

وزارة التعليم العالي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET **DE FIN D'ETUDES**



SUJET

La Compensation Adaptative  
d'un Système de Commande  
Automatique pour le Robot

Proposé par :

Mr. LYSSOV

Maître de Conférence à l'E.N.P.

Etudié par :

ADJERAD Meki

TERBAOUI Smain

Dirigé par :

Mr. LYSSOV

PROMOTION JANVIER 1988

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

SUJET

La Compensation Adaptative  
d'un Système de Commande  
Automatique pour le Robot

Proposé par :

Mr. LYSSOV

Maître de Conférence à l'E.N.P.

Etudié par :

ADJERAD Meki

TERBAOUI Smain

Dirigé par :

Mr. LYSSOV

PROMOTION JANVIER 1988

E.N.P. 10. Avenue Hacén Badi - EL-HARRACH - ALGER

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION   | 1  |
| BUT DU PROJET  | 1  |
| <u>-Chapitre UN</u> : CLASSIFICATION                           | 3  |
| I-DEFINITIONS  | 3  |
| II-CLASSIFICATIONS   | 4  |
| II.1-CLASSIFICATION PAR MOUVEMENT                              | 5  |
| II.1.1-Robots à coordonnées cartésiennes                       | 5  |
| II.1.2-Robots à coordonnées cylindriques                       | 5  |
| II.1.3-Robots à coordonnées sphériques                         | 5  |
| II.1.4-Robots articulés  | 5  |
| II.2-CLASSIFICATION PAR MODE DE CONTROLE                       | 7  |
| II.2.1-Les Robots contrôlés point à point                      | 7  |
| II.2.2-Robots à chemin contrôlé continu                        | 7  |
| II.2.3-Les Robots à chemin contrôlé                            | 7  |
| II.2.4-Les Robots intelligents                                 | 7  |
| II.3-CLASSIFICATION PAR PRECISION                              | 8  |
| II.3.1-La résolution   | 8  |
| II.3.2-La reproductibilité                                     | 8  |
| II.3.3-L'exactitude  | 8  |
| II.4-CLASSIFICATION PAR LE TYPE D'ACTIONNEUR                   | 9  |
| II.4.1-Robots à actionneur électrique                          | 9  |
| II.4.2-Robots à actionneur hydraulique                         | 10 |
| II.4.3-Robots à actionneur pneumatique                         | 10 |
| III-DOMAINES D'UTILISATION                                     | 10 |
| IV-AVANTAGES CONSTATES   | 11 |
| <br>   |    |
| <u>-Chapitre DEUX</u> : ETUDE ET CHOIX DES ELEMENTS DU SYSTEME |    |
| I-MOTEUR A COURANT CONTINU                                     | 12 |
| I.1-LE MOTEUR UNIVERSEL  | 12 |
| I.2-CARACTERISTIQUES DES MOTEURS UNIVERSELS                    | 12 |
| I.3-MODELE MATHEMATIQUE DU MOTEUR                              | 13 |
| I.4-LES TACHYMETRES  | 15 |
| I.5-MODELE MATHEMATIQUE DU TACHYMETRE                          | 15 |
| II-CALCUL DES PARAMETRES DU SYSTEME                            | 16 |
| II.1-LE MOTEUR   | 16 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| II.1.1-Partie électrique | 17 |
| II.1.2-Partie mécanique  | 18 |
| II.2-LE TACHYMETRE       | 19 |
| II.3-LE THYRISTOR        | 19 |
| II.4-GAIN DU DEPHASEUR   | 19 |
| II.5-GAIN DE L'AMPLI     | 19 |



-Chapitre TROIS:ETUDE DE BASE MATHÉMATIQUE DE LA COMPENSATION ADAPTIVE 21

|   |    |
|---|----|
| I-MODELE MATHÉMATIQUE DU SYSTEME                | 21 |
| II-CONCEPTION DU SYSTEME PAR LA METHODE DE BOBE | 23 |
| II.1-DETERMINATION DU RESEAU CORRECTEUR         | 23 |
| II.2-METHODE DU TRACE DE LA COURBE DE REPONSE   | 29 |
| II.3-TRACE DES COURBES                          | 30 |
| II.4-INTERPRETATION DES COURBES                 | 51 |

-Chapitre QUATRE:CONCEPTION ET REALISATION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE 53

|   |    |
|---|----|
| I-CONCEPTION                                | 53 |
| II-SCHEMA DE PRINCIPE                       | 53 |
| I.2-ETUDE THEORIQUE DES DIFFERENTS CIRCUITS | 54 |
| I.2.1-GENERATEUR D'IMPULSIONS               | 54 |
| I.2.2-ORGANE DE COMMANDE                    | 57 |
| I.2.3-ORGANE DE CONSIGNE                    | 61 |
| I.2.4-LE CIRCUIT DEPHASEUR                  | 61 |
| I.3-SCHEMA COMPLET DU CIRCUIT               | 62 |
| II-FONCTIONNEMENT                           | 63 |
| III-REALISATION                             | 66 |
| III.1-CALCUL DES TRANSFORMATEURS            | 66 |

|  |    |
|--|----|
| III.1.1-LE TRANSFORMATEUR D'IMPULSIONS   | 66 |
| III.1.2-LE TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION | 66 |
| III.2-PRESENTATION DE LA REALISATION     | 69 |
| CONCLUSION                               | 72 |
| ANNEXE                                   | 8  |
| BIBLIOGRAPHIE                            |    |

EDICACES  
=====

- A MES GRAND-MERES
- A MON PERE
- A MA MERE
- A MES SOEURS
- A MA FEMME
- A TOUTE LA FAMILLE
- A TOUS MES AMIS

SMAIN

- A MES GRANDS-PARENTS
- A MES PARENTS
- A MON UNIQUE FRERE
- A LA MEMOIRE D'AHCENE
- A TOUTE LA FAMILLE
- A TOUS(PES) LES AMIS(ES)

MEKI

 EMERCIEMENTS  
=====

Nous tenons à remercier vivement Monsieur LYSSOV pour son aide, ses précieux conseils et ses encouragements qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de l'élaboration de cette étude.

Que tous les professeurs, qui ont contribué à notre formation, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Que tous ceux, qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

*Lyssov*

## INTRODUCTION

La robotique, ou l'étude des robots, est un domaine très complexe et interdisciplinaires; elle inclue non seulement les différentes disciplines scientifiques mais aussi le domaine social et économique. Par conséquent, il y a plusieurs façons pour approcher l'étude de ce domaine.

De nos jours, les robots ont pris leur place dans l'industrie lourde, légère, et même dans les travaux de précision, etc... Ces robots utilisent, dans leur majorité, des servomoteurs à courant continu.

Il existe deux méthodes pour le contrôle des mouvements des robots à moteur à courant continu. La première consiste à contrôler le couple du bras du robot par la manipulation du courant du moteur. Tandis que, la seconde méthode consiste à contrôler la vitesse rotationnelle par manipulation de la tension du moteur. Le choix de la méthode repose sur les exigences techniques du problème.

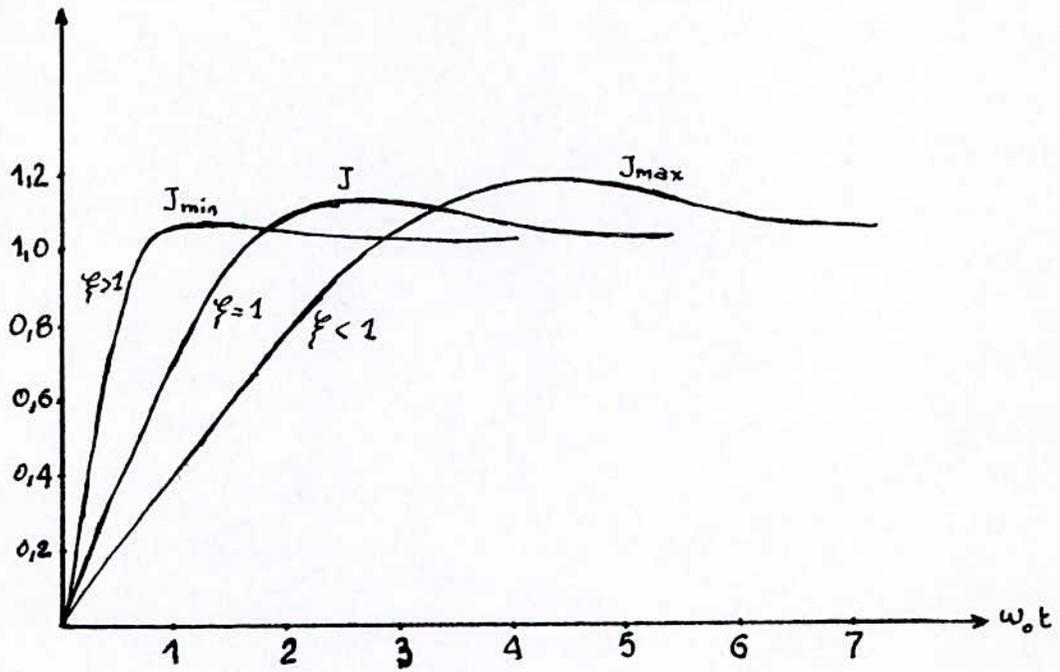
La première approche traite le couple produit par le moteur comme une entrée de l'articulation du robot, tandis que, la seconde approche traite le bras du robot comme une charge turbulente agissant sur l'arbre du moteur.

## BUT DU PROJET

Le but principal de ce projet est l'étude et la réalisation d'une commande électronique pour la régulation de la vitesse du moteur. Cette régulation se fait par une action automatique, qui fera tourner le moteur à la vitesse désirée.

L'inconvénient de la boucle de retour primaire ( i.e: sans régulation) est que le coefficient d'amortissement du moteur dépend du moment d'inertie, lequel varie avec la charge manipulée par le robot. Un petit moment d'inertie cause une réponse rapide avec un grand coefficient d'amortissement, et de là, une baisse dans le dépassement maximum; et pour un grand moment

d'inertie, le contraire de ce qu'a été dit est vrai. La figure ci-dessous illustre nos dires.



-fig.1-

Parachemin  
L. A. B.

## CHAPITRE UN

### CLASSIFICATION

Dans ce chapitre nous allons vous donner quelques définitions avant d'entamer les différentes classifications des robots.

#### I. DEFINITIONS

##### -ACTIONNEUR

C'est un moteur électrique, hydraulique, pneumatique, ou tout autre dispositif automatique qui est utilisé pour produire le mouvement du maillon.

##### -ARTICULATION

Est la connection entre deux maillons adjacents.

##### -CHAINE CINEMATIQUE

C'est un ensemble de corps rigides connectés entre eux à l'aide des articulations.

##### -L'EFFECTUEUR FINAL

C'est une mâchoire particulière ( ou main ) attachée à la fin du manipulateur, lequel est généralement utilisé pour transporter un outil ou tout autre objet.

##### -MAILLON

Est un corps rigide dans une chaîne cinématique.

##### MANIPULATEUR

C'est un dispositif permettant de déplacer des objets dans les directions souhaitées sans qu'il soit nécessaire d'y toucher. Ce dispositif a plusieurs degrés de liberté qui lui permettent de faire les mouvements suivants : révolution, avant-arrière, haut-bas, gauche-droite, balancement vertical et horizontal, et ainsi de saisir un objet par pincement, succion, etc..., pour le transporter dans l'espace.

##### -ROBOT

Le mot robot englobe tous les manipulateurs automatiques, et est défini comme étant un système mécanique doté de fonctions motrices flexibles.

analogues a celles des organismes humains ou qui combinent des fonctions de ce type avec des fonctions intelligentes et qui agit selon les instructions données par l'homme.

Dans ce texte, on entend par fonctions intelligentes l'une des capacités suivantes: juger, reconnaître, s'adapter ou apprendre.

## II. CLASSIFICATIONS

Il y a plusieurs façons pour différencier un robot l'un autre, et l'idée principale de ce paragraphe est de discuter et de classer quelques uns. Nous commençons avec une observation fondamentale sur le nombre de degrés de Liberté associés avec la localisation de n'importe quel objet dans le domaine réel, c.à.d l'espace tri-dimensionnel.

Les robots sont normalement construits comme une série de corps rigides couplés, ou maillons, lesquels constituent ensemble ce qu'on appelle "UNE CHAÎNE CINÉMATIQUE". Si, au moins, chaque maillon est connecté à deux autres la chaîne cinématique est dite fermée; et un tel mécanisme est appelé enchaînement.

Une paire cinématique est le couplage de deux maillons adjacents. Si ces deux maillons font contacte sur une surface, la paire est appelée "paire basse". Si, toutefois, les deux maillons font contacte le long d'une ligne ou à point, la paire est appelée "paire supérieure". Les deux plus simples paires supérieures qui sont les plus fréquemment rencontrées, dans l'industrie courantes des manipulateurs, sont celles nommées "paire de révolution", qui favorise seulement une rotation relative autour d'un seul axe, et la "paire prismatique" qui favorise seulement une translation relative le long d'un seul axe.

Les paires de révolution et prismatique sont à un seul degré de liberté car leurs liaisons favorisent un mouvement relatif dans une seule direction.

Cependant, la plupart des robots industriels, qui ont soit-disant un

but général, peuvent avoir exactement six degrés de liberté; donc ils sont capables d'achever des configurations arbitraires. De plus, les trois premiers degrés de liberté de plusieurs, sinon la plupart, de ces manipulateurs industriels sont essentiellement utilisés pour accomplir les positions désirées du poignet et avec les trois derniers de grés de liberté sont employés par la suite afin de réaliser les orientations voulues de la structure de l'outil. Les trois derniers, ou les mains, de la plupart des manipulateurs sont similaires en configuration géométrique, quoique celle des trois premiers maillons peut-être considérablement différente.

Maintenant, nous allons commencer à voir les différentes classifications des robots.

## II.1 CLASSIFICATION PAR MOUVEMENT

### II.1.1 Robots à coordonnées cartésiennes

On appelle robot à coordonnées cartésiennes ou de configuration cartésienne, si le mouvement des trois maillons est translationnel ou prismatique.

### II.1.2 Robots à coordonnées cylindriques

Si le mouvement du premier maillon est rotationnel et que le second et le troisième ont un mouvement translationnel, alors nous avons une configuration cylindrique.

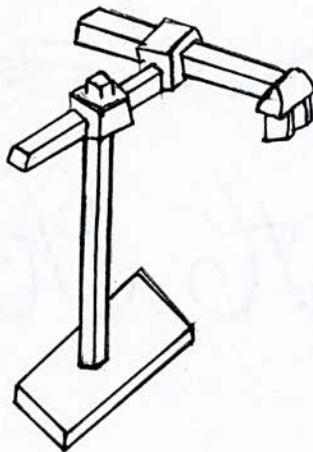
### II.1.3 Robots à coordonnées sphériques

Si le mouvement des deux premiers maillons est rotationnel et celui du troisième maillon est translationnel ou prismatique, la configuration est dite sphérique.

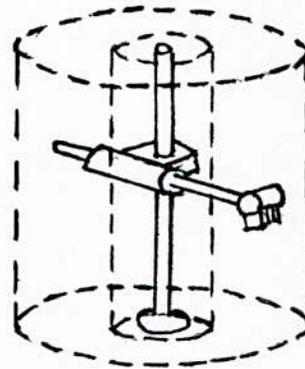
### II.1.4 Robots articulés

Lorsque le mouvement des trois maillons est rotationnel, la configuration est dite articulée.

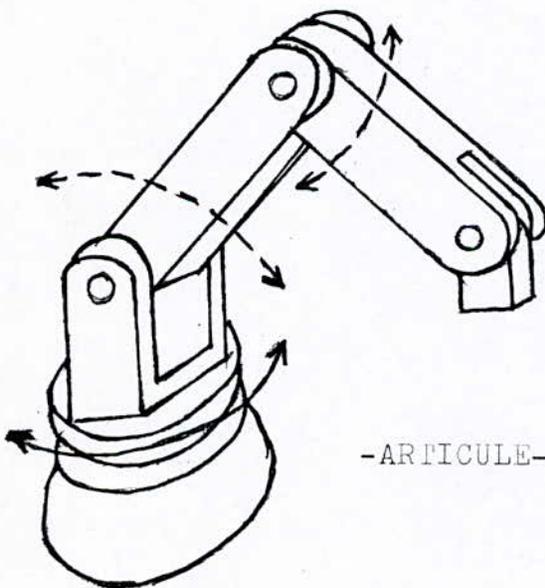
Ces quatre configurations de robot sont représentées en figure I.14.



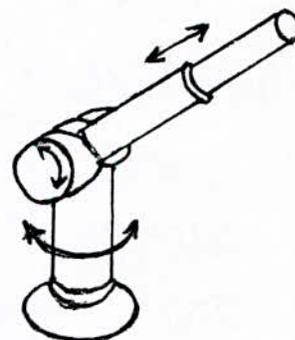
-CARTESIEN-



-CYLINDRIQUE-



-ARTICULE-



-SPHERIQUE-

-Fig.I.1- Les quatre configuration de base des manipulateurs

La série de toutes les positions qu'un manipulateur donné peut atteindre est appelée "son domaine de travail" (volume ou espace). Donc, les quatre différentes configurations, que nous avons juste énuméré ci-dessus, décrivent essentiellement leur domaine de travail.

## II.2.CLASSIFICATION PAR MODE DE CONTROLE

### II.2.1.Les robots contrôlés point à point

Ces manipulateurs sont capables de stopper à plusieurs différentes positions programmées, bien qu'il n'y a pas de manière pour spécifier le chemin particulier ou la trajectoire du manipulateur entre les points programmés. Ces manipulateurs sont souvent à un niveau de sophistication très bas et presque souvent ils ont moins de six degrés de liberté et sont communément utilisés dans les opérations de "prendre et placer": i.e, ils prennent un objet d'un point et le placent à un autre point.

### II.2.2.Robots à chemin contrôlé continu

Cette classe est caractérisée par une trajectoire complète qui est stockée comme un système de points qui dépendent du temps. La trajectoire est souvent générée par ce qu'on appelle opération "marcher à travers" dans laquelle un opérateur humain déplace manuellement l'effecteur final le long du chemin désiré. Une mémoire, relativement large, est d'habitude nécessaire pour stocker les plusieurs points associés avec la trajectoire.

### II.2.3. Les robots à chemin contrôlé

Ils représentent le niveau de contrôle de mouvement le plus sophistiqué. Les trajectoires associées à cette classe de manipulateurs sont usuellement générées par l'ordinateur de contrôle, après que certains points désirés ont été définis et stockés dans la mémoire. Un microprocesseur ou un mini-ordinateur exécute les points stockés. Ces robots sont généralement à six degrés de liberté.

### II.2.4. Les robots intelligents

Ils peuvent déterminer leurs propres actes grâce à leurs organes de

perception et de reconnaissance, et sont capables d'adapter leur apprentissage en fonction des situations réelles appréhendées par les capteurs dont ils sont dotés.

### II.3 CLASSIFICATION PAR PRECISION

C'est une autre manière de comparer ou de classer les robots. Il y a trois différentes mesures de précision dont on doit être familier avec, à savoir "la résolution", "la reproductibilité", et enfin "l'exactitude".

#### II.3.1 La résolution

Elle est la mesure la plus fine de la précision, et est définie comme étant le plus petit déplacement qu'un manipulateur peut-être commandé pour se déplacer. Pour illustrer ceci, si un capteur de position est monté sur un manipulateur employant un nombre binaire de 14 bits et le rayon **total d'action** du manipulateur est de 2032mm, alors le plus petit changement dans la position à laquelle on peut, physiquement, commander le robot pour se déplacer est donnée par  $2032/2^{14} = 0.128$  mm; qui définit sa résolution.

#### II.3.2 La reproductibilité

C'est une mesure quantitative du pouvoir du manipulateur à positionner l'effecteur final au même point durant des essais répétés. Pour l'illustrer si un robot est programmé afin d'accomplir une répétition, par exemple une opération de "prendre et placer", chaque fois la prise de l'objet se fait du même point, comme la fin d'un chargeur à gravité. Donc, la "reproductibilité" du manipulateur représentera une mesure quantitative qui explique pourquoi à chaque fois l'effecteur final revient toujours au même point. La "reproductibilité" des manipulateurs industriels courants est typiquement entre 1.28 et 0.128mm.

#### II.3.3 L'exactitude

ELLE EST un peu plus difficile à définir précisément et à mesurer. En particulier, "l'exactitude" est associée avec les indépendantes capacités de programmation d'un robot industriel. Pour l'illustrer, supposons que quelqu'un fait un programme pour déplacer l'effecteur final d'un manipulateur à une

certaines positions à qui ce dernier n'a jamais été auparavant. Si le programme est alors chargé dans l'ordinateur de contrôle et exécuté, "l'exactitude" représentera une mesure quantitative d'approche, de l'effecteur final, de la position désirée et programmée. Pour des raisons variées, "l'exactitude" des manipulateurs industriels, d'aujourd'hui, est relativement faible (en comparaison avec leur "reproductibilité"), et beaucoup des recherches courantes sont concentrées sur la résolution de ce problème.

#### II.4 CLASSIFICATION PAR TYPE D'ACTIONNEUR

C'est une autre façon de classer les robots. Essentiellement il y a trois types d'actionneurs (ou de sources d'énergie) utilisés en robotique, savoir: électrique, pneumatique, et hydraulique.

##### II.4.1 Robots à actionneur électrique

Les moteurs pas à pas et les servomoteurs à courant continu sont les types essentiels des actionneurs électriques utilisés dans l'industrie robotique.

Comme les critères de performances des moteurs à courant continu s'améliorent de plus en plus, ils seront les principaux actionneurs employés dans les futures applications de la robotique, et spécialement lorsque leurs coûts diminuent. Ainsi les robots seront utilisés plus fréquemment dans des assemblages légers et dans le travail de ménage de maison, plutôt que dans les industries lourdes.

Contrairement aux moteurs à courant continu, qui requièrent généralement plusieurs formes de rétroactions ou boucles de contrôle fermées, les moteurs pas à pas sont essentiellement conduits par une séquence d'impulsions électriques. Avec le nombre d'impulsions, la position du moteur est directement contrôlée dans une boucle ouverte.

Les moteurs pas à pas sont généralement utilisés dans les opérations de robotique les plus sophistiquées, comme le genre d'opérations "prendre et placer

Ils sont plus simples et moins chères que les moteurs à courant continu; bien que, ils sont, usuellement, plus grands dans les dimensions physiques, et leur capacités de performances sont quelque peu limitées.

#### II.4.2 Robots a actionneur hydraulique

Les robots hydrauliques étaient de grands dispositifs à conduit hydraulique, et étaient principalement utilisés dans l'industrie automobile. Ils fournissent encore la plus grande force au coût le plus bas, et ils continuent à être utilisés dans les industries lourdes. Malheureusement, ils sont notoirement brillants et présentent des fuites.

#### II.4.3 Robots a actionneur pneumatique

Les actionneurs pneumatiques sont, peut-être, d'une conception plus simple et d'un prix très bas pour leur emploi en robotique. BIEN qu'ils soient semblables dans leur principe aux actionneurs hydrauliques, ils ont, cependant leurs conduites pneumatiques difficile à contrôler. Une grande précision est aussi difficile à atteindre avec un système complètement pneumatique.

### III. DOMAINE D'UTILISATION

Les critères les plus déterminants pour délimiter les domaines d'applications privilégiées des robots sont:

- La répétitivité de la tâche
- Sa pénétrabilité et ses risques
- Sa fréquence
- La possibilité de prédéfinir le geste.

Ces critères permettent d'utiliser valablement la robotique dans la petite série, si la production est effectuée de manière continue, et dans la grande série.

Les principales applications actuelles sont:

- Le soudage par point ou à l'arc

- Les applications de peintures, laques, vernis, colles.
- L'alimentation et le déchargement des machines outils, des presses, et de machines à mouler.
- Les manutentions
- Les opérations d'assemblage
- Les opérations de parachèvement (moulage, polissage, découpage).

#### IV. AVANTAGES CONSTATES

La robotisation de l'industrie à présenter plusieurs avantages sur le plan économique et social. ELLE a permis:

- d'accroître la productivité
- d'humaniser d'avantage les conditions de travail
- de limiter les accidents de travail
- d'améliorer la qualité des produits
- d'accélérer le rythme de rendement des investissements.
- de l'élimination des pénuries de main-d'oeuvre qualifiée

Ces incidences économiques et sociales tiennent au fait que les robots industriels sont flexibles et à fonctions multiples, dotés désormais d'une grande liberté de mouvement semblable à celle des membres supérieurs (bras et mains) des êtres humains. Cette adaptabilité ayant permis l'automatisation de la production.

La pénétration des robots industriels à transformer le système de production homme-machine en un système homme-robot-machine. Grâce à cette évolution, les hommes ont été déchargés des tâches dangereuses et ingrates.

## CHAPITRE DEUX

### ETUDE ET CHOIX DES ELEMENTS DU SYSTEME

#### I-MOTEUR A COURANT CONTINU

Les moteurs à courant continu permettent un contrôle précis de la vitesse, par la manipulation de la tension, ou du couple, par la manipulation du courant appliqué au moteur. Idéalement, ils sont convenus pour conduire les axes des petits et moyens robots.

##### I.1.LE MOTEUR UNIVERSEL (7)

Le moteur à courant continu du type série, encore appelé moteur universel car il peut fonctionner aussi bien en courant continu et en courant alternatif, est très utilisé dans les applications domestiques. Les moteurs universels, qui sont le plus souvent alimentés en courant alternatif, fonctionnent habituellement à une seule vitesse.

La limitation de la vitesse peut être obtenue en utilisant des thyristors dont la gachette est commandée par des impulsions réglables en phase. Par ailleurs, on peut utiliser un circuit simple à thyristors pour déterminer les variations de vitesse afin de régler l'alimentation du moteur pour que sa vitesse demeure sensiblement constante.

##### I.2.CARACTERISTIQUES DES MOTEURS UNIVERSELS (7)

Un moteur universel classique comporte un simple enroulement d'excitation qui est branché en série avec l'armature du moteur. Quand le courant passe entre les bornes du moteur, le courant change à la fois dans l'excitation et dans l'armature. Un moteur série est autorégulateur de vitesse. En effet, quand une tension est appliquée aux bornes d'un moteur arrêté, la f.c.e.m du moteur étant nulle, l'appel de courant est alors important, il en résulte un couple au démarrage important qui provoque une forte accélération de l'armature. Quand le moteur atteint sa vitesse maximale, sa f.c.

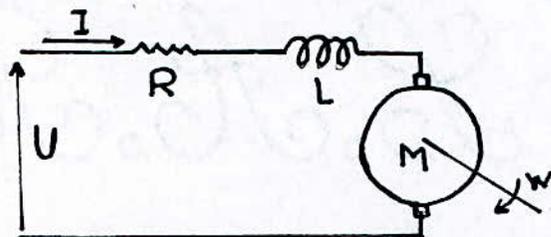
e.m est élevée et le couple est relativement faible.

Quand on applique un couple résistant sur l'arbre du moteur, sa vitesse tend à diminuer. Dès que celle-ci diminue, la f.c.e.m diminue et la différence entre la f.c.e.m et la tension appliquée augmente. En conséquence, l'intensité absorbée et le couple augmentent automatiquement ce qui tend à accélérer le moteur afin de lui redonner sa vitesse d'origine.

### I.3. MODELE MATHEMATIQUE DU MOTEUR

Pour des buts analytiques, il est essentiel que nous établissions un modèle mathématique pour notre moteur.

Le schéma électrique du moteur est montré par la figure II.1:



-fig.II.1- Schema électrique du moteur.

Ecrivons les équations régissant le moteur:

$$U = RI + LI + E \quad \text{II.1}$$

où: U: tension d'entrée;

R: résistance de l'induit;

L: inductance de l'induit;

E: la f.c.e.m du moteur;

$$\text{or} \quad E = C_e w \quad \text{II.2}$$

avec  $C_e$ : constante électrique du moteur.

D'autre part on a:

$$\Gamma = C_m I = J_m \frac{dw}{dt} \quad \text{II.3}$$

$$\text{et} \quad P = \Gamma w \quad \text{II.4}$$

où:  $\Gamma$ : couple développé par le moteur;

$J_m$ : moment d'inertie de l'induit du moteur;

$C_m$ : constante du couple;

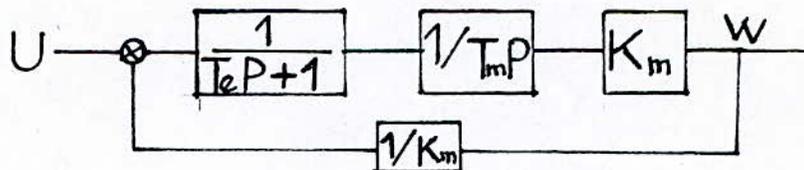
P:puissance du moteur.

En combinant les équations précédentes et utilisant la transformée de LAPLACE, on aboutit, après arrangement, à:

$$\frac{w(p)}{U(p)} = \frac{K_m}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1} \quad \text{II.5}$$

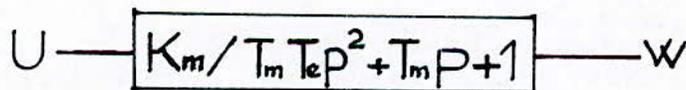
avec  $T_m = J_m R / C_e C_m$  ;  $T_m$ : constante de temps mécanique.  
 $T_e = L/R$  ;  $T_e$ : constante de temps électrique.  
 $K_m = 1/C_e$  ;  $K_m$ : constante mécanique du moteur.

L'équation II.5 est dite fonction de transfert du moteur, elle nous permet de dresser le bloc diagramme du moteur.



-fig.II.2-Le bloc diagramme du moteur avec son auto-réaction.

Ce bloc diagramme peut être représenté, aussi, en un diagramme en boucle ouverte.



-fig.II.3-Le bloc diagramme du moteur en boucle ouverte

Bien que le moteur en lui même est un système en boucle ouverte, la figure II.2 montre que le moteur possède sa propre boucle de retour qui est causée par la f.c.e.m. Physiquement, la f.c.e.m représente la contre réaction d'un signal proportionnel au retour négatif de la vitesse du moteur.

#### -Relation entre $C_e$ et $C_m$

Bien que, fonctionnellement la constante du couple ( $C_m$ ) et la constante de la f.c.e.m ( $C_e$ ) sont deux paramètres séparés, pour un moteur donné

leurs valeurs sont en relation étroite. Pour montrer cette relation, écrivons l'énergie mécanique développée par le moteur. On a :

$$P = \Gamma \omega \quad \text{II.6}$$

et d'autre part, on peut exprimer cette énergie par :

$$P = E I \quad \text{II.7}$$

En remplaçant par II.2 dans II.6, et par II.3 dans II.7; en égalisant les deux nouvelles équations, on aura :

$$C_e \omega I = C_m I \omega \quad \text{II.8}$$

d'où on tire :

$$C_e \text{ (V/rad/S)} = C_m \text{ (N.m/A)} \quad \text{II.9}$$

Ainsi, dans le système S.I., les valeurs de  $C_e$  et  $C_m$  sont identiques si  $C_m$  est donné en (V/(rad/s)).

#### I.4. LES TACHYMETRES

Ce sont des dispositifs électromécaniques qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Le dispositif travaille essentiellement comme un générateur avec une tension de sortie proportionnelle à la grandeur de la vitesse angulaire.

Dans les systèmes de contrôle, la plupart des tachymètres sont du type à courant continu. Ces derniers sont surtout utilisés dans les systèmes de contrôle de vitesse ou de stabilisation. La figure II.4 montre le diagramme typique d'un système de contrôle de vitesse dans lequel la sortie du tachymètre est comparée à la tension de référence, qui représente la vitesse désirée. La différence entre les deux tensions, ou l'erreur, est amplifiée et utilisée pour conduire le moteur, donc la vitesse atteindra éventuellement la valeur désirée. Dans ce type d'application, la précision du tachymètre est hautement critique, comme la précision du contrôle de la vitesse dépend de cette dernière.

#### I.5. MODELE MATHEMATIQUE DU TACHYMETRE

Sans se soucier du type du tachymètre, sa caractéristique de base

est sa tension de sortie qui est proportionnelle à la vitesse du rotor. Ainsi, la dynamique du tachymètre peut être représentée par:

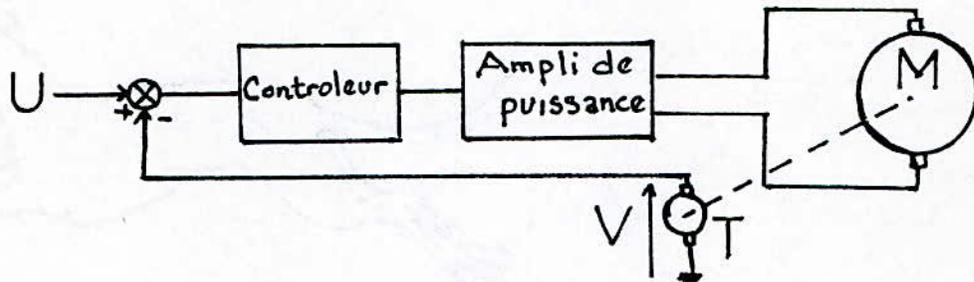
$$e(t) = K_{tg} w(t) \quad \text{II.10}$$

où  $e(t)$  est la tension de sortie,  $w(t)$  la vitesse du rotor et  $K_{tg}$  le gain.

La fonction de transfert est obtenue en prenant la transformée de Laplace des membres de l'équation II.10.

$$E(p)/w(p) = K_{tg} \quad \text{II.11}$$

$w(p)$  est considérée comme l'entrée et  $E(p)$  comme la sortie.



-fig.II.4-Système de contrôle de vitesse typique.

## II. CALCUL DES PARAMETRES DU SYSTEME

Dans cette partie, nous déterminerons les paramètres des éléments constituant notre système à partir du cahier de charge et des quelques renseignements qu'on possède sur ces éléments.

### -Cahier de charge

Pour tout projet d'étude, on fixe les critères de performances qu'on désire obtenir. Les nôtres sont fixées comme suit:

- l'erreur permise sur la stabilité du système :  $\epsilon = 5\%$ ,
- l'erreur due aux perturbations engendrées par le thyristor :  $h_1 = 0.2 \text{ V}$ ,
- l'erreur due aux perturbations engendrées par le moteur :  $h_2 = \Delta w = RI/Ce$ ,
- le temps de la région transitoire :  $t_r = 0.05 \text{ s}$ ,
- le dépassement maximal désiré :  $\sigma = 15\%$ .

### II.1. LE MOTEUR

Les seules informations, qu'on possède sur notre moteur (du type universel), sont:

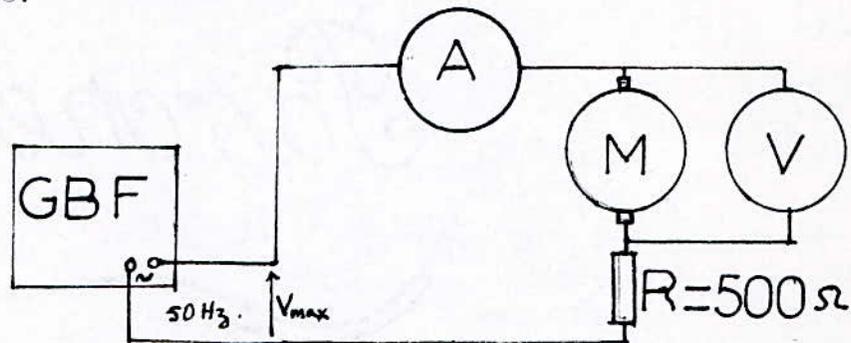
- la puissance nominale :  $P_n = 150 \text{ W}$ .
- le courant d'induit nominal :  $I_n = 1,365 \text{ A}$ .
- la vitesse nominale :  $N = 3000 \text{ tr/mn}$ .

### II.1.1. Partie électrique

#### a) - La résistance et l'inductance de l'induit

La résistance de l'induit a été mesurée directement à l'aide d'un Ohm-mètre, on a trouvé que  $R = 0,12 \Omega$ .

Pour mesurer l'inductance, nous avons utilisé le montage décrit à la figure II.5:



-fig.II.5- Montage utilisé pour mesurer L.

avec:  $V_{max} = 4 \text{ V}$  mesurée à l'oscilloscope,

$I = 2,8 \text{ mA}$  mesuré à l'aide de l'ampère-mètre,

$U = 0,8 \text{ V}$  mesurée à l'aide du volt-mètre.

On a obtenu :

$L = 227 \text{ mH}$  ;  $R = 0,12 \Omega$ .

#### b) - La tension nominale

D'après la loi fondamentale de l'électricité, on sait que:

$$P = UI \implies U = P/I \quad \text{II.12}$$

Pour  $P = 150 \text{ W}$  et  $I = 1,365 \text{ A}$  on a  $U = 110 \text{ V}$ .

#### c) - La constante électrique

Ecrivons les équations régissant le moteur en régime permanent:

$$U = RI + E \quad \text{II.13}$$

$$E = C_e \omega \quad \text{II.14}$$

En remplaçant par II.14 dans II.13 et en arrangeant; on a:

$$C_e = (U - RI) / \omega = (110 - 0.12 \cdot 1.365) / 314$$

$$C_e = 0.35 \text{ V}/(\text{rad/s})$$

### II.1.2 Partie mécanique

Pour cette partie, nous avons deux paramètres à calculer, le moment d'inertie de l'inducteur et la constante du couple.

#### a) - Moment d'inertie

Pour calculer le moment d'inertie, nous avons assimilé l'induit du moteur à un cylindre, en cuivre, plein et homogène, de densité volumique  $d = 7.5 \text{ g/cm}^3$ . On sait que le moment d'inertie d'un cylindre plein et homogène est donné par :

$$J_m = m r^2 / 2 \quad \text{II.15}$$

$$J_m = (1/2) d \pi h r^4 \quad \text{II.16}$$

$d = 7.5 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$  : densité volumique

$h$ : hauteur de l'induit = 2 cm

$r$ : rayon de l'induit = 1 cm

on trouve:  $J_m = 2.36 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$

#### b) - Constante du couple

D'après les lois de la mécanique, on a:

$$P = \Gamma \omega \quad \text{II.17}$$

où  $\Gamma$ : étant le couple mécanique.

D'autre part, on a:

$$\Gamma = C_m \omega \quad \text{II.18}$$

En combinant les équations II.17 et II.18, on aboutit à:

$$C_m = P / \omega I \quad \text{II.19}$$

$$C_m = 0.35 \text{ N.m/A}$$

## II.2. LE TACHYMETRE

Après plusieurs tests sur notre tachymètre, on a constaté que la tension maximale qu'il délivre à sa sortie n'excède pas 4.1 V. L'équation physique régissant un tachymètre est donnée par:

$$E = K_{tg} \omega \quad \text{II.20}$$

$K_{tg}$  est appelé gain du tachymètre = 0.013 V/(rad/s).

## II.3. LE THYRISTOR

En automatisme, deux paramètres caractérisent le thyristor; à savoir sa constante de temps ( $T_{th}$ ) et son gain ( $K_{th}$ ).

La constante de temps est donnée par:

$T_{th} = 1/2mf$ ; où  $m$  est le nombre de phase du secteur et  $f$  sa fréquence.

$$T_{th} = 1/2.1.50 = 0.01 \text{ s.}$$

Par contre, le gain ( $K_{th}$ ) est fonction de la tension anode et du déphasage de l'impulsion qui commande sa gachette. Donc, on peut écrire que:

$$K_{th} = U_a/\psi \quad \text{II.21}$$

## II.4. GAIN DU DEPHASEUR

Le gain du déphaseur est donné par:

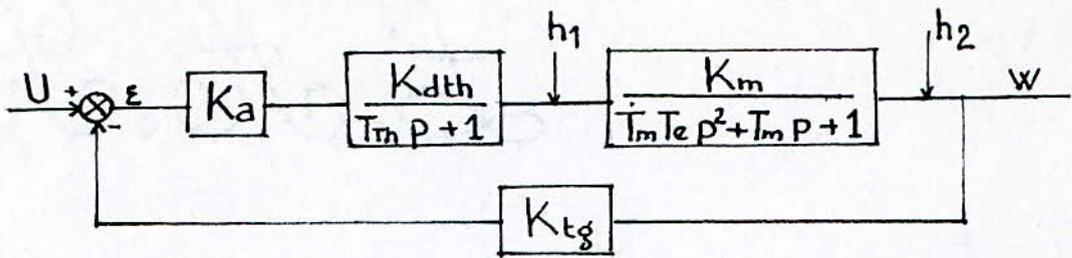
$$K_d = \text{déphasage}/\text{Tension d'entrée} = \psi/\epsilon \quad \text{II.22}$$

On remarque que  $K_{th}$  et  $K_d$  dépendent tous les deux du déphasage, pour cela, on préfère de calculer le gain commun  $K_{dth}$  en considérant que le thyristor et le déphaseur forment un seul bloc. Donc, on peut écrire que:

$$K_{dth} = U_a/\epsilon = 9 \text{ (sans unité).}$$

## II.5. GAIN DE L'AMPLI

SOIT la figure II.6 qui représente le bloc diagramme de notre système en tenant compte de la représentation des perturbations dues aux thyristor et le moteur.



-fig.II.6- Représentation du système avec les perturbations.

L'erreur, sur la stabilité du système en fonction des perturbations, est donnée par:

$$\varepsilon = \frac{K_m h_1 / (T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}{1 + \frac{K_m K_a K_{dth} K_{tg}}{(T_{th} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}} + \frac{h_2}{1 + \frac{K_m K_a K_{dth} K_{tg}}{(T_{th} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}} \quad \text{II.23}$$

Or, l'erreur est toujours calculée en régime permanent. (i.e : pour  $p$  tend vers 0); alors, en faisant  $p=0$  dans l'équation II.23, on aura:

$$\varepsilon = \frac{K_m h_1 + h_2}{1 + K_m K_a K_{dth} K_{tg}} \quad \text{II.24}$$

d'où:

$$K_a = \frac{K_m h_1 + h_2 - \varepsilon}{K_m K_{dth} K_{tg} \varepsilon} \quad \text{II.25}$$

mais  $h_2 = RI/C_e$  et  $K_m = 1/C_e$ , donc:

$$K_a = \frac{h_1/C_e + RI/C_e - \varepsilon}{(1/C_e) K_{dth} K_{tg} \varepsilon} \quad \text{II.26}$$

$$K_a = 59,32 \quad (\text{sans dimension})$$

On majore, toujours,  $K_a$  de 15 à 20% à cause des perturbations dues aux éléments du système. Donc:

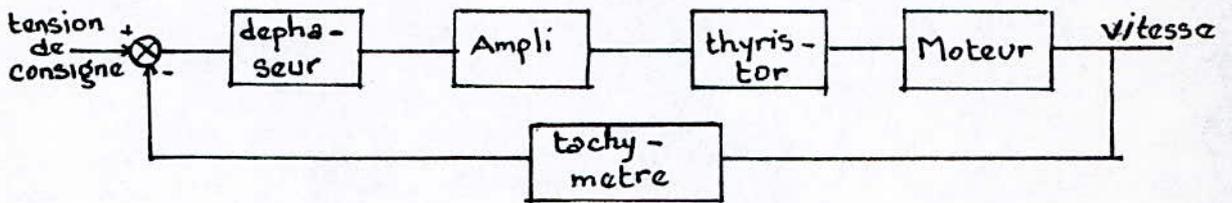
$$K_a = 70$$

ETUDE DE BASE MATHÉMATIQUE DE LA COMPENSATION ADAPTIVE

Dans ce chapitre, on tracera les courbes de réponse des régimes transitoires de notre fonction de transfert, en boucle ouverte; tout d'abord, avec les coefficients réels de l'équation caractéristique, ensuite, on fera varier ces coefficients, tour à tour, de 20% afin de voir sur quelle partie de fréquence le moment d'inertie, de la charge manipulée par le robot, aura une influence sur le régime transitoire.

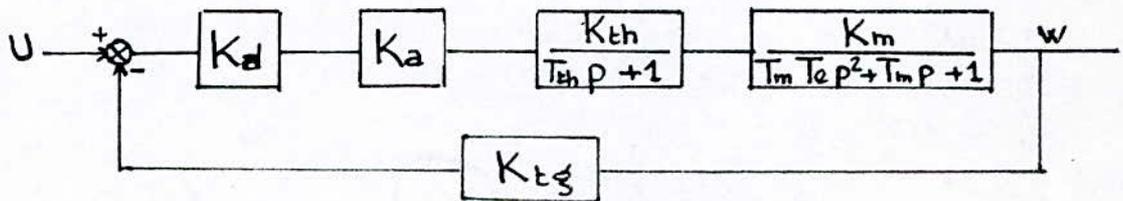
I. MODELE MATHÉMATIQUE DU SYSTEME

Le système de contrôle de vitesse, que nous proposons, est représenté par la figure III.1. Il se compose, essentiellement, du déphaseur, de l'amplificateur, du thyristor, du moteur et du tachymètre.



-fig.III.1-Bloc diagramme de contrôle de vitesse.

En tenant compte des notations précédemment donnés ( voir chap II) on peut représenter la figure III.1 comme suit:



-fig.III.2-

De cette figure on établit l'équation de transfert du système; elle est donnée par:

$$W(p) = \frac{\frac{K_a K_{dth} K_m}{(T_{th} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}}{1 + \frac{K_a K_{dth} K_m K_{tg}}{(T_{th} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}} \quad \text{III.1}$$

En arrangeant l'équation précédente, on aura:

$$W(p) = \frac{K_a K_{dth} K_m}{T_m T_e T_{th} p^3 + (T_e + T_{th}) T_m p^2 + (T_m + T_{th}) p + K_a K_{dth} K_m K_{tg}} \quad \text{III.2}$$

En remplaçant par les valeurs numériques; on obtient:

$$W(p) = \frac{1800}{4,6 \cdot 10^{-8} p^3 + 4,623 \cdot 10^{-6} p^2 + 10,0023 \cdot 10^{-3} p + 19,83} \quad \text{III.3}$$

Etudions la stabilité du système par le biais du critère de Routh:

|                          |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| 4,6 · 10 <sup>-8</sup>   | 10,0023 · 10 <sup>-3</sup> |
| 4,623 · 10 <sup>-6</sup> | 19,83                      |
| -0,187                   | 0                          |
| 19,83                    | 0                          |
| 0                        | 0                          |

On remarque que le signe, du troisième coefficient, de la première colonne, est différent de ceux des autres; alors, notre système est instable. Pour pallier à cet inconvénient, nous allons ajouter des réseaux correcteurs afin d'obtenir un système plus ou moins stable. Ces réseaux correcteurs seront déterminés à partir du tracé de Bode du gain et de la phase du système en boucle ouverte, car on peut juger la stabilité d'un système en boucle fermée à travers la fonction de transfert de la boucle ouverte de ce même système.

L'équation de transfert du système en boucle ouverte est donnée par:

$$W_o(p) = \frac{K_a K_{dth} K_m}{(T_{th} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)} \quad \text{III.4}$$

$$W_o(p) = \frac{1800}{(0,01p + 1)(4,6 \cdot 10^{-6} p^2 + 2,3 \cdot 10^{-6} p + 1)} \quad \text{III.5}$$

## II. CONCEPTION DU SYSTEME PAR LA METHODE DE BODE

La conception d'un système asservi par la méthode de Bode consiste à modéliser et remodeler les courbes de Bode de gain et de phase jusqu'à ce qu'on vérifie les conditions imposées au système.

La figure III.3 montre les courbes de Bode, de gain et de phase, de notre système. Elles ont été tracées à partir de la fonction de transfert de la boucle ouverte du système. On remarque sur la courbe de phase que le système est bien instable.

### II.1. DETERMINATION DU RESEAU CORRECTEUR

Pour déterminer le réseau correcteur à ajouter; il faut, tout d'abord, tracer la caractéristique désirée du système. Cette caractéristique dépend des exigences techniques; elle se compose de trois parties:

- la première partie est à moyennes fréquences,
- la seconde partie est à basses fréquences,
- la troisième partie est à hautes fréquences.

Pour tracer la caractéristique désirée idéale on doit, d'abord, trouver la fréquence de coupure désirée ( $w_{cd}$ ), celle-ci est donnée par:

$$w_{cd} = b \sqrt{tr}; \text{ où } b \text{ est la valeur du dépassement.}$$

Le tableau 1 donne  $b$  en fonction de  $\sigma$ .

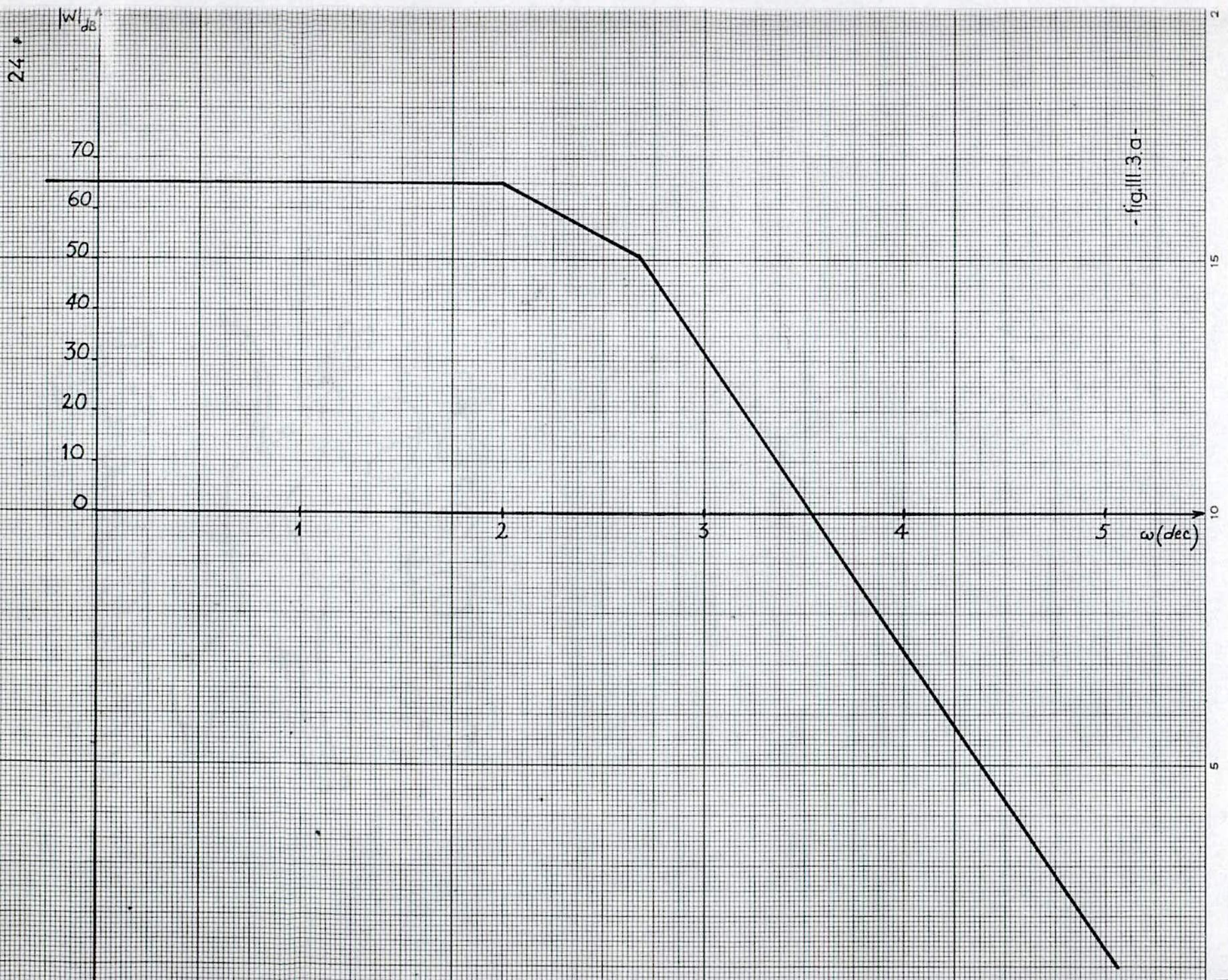
Une fois  $w_{cd}$  trouvée, on trace une asymptote de  $-20$  dB/décade, allant de  $w^-$  jusqu'à  $w^+$ .

$$w^- = 2 \text{ à } 4 \text{ fois } w_{cd} \quad \text{III.6}$$

$$w^+ = w_{cd}^2 / w^- \quad \text{III.7}$$

Pour relier les pentes à moyennes et basses fréquences on adopte une asymptote de  $-40$  dB/décade, tandis que pour les hautes fréquences, on prolonge notre caractéristique jusqu'à l'intersection avec le prolongement de la caractéristique initiale.

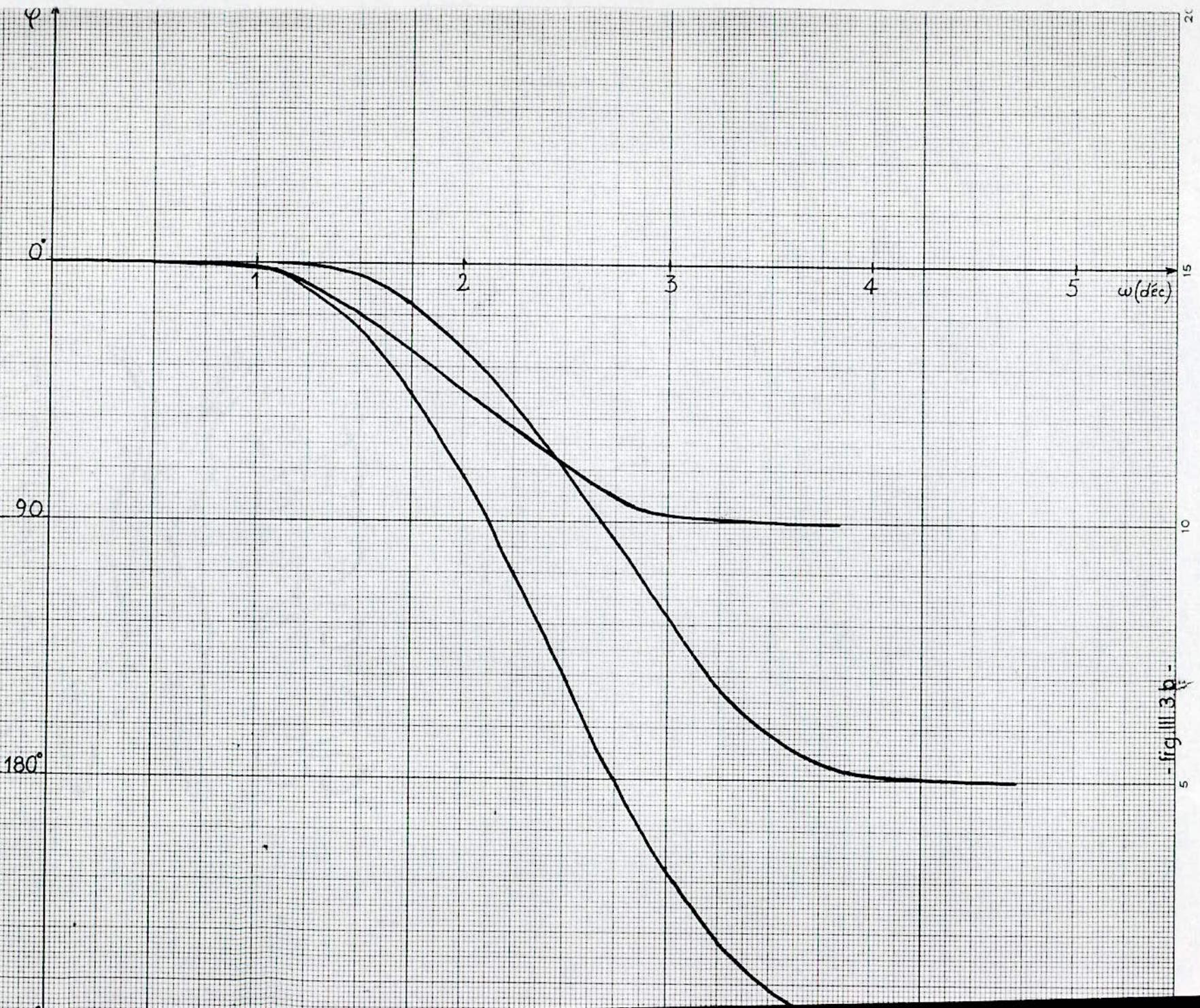
En hautes fréquences, on utilise la pente de  $-60$  dB/décade, car le système risque de devenir instable à un moment donné.



24 \*

- fig. III.3.a -

25



5 - fig III.3 b -

$|w|_{dB}$

70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

1

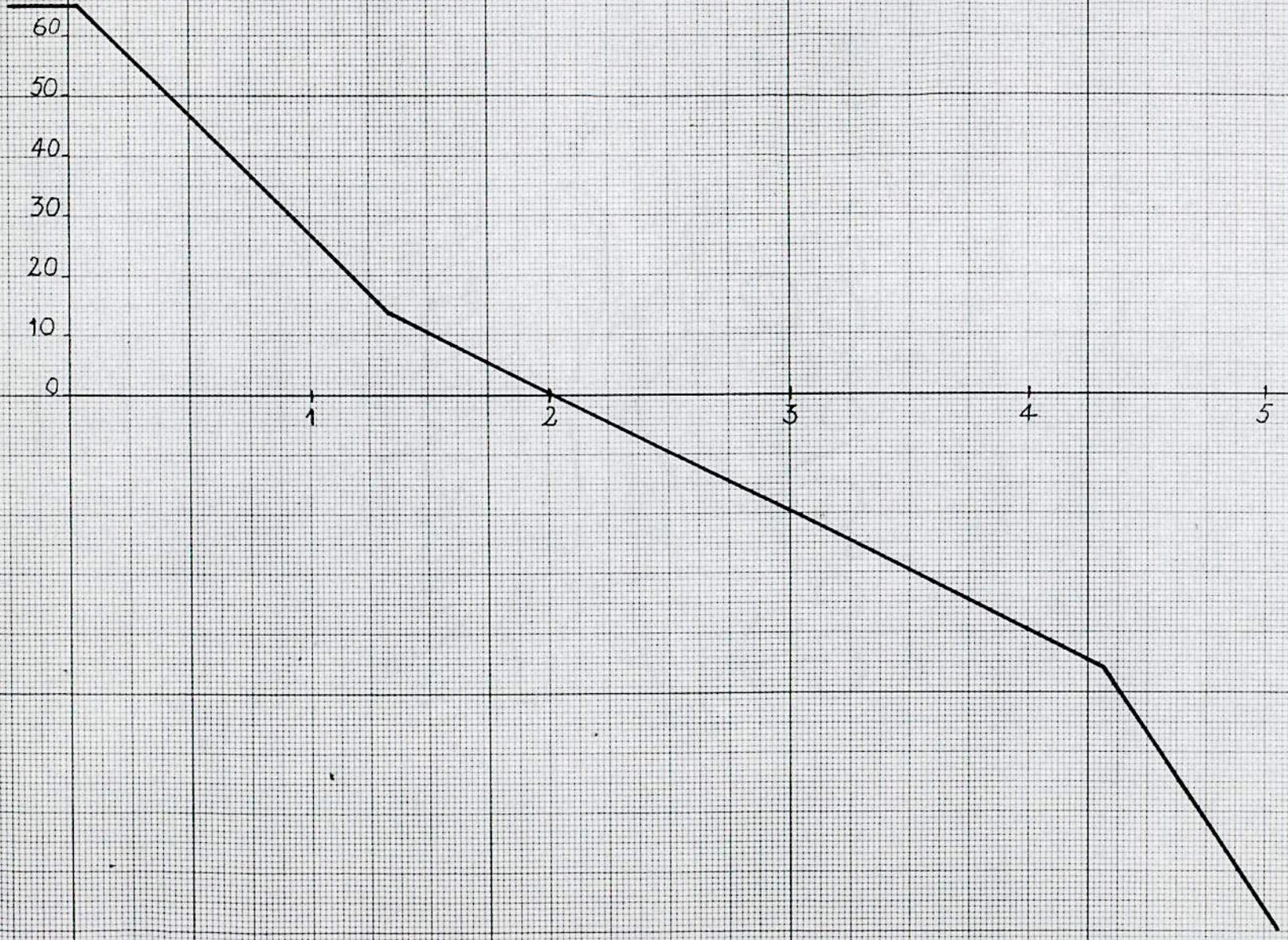
2

3

4

5

$\omega(dec)$

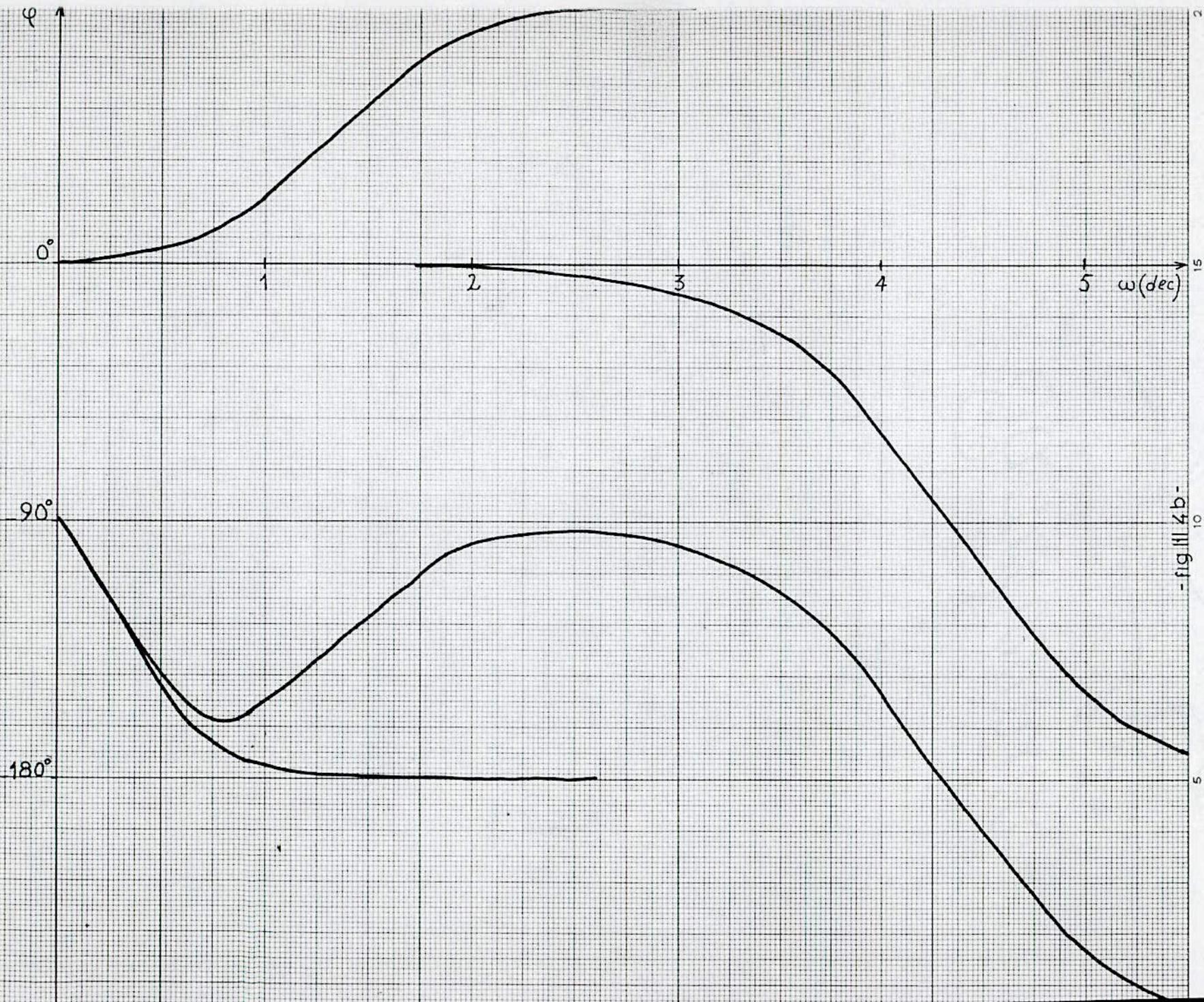


- fig. III. 4. a -

15

10

5



218

$|W|_{dB}$

70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

1

2

3

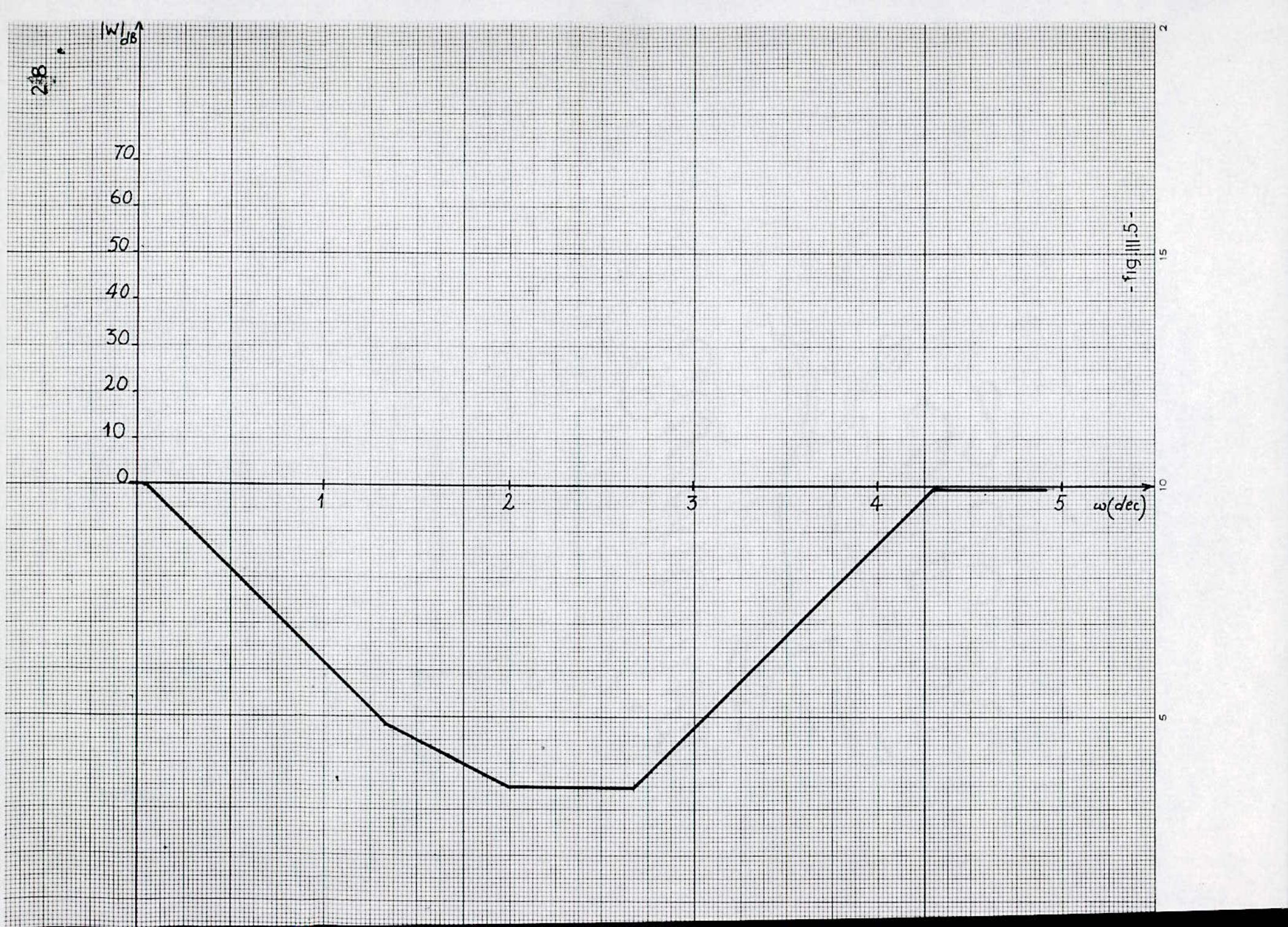
4

5

$\omega(dec)$

- fig. III.5 -

2  
15  
10  
5



|                    |     |     |     |     |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| b                  | 1.7 | 2.5 | 3.0 | 4.0 |
| $\sigma(^{\circ})$ | 15  | 20  | 25  | 30  |

-Tableau 1-

D'après le cahier de charge, on a  $\sigma=15\%$  et  $tr=0.05$  s; alors:  
 $\omega_{cd} = 1.7 \times 3.14 / 0.05 = 100$  rad/s.

La figure III.4 montre la caractéristique désirée, on remarque d'après la courbe de phase que notre système est bien stable.

La caractéristique du réseau correcteur, déduite géométriquement à partir des deux caractéristiques précédentes, est donnée par la figure III.5

$$L_{rc} = L_d - L_{in}$$

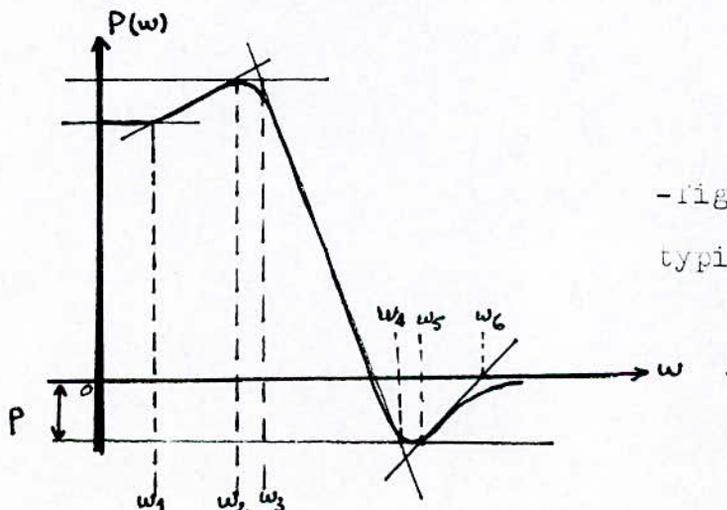
$$\varphi_{rc} = \varphi_d - \varphi_{in}$$

## II.2.METHODE DU TRACE DE LA COURBE DE REPONSE

La méthode, que nous avons utilisé, est une méthode analytique classique mais très précise. Elle se fait en trois étapes essentielles.

Première étape: après avoir déterminé les fréquences de coupures, on trace la courbe de Bode, de gain et de phase, de la caractéristique désirée.

Deuxième étape: on trace la courbe  $P(\omega)$  en utilisant l'abaqué de Nichols. Cette fonction  $P(\omega)$  est difficile à exprimer analytiquement, alors on la décompose par la méthode des trapèzes (voir figure III.6).



-fig.III.6-La courbe typique de  $P(\omega)$ .

$P(w)$  est déduite à partir de l'abaque de Nichols en reportant sur celle-ci les valeurs du gain et de phase, de la caractéristique désirée, pour des valeurs de  $w$ .

-Troisième étape: elle consiste à tracer la courbe de réponse transitoire. Cette dernière a pour expression:

$$Y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(w) \sin(wt)}{w} dw \quad \text{III.8}$$

Le tracé de cette courbe repose sur la connaissance de deux paramètres, à savoir: la hauteur du trapèze et le rapport entre les valeurs des fréquences d'intersection de la grande base et de la petite base avec la pente du trapèze. Ces deux paramètres doivent être calculés pour chaque trapèze; ils sont indispensables pour l'utilisation de la table des régimes transitoires pour un trapèze unité (voir annexe).

### II.3. TRACE DES COURBES

Le tracé des courbes de réponse se fera pour différents cas, nous visualiserons, ensuite, sur quelle partie du régime transitoire le moment d'inertie de la charge aura une influence.

Pour chaque cas nous donnerons directement les résultats numériques et les tableaux de mesures.

Nous rappellerons que notre équation de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$W_o(p) = \frac{1800}{4,6 \cdot 10^{-8} p^3 + 4,623 \cdot 10^{-6} p^2 + 10,0023 \cdot 10^{-3} p + 1} \quad \text{(III.5)}$$

Nous mettrons cette fonction de transfert sous la forme:

$$W_o(p) = \frac{K}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad \text{III.9}$$

## a)-Pour les coefficients réels

$a_3 = 4.6 \cdot 10^{-6}$

$a_2 = 4.623 \cdot 10^{-6}$

$a_1 = 10.0023 \cdot 10^{-3}$

$wcd = 100$

$w^- = 466.25$

$w^+ = 21.45$

|                 |     |       |       |     |      |      |     |        |        |       |
|-----------------|-----|-------|-------|-----|------|------|-----|--------|--------|-------|
| $w(\text{kHz})$ | 0,0 | 0,5   | 1,0   | 1,5 | 2,0  | 2,5  | 3,0 | 3,5    | 4,0    | 4,5   |
| $P(w)$          | 1,0 | 1,015 | 1,025 | 1,1 | 0,50 | 0,75 | 0,0 | -0,025 | -0,025 | 0,025 |

$w_1 = 2$

$w_3 = 44.67$

$w_5 = 12589.25$

$w_2 = 25.12$

$w_4 = 251.19$

$w_6 = 56234.13$

$X_1 = 0.1$

$X_2 = 0.2$

$X_3 = 0.25$

$P_1 = 0.1$

$P_2 = 1.13$

$P_3 = 0.03$

| $T(s)$ | $h_1$ | $Y_1 = h_1 P_1$ | $t_1 = T/w_1$ | $h_2$ | $Y_2 = h_2 P_2$ | $t_2 = T/w_2$ | $h_3$ | $Y_3 = h_3 P_3$ | $t_3 = T/w_3$ |
|--------|-------|-----------------|---------------|-------|-----------------|---------------|-------|-----------------|---------------|
| 0.0    | 0.000 | 0.000           | 0.000         | 0.000 | 0.000           | 0.000         | 0.000 | 0.000           | 0.000         |
| 0.5    | 0.176 | 0.018           | 19.9          | 0.192 | 0.217           | 1.99          | 0.199 | 0.006           | 8.89          |
| 1.0    | 0.340 | 0.034           | 39.8          | 0.374 | 0.419           | 3.98          | 0.386 | 0.012           | 17.78         |
| 1.5    | 0.494 | 0.049           | 59.7          | 0.538 | 0.608           | 5.97          | 0.560 | 0.017           | 26.67         |
| 2.0    | 0.628 | 0.063           | 79.6          | 0.682 | 0.771           | 7.96          | 0.709 | 0.021           | 35.56         |
| 2.5    | 0.739 | 0.074           | 99.5          | 0.802 | 0.906           | 9.95          | 0.833 | 0.025           | 44.45         |
| 3.0    | 0.828 | 0.083           | 119.4         | 0.895 | 1.011           | 11.94         | 0.928 | 0.028           | 53.34         |
| 3.5    | 0.892 | 0.089           | 139.3         | 0.963 | 1.088           | 13.93         | 0.994 | 0.030           | 62.23         |
| 4.0    | 0.937 | 0.094           | 159.2         | 1.008 | 1.139           | 15.92         | 1.039 | 0.031           | 71.12         |
| 4.5    | 0.960 | 0.096           | 179.1         | 1.029 | 1.163           | 17.91         | 1.057 | 0.032           | 80.01         |
| 5.0    | 0.977 | 0.098           | 199.1         | 1.042 | 1.177           | 19.91         | 1.067 | 0.032           | 88.90         |
| 5.5    | 0.986 | 0.099           | 219.0         | 1.042 | 1.177           | 21.90         | 1.063 | 0.032           | 97.79         |
| 6.0    | 0.981 | 0.098           | 238.9         | 1.037 | 1.172           | 23.89         | 1.054 | 0.032           | 106.68        |
| 6.5    | 0.980 | 0.098           | 258.8         | 1.029 | 1.163           | 25.88         | 1.043 | 0.031           | 115.57        |
| 7.0    | 0.978 | 0.098           | 278.7         | 1.024 | 1.157           | 27.87         | 1.034 | 0.031           | 124.46        |
| 7.5    | 0.980 | 0.098           | 298.6         | 1.021 | 1.154           | 29.86         | 1.027 | 0.031           | 133.35        |
| 8.0    | 0.983 | 0.098           | 318.5         | 1.020 | 1.152           | 31.85         | 1.024 | 0.031           | 142.24        |
| 8.5    | 0.989 | 0.099           | 338.4         | 1.021 | 1.154           | 33.84         | 1.024 | 0.031           | 151.13        |
| 9.0    | 0.996 | 0.100           | 358.3         | 1.025 | 1.158           | 35.83         | 1.025 | 0.031           | 160.02        |
| 9.5    | 1.004 | 0.100           | 378.2         | 1.028 | 1.162           | 37.82         | 1.026 | 0.031           | 167.91        |
| 10     | 1.009 | 0.101           | 398.1         | 1.030 | 1.164           | 39.81         | 1.027 | 0.031           | 177.80        |

$t_1$  est donné en ms

$t_2$  est donné en ms

$t_3$  est donné en s

$|W|_{dB}$

70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

$\omega(dec)$

- fig. III.7.a -

1

2

3

4

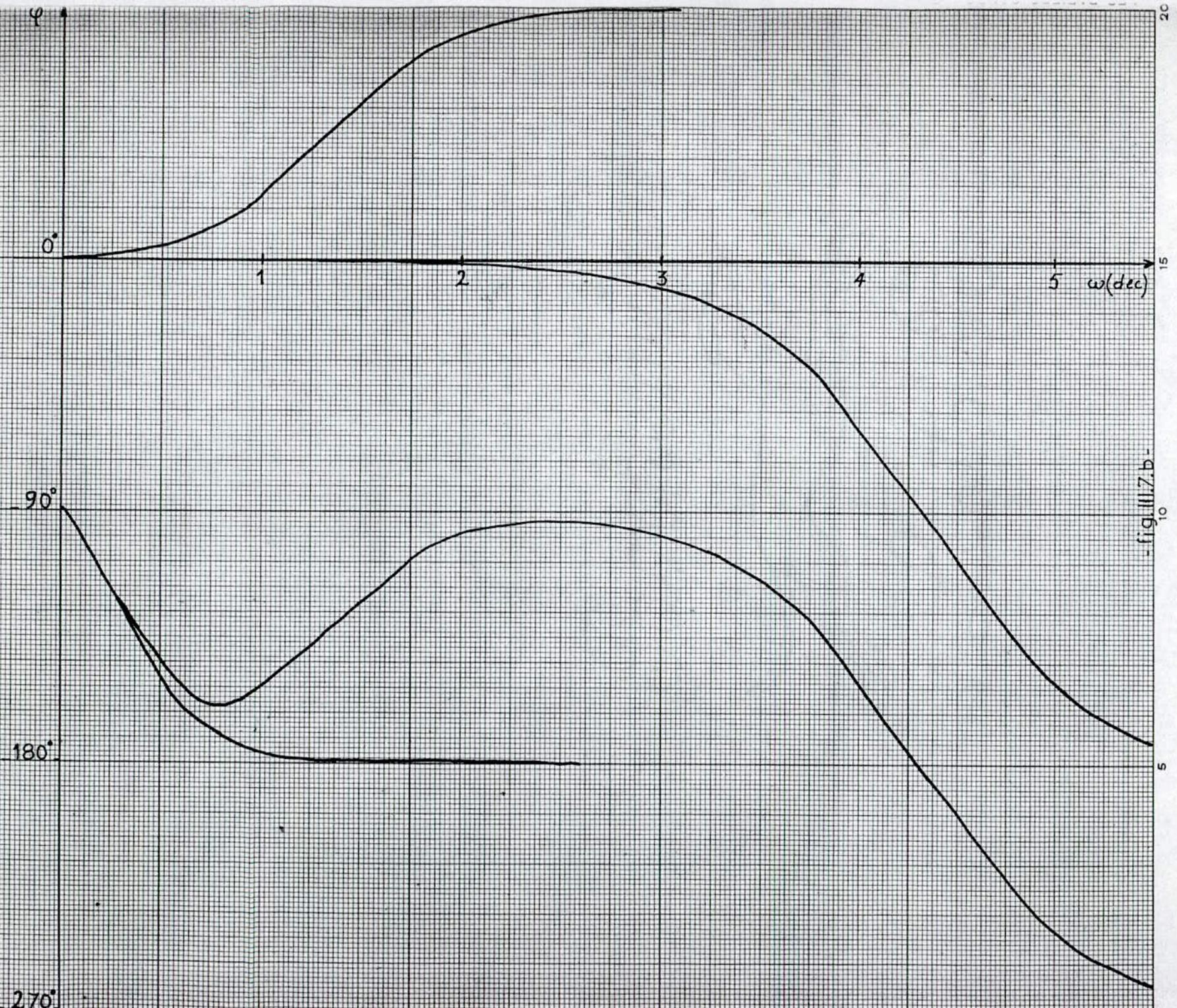
5

10

5

15

20



-fig. III.7.b-

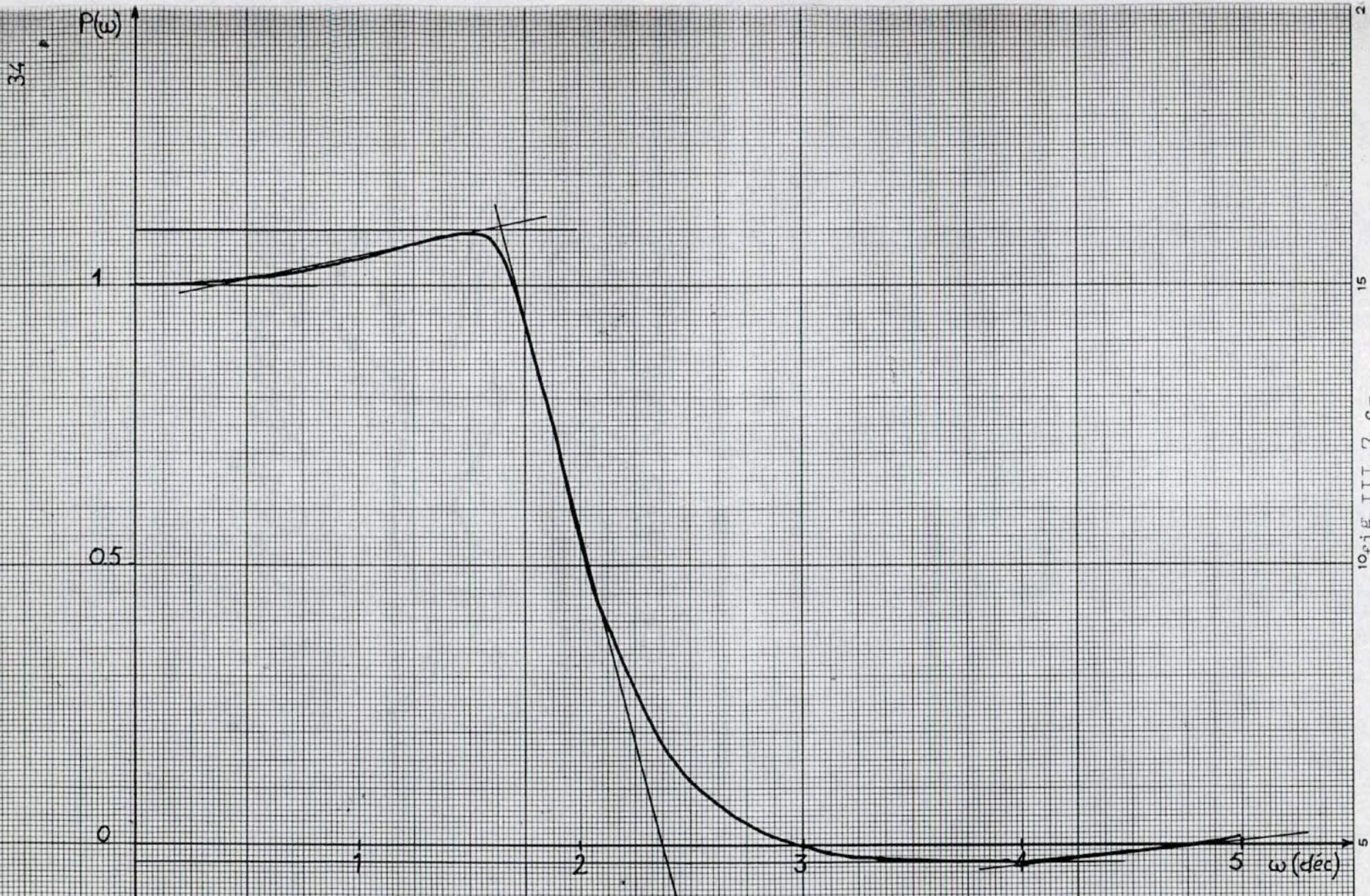


Fig. III.7.C-

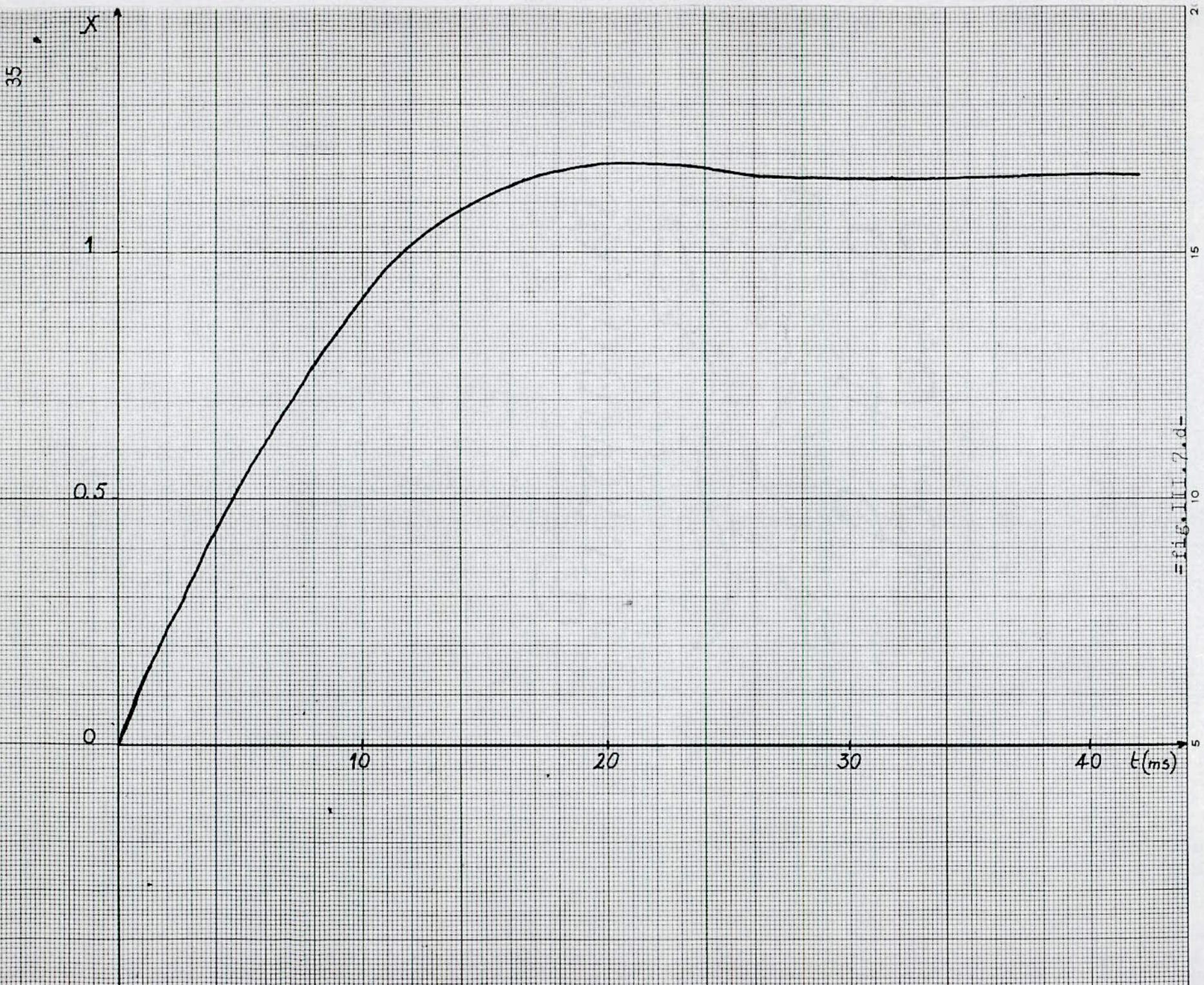


fig. III.7.d

b)-Pour a3 majoré de 20%

$$a3=5.52 \cdot 10^{-8}$$

$$a2=4.623 \cdot 10^{-6}$$

$$a1=10.0023 \cdot 10^{-3}$$

$$wcd = 100$$

$$w^- = 425.42$$

$$w^+ = 23.50$$

|        |   |       |       |     |     |      |     |        |       |       |       |      |
|--------|---|-------|-------|-----|-----|------|-----|--------|-------|-------|-------|------|
| w(déc) | 0 | 0.5   | 1.0   | 1.5 | 2.0 | 2.5  | 3.0 | 3.5    | 4.0   | 4.5   | 5.0   | 5.5  |
| P(w)   | 1 | 1.025 | 1.025 | 1.1 | 0.5 | 0.75 | 0.0 | -0.025 | -0.02 | -0.02 | -0.01 | 0.00 |

$$w1= 2.51$$

$$w3=41.17$$

$$w5=23713.74$$

$$w2=31.62$$

$$w4=251.19$$

$$w6=125892.54$$

$$X1=0.1$$

$$X2=0.15$$

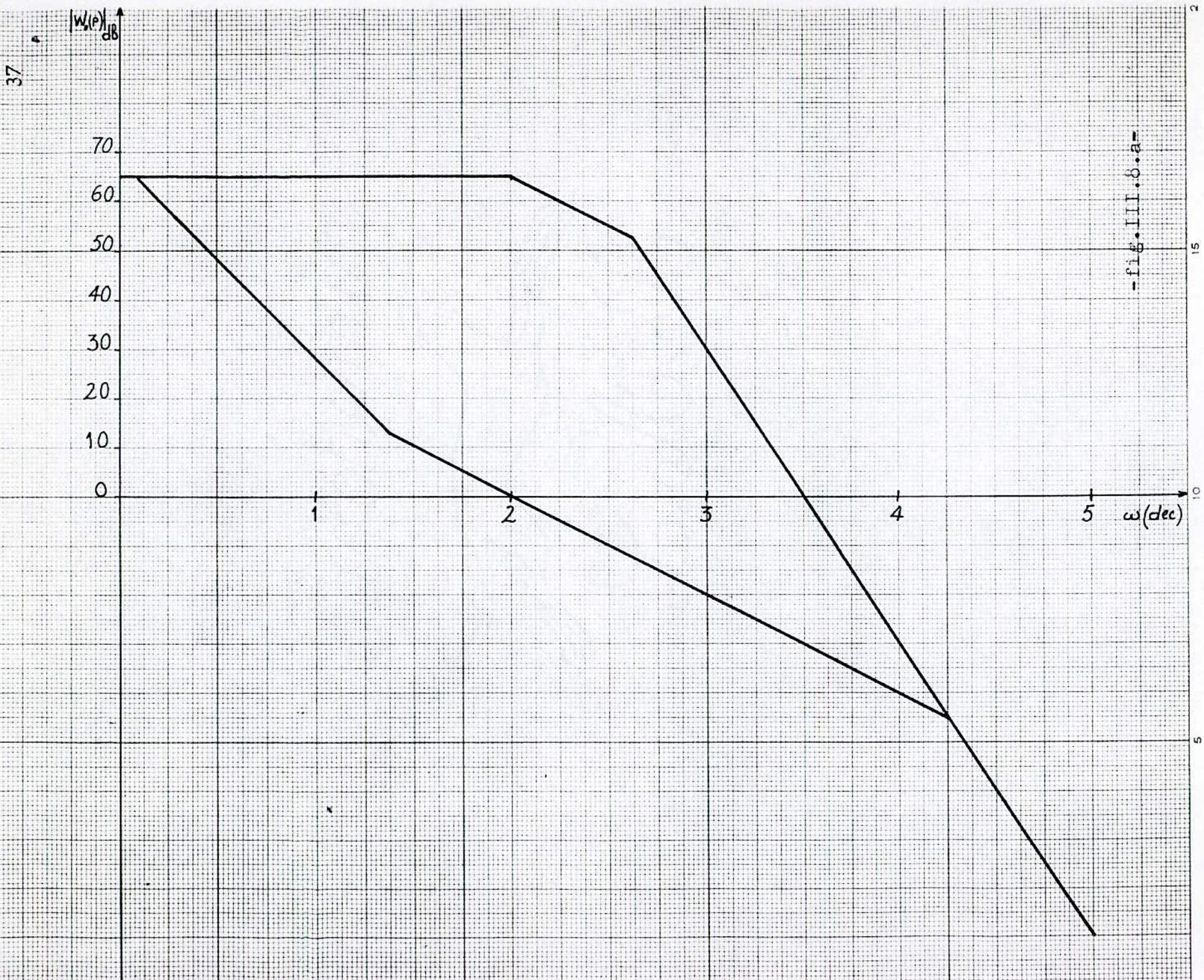
$$X3=0.2$$

$$P1=0.1$$

$$P2=1.13$$

$$P3=0.03$$

| T(s) | h1    | Y1=h1P1 | t1=T/w2<br>(ms) | h2    | Y2=h2P2 | t3=T/w4<br>(ms) | h3    | Y3=h3P3 | t3=T/w6<br>(s) |
|------|-------|---------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|----------------|
| 6.0  | 0.000 | 0.000   | 00.00           | 0.000 | 0.000   | 00.00           | 0.000 | 0.000   | 00.00          |
| 0.5  | 0.176 | 0.018   | 15.82           | 0.184 | 0.208   | 1.99            | 0.192 | 0.006   | 3.97           |
| 1.0  | 0.340 | 0.034   | 31.64           | 0.356 | 0.402   | 3.98            | 0.371 | 0.011   | 7.94           |
| 1.5  | 0.494 | 0.049   | 47.46           | 0.516 | 0.583   | 5.97            | 0.538 | 0.016   | 11.91          |
| 2.0  | 0.628 | 0.063   | 63.28           | 0.655 | 0.740   | 7.96            | 0.682 | 0.020   | 15.88          |
| 2.5  | 0.739 | 0.074   | 79.10           | 0.771 | 0.871   | 9.95            | 0.802 | 0.024   | 19.85          |
| 3.0  | 0.828 | 0.083   | 94.92           | 0.863 | 0.975   | 11.94           | 0.895 | 0.027   | 23.82          |
| 3.5  | 0.892 | 0.089   | 110.74          | 0.928 | 1.049   | 13.93           | 0.963 | 0.029   | 27.79          |
| 4.0  | 0.937 | 0.094   | 126.56          | 0.974 | 1.101   | 15.92           | 1.008 | 0.030   | 31.76          |
| 4.5  | 0.960 | 0.096   | 142.38          | 0.998 | 1.128   | 17.91           | 1.029 | 0.031   | 35.73          |
| 5.0  | 0.977 | 0.098   | 158.20          | 1.012 | 1.144   | 19.90           | 1.042 | 0.031   | 39.70          |
| 5.5  | 0.986 | 0.099   | 174.02          | 1.015 | 1.147   | 21.90           | 1.042 | 0.031   | 43.67          |
| 6.0  | 0.981 | 0.098   | 189.84          | 1.013 | 1.145   | 23.89           | 1.037 | 0.031   | 47.64          |
| 6.5  | 0.980 | 0.098   | 205.86          | 1.009 | 1.140   | 25.88           | 1.029 | 0.031   | 51.61          |
| 7.0  | 0.978 | 0.098   | 221.48          | 1.006 | 1.137   | 27.87           | 1.024 | 0.031   | 55.58          |
| 7.5  | 0.980 | 0.098   | 237.30          | 1.005 | 1.136   | 29.86           | 1.021 | 0.031   | 59.55          |
| 8.0  | 0.983 | 0.098   | 253.12          | 1.007 | 1.138   | 31.85           | 1.020 | 0.031   | 63.52          |
| 8.5  | 0.989 | 0.099   | 268.74          | 1.010 | 1.141   | 33.84           | 1.021 | 0.031   | 67.49          |
| 9.0  | 0.996 | 0.100   | 284.76          | 1.016 | 1.148   | 35.83           | 1.025 | 0.031   | 71.46          |
| 9.5  | 1.004 | 0.100   | 300.58          | 1.020 | 1.153   | 37.82           | 1.028 | 0.031   | 75.43          |
| 10   | 1.009 | 0.101   | 316.40          | 1.025 | 1.158   | 39.81           | 1.030 | 0.031   | 79.40          |



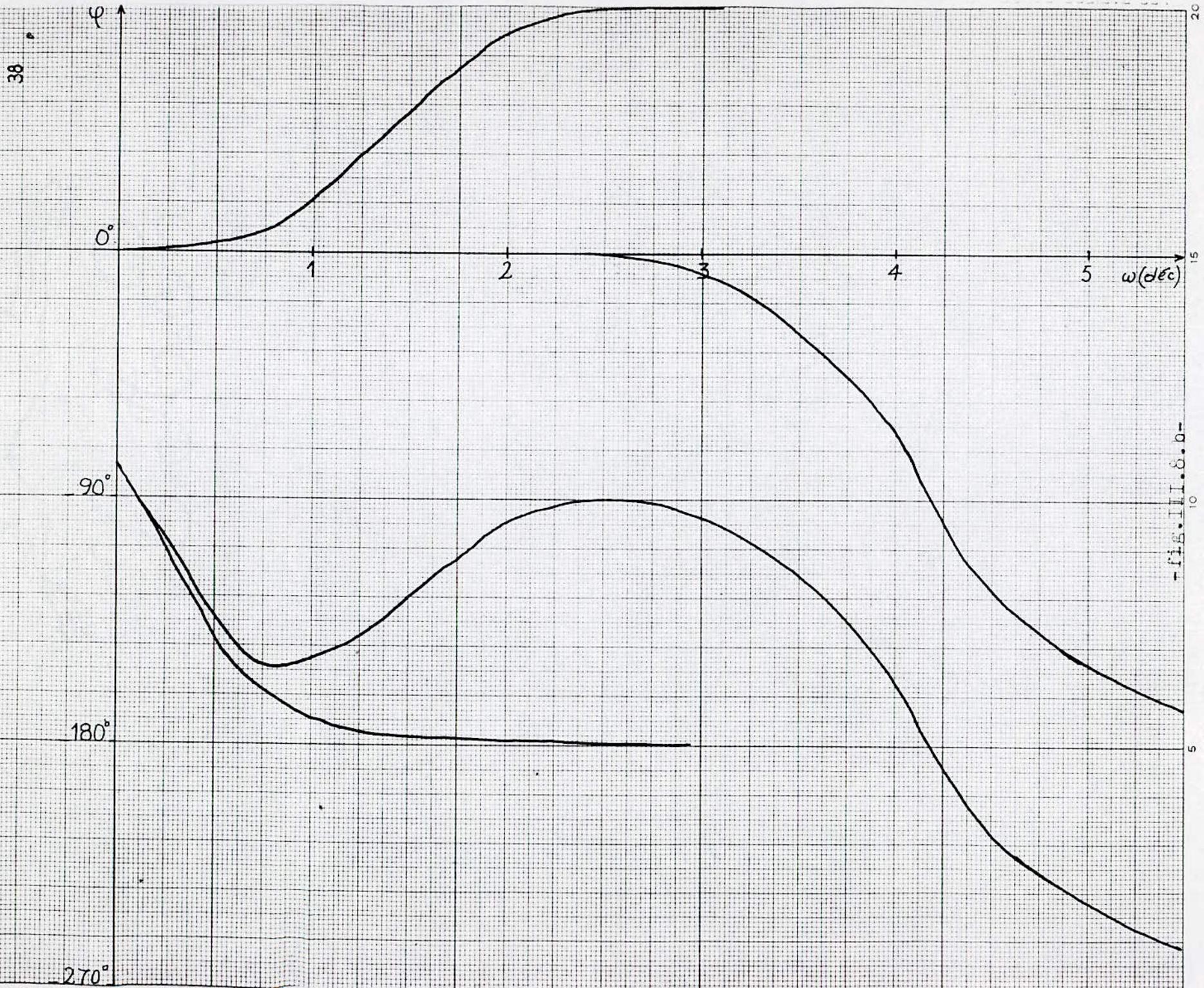
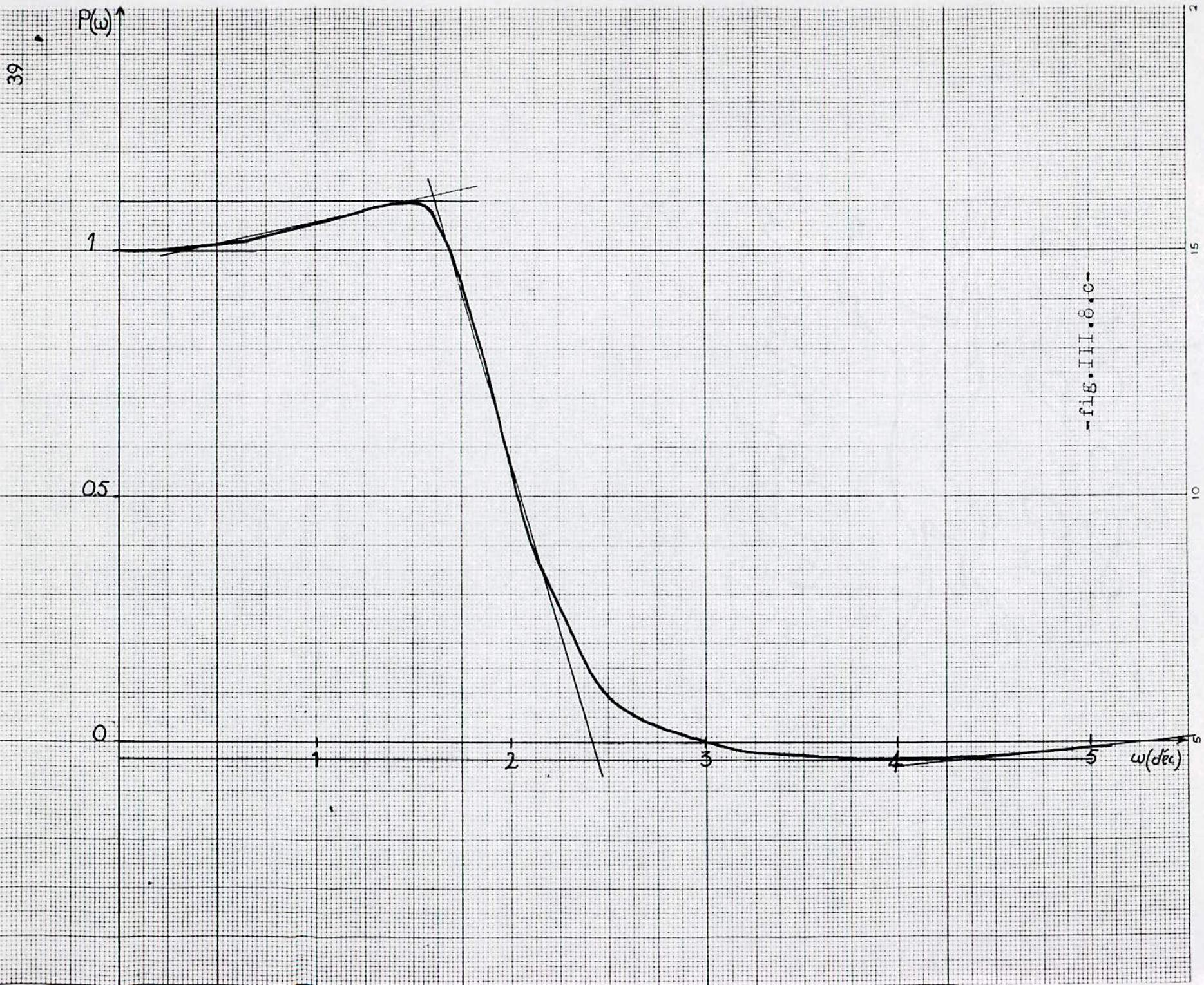
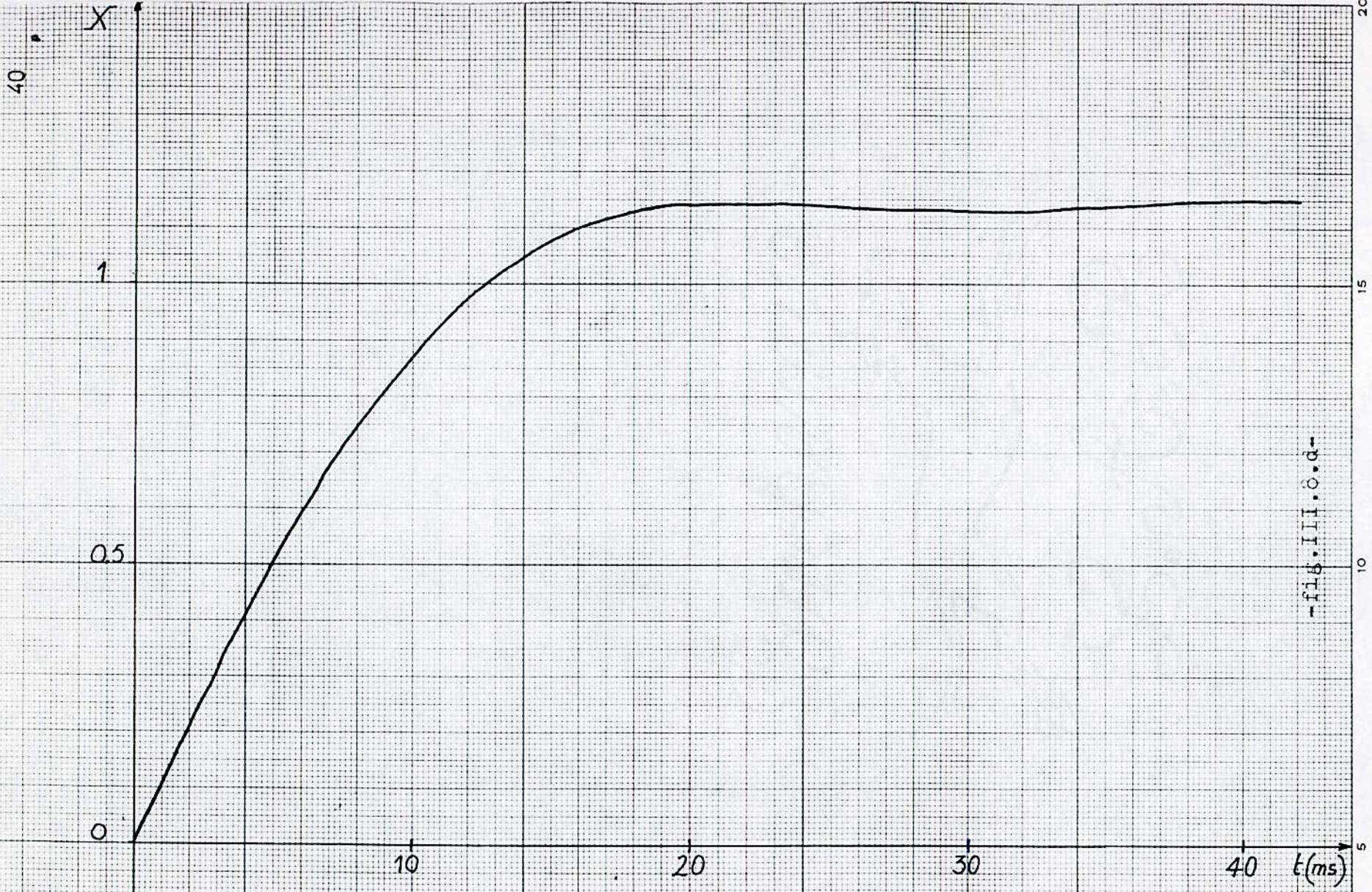


Fig. III. 6. 6.



-fig. III.8.c-



-fig. III.0.d-

c)-Pour a2 majoré de 20%

$$a3=4,6 \cdot 10^{-8}$$

$$a2=5,548 \cdot 10^{-6}$$

$$a1=10,0023 \cdot 10^{-3}$$

$$wcd=100$$

$$w^*=466,49$$

$$w^{\dagger}=21,44$$

|        |   |     |       |       |     |      |   |        |        |        |        |     |
|--------|---|-----|-------|-------|-----|------|---|--------|--------|--------|--------|-----|
| w(déc) | 0 | 0.5 | 1.0   | 1.5   | 2.0 | 2.5  | 3 | 3.5    | 4.0    | 4.5    | 5.0    | 5.5 |
| P(w)   | 1 | 1.0 | 1.025 | 1.025 | 0.5 | 0.05 | 0 | -0.025 | -0.025 | -0.025 | -0.015 | 0   |

$$w1=3,16$$

$$w3=50,19$$

$$w5=31622,78$$

$$w2=10$$

$$w4=266,07$$

$$w6=100000$$

$$X1=0,3$$

$$X2=0,2$$

$$X3=0,3$$

$$P1=0,03$$

$$P2=1,06$$

$$P3=0,03$$

| T(s) | h1    | Y1=h1P1 | t1=T/w2<br>(s) | h2    | Y2=h2P2 | t2=T/w2<br>(ms) | h3    | Y3=h3P3 | t3=T/w2<br>(s) |
|------|-------|---------|----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|----------------|
| 0:0  | 0.000 | 0.000   | 0.000          | 0.000 | 0.000   | 0.00            | 0.000 | 0.000   | 00.00          |
| 0.5  | 0.207 | 0.006   | 0.050          | 0.172 | 0.204   | 1.88            | 0.207 | 0.006   | 5.0            |
| 1.0  | 0.402 | 0.012   | 0.100          | 0.371 | 0.393   | 3.76            | 0.402 | 0.012   | 10.0           |
| 1.5  | 0.594 | 0.018   | 0.150          | 0.538 | 0.570   | 5.64            | 0.594 | 0.018   | 15.0           |
| 2.0  | 0.732 | 0.022   | 0.200          | 0.682 | 0.723   | 7.52            | 0.732 | 0.022   | 20.0           |
| 2.5  | 0.862 | 0.026   | 0.250          | 0.802 | 0.850   | 9.40            | 0.862 | 0.026   | 25.0           |
| 3.0  | 0.958 | 0.029   | 0.300          | 0.895 | 0.949   | 11.28           | 0.958 | 0.029   | 30.0           |
| 3.5  | 1.024 | 0.031   | 0.350          | 0.963 | 1.021   | 13.16           | 1.024 | 0.031   | 35.0           |
| 4.0  | 1.066 | 0.032   | 0.400          | 1.008 | 1.068   | 15.04           | 1.066 | 0.032   | 40.0           |
| 4.5  | 1.084 | 0.033   | 0.450          | 1.029 | 1.091   | 16.92           | 1.084 | 0.033   | 45.0           |
| 5.0  | 1.087 | 0.033   | 0.500          | 1.042 | 1.104   | 18.80           | 1.087 | 0.033   | 50.0           |
| 5.5  | 1.079 | 0.032   | 0.550          | 1.042 | 1.104   | 20.68           | 1.079 | 0.032   | 55.0           |
| 6.0  | 1.065 | 0.032   | 0.600          | 1.037 | 1.099   | 22.56           | 1.065 | 0.032   | 60.0           |
| 6.5  | 1.050 | 0.032   | 0.650          | 1.029 | 1.091   | 24.44           | 1.050 | 0.032   | 65.0           |
| 7.0  | 1.037 | 0.031   | 0.700          | 1.024 | 1.085   | 26.32           | 1.037 | 0.031   | 70.0           |
| 7.5  | 1.027 | 0.031   | 0.750          | 1.021 | 1.082   | 28.20           | 1.027 | 0.031   | 75.0           |
| 8.0  | 1.021 | 0.031   | 0.800          | 1.020 | 1.081   | 30.08           | 1.021 | 0.031   | 80.0           |
| 8.5  | 1.018 | 0.030   | 0.850          | 1.021 | 1.082   | 31.96           | 1.018 | 0.030   | 85.0           |
| 9.0  | 1.017 | 0.030   | 0.900          | 1.025 | 1.086   | 33.84           | 1.017 | 0.030   | 90.0           |
| 9.5  | 1.018 | 0.030   | 0.950          | 1.028 | 1.080   | 35.72           | 1.018 | 0.030   | 95.0           |
| 10   | 1.018 | 0.030   | 1.000          | 1.030 | 1.092   | 37.60           | 1.018 | 0.030   | 100            |

42

$|W(\omega)|_{dB}$

70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

1

2

3

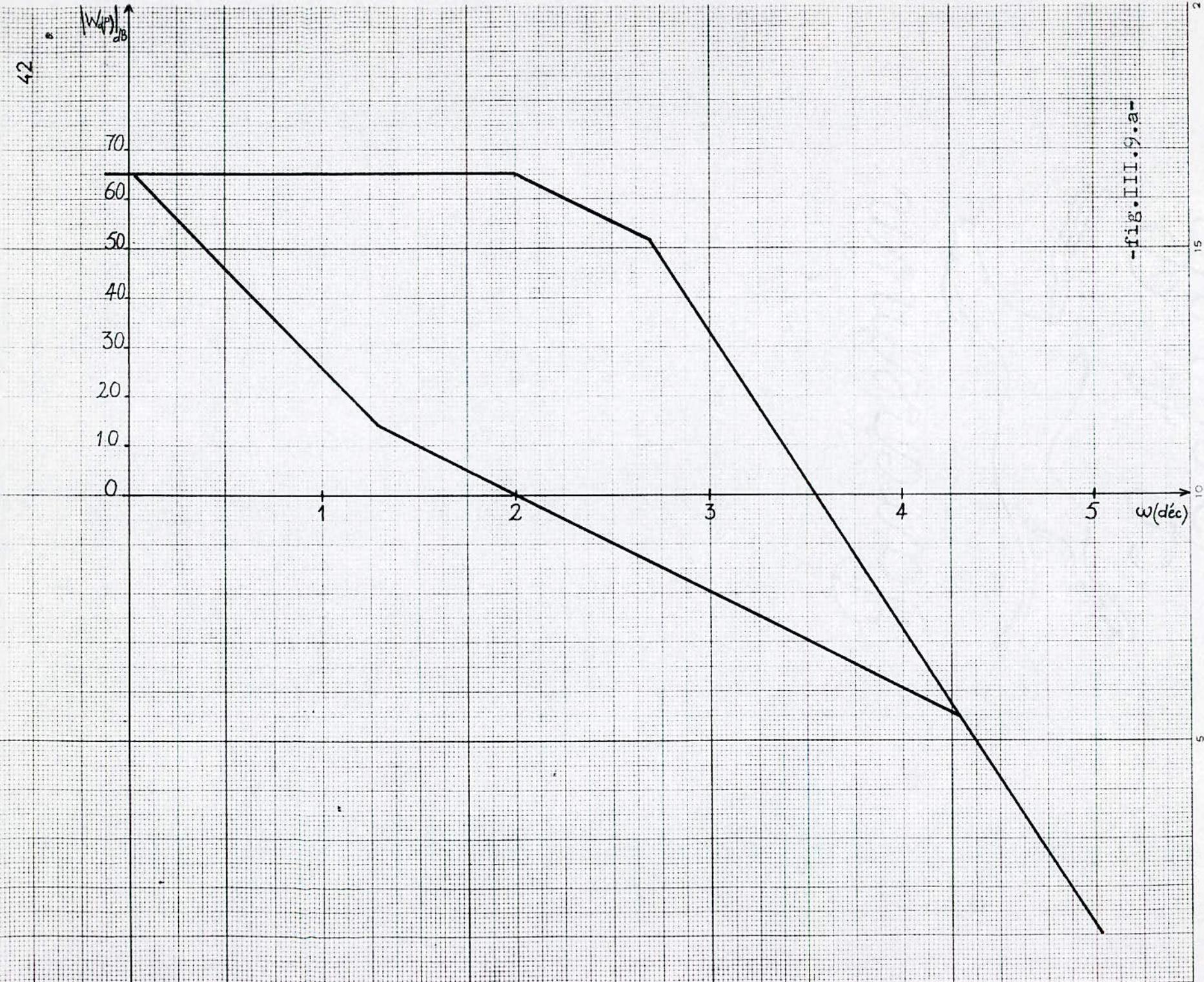
4

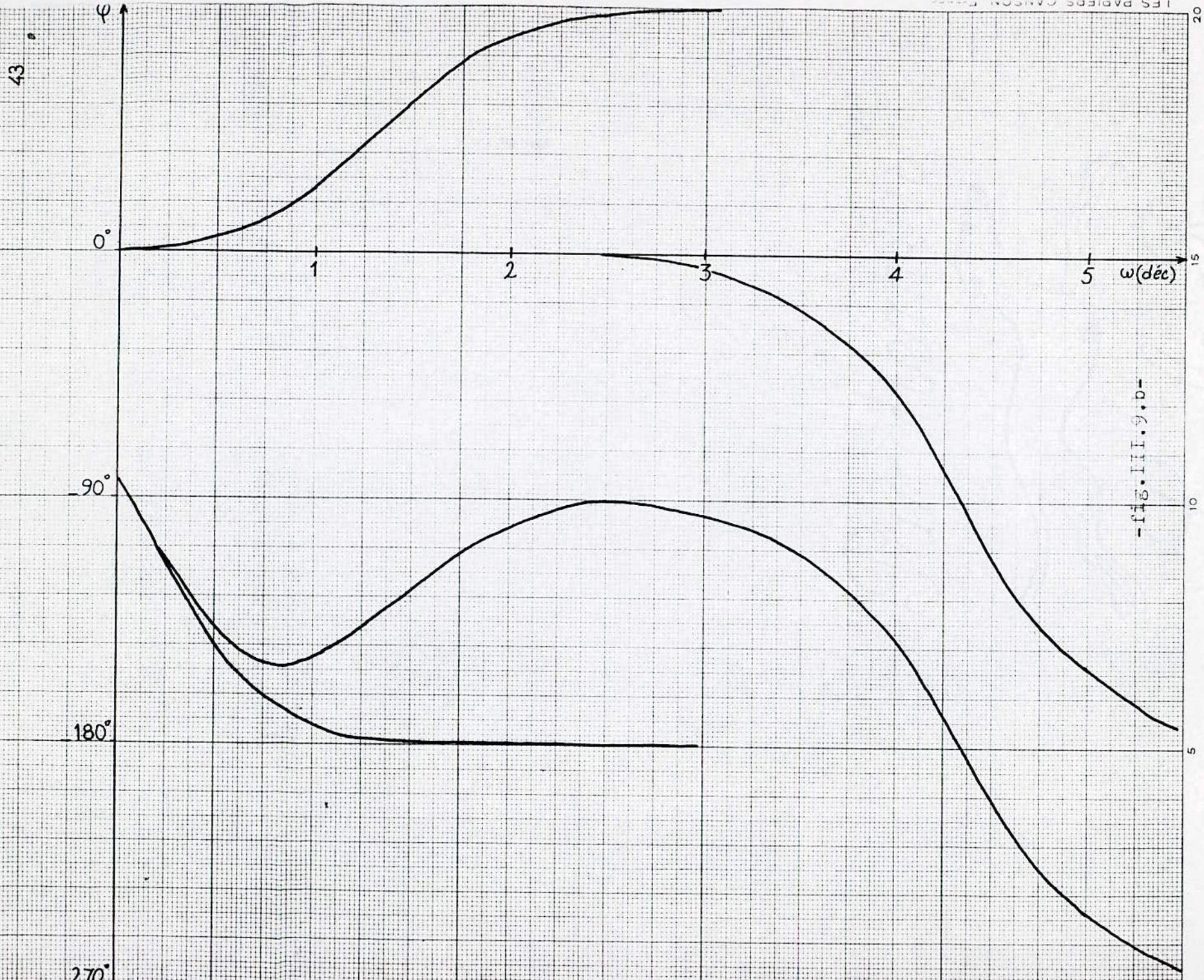
5

$\omega(\text{déc})$

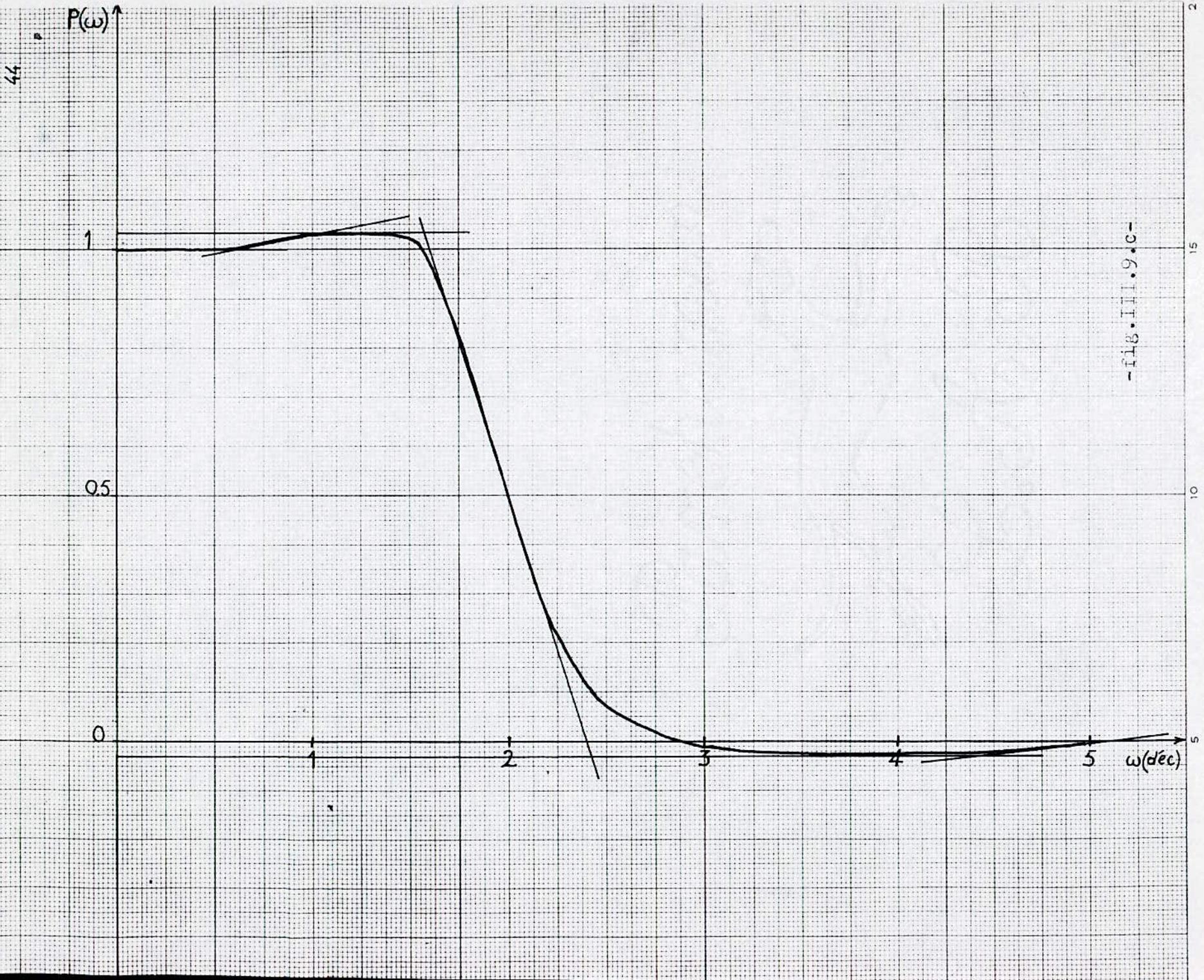
2  
15  
10  
5

-fig.III.9.a-



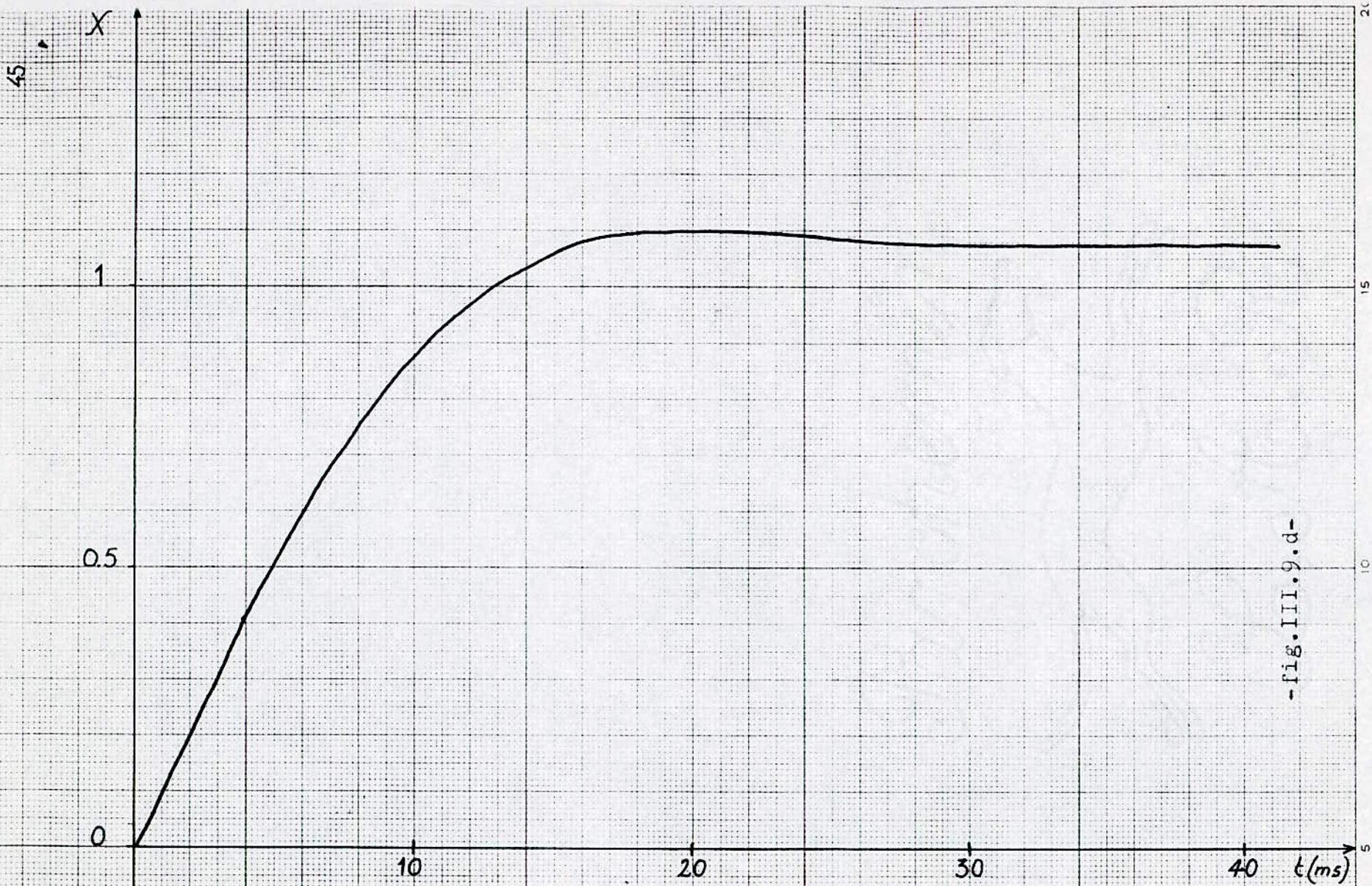


-fig. III.9.D-



-fig. III.9.C-

44



-fig.III.9.d-

d) - Pour  $a_1$  majoré de  $20''$

$$a_3 = 4.6 \cdot 10^{-8}$$

$$a_2 = 4.623 \cdot 10^{-6}$$

$$a_1 = 12.0028 \cdot 10^{-3}$$

$$w_{cd} = 100$$

$$w^- = 473.15$$

$$w^+ = 21.13$$

|        |   |       |       |       |     |       |   |       |        |        |       |
|--------|---|-------|-------|-------|-----|-------|---|-------|--------|--------|-------|
| w(déc) | 0 | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.0 | 2.5   | 3 | 3.5   | 4.0    | 4.5    | 5.0   |
| P(w)   | 1 | 1.025 | 1.025 | 1.075 | 0.5 | 0.075 | 0 | -0.01 | -0.025 | -0.025 | -0.01 |

$$w_1 = 2.11$$

$$w_3 = 42.17$$

$$w_5 = 10000$$

$$w_2 = 26.61$$

$$w_4 = 251.19$$

$$w_6 = 74989.42$$

$$X_1 = 0.1$$

$$X_2 = 0.15$$

$$X_3 = 0.15$$

$$P_1 = 0.07$$

$$P_2 = 1.10$$

$$P_3 = 0.03$$

| T(s) | h1    | Y1=h1P1 | t1=T/w1<br>(ms) | h2    | Y2=h2P2 | t2=T/w4<br>(ms) | h2    | Y3=h3P3 | t3=T/w6<br>(s) |
|------|-------|---------|-----------------|-------|---------|-----------------|-------|---------|----------------|
| 6.0  | 0.000 | 0.000   | 00.00           | 0.000 | 0.000   | 00.00           | 0.000 | 0.000   | 00.00          |
| 0.5  | 0.176 | 0.018   | 18.79           | 0.184 | 0.202   | 1.99            | 0.184 | 0.006   | 6.67           |
| 1.0  | 0.340 | 0.034   | 37.58           | 0.356 | 0.392   | 3.98            | 0.356 | 0.012   | 13.34          |
| 1.5  | 0.494 | 0.049   | 56.37           | 0.510 | 0.578   | 5.97            | 0.516 | 0.015   | 20.01          |
| 2.0  | 0.628 | 0.063   | 75.16           | 0.658 | 0.721   | 7.96            | 0.658 | 0.020   | 26.68          |
| 2.5  | 0.739 | 0.074   | 93.95           | 0.771 | 0.848   | 9.95            | 0.771 | 0.023   | 33.35          |
| 3.0  | 0.828 | 0.083   | 112.74          | 0.863 | 0.949   | 11.94           | 0.863 | 0.026   | 40.02          |
| 3.5  | 0.892 | 0.089   | 131.53          | 0.926 | 1.021   | 13.93           | 0.928 | 0.031   | 46.69          |
| 4.0  | 0.937 | 0.094   | 150.32          | 0.974 | 1.071   | 15.92           | 0.974 | 0.032   | 53.36          |
| 4.5  | 0.960 | 0.096   | 169.11          | 0.998 | 1.098   | 17.91           | 0.998 | 0.033   | 60.03          |
| 5.0  | 0.977 | 0.098   | 187.90          | 1.012 | 1.113   | 19.90           | 1.012 | 0.033   | 66.70          |
| 5.5  | 0.986 | 0.099   | 206.69          | 1.015 | 1.116   | 21.89           | 1.015 | 0.033   | 73.37          |
| 6.0  | 0.981 | 0.098   | 225.48          | 1.013 | 1.114   | 23.88           | 1.013 | 0.033   | 80.04          |
| 6.5  | 0.980 | 0.098   | 244.27          | 1.009 | 1.110   | 25.87           | 1.009 | 0.033   | 86.71          |
| 7.0  | 0.978 | 0.098   | 263.06          | 1.006 | 1.107   | 27.86           | 1.006 | 0.033   | 93.38          |
| 7.5  | 0.980 | 0.098   | 281.85          | 1.005 | 1.106   | 29.85           | 1.005 | 0.033   | 100.05         |
| 8.0  | 0.983 | 0.098   | 300.64          | 1.007 | 1.108   | 31.84           | 1.007 | 0.033   | 106.72         |
| 8.5  | 0.989 | 0.099   | 319.43          | 1.010 | 1.111   | 33.83           | 1.010 | 0.033   | 113.39         |
| 9.0  | 0.996 | 0.100   | 338.22          | 1.016 | 1.118   | 35.82           | 1.016 | 0.034   | 120.06         |
| 9.5  | 1.004 | 0.100   | 357.01          | 1.020 | 1.122   | 37.81           | 1.020 | 0.034   | 126.73         |
| 10   | 1.009 | 0.101   | 375.80          | 1.025 | 1.128   | 39.80           | 1.025 | 0.034   | 133.40         |

dB/m.v.l

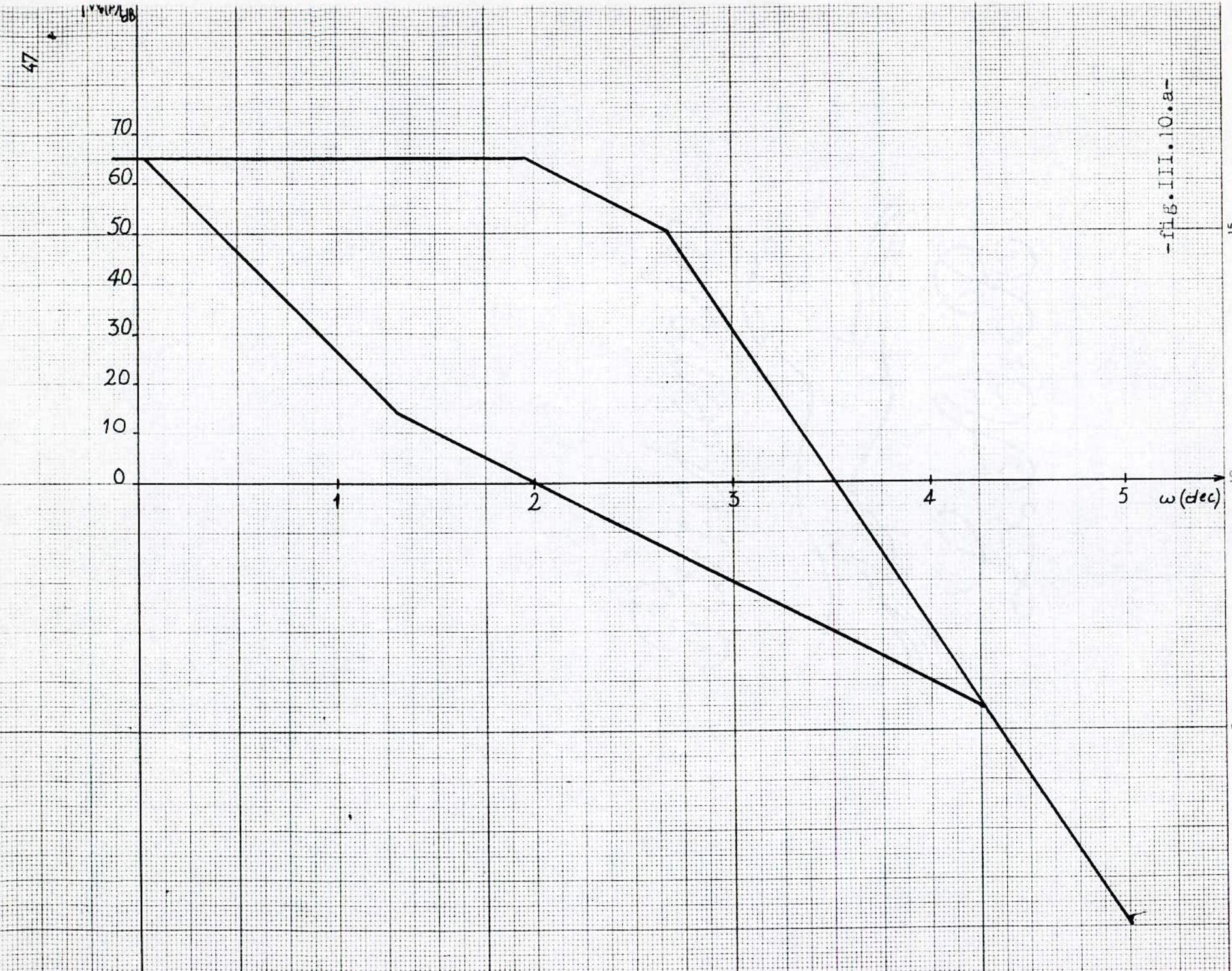
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0

-fig. III.10.a-

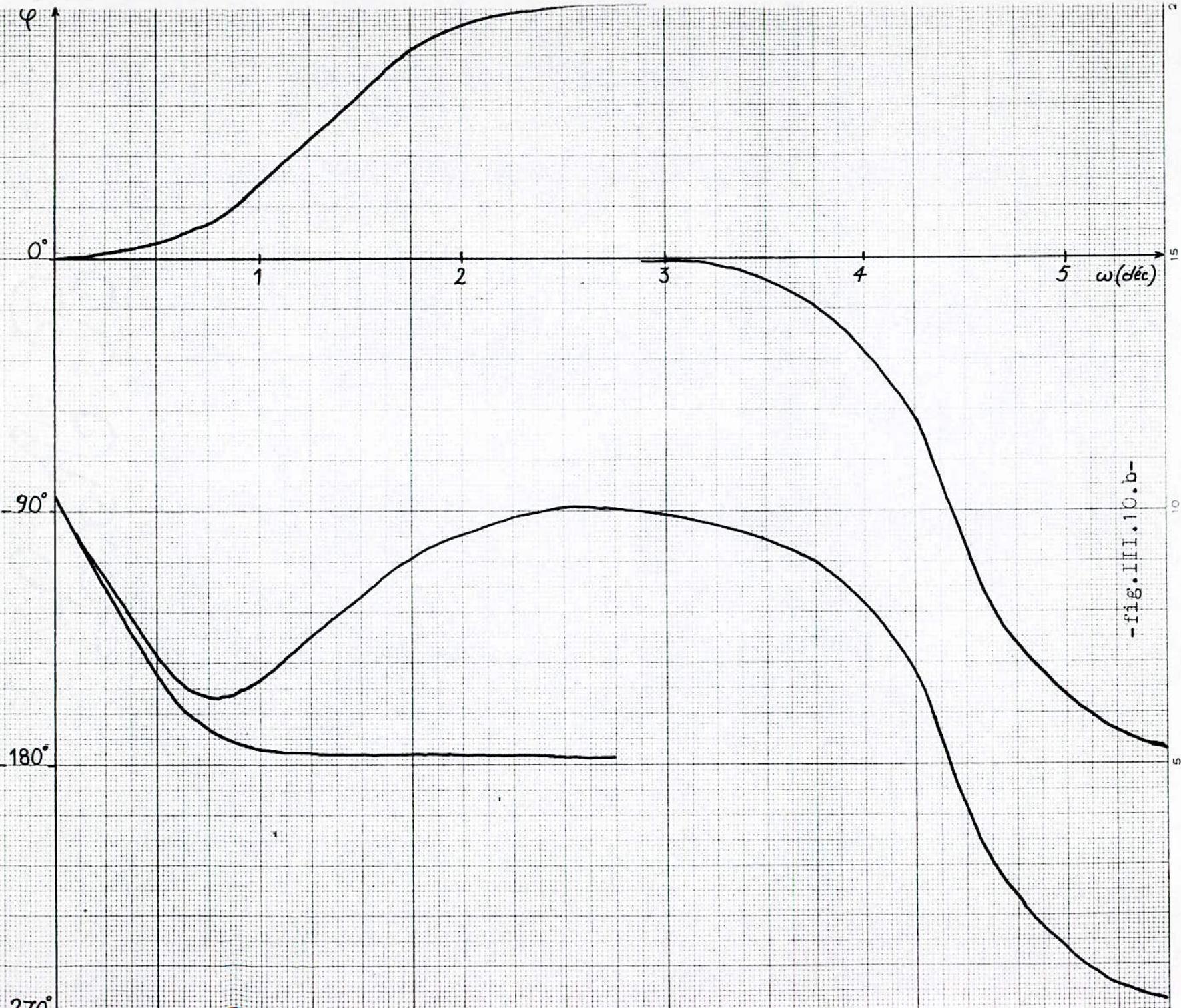
$\omega$  (dec) 10

5

0



15



-fig. III.10.b-

$P(\omega)$

1

0.5

0

1

2

3

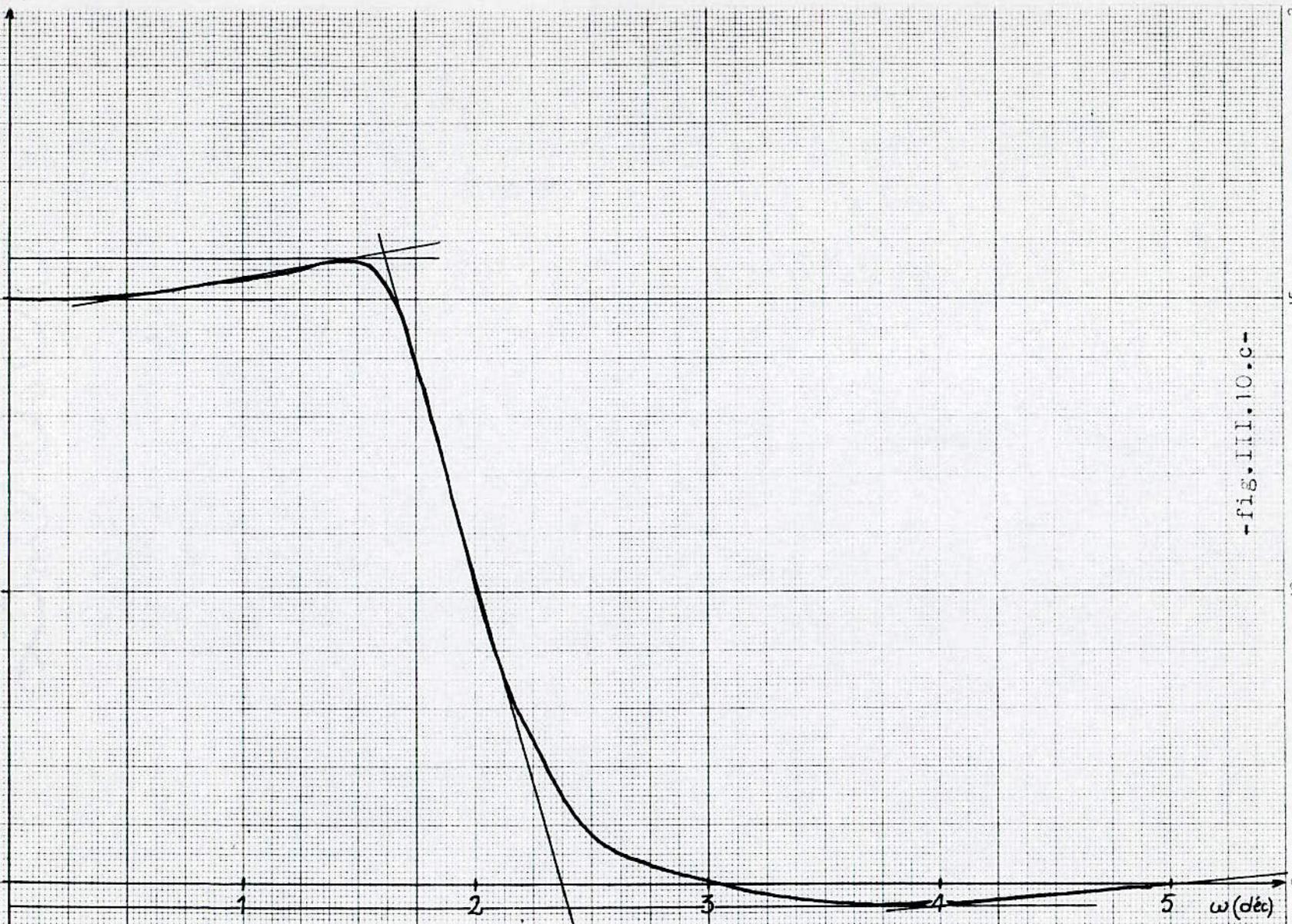
4

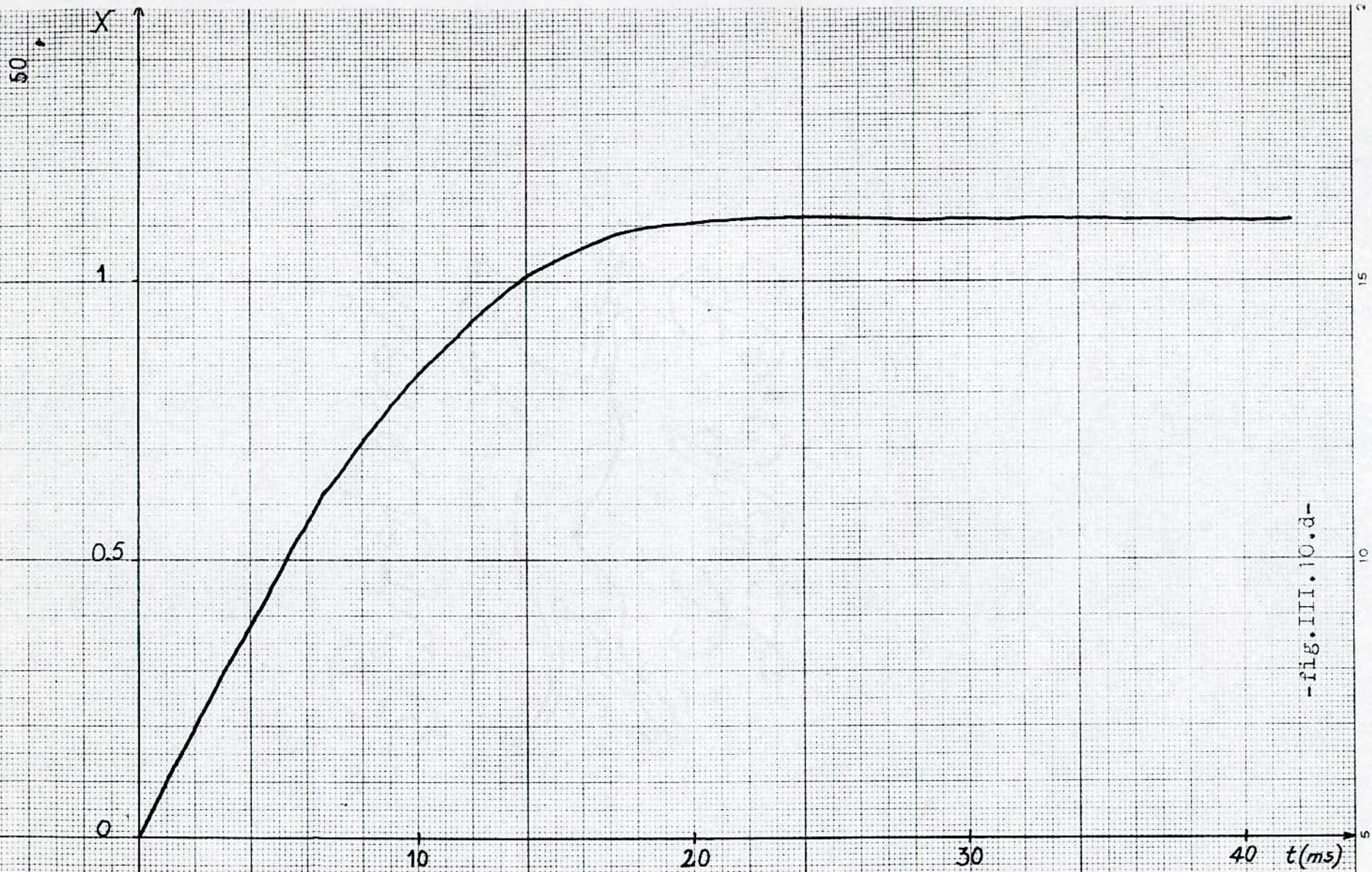
5

$\omega$  (dec)

fig. III.10.c

2  
15  
10  
5

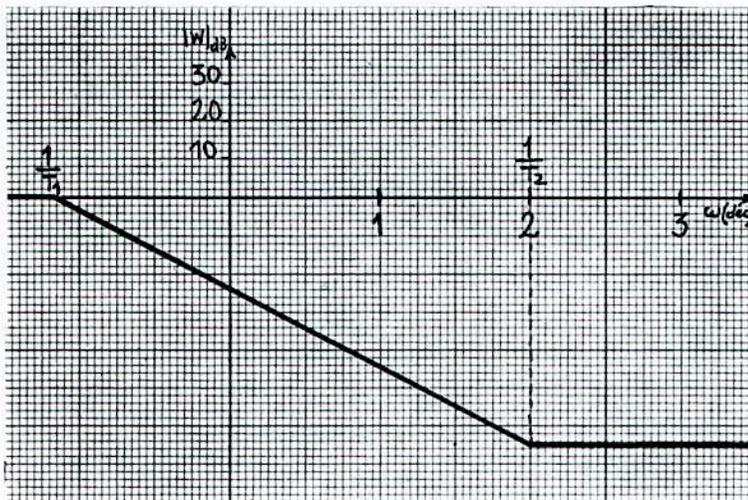




-fig.III.10.d-

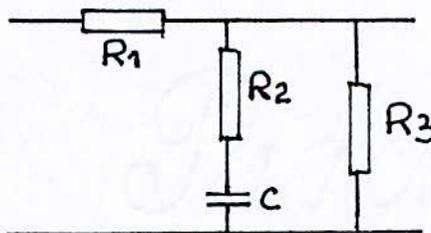
## II.4. INTERPRETATION DES COURBES

La comparaison des courbes de réponse, nous montre que, seulement, dans le cas (d), on a influence sur le régime transitoire. Donc, on peut dire que le moment d'inertie, de la charge manipulée par le robot, influe, uniquement, dans la gamme des basses fréquences; ce qui nous permet de simplifier notre réseau correcteur comme suit (fig. III.11):



-fig. III.11- La caractéristique du réseau correcteur simplifiée.

De cette caractéristique, on déduit le schéma du circuit du réseau correcteur à ajouter au circuit.



-fig. III.12- Schéma du circuit correcteur.

La fonction de transfert de ce circuit est donnée par:

$$W(p) = \frac{1}{(1 + R1/R3)} \left[ \frac{T2 p + 1}{T1 p + 1} \right] \quad \text{III.10}$$

où  $T1 = (R2 + R1 R3 / (R1 + R3)) C$

$T2 = R2 C$

$R3$ : représente la résistance d'entrée du transistor; elle est donnée par:

$$R3 = 0.82 + 39.6 / (20 + R_c) \quad (R3 \text{ et } R_c \text{ en } K\Omega)$$

De la figure III.12 ,ci-dessus,on tire les constantes de temps T1 et T2.On a :

$$T1=17.76 \text{ s} ; T2=0.01 \text{ s}$$

On prend  $R1=R3/10$  et on calcule R2 et C.

$$R3= 0.82+39.6/20+0.33 =2.8 \text{ K}\Omega$$

d'où:  $T1/T2=(R2 + R1 R3)C/(R1 + R3)R2$

donc  $R2 = (-R1 R3 T2)/(R1+R3)(T2-T1)$

$$= (-280 \times 2800 \times 17.76)/(280+2800)(0.01-17.76)$$

$$=254 \Omega \text{ en normalisant } R2=280 .$$

or  $T2=R2 C \implies C= T2/R2 =0.01/280$

$$C= 35.71 \mu\text{F} \text{ en normalisant } C=39 \mu\text{F}.$$

## CHAPITRE QUATRE

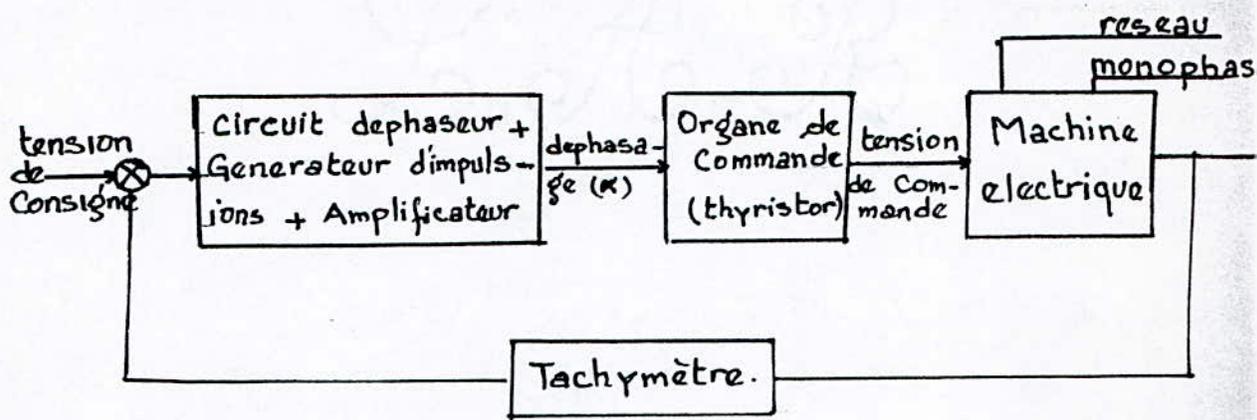
### CONCEPTION ET REALISATION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE

Dans ce chapitre, on décrira les différents circuits composant notre schéma de principe. Ensuite, on expliquera le fonctionnement du circuit complet. On rappellera que les entraînements réglés, utilisant des moteurs à courant continu, font appel à des thyristors ou des triacs; car les propriétés de ces deux derniers sont très favorables pour la réalisation des circuits de commande de haute qualité.

#### I. CONCEPTION

##### I.1. SCHEMA DE PRINCIPE

Le schéma de principe d'un entraînement réglé, avec moteur à courant continu, est représenté ci-dessous (fig. IV.1).



-fig. IV.1- Schéma de principe.

Le réseau monophasé débite sur un transformateur qui abaissera la tension du secteur aux valeurs des tensions désirées. Ces tensions alimenteront les différents étages.

La tension de consigne est une tension stabilisée qui sert de référence au comparateur pour détecter toute variation de la tension générée par le tachymètre.

La seconde tension stabilisée sert à la polarisation des éléments semi-conducteurs qui en demandent.

Les organes de commande les plus utilisés actuellement sont les thyristors et les triacs, et ceci à cause de leurs hautes performances. Ils sont l'élément principal du circuit de puissance qui assure l'entraînement du moteur.

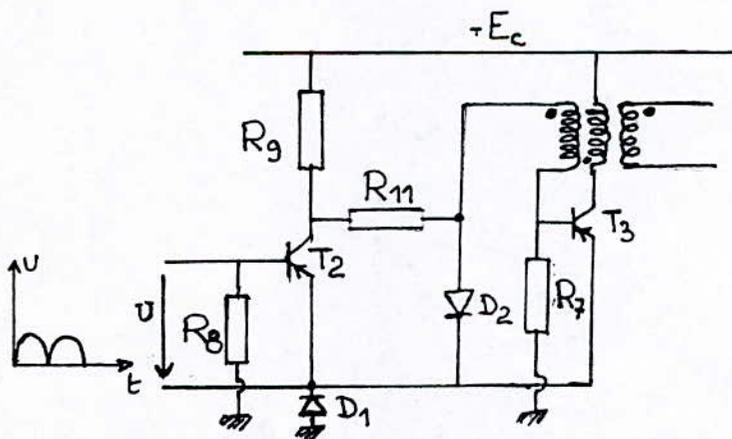
Pour allumer le thyristor (ou le triac), il est nécessaire d'appliquer des impulsions à leur gâchette. Ces impulsions doivent avoir un déphasage ( $\alpha$ ) réglable (à l'aide d'un circuit déphaseur) par rapport à la tension alternative alimentant le thyristor.

Les organes de commande et le générateur d'impulsions sont, souvent, séparés galvaniquement pour éliminer toutes les perturbations provenant du circuit de commande, qui est un circuit de puissance, pour qu'elles ne gênent pas le fonctionnement du générateur d'impulsions.

## I.2 ETUDE THEORIQUE DES DIFFERENTS CIRCUITS

### I.2.1 Générateur d'impulsions

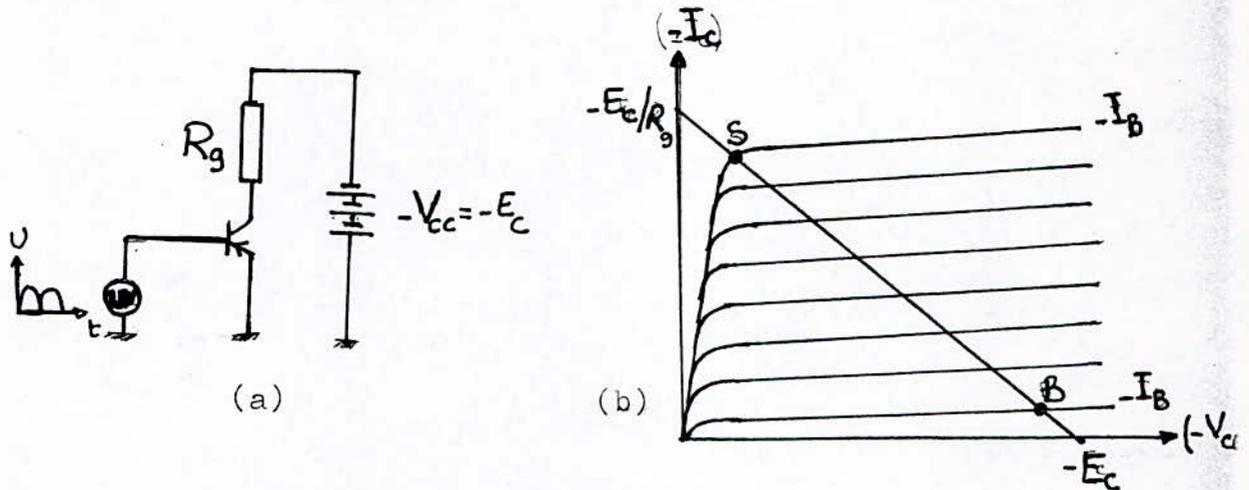
Le générateur d'impulsions se compose de deux étages (fig IV.2). Le premier est un transistor (PNP) qui fonctionne en commutation. Le second est un générateur blocking qui assure la mise en forme des impulsions et la séparation galvanique



-Fig. IV.2- Générateur d'impulsions

### a) Transistor en commutation

Représentons la droite de charge du transistor en commutation (fig. IV.3), celle-ci coupe les axes aux deux points  $(-I_C)=0, (-V_{CE})=(-E_C)$  et  $(-V_{CE})=0, (-I_C)=(-E_C/R_C)$ . Il est donc possible de réaliser l'un ou l'autre des états suivants:



-Fig. IV.3- Caractéristiques d'un transistor en commutation monté en E.C.

#### -Etat bloqué

La jonction émetteur-base constitue une diode polarisée en inverse, donc elle ne laisse passer aucun courant ( $I_D=0$ ) si la tension appliquée est inférieure au seuil  $V_{BE_0}$ . Il en résulte  $(-I_C)=0$  et  $(-V_{CE})=(-E_C)$ . Avec un transistor PNP on assure le blocage en appliquant à la base une tension  $V_{BE}$  positive (point de fonctionnement en B).

#### -Etat saturé

Si la tension d'entrée dépasse la valeur  $V_{BE_0}$ , un courant  $I_B$  circule dans la base, et si celui-ci a une valeur suffisante, le point de fonctionnement sera en S dans la partie saturée. Il en résulte  $(-I_C)=(-E_C/R_C)$  et  $(-V_{CE})=0$ .

On remarque que, dans les deux cas, la puissance dissipée par le transistor est nulle (théoriquement); car on a toujours soit  $V_{CE}=0$ , soit  $I_C=0$ .

### b)-L'oscillateur blocking

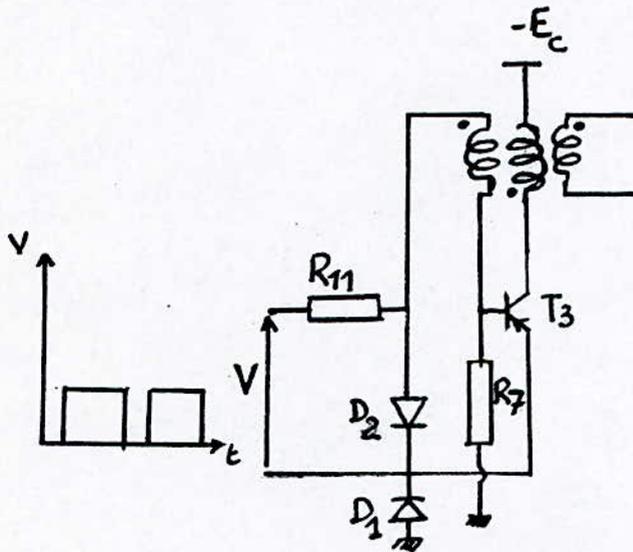
La deuxième fonction, mise en évidence par le générateur d'impulsions, consiste à générer une impulsion de forme, si possible, idéale par rapport à une impulsion dont le front avant n'était plus suffisamment abrupte.

Cette "remise en forme" des impulsions peut être obtenue:

- soit à l'aide du multivibrateur monostable;
- soit à l'aide d'un oscillateur à blocage déclenché.

L'oscillateur à blocage déclenché est constitué de deux éléments principaux: le transistor d'une part, et un transformateur d'autre part. Son régime de fonctionnement permanent est l'état de non conduction en l'absence d'impulsions.

Le rôle du transformateur est donc de renforcer les tendances de basculement du transistor.



-fig.IV.4-Le générateur blocking.

### I.2.2 Organes de commande

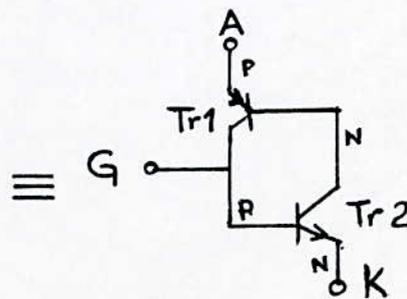
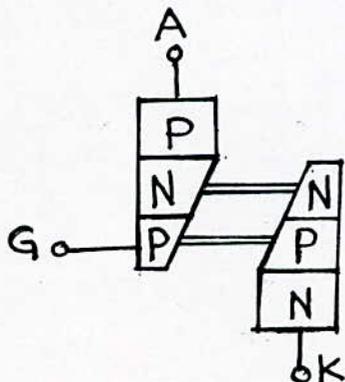
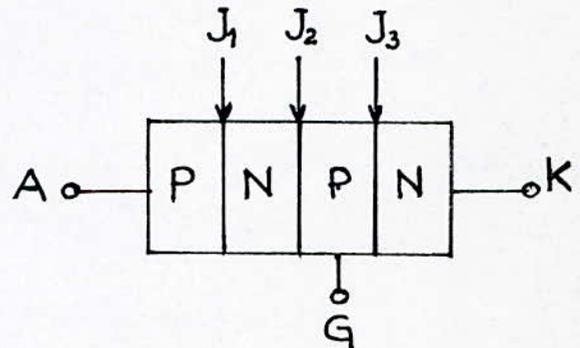
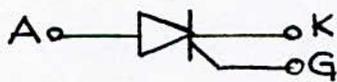
Les thyristors et les triacs sont des commutateurs de puissance rapide. Ils peuvent fonctionner sous plusieurs centaines de volts et conduire des courants pouvant dépasser cent ampères. Ils remplacent les relais et commutateurs mécaniques et offrent une fiabilité bien supérieure à ces composants maintenant démodés. Le domaine des thyristors et des triacs recouvre la commande en alternatif des éclairages, des appareils de chauffage, des moteurs électriques, etc...

L'utilisation de ces dispositifs se généralise; il est important d'en comprendre le fonctionnement; nous commencerons par la théorie de base de ces composants.

#### a)- Fonctionnement du thyristor

Le thyristor (fig. IV.5) se constitue de quatre couches P.N.P.N de silicium. Le symbole représentatif est celui d'une diode, avec une électrode de commande ou gâchette. Le thyristor peut être bloqué ou passant suivant la tension appliquée à la gâchette, sous forme d'une impulsion de faible puissance et de courte durée.

-Fig. IV.5- Constitution d'un thyristor



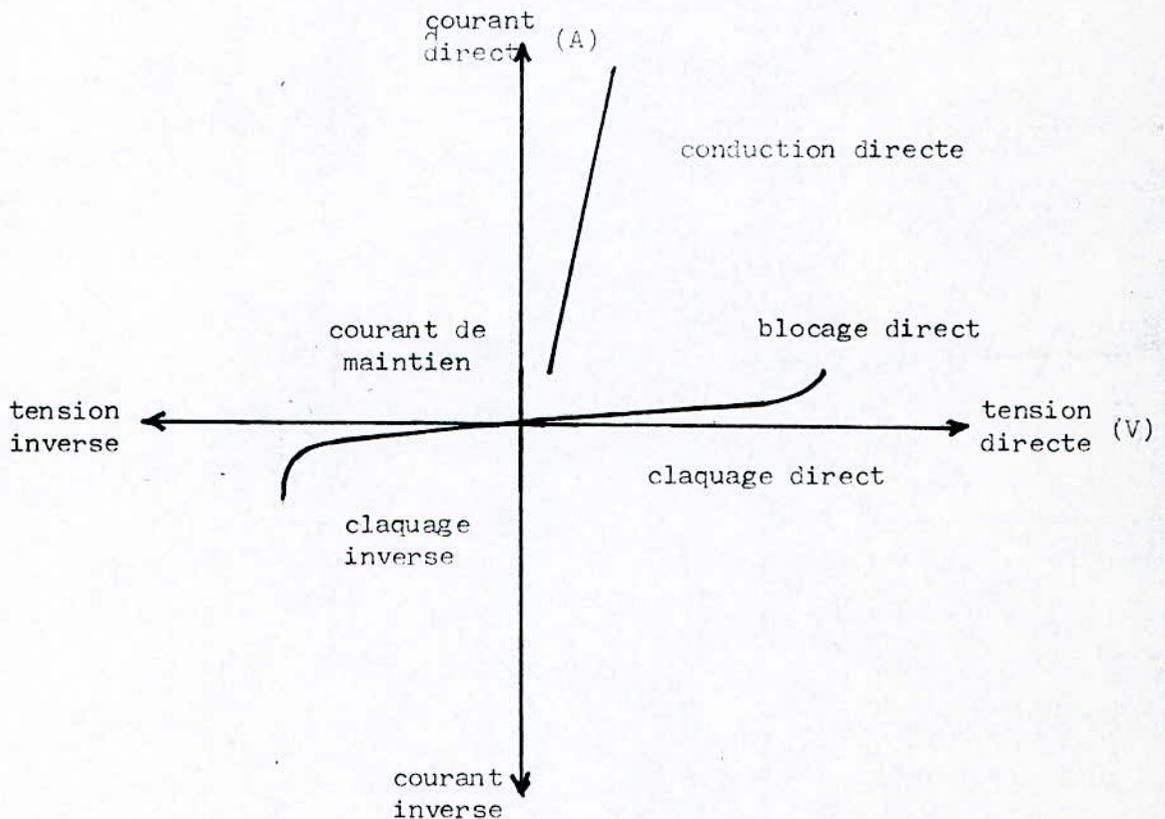
-Fig. IV.6- circuit équivalent à un thyristor.

Une fois que le thyristor a été ouvert, on ne peut le couper qu'en réduisant le courant qui le parcourt à une valeur inférieure au courant de maintien. Les circuits alternatifs permettent la coupure. Les circuits continus requièrent des dispositifs spéciaux.

Un thyristor peut se mettre en conduction sans signal de commande sur la gâchette dans les cas suivants:

a-Tension anode cathode supérieure à la tension d'avalanche.

b-Application d'une rampe de tension entre l'anode et la cathode. L'amorçage se fait par effet capacitif de la jonction  $J_2$  qui brutalement portée à un potentiel suffisant pour que la gâchette déclenche la conduction du thyristor



-Fig. IV.7- Caractéristiques statiques d'un thyristor.

Il s'agit, bien entendu, d'effets intempestifs non utilisés en fonctionnement normal.

On peut représenter un thyristor par deux transistors complémentaires montés en cascade. En coupant en diagonale un thyristor, on voit qu'il est constitué d'un transistor PNP associé à un transistor NPN.

Le fonctionnement peut s'analyser suivant trois configurations différentes:

-Polarisation en inverse: Anode négative par rapport à la cathode. Seul un faible courant de fuite passe, les jonctions  $J_1$  et  $J_2$  sont polarisées en inverse

-Polarisation directe: Anode positive par rapport à la cathode sans signal sur la gâchette. Le thyristor est dit bloqué en direct, il agit comme une résistance très élevée.  $J_1$  et  $J_3$  sont polarisées en direct, la jonction  $J_2$  est polarisée en inverse. Le transistor 2 est bloqué si l'on se réfère au schéma équivalent.

-Polarisation directe avec signal sur la gâchette: Le thyristor débloque la jonction  $J_2$  en quelques microsecondes et un courant très important, seulement limité par la résistance externe du circuit, circule dans le thyristor. La tension anode cathode reste de l'ordre de 1 volt. On voit sur le schéma équivalent que le déblocage de Tr2 entraîne, par réaction positive (liaison collecteur base), le déblocage de Tr1. Le thyristor reste dans cet état conducteur, même après la disparition du signal de commande sur la gâchette. On ne peut couper le thyristor qu'en réduisant le courant qu'il débite en dessous d'une valeur appelée courant de maintien.

Les deux transistors étant reliés en boucle de réaction positive, le gain en courant entre la gâchette (base de Tr1) et l'anode (collecteur de Tr1 et émetteur de Tr2) est très élevé. Le gain en tension est aussi très important puisqu'il suffit de 1 volt seulement entre la cathode et la gâchette pour allumer le thyristor. La puissance de commande reste donc faible; quelques milliwatts, suffisent à commander plusieurs centaines de watts dans le circuit principal.

### b)-Fonctionnement du Triac

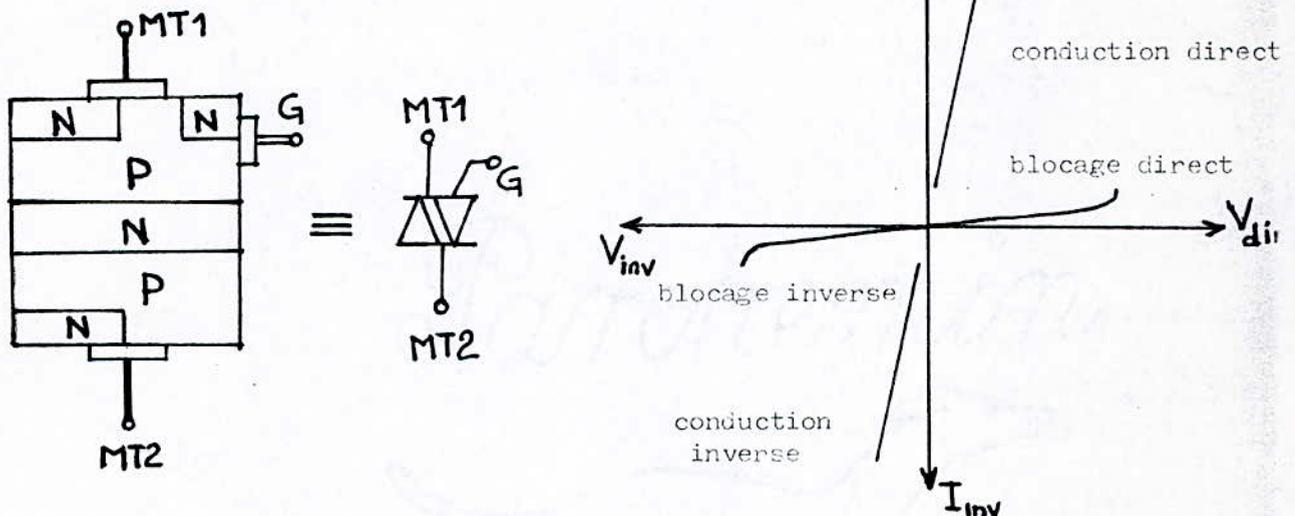
La fig.IV.7 montre la constitution de ce dispositif, que l'on peut considérer comme étant le montage tête bêche de deux thyristors avec une gâchette commune. On peut voir sur la même figure la caractéristique de fonctionnement de ce composant, qui peut couper un courant très important dans deux directions, tandis que le thyristor ne fonctionne qu'à sens unique. Le triac peut être commandé par des signaux de gâchette positifs ou négatifs de quatre façons différentes:

Mode  $I^+$  = courant MT2 + courant gâchette +

Mode  $I^-$  = courant MT2 + courant gâchette -

Mode  $II^+$  = courant MT2 - courant gâchette +

Mode  $II^-$  = courant MT2 - courant gâchette -



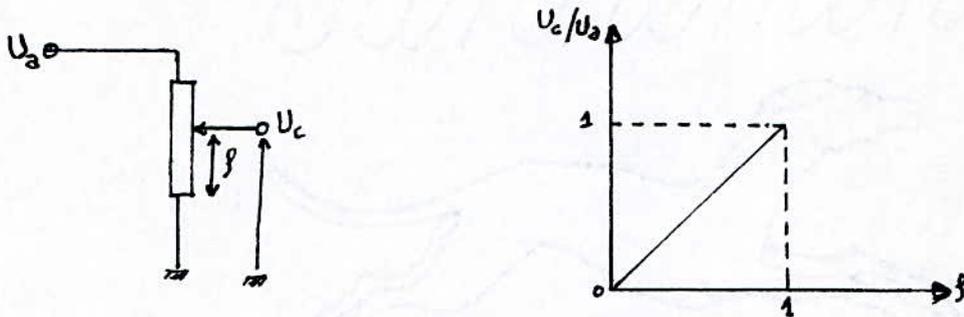
-Fig.IV.8-Constitution et caractéristiques d'un triac.

La meilleure sensibilité est obtenue en mode  $I^+$  et  $II^-$ ; elle est, dans ce deux cas, deux fois meilleure que dans les autres modes. La puissance nécessaire pour commander le dispositif reste très faible en comparaison de la puissance débitée dans le circuit principal MT2.

### L2.3. Organes de consigne

Parmi les organes d'entrée se trouvent les organes de consigne. Ces derniers sont des tensions stabilisées. Elles servent de tension de référence pour les comparateurs.

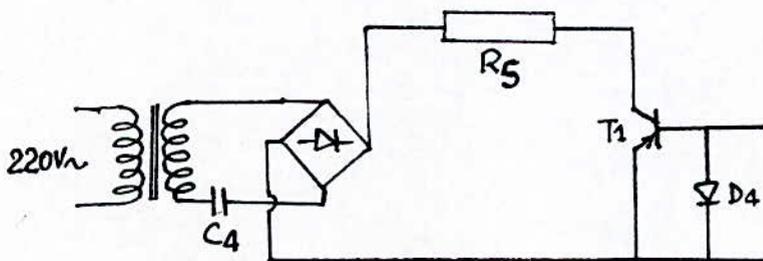
Le potentiomètre est le plus simple en mesure de délivrer une tension continue ajustable, où le curseur est déplacé à la main. Cette tension continue provient d'un organe d'alimentation stabilisée.



-fig.IV.8- Le potentiomètre comme organe de consigne

### I.2.4. Le circuit déphaseur

Il est constitué du transistor T1 et de la capacité C4. Le transistor T1 fonctionne comme une résistance variable et ceci suivant la chute de tension qu'il reçoit entre sa base et son émetteur. Ainsi, l'angle de déphasage variant suivant la chute de tension aux bornes du transistor.



-fig.IV.9- Circuit déphaseur.



## II. FONCTIONNEMENT

Les graphes, de la figure III.12, décrivent le fonctionnement du montage. Ces graphes sont explicités un par un dans l'ordre:

-Le graphe (a) représente la tension alternative délivrée par le secondaire du transformateur d'alimentation.

-Le graphe (b) montre la tension redressée par le pont III et la tension de polarisation de la base causée par la diode D1. Cette tension redressée est déphasée d'un angle ( $\alpha$ ).

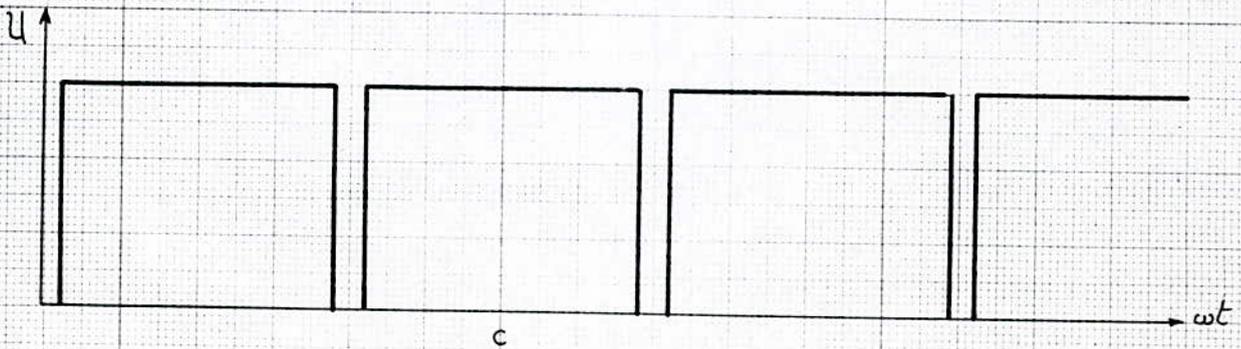
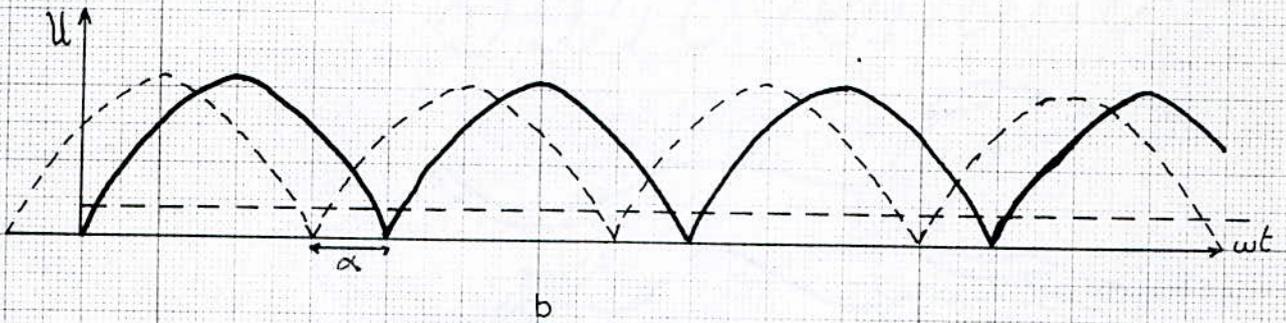
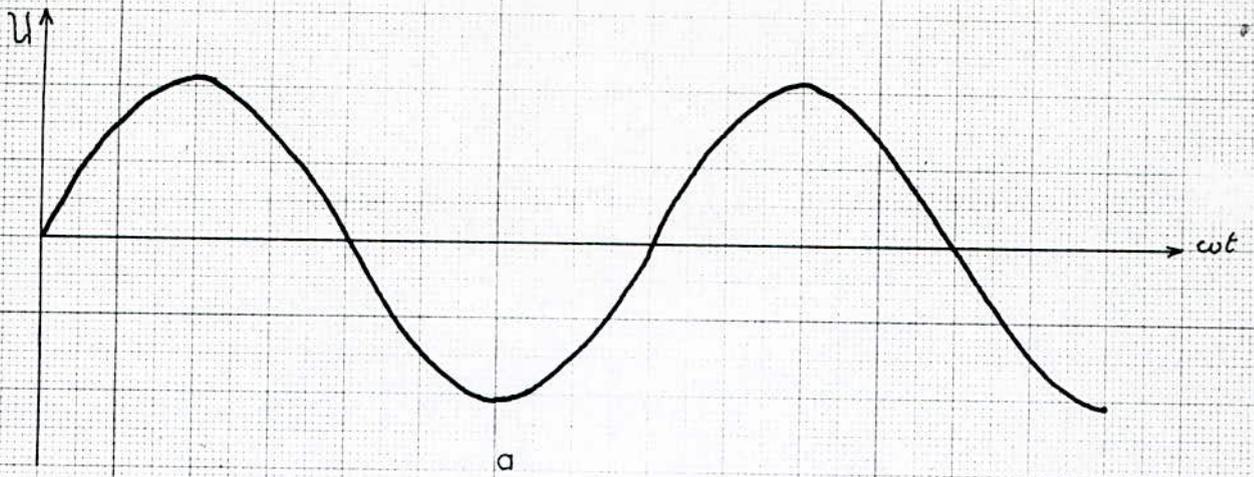
Les impulsions, représentées en (b), sont appliquées sur la base du transistor T2; cette dernière devient plus négative que l'émetteur ce qui amène T2 à la conduction, par effet cumulatif T2 se sature et, ainsi, génère une impulsion sur son collecteur.

-Le graphe (c) donne les impulsions générées par le transistor 2. Celles-ci sont appliquées sur l'émetteur, du transistor T3, qui devient plus positif par rapport à la base ce qui entraîne T3 à la conduction. A sa saturation, une impulsion est générée sur le primaire du transformateur, celui-ci la transmet, à son tour, au secondaire.

-Le graphe (d) représente les impulsions transmises par le transformateur sur son secondaire. Elles servent à la commande de la gachette du thyristor. Ces impulsions sont de courte durée et de pente abrupte.

-Le graphe (e), quand-à-lui, montre la tension anode du thyristor. La partie hachurée donne la période d'amorçage du thyristor pour lequel le moteur est actionné. Cet amorçage s'obtient chaque fois qu'une impulsion de commande arrive sur la gachette du thyristor.

-Enfin, le graphe (f) montre l'évolution du courant de charge (ici le moteur) suivant l'impulsion et le déphasage. Par conséquent, le moteur fonctionne à la valeur moyenne du courant.

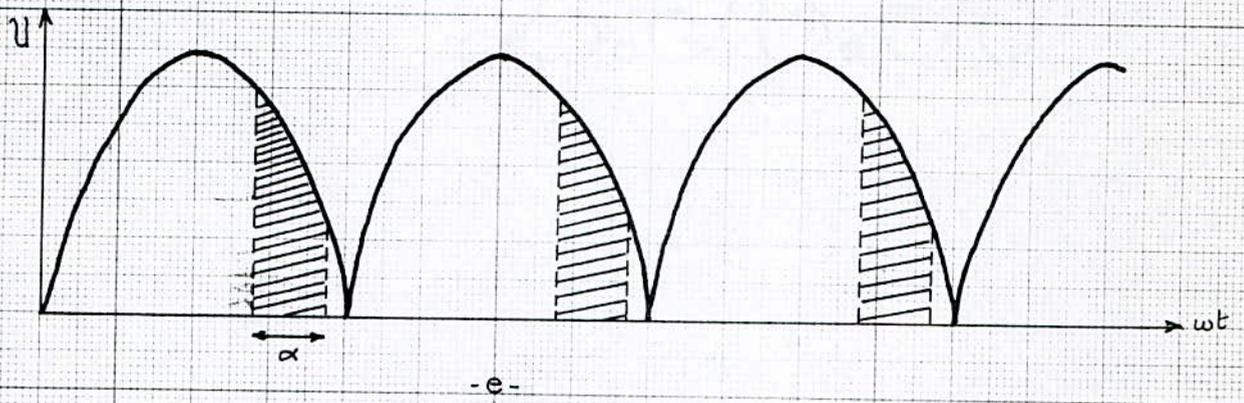
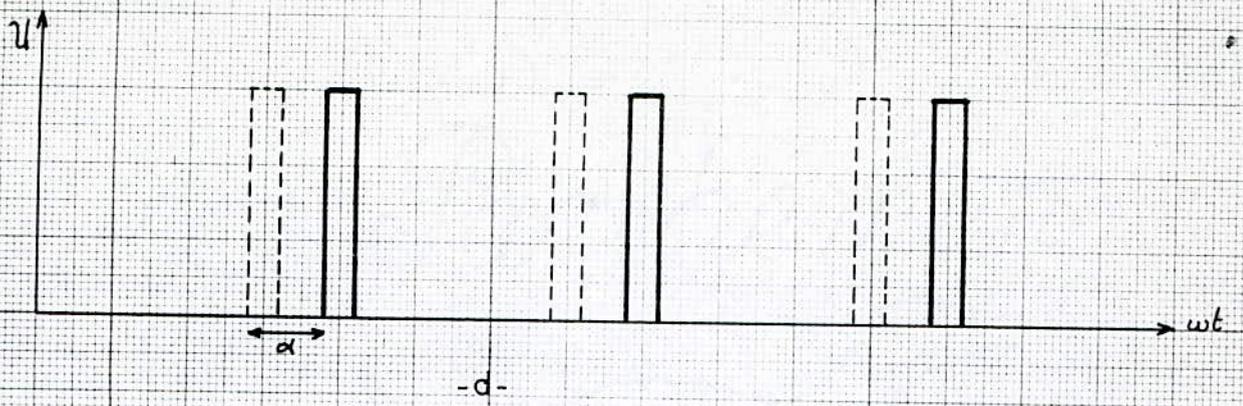


5

10

15

20



-fig.IV.12-

### III. REALISATION

Ce paragraphe se compose, essentiellement, de deux grandes lignes;

à savoir:

- le calcul des deux transformateurs
- la présentation de la réalisation.

#### III.1.CALCUL DES TRANSFORMATEURS

##### III.1.1.Le transformateur d'impulsions

Le transformateur du générateur blocking est un transformateur, d'impulsions, de puissance à trois enroulements, le primaire, le secondaire et le tertiaire. Ce dernier sert à la rétroaction entre la base et l'émetteur.

##### Calcul du nombre de spires

$$N_p = A \cdot E/S$$

où  $A=40$  à  $50$  lorsqu'il n'y a pas d'entrefer

$E$ =valeur de la tension appliquée au collecteur du transistor.

$S$ =section du noyau en  $\text{cm}^2$ .

donc  $N_p=40 \times 10 / 1,26 = 318$  spires

d'autre part, on sait que :

$$N_s/N_p = U_s/U_p = N \implies N_s = N_p \cdot U_s/U_p$$

nous avons fixé le rapport de transformation  $N=1,5$ . Donc:

$$N_s = 1,5 \times 318 = 480 \text{ spires}$$

Pour le tertiaire, on a pris  $N_t = 40$  spires.

##### III.1.2.Le transformateur d'alimentation

Le transformateur, que nous avons réalisé, est un abaisseur de tension à une seule entrée et plusieurs sorties (4) dont deux sont à point milieu. La section du noyau supportant le bobinage est seule à considérer comme base des calculs pour la réalisation de ces transformateurs.

La section de notre transformateur est  $S=20,8 \text{ cm}^2$ .

On calcule approximativement la puissance optimum, pour les transfo-

transformateurs cuirassés 50 Hz, à l'aide de la formule:

$$P = S^2 / (1,2)^2$$

S = section du fer en cm<sup>2</sup>

P = puissance en voltampères

$$P = (20,8)^2 / (1,2)^2 = 300 \text{ VA}$$

### Calcul du nombre de spires

Le nombre de spires par volt dépend de la tension adoptée et du flux magnétique dans le circuit. Ceci est exprimée par:

$$N = 10^4 / 4,44 f B S$$

où N: nombre de spires par volt

f: la fréquence en Hz

B: induction en tesla

S: section du noyau en cm<sup>2</sup>

Pour 50 Hz, une induction de 1T et une section de 20,8 cm<sup>2</sup>; on a:

$$N = 2,1 \text{ spires par volt}$$

Connaissant la tension désirée de chaque enroulement, il est facile de déterminer leur nombre de spires.

#### a) - le primaire

$$N_p = U_p N = 462 \text{ spires}$$

#### b) - le secondaire

##### - le premier enroulement

Il a pour tension de sortie 12 V; il sert à l'obtention de la tension de consigne.

$$N_{s1} = U_{s1} \times N = 25 \text{ spires}$$

##### - le second enroulement

Il a pour tension de sortie 16 V; il sert à la polarisation des transistors (T2 et T3) du générateur d'impulsions.

$$N_{s2} = U_{s2} \times N = 34 \text{ spires}$$

-le troisième enroulement

C'est un enroulement à point milieu. Nous déterminerons le nombre de spires pour la tension entre le point milieu et une borne (5V). Cet enroulement sert à l'alimentation du circuit déphaseur et la génération d'impulsions pour attaquer la base du T2.

$$N_{s3} = U_{s3} \times N = 11 \text{ spires}$$

-le quatrième enroulement

Il délivre du 2x34V et sert à l'alimentation de la partie de puissance (le moteur et l'anode du thyristor).

$$N_{s4} = U_{s4} N = 34 \times 2,1 = 71 \text{ spires}$$

- évaluation de la section des conducteurs

La section des fils de cuivre qui constituent les enroulements primaire et secondaire, est directement proportionnelle à l'intensité circule dans le fil et inversement proportionnelle à la densité de courant admise.

Pour le primaire et les trois premiers enroulements du secondaire, on a opté pour un courant de 1A et pour le dernier un courant de 2A.

La densité de courant maximale admissible en fonction de la puissance, pour un régime permanent, est donnée par des tables (17). Dans notre cas,  $D=2,5 \text{ A/mm}^2$  pour une puissance de 300 VA.

La relation donnant la section du fil est exprimée par:

$$s = I/D \quad ;$$

s: section du fil en  $\text{mm}^2$

I: intensité en A

D: densité de courant en  $\text{A/mm}^2$

Donc, pour le primaire et les trois premiers enroulements du secondaire; on a:

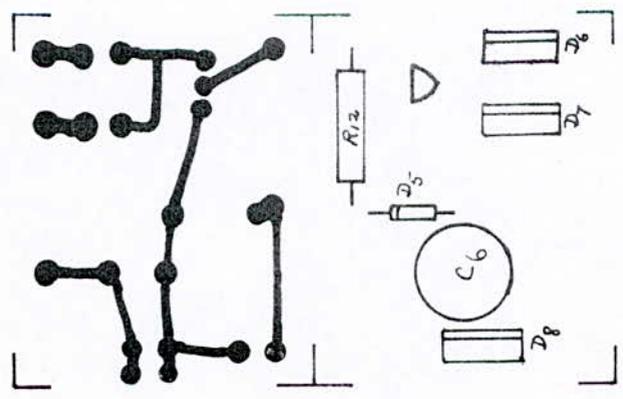
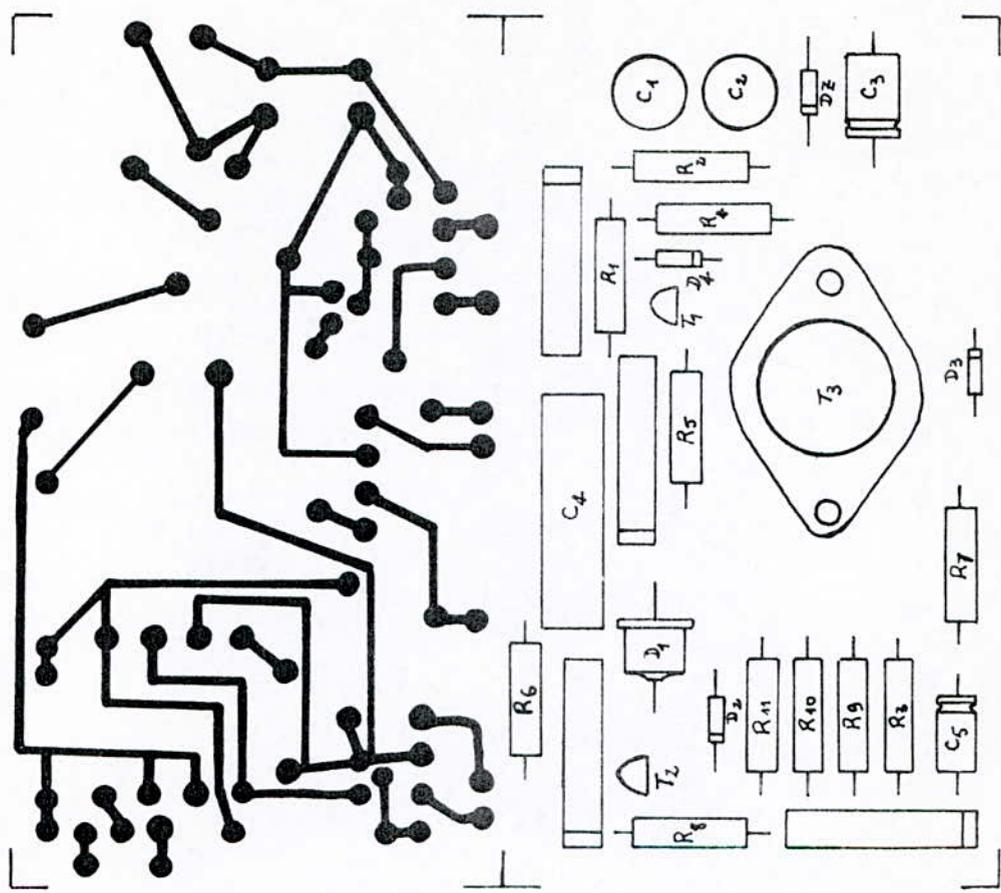
$$s = 1/2,5 = 0,4 \text{ mm}^2 \quad ; \text{ d'où le diamètre du fil est } d=0,6 \text{ mm.}$$

Tandis que pour l'enroulement dernier, on a:

$s=2/2,5 = 0,8 \text{ mm}^2$  ;d'où un diamètre de 1mm.

### III.2.PRESENTATION DE LA REALISATION

Notre réalisation pratique est faite à l'aide de composants simples. Elle est constituée de deux circuits imprimés dont l'un mesure 120 x 65, pour la partie faible puissance, et l'autre, la partie de puissance, est de 65x60. Nous avons opté pour deux circuits imprimés pour avoir une bonne séparation galvanique. La figure IV.13 montre la disposition des composants sur la maquette.



- fig.IV.13 -

LISTE DES COMPOSANTSResistances

R1 : 100  $\Omega$   
 R2 : 68  $\Omega$   
 R3 : 1 K  $\Omega$   
 R4 : 22 K  $\Omega$   
 R5 : 330  $\Omega$   
 R6 : 1 K  $\Omega$   
 R7 : 22 K  $\Omega$   
 R8 : 47 K  $\Omega$   
 R9 : 1 K  $\Omega$   
 R10 : 47 K  $\Omega$   
 R11 : 1 K  $\Omega$   
 R12 : 100  $\Omega$   
 P1 : 1 K  $\Omega$

Diodes

D1 : 1N4719  
 D2 : AA119  
 D3 : AA119  
 D4 : AA119  
 D5 : AA119  
 D6 : BYV 71800RC  
 D7 : BYV 71800RC  
 D8 : BYV 71800RC

Capacites

C1 : 100  $\mu$ F/25  
 C2 : 100  $\mu$ F/25  
 C3 : 47  $\mu$ F/10  
 C4 : 39  $\mu$ F/  
 C5 : 10  $\mu$ F/25  
 C6 : 620  $\mu$ F/63

Transistors

T1 : BC 307  
 T2 : BC 307  
 T3 : MJ 900

Thyristor

BRY 55

## CONCLUSION

Vu que la majorité des robots industriels utilisent des moteurs à courant continu, notre étude, sur la compensation adaptative d'un système de commande automatique pour le robot, s'est retrouvée à l'étude de la régulation de la vitesse d'un moteur, à courant continu, sur lequel un moment d'inertie externe agit.

Nous avons fait l'étude de base mathématique de notre système et nous avons établi une liaison entre les coefficients de l'équation différentielle et la résolution de notre problème.

La méthode utilisée, pour établir cette liaison, nous a montré que les variations du moment d'inertie de la charge, manipulée par le robot, affectent uniquement le temps de réponse transitoire.

Les difficultés rencontrées lors de l'élaboration de notre travail nous ont aidé à mieux voir l'importance de notre sujet; et l'aide précieuse de notre promoteur nous a été bénéfique pour surmonter ces difficultés.

Enfin, nous pensons que notre travail est une porte qui s'est ouverte pour d'autres sujets traitants ce domaine. Néanmoins, nous espérons que certains d'entre eux puissent être développés à partir de la base que constitue notre projet.

-Chapitre un

- (1) La Robotique industrielle: Stratégie et développement  
Caracostas PARASKEVAS -Paris-PAFLA 1984.
- (2) La microélectronique, la robotique et l'emploi  
O.C.D.E -Paris-1982
- (3) Robotique: Basique Analysis and Design  
William.A.WOLOVICH -CBS Collège Publishing-1987
- (4) Robotics for engineers  
Yorman KOREN -Mc GRAW-HILL- 1985

-Chapitre deux

- (5) Introduction to feedback control systems  
E.PERICLES et E.LEFF -Mc GRAW-HILL-1979
- (6) Elements de robotique  
P.COIFFET et M.CHIROUZE -HERMES-1982
- (7) 110 études pratiques à thyristors et triacs  
R.M.MARSTON traduit par F.MILSANT -Eyrolles-1981

-Chapitre trois

- (8) Cours de Magister de Monsieur LYSSOV
- (9) Automatic Control Systems  
Benjamin.C.KUO -P.H.I-1987 :5ème édition.
- (10) Commande des moteurs à courant continu  
R.CHAUPRADE -Eyrolles-1984
- (11) Automatique: Calcul algébrique des systèmes asservis linéaires  
P.NASLIN 1967
- (12) Systèmes Asservis (tome 2)  
J.J.DI STEFANO -série SCHAU-1984

-Chapitre quatre

- (13) Les Transistors en Régime d'Impulsions  
J.DOYLE -DUNOD-1970
- (14) Semi-Conducteurs: Thyristor et Triacs.  
fonctionnement-caractéristiques-procédés de commande-applications.  
M.MOUNIC -Foucher-1973
- (15) ELECTRICITE INDUSTRIELLE+ELECTRONIQUE: Les systèmes  
F.LUCAS -DELAGRAVE-1981
- (16) ELECTRICITE INDUSTRIELLE-ELECTRONIQUE: Les composants actifs.

F.LUCAS et A.GALICHON

-RELAGRAVE-1978

(17) La construction des petits transformateurs.

M.DOURIAU et F.JUSTER

-TSF-14ème édition 1980

(18) Electronique à transistors et à circuits intégrés

R.BESSON

-TV Technique- 1979

ANNEXE

Caractéristiques

| <u>transistors</u>         | HJ 900 | BC 307 |
|----------------------------|--------|--------|
| type:                      | PNP    | PNP    |
| I <sub>cmx</sub> :         | 8 A    | 10 mA  |
| V <sub>ce0</sub> :         | 60 V   | 25 V   |
| V <sub>cesat</sub> :       | 2 V    | 0.2 V  |
| Pt:                        | 90 W   | 300 mW |
| I <sub>b</sub>             | 112 mA | 0.5 mA |
| $\beta$ =h <sub>fe</sub> : | 1000   | 65     |
| I <sub>c</sub> :           | 3 A    | 2 mA   |

-le thyristor

|                    |        |
|--------------------|--------|
| type               | DRY 55 |
| I <sub>TSM</sub> : | 8A     |
| V <sub>RRM</sub> : | 200 V  |
| V <sub>GT</sub> :  | 0.6 V  |
| I <sub>GT</sub> :  | 0.2 mA |
| V <sub>TM</sub> :  | 1.5 V  |
| I <sub>TM</sub> :  | 1A     |

19. Таблица  $h$ -функций для трапеций

| $X$  | 0,0   | 0,05  | 0,10  | 0,15  | 0,20  | 0,25  | 0,30  | 0,35  | 0,40  | 0,45  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0  | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,5  | 0,138 | 0,165 | 0,176 | 0,184 | 0,192 | 0,199 | 0,207 | 0,215 | 0,223 | 0,231 |
| 1,0  | 0,310 | 0,325 | 0,340 | 0,356 | 0,371 | 0,386 | 0,402 | 0,417 | 0,432 | 0,447 |
| 1,5  | 0,449 | 0,469 | 0,494 | 0,516 | 0,538 | 0,560 | 0,594 | 0,603 | 0,617 | 0,646 |
| 2,0  | 0,571 | 0,560 | 0,628 | 0,655 | 0,682 | 0,709 | 0,732 | 0,761 | 0,785 | 0,810 |
| 2,5  | 0,674 | 0,707 | 0,739 | 0,771 | 0,802 | 0,833 | 0,862 | 0,891 | 0,917 | 0,943 |
| 3,0  | 0,755 | 0,792 | 0,828 | 0,863 | 0,895 | 0,928 | 0,958 | 0,986 | 1,013 | 1,038 |
| 3,5  | 0,815 | 0,853 | 0,892 | 0,928 | 0,963 | 0,994 | 1,024 | 1,050 | 1,044 | 1,095 |
| 4,0  | 0,856 | 0,895 | 0,937 | 0,974 | 1,008 | 1,039 | 1,066 | 1,090 | 1,110 | 1,127 |
| 4,5  | 0,883 | 0,923 | 0,960 | 0,993 | 1,029 | 1,057 | 1,084 | 1,104 | 1,120 | 1,129 |
| 5,0  | 0,895 | 0,939 | 0,977 | 1,012 | 1,042 | 1,067 | 1,087 | 1,102 | 1,112 | 1,117 |
| 5,5  | 0,900 | 0,940 | 0,976 | 1,015 | 1,042 | 1,063 | 1,079 | 1,088 | 1,097 | 1,099 |
| 6,0  | 0,903 | 0,945 | 0,981 | 1,013 | 1,037 | 1,054 | 1,065 | 1,070 | 1,068 | 1,067 |
| 6,5  | 0,904 | 0,943 | 0,980 | 1,009 | 1,029 | 1,043 | 1,050 | 1,049 | 1,043 | 1,033 |
| 7,0  | 0,904 | 0,945 | 0,978 | 1,006 | 1,024 | 1,034 | 1,037 | 1,033 | 1,023 | 1,009 |
| 7,5  | 0,907 | 0,945 | 0,980 | 1,005 | 1,021 | 1,027 | 1,027 | 1,020 | 1,005 | 0,989 |
| 8,0  | 0,911 | 0,951 | 0,983 | 1,007 | 1,020 | 1,024 | 1,021 | 1,011 | 0,998 | 0,982 |
| 8,5  | 0,918 | 0,956 | 0,989 | 1,010 | 1,021 | 1,024 | 1,018 | 1,007 | 0,998 | 0,978 |
| 9,0  | 0,925 | 0,966 | 0,996 | 1,016 | 1,025 | 1,025 | 1,017 | 1,006 | 0,992 | 0,978 |
| 9,5  | 0,932 | 0,972 | 1,004 | 1,020 | 1,028 | 1,026 | 1,018 | 1,006 | 0,993 | 0,982 |
| 10,0 | 0,939 | 0,980 | 1,009 | 1,025 | 1,030 | 1,027 | 1,018 | 1,005 | 0,994 | 0,985 |
| 10,5 | 0,946 | 0,985 | 1,013 | 1,028 | 1,031 | 1,026 | 1,016 | 1,004 | 0,994 | 0,989 |
| 11,0 | 0,947 | 0,988 | 1,015 | 1,028 | 1,030 | 1,024 | 1,013 | 1,002 | 0,993 | 0,990 |
| 11,5 | 0,949 | 0,988 | 1,016 | 1,027 | 1,028 | 1,021 | 1,010 | 0,998 | 0,991 | 0,991 |
| 12,0 | 0,950 | 0,989 | 1,015 | 1,025 | 1,024 | 1,015 | 1,004 | 0,994 | 0,988 | 0,990 |
| 12,5 | 0,950 | 0,989 | 1,013 | 1,022 | 1,019 | 1,010 | 0,998 | 0,990 | 0,985 | 0,989 |
| 13,0 | 0,950 | 0,989 | 1,012 | 1,019 | 1,015 | 1,004 | 0,993 | 0,986 | 0,984 | 0,989 |
| 13,5 | 0,950 | 0,990 | 1,011 | 1,016 | 1,011 | 1,000 | 0,990 | 0,983 | 0,984 | 0,989 |
| 14,0 | 0,951 | 0,990 | 1,010 | 1,015 | 1,008 | 0,997 | 0,987 | 0,983 | 0,985 | 0,991 |
| 14,5 | 0,954 | 0,990 | 1,011 | 1,014 | 1,008 | 0,996 | 0,986 | 0,984 | 0,987 | 0,994 |
| 15,0 | 0,956 | 0,993 | 1,012 | 1,014 | 1,006 | 0,995 | 0,987 | 0,986 | 0,991 | 0,998 |
| 15,5 | 0,959 | 0,995 | 1,013 | 1,014 | 1,006 | 0,995 | 0,989 | 0,989 | 0,995 | 1,002 |

Наморограмма для построения вещественной характеристики

$\theta$  [град]

