membres	\$20.00
Institutions	\$25.00
Adresse pour demande d'abonnement: RCGE, Bureau 700, Edifice ICI, 2050 rue mansfield, Montréal, Québec H3A 1Y9.	

Page Charges

A voluntary page charge of \$40 per page will be requested.

Contribution par page

Une contribution volontaire de \$40 par page sera sollicitée.

Publication Staff / Rédaction

Editor/Rédacteur Prof. Ian McCausland, Dept. of Electrical Engineering, University of Toronto, Ont. M5S 1A4, (416) 978-7039.
Assistant editors / Rédacteurs adjoints Prof. S. Pasupathy, Dept. of Electrical Engineering, University of Toronto, Toronto, Ont. M5S 1A4, (416) 978-5037, and Prof. Anastasios Venetsanopoulos, Dept. of Electrical Engineering, University of Toronto, Toronto, Ont., (416) 978-8670. *Associate editor / Rédacteur associé* Jean Jacques Archambault, Hydro-Québec, 855 Ste. Catherine est, Montréal, Québec, (514) 285-1711. *Staff / Personnel* James Hilborn, Susan Baka, Gayle Westacott, Corpus Information Services Ltd., 1450 Don Mills Road, Don Mills, Ontario M3B 2X7, (416) 445-7101. *Art director / Directeur artistique* John Sallinen, J. K. Sallinen Limited, 302 Merton St., Toronto, Ontario, (416) 484-1321. *Printer / Imprimeur* Heritage Press Co. Ltd., 3099 Universal Dr., Mississauga, Ontario L4X 2E4, (416) 625-5240.

Joint Publications Council / Conseil paritaire des publications

G. Sinclair (Chairman), J. J. Archambault, R. Billinton, C. diCenzo, M. Giroux, E. F. Glass, G. Holbrook, B. Kerr, I. McCausland, A. D. Moore, T. Pavlasek, M. N. S. Swamy

Publisher's Statement

The Canadian Electrical Engineering Journal, ISSN 0700-9216, is published quarterly by the Engineering Institute of Canada on behalf of the Canadian Society for Electrical Engineering, a Constituent Society of EIC, and the Canadian region of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. The EIC subscribes to the Fair Copying Declaration of the Royal Society. Single reprints of any part of this publication may be made for the purpose of private study, research, criticism or review provided exact reference thereto is quoted. Such reprints may not be offered for sale.

Printed in Toronto.

All material published in this Journal is the copyright of the EIC.

The subscription cost of CEEJ for members of the CSEE is included in their annual dues. Members of the IEEE are invited to use the subscription form at the back of the magazine to ensure that they receive future issues. Subscriptions may be obtained by IEEE members for \$15/year, non-members \$20/year and institutions \$25/year.

The financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council Canada is hereby acknowledged.

Déclaration de l'éditeur

Revue canadienne de génie électrique, ISSN 0700-9216, est une publication trimestrielle de l'Institut canadien des Ingénieurs, au nom de la Société de génie électrique, société constituante de l'ICI, et de la division canadienne de l'Institut des Ingénieurs en Électricité et Electronique. L'Institut canadien des ingénieurs souscrit à la déclaration de la société royale touchant l'intégrité des textes. Des réimpressions de toute partie de cette publication peuvent être faites pour étude privée, recherche, critique ou revue, pourvu que la source exacte en soit citée. Ces réimpressions ne peuvent être mises en vente.

Imprimé à Toronto.

La totalité de cette publication reste la propriété de l'ICI.

L'abonnement au RCGE pour les membres du SCGE est inclus dans leurs cotisations annuelles. Les membres de l'IEEE sont invités à utiliser le formulaire que se trouve au verso du magasine pour s'assurer qu'ils recevront bien les prochains numéros. Pour les membres de l'IEEE l'abonnement annuel est de \$15; de \$20 pour les autres et de \$25 pour les instituts.

Nous désirons signaler le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie.