

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

16/87

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : électrotechnique

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

Stabilité d'un Système

Couplé

Photo-Voltaïque

—

Thermodynamique

Proposé Par :

s.a darradji

Etudié par :

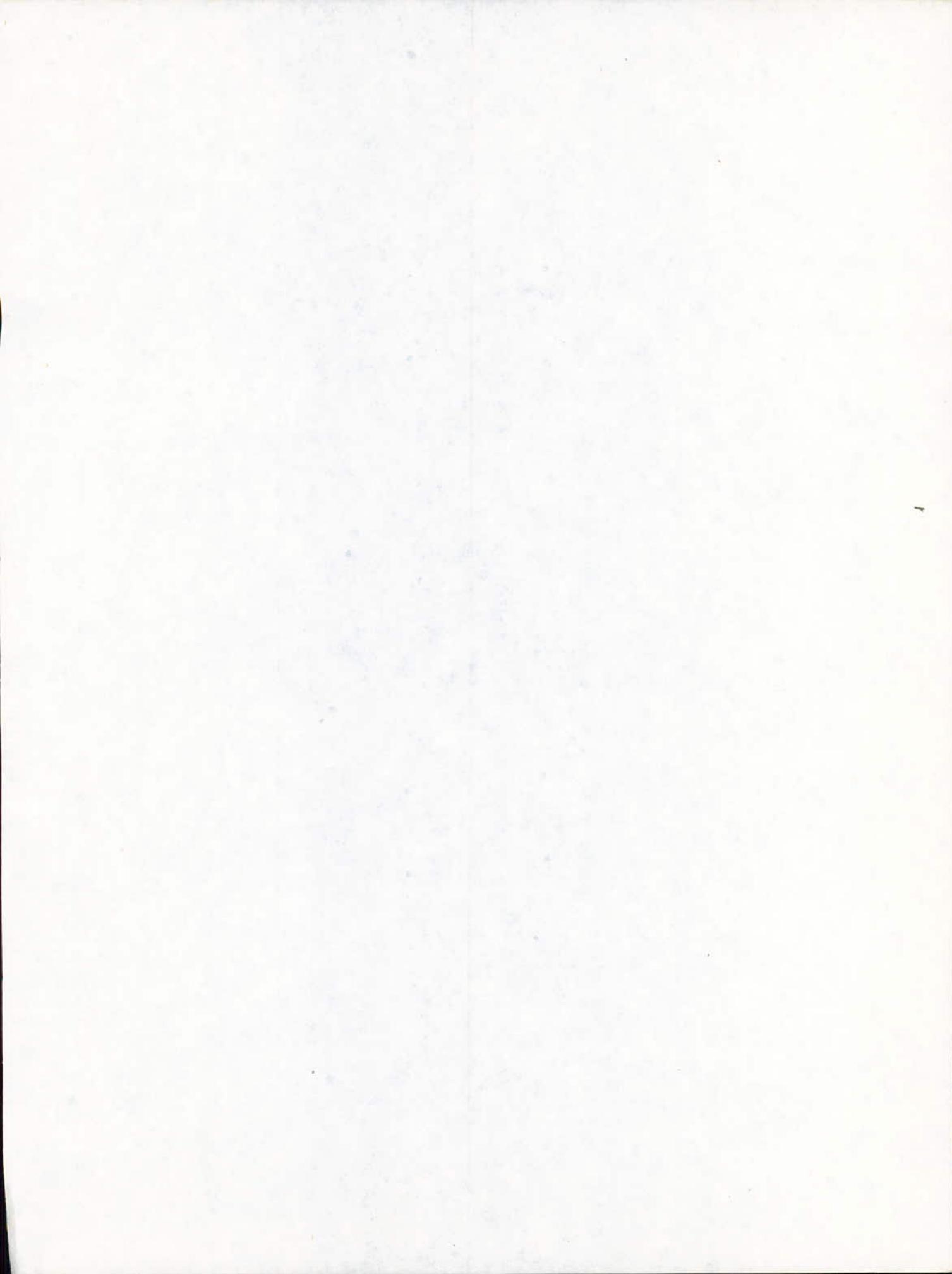
idir kamel

hamza boubkar\_Fatah

Dirigé par :

s.a darradji

PROMOTION : juin 1987



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ إِقْرَأْ وَرَبُّكَ  
الْأَكْرَمُ الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ

صدق الله العظيم

D E D I C A C E S

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

A ma mère

A mon père

A mes soeurs à mon frère Samir

A ma famille et à tous les amis.

Je dédie ce modeste travail.

HAMZA Boubkar-Fatah

\* \* \* D E D I C A C E S \* \* \*

A mon père

A ma mère

A mes frères et soeurs

A mon neveu Lyess

A ma famille et à tous les amis.

je dédie ce modeste travail.

IDIR Kamel

## R E M E R C I M E N T S

- Mr S.A DERRADJi , notre promoteur pour nous avoir suivi et guidé dans l'élaboration de ce travail.
- Mr BOUCHERIT pour son aide et ses suggestions.
- Tous les professeurs qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.
- Tous ceux qui nous ont aidé à l'élaboration de ce travail en particulier à Mr SACI Dalil.

TABLE DES MATIERES

Introduction .....	1
Chapitre I - Etude préchauffage par energie solaire. ....	2
I - 1 Généralités sur le rayonnement solaire.....	2
I - 2 La cellule photovoltaïque.....	2
I - 3 Schéma équivalent de la cellule.....	3
photovoltaïque	
I - 4 Générateur photovoltaïque.....	5
I - 5 Description du module Arco-solar M 53.....	5
I - 6 Schéma équivalent d'un module photovoltaïque...	6
I - 7 Description du poste de détente du gaz.....	8
naturel.	
I - 8 Problème pratique de refroidissement.....	8
I - 8 -1 Conversion thermique.....	9
I - 8 -2 Conversion photovoltaïque.....	10
Chapitre II - Etude du régulateur de température.....	16
II - 1 Introduction.....	16
II-1- 1 Chaîne principale.....	16
II-1- 2 Chaîne secondaire.....	16
II-1- 3 Description du montage du régulateur de.....	16
température.	
II - 2 Structures et hypothèses.....	17
II-2- 1 Etude de l'organe à réguler.....	17
II-2-2 L'organe comparateur.....	20
II-2- 3 Organe d'exécution.....	25
II - 3 Schéma bloc du régulateur.....	27
II-3- 1 Fonction du transfert du système.....	28
II-3- 2 Comportement du système en régime définitif.....	30

Chapitre III - Couplage et adaptation du système.....	32
photovoltaïque-thermodynamique.	
III -1 Caractéristique fondamentale ( I - V ).....	32
III -2 Optimisation de l'orientation du capteur.....	34
III 2-1 Exploitation des données météorologiques.....	35
mesurées mesurées à la station de Bouzaréah	
III -3 Dimension du générateur photovoltaïque.....	35
III -4 Type de couplage des panneaux.....	37
III -5 Détermination du point de fonctionnement.....	40
III 5-1 Résultats et interprétations.....	40
III 6 Fonctionnement du système au fil du soleil.....	43
III 7 Influence du rayonnement sur le courant.....	46
III 8 Influence du rayonnement sur la tension.....	49
Chapitre IV - Réglage du gain en boucle ouverte et.....	50
amélioration des performances du régulateur de température.	
IV - 1 Introduction.....	50
IV-1 - 1 Influence du gain en boucle ouverte sur la .....	50
stabilité.	
IV - 2 Réglage du gain en boucle ouverte.....	53
IV-2 - 1 Détermination du gain optimal en boucle .....	53
ouverte.	
IV - 3 Influence des retards sur les performances... ..	58
du système.	
IV - 4 Etude du régime transitoire pour un gain de... ..	59
0,25.	
IV - 5 Amélioration des performances du régulateur... ..	63
Conclusion.....	73

## Introduction

L'énergie solaire constitue un axe de recherche très intéressant puisque la terre reçoit chaque jour, du soleil suffisamment d'énergie pour alimenter toutes les industries ménagères et d'appareillages sur la planète.

La terre reçoit une quantité d'énergie totale égale à  $1,5 \cdot 10^{22}$  joule/jour pour une densité de flux énergétique de  $1350 \text{ W/m}^2$ . Certaines régions de notre pays présentent un ensoleillement supérieur à 3600 heures/an, en plus, les prévisions annoncent que le soleil pouvait encore rayonner pendant cinq milliards d'années n'est-ce pas les raisons suffisantes pour notre pays afin d'accorder une importance toute particulière au développement et à la maîtrise de l'énergie solaire.

L'une de ces utilisations pratiques sera l'objet de ce projet concernant le préchauffage d'un gaz thermodynamique à l'aide d'un système photovoltaïque ainsi on contribuera à résoudre le problème de refroidissement au niveau d'un poste de détente et assurer une meilleure adaptation du système couplé photovoltaïque-thermodynamique.

On envisagera également l'introduction d'un système de régulation de la grandeur thermique à savoir la température du gaz et répondre au meilleur fonctionnement de l'installation.

## CHAPITRE I

## ETUDE DE PRECHAUFFAGE PAR ENERGIE SOLAIRE

## I - 1 Généralité sur le rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui le sépare de la terre, le soleil fournit une énergie importante qui nous parvient sous forme d'un rayonnement dont le spectre se répartie essentiellement entre les longueurs d'onde 0,3  $\mu\text{m}$  et 0,4  $\mu\text{m}$ . L'atmosphère terrestre perturbe cette répartition spectrale, en modifiant l'intensité du rayonnement solaire incident qui est réfléchi, diffusé et absorbé par les gaz et les nuages.

La durée d'ensoleillement varie d'une région à l'autre du globe terrestre, elle change aussi selon les saisons et les conditions climatiques du site. Ce caractère intermittent propre à l'énergie solaire constitue un handicap, on y remédie en stockant l'énergie obtenue sous forme utilisable, essentiellement, électrique après sa conversion par des systèmes solaires tels que les cellules photovoltaïques.

## I - 2 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur, les plus courantes sont à base de silicium, qui transforme l'énergie lumineuse en électricité.

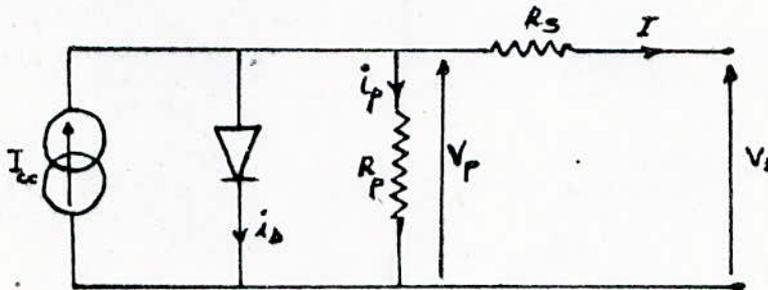
La puissance électrique qu'elle délivre dépend du flux et de la répartition spectrale du rayonnement solaire.

Une cellule photovoltaïque en fonctionnement sous éclairage peut s'identifier à un générateur de courant délivrant un photocourant  $I_{cc}$  (ou courant de court circuit) auquel il faut soustraire le courant de la diode en polarisation direct ( $i_d$ ).

En pratique, on introduit une résistance parallèle  $R_p$  (résistance shunt qui rend compte d'effets tel que, le courant de fuite par les bords de photopile, et une résistance série qui traduit les phénomènes de contact des électrodes avec la cellule et à la résistance interne de cette dernière.

I - 3 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule sous éclairément, vue ce qui a été dit plus haut, peut donc être représentée par le schéma suivant :



L'expression du courant débité par la cellule est sous la forme :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q (V_1 + R_s I)}{N \cdot K (T + 273)} \right) - 1 \right] - \frac{V_1}{R_p} \quad (1)$$

Où

$I_{cc}$  : est le courant de court-circuit

$I_0$  : est le courant de saturation

$K$  : est la constante de Boltzman

$q$  : est la charge d'électron

$N$  : est le coefficient d'idéalité, il vaut

l'unité pour les faibles débits et 2 pour les débits de courants plus important dans le cas de la jonction P.n au silicium.

$R_s$  : est la résistance série.

$R_p$  : est la résistance parallèle (shunt)

$T$  : est la température ambiante en degré ° C

$V_1$  : est la tension aux bornes d'une cellule.

L'équation (1) se simplifie moyennant certaines approximations qui se sont, d'ailleurs, confirmées par des essais expérimentaux. On admet que la résistance  $R_p$  a une valeur assez élevée pour ne pas tenir compte du courant  $I_p$  et que la résistance série  $R_s$  a une valeur négligeable, ainsi le courant délivré à la charge se réduit à :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[ \frac{\text{Exp} \left( \frac{q \cdot V_1}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right) - 1}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right] \quad (2)$$

La valeur du courant de saturation ( $I_0$ ) peut être déduite au point de circuit ouvert tel que :  
à circuit ouvert :  $V_1 = V_{1co}$  et  $I = 0$

D'où l'équation (2) donne :

$$0 = I_{cc} - I_0 \left[ \frac{\text{Exp} \left( \frac{q \cdot V_{1co}}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right) - 1}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right]$$

Ceci implique :

$$I_0 = I_{cc} / \left[ \frac{\text{Exp} \left( \frac{q \cdot V_{1co}}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right) - 1}{N \cdot K \cdot (T + 273)} \right]$$

D'autre part, le courant de court circuit  $I_{cc}$  est lié directement au flux lumineux et à la température ambiante par la relation suivante :

$$I_{cc} = \alpha(T) \cdot \Phi \cdot S$$

où  $\alpha(T)$  : est le coefficient de création du photocourant, fonction de la température et il est défini par l'expression suivante :

$$\alpha(T) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (T + 273) + 0,224 \text{ A/W}$$

T : est la température ambiante en °C

$\Phi$  : est le flux du rayonnement solaire (W/M<sup>2</sup>)

S : est la surface d'une cellule photovoltaïque.

Vu la faible intensité que peut délivrer une cellule photovoltaïque, on est amené à connecter plusieurs cellules formant des modules, ceux-ci sont à leur tour couplés entre eux pour former un générateur photovoltaïque.

I - 4

Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque se compose de un ou plusieurs modules, dans la pratique il est rare d'utiliser un seul module vu que sa puissance est relativement faible, ainsi dans la plupart des installations photovoltaïques d'une certaine puissance on est amené à coupler plusieurs modules entre eux afin de satisfaire les besoins spécifiques de la consommation.

Remarque : Dans la suite de nos calculs on utilisera les données spécifiques des modules type Arco-solar modèle M 53, qui constituent le générateur photovoltaïque du laboratoire d'énergie solaire de l'école nationale polytechnique.

I - 5

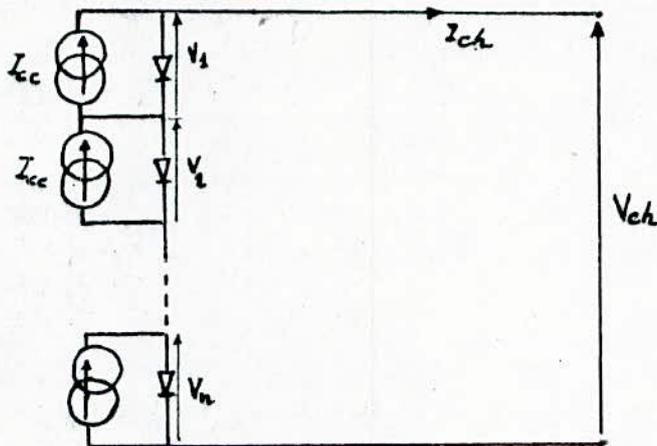
Description du module Arco-solar M 53.

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules <sup>montées</sup> généralement en série ; le module Arco-solar comporte 36 cellules au silicium monocristallin, carrées, disposées en série ayant 9,5 cm de côté chacune, on dispose de 37 grilles parallèles sur la face active de la cellule qui servent à réduire la résistance série de la photopile. les cellules sont recouvertes d'une couche antireflet pour diminuer au maximum les pertes par réflexion, cette couche doit être mince et transparente aux radiations utiles à l'effet photovoltaïques.

Les connexions entre les cellules sont faites par soudure automatique, ce qui supprime le circuit imprimé et diminue le temps de fabrication. La tension du circuit ouvert  $V_{co}$  vaut 19 Volts à la température ambiante ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), le rendement de conversion atteint 13 %.

1 - 6 Schéma équivalent d'un module photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement d'un module est similaire à celui de l'ensemble des cellules le constituant, ainsi le schéma équivalent est représenté comme suit :



Le courant débité par une cellule est le même que celui fourni par le module photovoltaïque puisque elles sont disposées en série d'où :

$$I(\text{cellule}) = I(\text{module}) = I_{ch}$$

et

$$V_{ch} = n V_i$$

Où  $V_i$  : est la tension aux bornes de la  $i$ ème cellule.

$n$  : est le nombre des cellules constituant le module photovoltaïque.

$V_{ch}$  : est la tension aux bornes de la charge.

Ainsi l'équation devient :

$$I_{ch} = I_{cc} - I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \cdot V_{ch}}{N K n (T + 273)} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Application : cas du module Arco-solar M 53 :

$$\begin{aligned} n &= 36 \text{ cellules} \\ V_{oc} &= 19 \text{ Volts} \\ S &= 90,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \\ \text{et :} \\ q &= 1,6028 \cdot 10^{-19} \text{ C.} \\ N &= 1 \\ K &= 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}^\circ \end{aligned}$$

ainsi, l'expression générale du courant délivré par un générateur photovoltaïque type Arco-solar constitué de M modules en série et N branches en parallèles s'écrit comme suit :

$$\text{avec ; } \frac{q}{N \cdot K \cdot n} = 322,47 \text{ c/j/k}^\circ$$

$$I_{ch} = N \left[ \alpha \cdot \phi \cdot S - I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{322,47 \cdot V_{ch}}{M (T + 273)} \right) - 1 \right] \right]$$

et

$$I_0 = \alpha \cdot \phi \cdot S / \left[ \text{Exp} \left( \frac{322,47 \cdot V_{co}}{(T + 273)} \right) - 1 \right]$$

On constate d'une part, que le courant délivré par le générateur dépend non seulement de la charge, comme le cas des générateurs électriques classiques, mais aussi des paramètres climatiques du site à savoir le rayonnement solaire et la température ambiante du milieu.

D'autre part, cette expression décrit le modèle de base de la simulation qui servira à l'étude et à la résolution du problème de préchauffage du gaz naturel au niveau d'un poste de détente (c'est le cas de notre étude).

## I - 7 Description du poste de détente du gaz naturel.

Un poste de détente est une installation dont la fonction est d'assurer l'interruption de l'écoulement du gaz, l'abaissement de sa pression, la protection contre les anomalies, l'élimination de l'eau ou des impuretés. En suivant le sens d'écoulement du gaz.

Une station de détente comprend les principaux appareils suivants : (voir figure I - 1)

- 1/ - Robinet d'arrêt : ils sont destinés à interrompre l'écoulement du gaz en cas de nécessité (entretien ou intervention).
- 2/ - Filtre : Cet appareil a une tâche très importante puisqu'il est destiné à retenir les impuretés solides véhiculés par le gaz, provenant soit du gaz lui-même soit des canalisations ou des systèmes de raccordement.
- 3/ - Robinet automatique de sécurité : c'est un appareil destiné à interrompre automatiquement l'écoulement du gaz dès que la pression atteint une valeur jugée dangereuse pour l'utilisateur.
- 4/- Détendeur : c'est l'élément essentiel du poste, cet appareil est destiné à abaisser la pression du gaz jusqu'à une valeur appelée pression nominale.
- 5/ - appareils de mesure : ces appareils affichent à tout moment les paramètres thermiques du gaz tels que la température et la pression du gaz.
- 6/ - Système de contrôle : le rôle essentiel de ce système est de maintenir la pression du gaz en aval de l'utilisateur à sa valeur nominale à savoir 4 bars, la régulation de la pression est assurée par un organe appelé "pilote".

## I - 8 - Problème pratique de refroidissement :

Avant d'être livré à l'utilisateur, pour des utilisations industrielles et domestiques, le gaz naturel subit des transformations qui s'effectuent au niveau d'un poste de détente dont l'une des fonctions essentielles est l'abaissement de la pression du gaz en aval du consommateur.

Le gaz arrive en amont du détendeur à la pression de 70 bars et à la température de 10 °C, après détente la pression du gaz chute à 4 bars et sa température sera - 30 °C selon le diagramme de la figure (I - 2).

Afin de vérifier et maintenir la pression de sortie du gaz à 4 bars, on procède à un piquage sur la canalisation principale, la pression du gaz sera comparée dans un organe de contrôle appelé "pilote".

Vue la chute importante de la température du gaz jusqu'à - 30°C, le gel et l'hydrate apparaissent principalement au niveau du système de contrôle ce qui provoque le blocage de ce dernier fig. (I - 1).

Pour remédier à ce problème on doit rechauffer le gaz, qui entre dans le système de contrôle à la même température que celle de la canalisation principale à savoir - 30°C, après chauffage préalable, le gaz voit sa température augmentée à une valeur de consigne admissible et qui vaut 7° C, celle-ci devrait être maintenue constante quelque soit les perturbations que peut subir le système, ceci impose un système de régulation et de contrôle.

La solution la plus couramment utilisée et le réchauffage par chaudière à gaz, il s'avère que celle-ci est très coûteuse, trop encombrante et pose des problèmes de sécurité.

On se propose de présenter ici une solution faisant appel à un chauffage par énergie solaire. La conversion de l'énergie solaire peut se faire sous deux formes :

- I-8-1 Thermique : cette forme se divise en deux selon que la captation du rayonnement se fait avec ou sans concentration du flux lumineux.
- Dans le cas de la conversion par concentration l'installation nécessite un mécanisme d'orientation automatique du capteur en direction du soleil, d'où un coût élevé. Ce genre d'installation ne peut être envisagée que dans le cas de très haute température, donc de grandes puissances (centrales électro-solaire) en plus, les lieux privilégiés de cette forme de conversion seront donc les régions à très fort ensoleillement.

Par contre, la conversion thermique sans concentration peut se faire à l'aide des capteurs solaires plans bien adaptés aux basses températures.

Ce genre d'installation ne nécessite aucun moyen d'orientation et le cout est modéré. L'énergie solaire convertie en énergie thermique est transmise à un fluide caloporteur dont l'énergie totale se répartie comme suit :

- Une partie sera stockée dans un réservoir calorifugé pour une utilisation à temps couvert.
- Une partie est transmise vers l'utilisation par des organes thermiques assurant le transfert de chaleur appelés "échangeurs".
- Une partie sera perdue dans le milieu environnant.

En l'absence du rayonnement solaire, le gaz est chauffé à partir de l'énergie thermique stockée. (voir Fig. I-3)

- 1 - Capteur solaire thermique
- 2 - Réservoir calorifugé
- 3 - Pompe de circulation du fluide caloporteur
- 4 - Echangeur de chaleur
- 5 - Echangeur thermique liquide-gaz (faisceaux, tubulaire).

Ce genre d'installation nécessite beaucoup d'organes (échangeur, pompe, réservoir, système de régulation, fluide caloporteur, tuyauterie etc...) et qui sont trop encombrant et pose ainsi le problème d'entretien, et de sécurité et du prix de revient.

I-8-2 Photovoltaïque : l'énergie solaire captée par des modules photovoltaïques est convertie en énergie électrique directement exploitable. Cette forme de conversion présente la solution la plus prometteuse, du point de vue pratique et une sécurité plus grande surtout en ce qui concerne les installations de chauffage de gaz inflammable dont le principe de fonctionnement est basé sur la loi de Joule.

$$P = V/R$$

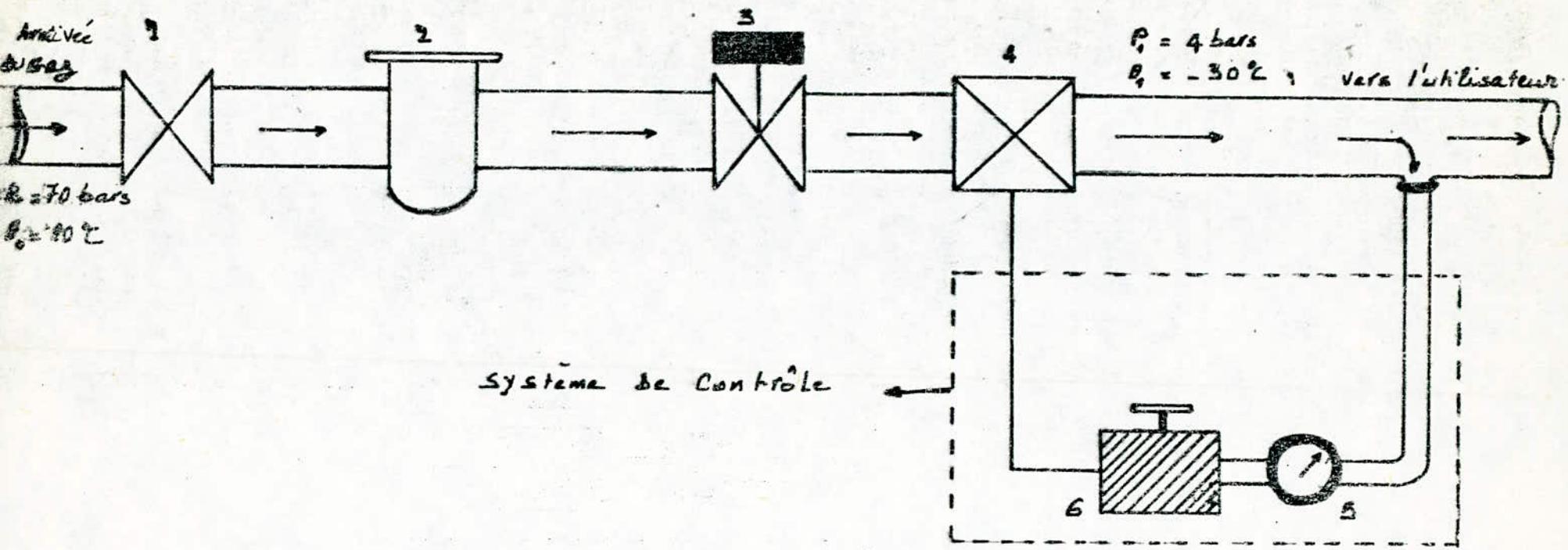


FIG. I-1

- Installation de détente -

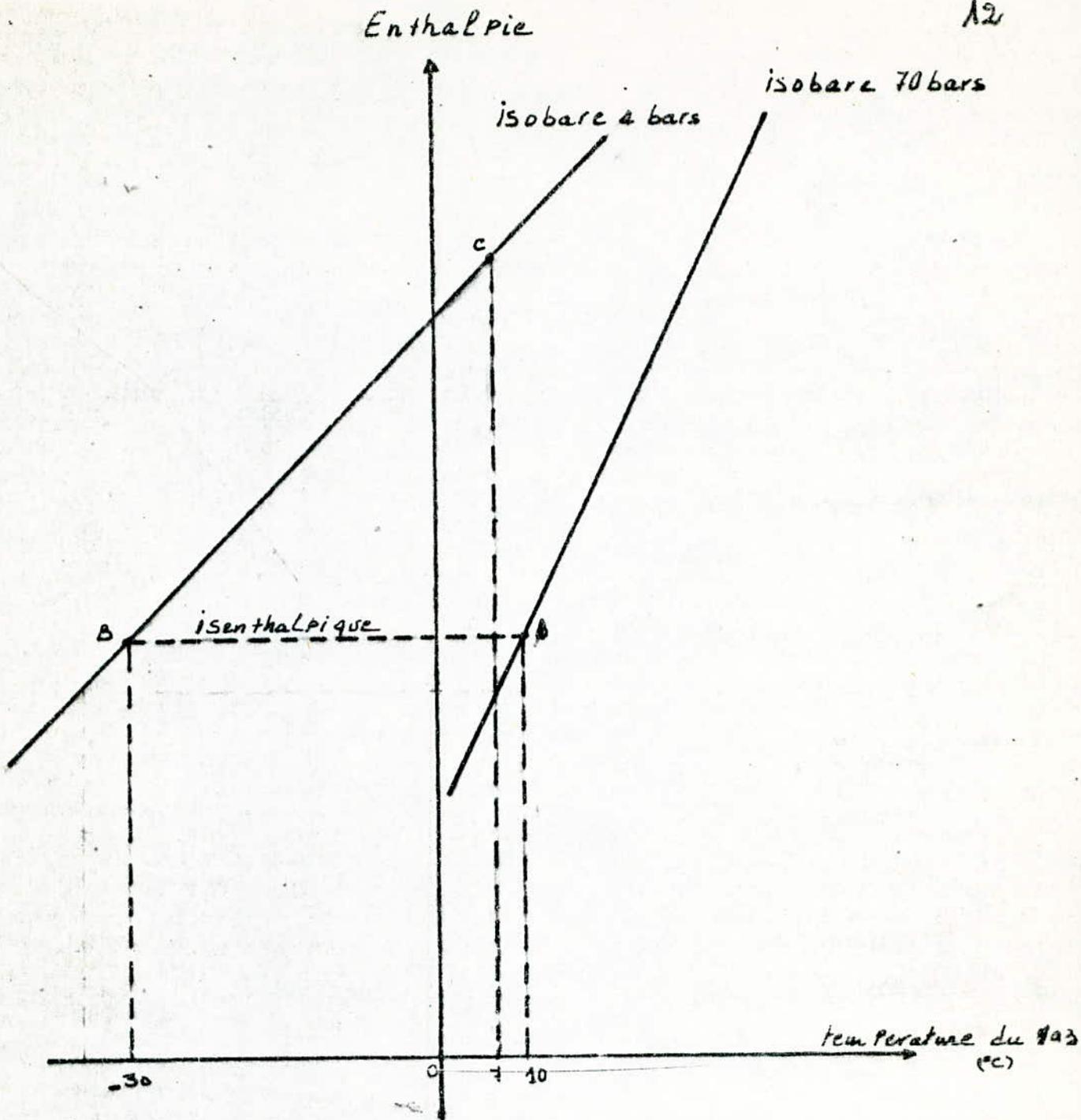


FIG I-2 "Extrait du diagramme température - Enthalpie"  
 - Du Gaz naturel -

AB. détente du gaz dans la canalisation principale.

B-C. Réchauffage du gaz au niveau du système de contrôle.

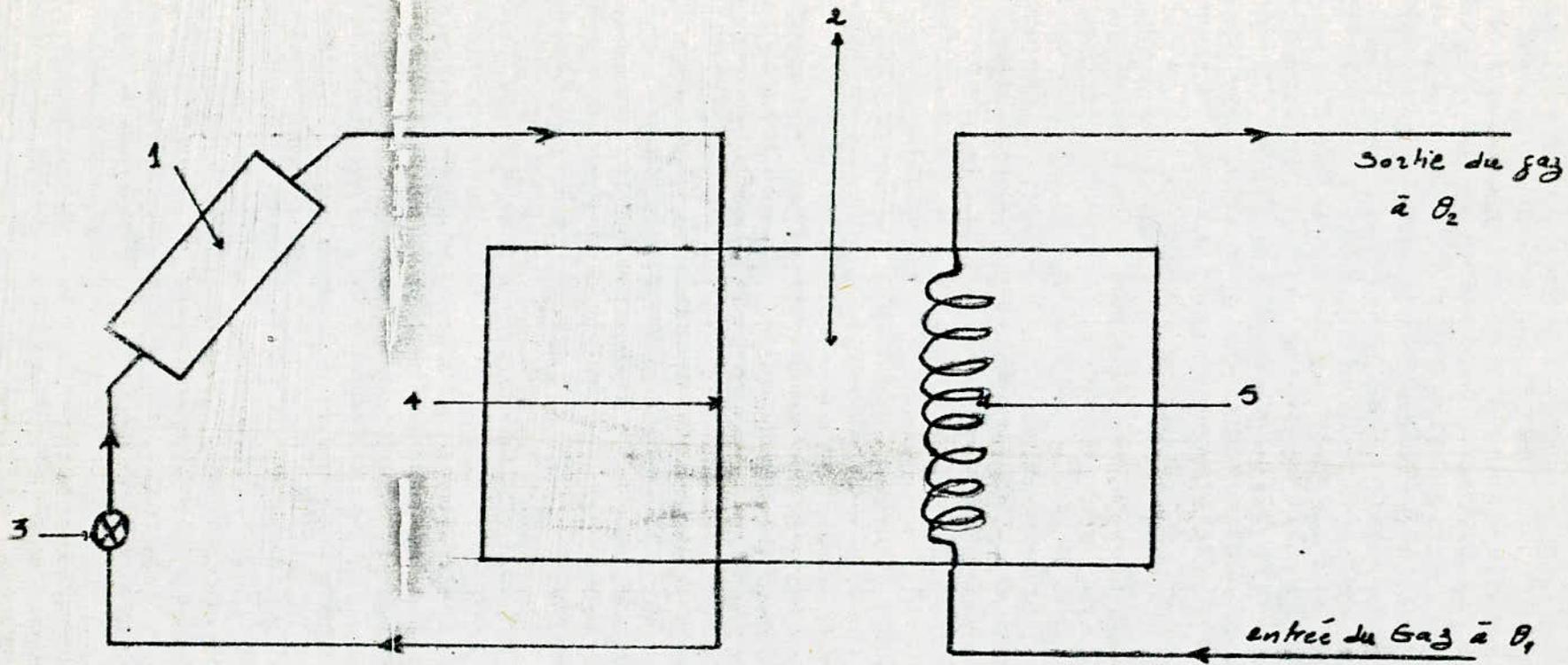


FIG. I-3. - schéma de Principe -

Les avantages principaux que peuvent présenter ce type d'installation réside essentiellement dans leur moindre encombrance et ne nécessitant pas beaucoup d'organes (capteur, fils conducteurs, résistances).

En plus, lorsqu'il s'agit d'une régulation, il est plus facile de jouer sur les paramètres électriques (courant, tension) que sur des grandeurs thermiques difficiles à contrôler, elle présente également une meilleure assurance.

Dans les <sup>deux</sup> formes de conversion, le transfert de chaleur se fait de la même manière, on peut distinguer trois grandes parties se rattachant chacune à un mode de transfert de chaleur particulier :

- 1/. Conduction : Ecoulement de la chaleur à travers un corps de la surface froide. La formule fourier donne le nombre de calories s'écoulant pendant l'unité de temps à travers une lame d'épaisseur constante et de section transversale si dans les deux faces sont en contact avec des milieux de température différents  $t_1$  et  $t_2$  avec  $t_1 > t_2$  :

$$Q = K \cdot S (t_1 - t_2)$$

où  $K$  : est le coefficient caractéristique de la matière dont est constituée la lame.

- 2/. Rayonnement : Un corps chaud émet du rayonnement thermique dont la puissance peut être mesurée par le pouvoir absorbant d'un écran. Ces rayons thermiques peuvent être réfléchis comme des rayons lumineux.

La loi de Stefan, ou loi du rayonnement du corps noir, donne la puissance  $W$  rayonnée en Watts, d'une surface radiante  $S$  en  $cm^2$  :

$$W = K \cdot S \cdot t^4$$

où  $K$  : est un coefficient thermique dont la valeur est d'environ  $6 \cdot 10^{-12}$

3/. Convection : Transmission de la chaleur par contact de la surface chaude avec un fluide air, vapeur, liquide qui s'échauffe et se déplace le long de la surface la convection augmente avec la vitesse du fluide, celle-ci peut-être naturelle ou forcée.

Une formule de Dulong indique :

$$Q_c = 0,552 .S. K (\theta - t)$$

où

C : est le nombre de calorie/heure

S : est la surface en mètre carré

$\theta$  : est la température du corps

t : est la température du fluide

K : est le coefficient thermique variable suivant la forme de la surface.

Par conséquent, la quantité de chaleur totale fournit au gaz est égale à la somme des trois modes de transfert thermique cités précédemment.

La température de sortie du gaz est proportionnelle à la quantité de chaleur dissipée par la résistance chauffante.

Afin de maintenir la température de sortie du gaz thermodynamique constante, il est nécessaire d'effectuer une régulation de cette grandeur thermique en contrôlant à tout moment la quantité de chaleur transférée au milieu chauffant ceci sera l'objet du chapitre suivant.

## C H A P I T R E II

## Etude du régulateur de température

## II - 1 Introduction

Pour obtenir les meilleurs rendements dans différents procédés de chauffage, il est essentiel de les asservir à des dispositifs de régulation, adaptés du point de vue de la précision de la stabilité et de la rapidité.

Le rôle d'un appareil de régulation est d'assurer la commande d'une grandeur de sortie à partir d'une grandeur de consigne ou de référence.

Le principe consiste à mesurer de façon continue la grandeur considérée et à la comparer à celle de la valeur de consigne. S'il y a différence entre ces deux valeurs, on effectue les modifications nécessaires pour ramener la grandeur de sortie à celle de la valeur désirée. La grandeur modifiée prend le nom de grandeur de commande.

En conséquence, un asservissement comporte deux chaînes.

## II 1 - 1 Chaîne principale (chaîne directe)

Cette chaîne est orientée de l'entrée vers la sortie par rapport au système à réguler. Elle comporte un comparateur et un contrôleur.

D'autre part, elle assure la commande lors de la variation de la charge. La puissance qu'elle lui transmet pouvant être importante, aussi on l'appelle également : chaîne de puissance.

## II 1 - 2 Chaîne secondaire (chaîne de réaction)

Cette chaîne allant du sens inverse que la chaîne principale a pour rôle de prélever à la sortie du système une puissance très faible qui permet de transmettre des informations obtenues en sortie. Cette chaîne est appelée aussi : chaîne de précision.

## II 1 - 3 Description du montage de principe du régulateur de température.

Nous considérons le montage du régulateur de température de la figure (2.1).

Un courant de gaz naturel de chaleur spécifique ( $C_p$ ), traverse une enceinte avec débit ( $\dot{M}$ ), chauffé par résistance électrique ( $R_c$ ), entre à la température ( $\theta_i$ ) et ressort à la température ( $\theta_e$ ), que l'on désire maintenir à la valeur de consigne ( $\theta_c$ ).

Nous désignons par (M) la masse équivalente en gaz de l'enceinte et de son contenu et par (Q) la qualité de chaleur fournie par la résistance chauffante dans laquelle le courant électrique peut être réglé au moyen d'un potentiomètre.

La température du gaz dans l'enceinte est captée au moyen d'une thermistance ( $R_t$ ) insérée dans le pont de WHEATSTONE dont le bras opposé contient une résistance ( $R_1$ ) variable permettant d'afficher la température désirée ( $\theta_1$ ), tandis que ( $R_2$ ) et ( $R_3$ ) sont deux autres résistances du pont, celui-ci étant alimenté sous une tension constante (E) dans la diagonale AC, nous noterons (U) la tension de déséquilibre dans la diagonale BD.

Après amplification, la tension de déséquilibre est appliquée à un servomoteur électrique qui déplace le curseur du potentiomètre.

## II - 2 Structures et hypothèses

On caractérise chaque organe du régulateur de température selon son rôle, par la fonction qu'il remplit dans le fonctionnement de l'ensemble. Le système asservi comporte essentiellement les organes suivants :

- Organe à réguler (l'enceinte du gaz)
- Organe de détection (pont)
- Organe de compensation
- Organe d'amplification.

### II-2 - 1 Etude de l'organe à réguler

Considérons la figure (2-2) ; le bilan thermique s'écrit en régime dynamique ;

$$Q \cdot dt = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot dt + M \cdot d\theta_2 \quad (2-1)$$

où  $\dot{m}$  et  $C_p$  sont le débit et la capacité calorifique du gaz entrant à  $\theta_1$  C° et sortant à  $\theta_2$  C°, M étant la masse équivalente en gaz de l'enceinte et de son contenu.

En divisant les deux membres de l'équation (2-1) par dt et en remplaçant d/dt par l'opérateur Laplacien P on a :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\theta_2 - \theta_1) + M \cdot P \cdot \theta_2 \quad (2-2)$$

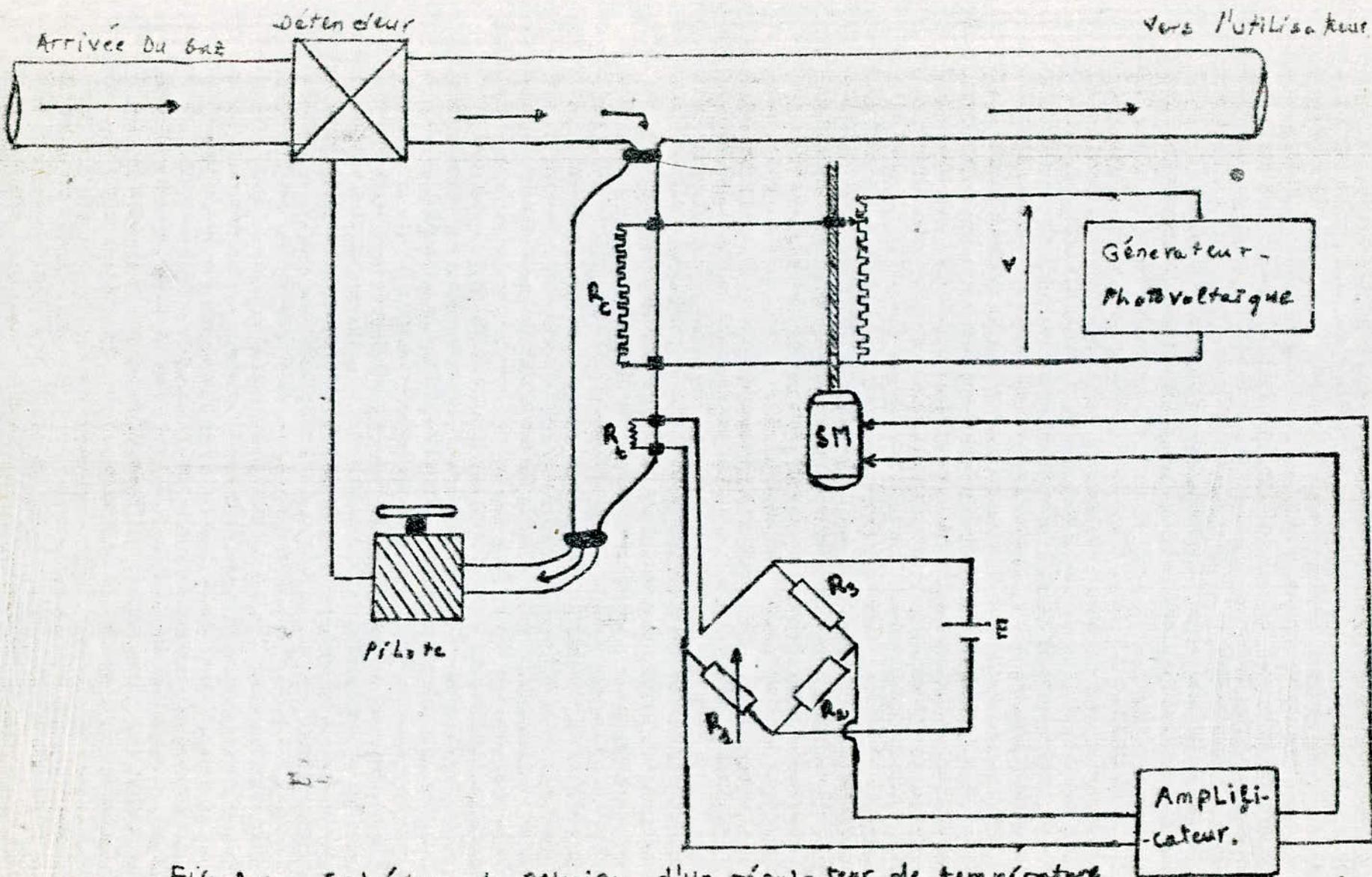


FIG 2-1 Schéma de principe d'un régulateur de température

Nous considérons que la quantité de chaleur ( $Q$ ) cédée par la résistance chauffante ( $R_c$ ) comme une grandeur d'entrée, et ( $\theta_2$ ) comme une grandeur de sortie, ( $\dot{m}$ ) et ( $\theta_1$ ) sont considérées comme des perturbations.

a / Linéarisation mathématique du système autour d'un point de fonctionnement.

Nous considérons un point de fonctionnement ( $Q_0$ ), défini par les valeurs  $\dot{m}_0$ ,  $\theta_{10}$ ,  $\theta_{20}$ .

Définissons alors les variables différentielles telles que :

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 + q \\ \dot{m} &= \dot{m}_0 + d \\ \theta_1 &= \theta_{10} + \theta_z \\ \theta_2 &= \theta_{20} + \theta_s \end{aligned}$$

Nous considérons les produits  $d \cdot \theta_z$  et  $d \cdot \theta_s$  comme les quantités infiniment petites.

Nous remplaçons les quantités différentielles dans l'équation (2-2) nous obtenons ainsi :

$$q = \dot{m}_0 \cdot C_p \cdot (\theta_s - \theta_z) + M \cdot P \cdot \theta_s + d \cdot C_p \cdot (\theta_{20} - \theta_{10}) \quad (2-3)$$

Cette équation linéarisée se traduit par le schéma fonctionnel de la figure (2-3).

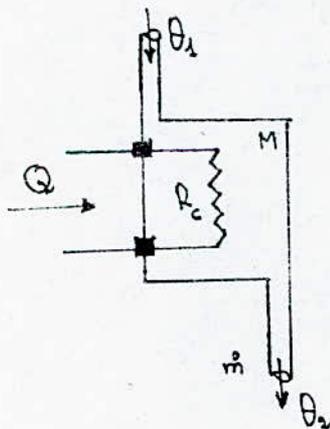


fig 2-2

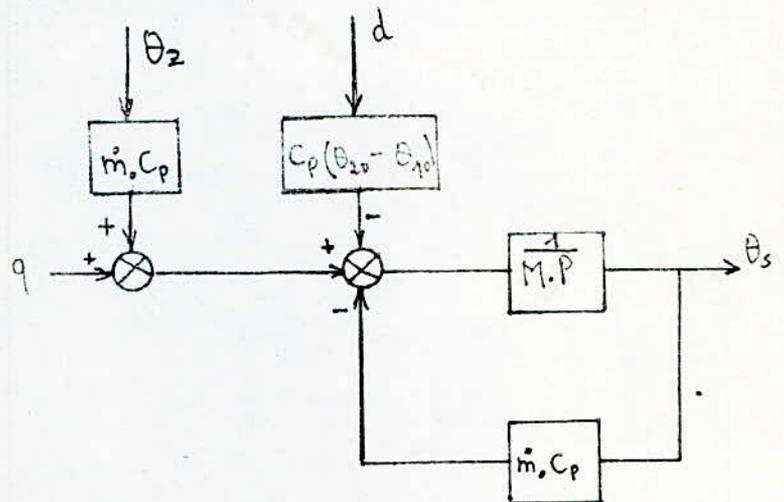


fig 2-3

## II-2 - 2 L'organe comparateur ou détecteur d'erreur :

C'est l'organe qui fait la jonction de la branche de retour avec la branche directe. Voir figure (2 - 9)

Le détecteur ne mesure pas exactement la sortie pour la comparer à l'entrée, il faut tenir compte du fait que la mesure de la sortie est modifiée par une certaine fonction de transfert qui caractérise le capteur.

### a/ Capteur de température (les thermistances)

Parmi les capteurs de température qu'on rencontre souvent, on peut citer les thermistances, parmi lesquelles citons celles appelées C T N et qui ont un coefficient de température négatif c'est-à-dire leurs résistances diminuent quand la température augmente voir figure (2-4). Les matériaux utilisés pour leurs fabrications sont des céramiques principalement à base d'oxyde de métaux. D'autres thermistances dites C T P et qui ont coefficient de température positif, présentent une anomalie qui se traduit par une augmentation brutale de la résistance à partir d'une certaine température. Nous nous intéressons dans notre cas aux thermistances du premier type (CTN) car elles sont plus fiables et précises et se présentent sous des formes facilement adaptables aux divers cas de mesure.

### b/ Mesure des températures par thermistances CTN :

La loi de variation de la résistance en fonction de la température est donnée par la formule :

$$R(T) = R_0 \text{ Exp} \left( B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (2-4)$$

où  $R_0$  : est la résistance à une température de référence  $T_0$  (en général  $T_0 = 298 \text{ K}^\circ$  soit  $25^\circ\text{C}$ ), on trouve couramment des thermistances pour lesquelles les résistances s'échelonnent sur la gamme allant de  $100 \Omega$  à  $100 \text{ k}\Omega$

où  $B$  : est le paramètre de sensibilité en température caractéristique du matériau constituant la thermistance exprimé en  $^\circ\text{Kelvin}$ , en général compris entre  $3300 \text{ }^\circ\text{K} - 4500 \text{ }^\circ\text{K}$ .

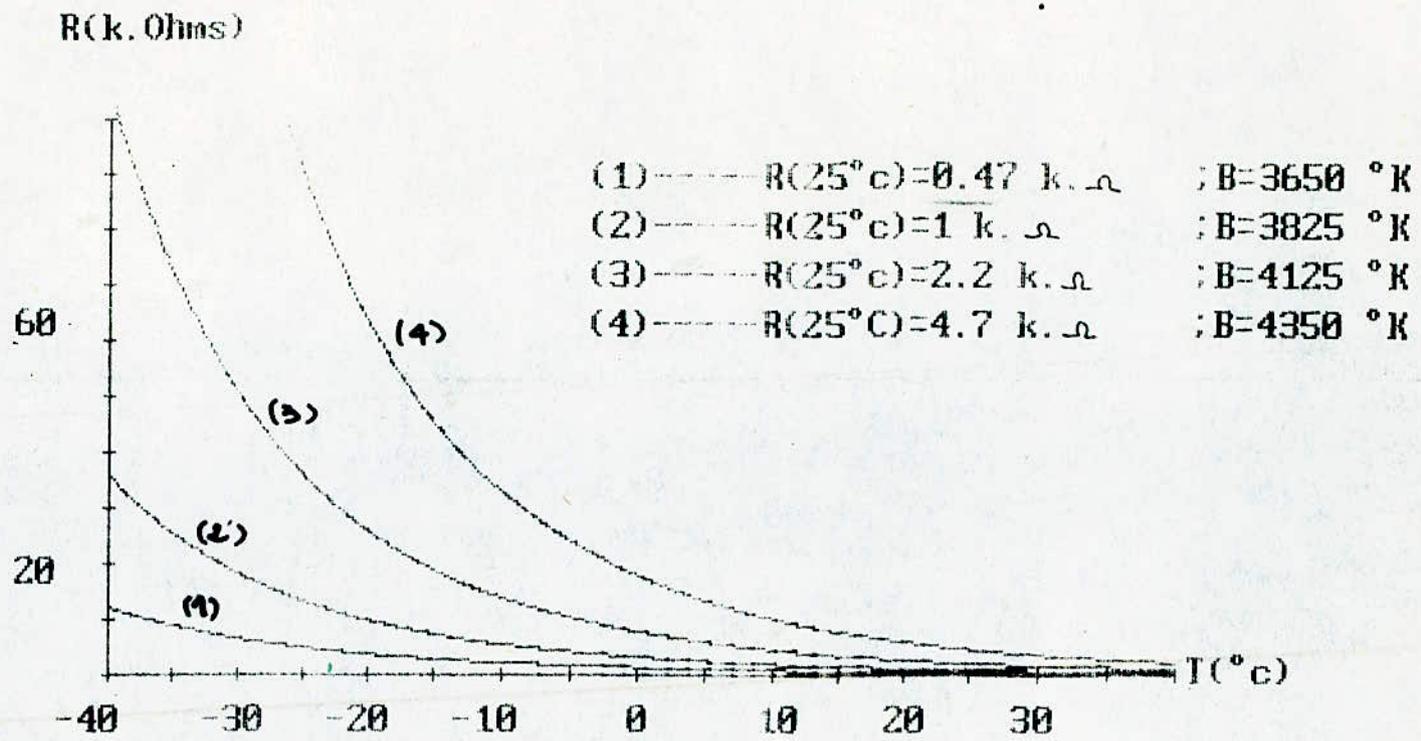


FIG 2-4 Caracteristiques Des Thermistances ( C T N )

Par dérivation de l'équation (2-4), on peut tirer le coefficient de température :

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} = \frac{-B}{T^2}$$

$\alpha$  : s'exprime en % °C, est diminué en valeur absolue en fonction de la température.

L'indice B n'est pas tout à fait constant en fonction de la température, et la courbe de variation réelle de la résistance s'écarte de la courbe calculée.

En général, pour des intervalles de températures inférieurs à 50°C les écarts entre les deux courbes n'excèdent pas 0,3 °C.

Une thermistance est de plus spécifiée par sa constante de temps et par son facteur de dissipation thermique.

c/ Schéma bloqué de la thermistance :

Soient (P) la variation d'énergie de la thermistance, ( $\delta$ ) le facteur de dissipation thermique exprimé en (W/°C), (C) sa capacité calorifique exprimée en (j/°C).

Nous supposons qu'après une brusque variation de la température du milieu  $\theta_2$ , on obtiendra la réponse de la thermistance  $\theta$  à l'instant t en écrivant que pour tout intervalle de temps dt, la variation d'énergie de l'ensemble est nulle.

Le bilan thermique se traduit par l'équation (2-5)

$$P = C d\theta + (\theta - \theta_2) \delta dt \quad (2 - 5)$$

Le schéma bloc de la thermistance est de la forme :

$$F(P) = \frac{\theta}{\theta_2} = \frac{1}{1 + T_2 \cdot P} \quad \text{avec} \quad T_2 = \frac{C}{\delta}$$

$T_2$  : représente la constante de temps de thermistance.

En général, le fabricant indique la valeur de la constante de temps dans l'air calme.

En pratique, le temps de réponse sera différent de la constante de temps ainsi définie car le milieu n'est pas toujours l'air calme.

Dans notre étude, on choisit le modèle perle enrobée sous verre avec une constante de temps dans l'air calme est de 2 secondes, avec un facteur de dissipation thermique  $0,2 \text{ m w/}^\circ\text{C}$ .

On suppose que la constante de temps de cette thermistance varie très peu d'un milieu à un autre, et sa résistance varie linéairement avec la température dans un intervalle de  $10^\circ\text{C}$ .

d/ Sensibilité du pont :

Nous utilisons alors la thermistance CTN dans le pont de Wheatstone voir figure (2-5).

On sait d'abord, que l'équilibre est réalisé à  $U = 0$  lorsque se trouve respectée la condition :

$$\frac{R_T}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$$

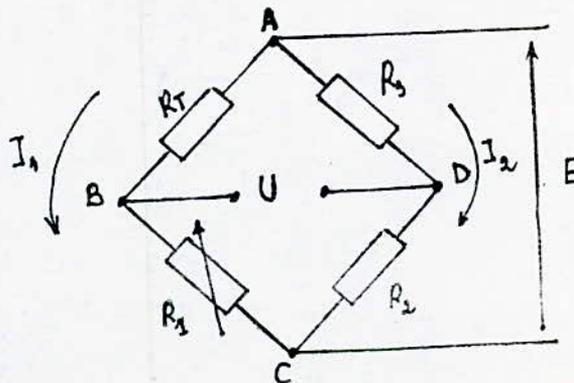


fig 2-5

Le principal problème qui nous intéresse est celui de la sensibilité, qui conditionnent les variations de U en fonction de celles de  $R_t$ .

En supposant que  $R_t$  varie de  $\Delta R_t$ , calculons la variation correspondante  $\Delta U$  dans la diagonale BD, supposée non chargée c'est-à-dire dans laquelle il ne passe aucun courant, on écrit :

$$R_t + \Delta R_t = (1 + \alpha) R_t$$

Dans la branche ABC, l'intensité a pour valeur :

$$I_1 = \frac{E}{R_t (1 + \alpha) + R_1} \quad (2-6)$$

Dans la branche ADC, l'intensité a pour valeur :

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3} \quad (2-7)$$

La variation  $\Delta U$  devient :

$$\Delta U = R_t (\alpha + 1) I_1 - R_3 I_2 \quad (2-8)$$

En développant les calculs après avoir remplacé les équations (2-6) et (2-7) dans l'équation (2-8)

On trouve finalement :

$$\Delta U = \frac{\alpha \cdot R_2 \cdot R_t}{E \left( R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_t + R_3 \cdot R_t + \alpha (R_2 \cdot R_t + R_3 \cdot R_t) \right)}$$

En divisant haut et bas par  $R_1 \cdot R_2$ , et en posant :

$$\frac{R_t}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = X$$

Puis en tenant compte du fait que  $\alpha$  est petit devant l'unité, peut être négligée, il vient :

$$\frac{\Delta U}{E} \approx \frac{\alpha \cdot X}{X^2 + 2X + 1} \quad (2-9)$$

Cette quantité passe par un maximum quand sa dérivée s'annule, ce qui donne  $x = 1$ , donc :

$$R_T = R_1 \text{ et } R_3 = R_2$$

Ceci représente la condition sensibilité maximale du pont.

Conclusion : Le choix de  $R_1$  dépend du domaine de variation de  $R_t$ .

II-2-3 Organe d'exécution (servo-moteur)

On prendra dans notre étude, un moteur à courant continu à aimant permanent, de faible puissance.

L'arbre du moteur est solidaire à une vis qui fait déplacer une table par l'intermédiaire d'un écrou selon une coordonnée unique  $x$ , voir figure (2-6 -a)

a / Avantage de ces moteurs :

Les avantages que présente ce genre de moteur sont :

- L'excitation ne nécessite pas une source d'alimentation extérieure.
- Leur flux ne dépend que très peu de la température du moteur.
- Stabilité des caractéristiques de sortie
- Grande rapidité de réponse.

b / Caractéristiques dynamiques du moteur :

Tout d'abord on admet que le circuit magnétique est non saturé et que la réaction d'induit n'est pas prise en considération.

En régime variable, on doit tenir compte non seulement de la résistance  $R_a$  de l'induit, mais aussi de son inductance  $L_a$ , aussi a-t-on en valeurs instantanées deux relations qui concernent respectivement les parties électriques et mécaniques du système soit :

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E, \text{ avec } E = K_e \omega$$

$$\Gamma_m = K_e i_a = \Gamma_r + f \omega + j d\omega/dt$$

où  $f$ ,  $j$  sont, le coefficient de frottement visqueux, et le moment d'inertie  $I$  du moteur et les organes qu'il entraîne.

La fonction de transfert relative à l'entrée principale est obtenue à partir du schéma bloc de la figure (2 - 6 - b), il vient :

$$H_1(P) = \frac{\Omega}{VA} = \frac{K_m}{1 + T_m P}$$

Si l'on pose :

$$K_m = \frac{K_e R_a}{f + K_e^2 / R_a}, \quad T_m = \frac{R_a \cdot j}{K_e^2 + R_a \cdot f}$$

Dans la pratique  $\frac{K_e^2}{R_a} \gg f$  ainsi on aura :

$$K_m = \frac{1}{K_e} \quad \text{et} \quad T_m = R_a \cdot j / K_e$$

La fonction de transfert du déplacement de la table entraîné par le moteur au moyen d'une vis et d'un écrou est donné par :

$$H(P) = \frac{K_m \cdot K_{dep}}{p(1 + T_m P)}$$

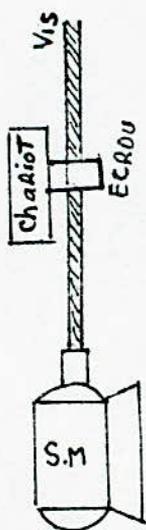


fig 2-6-a

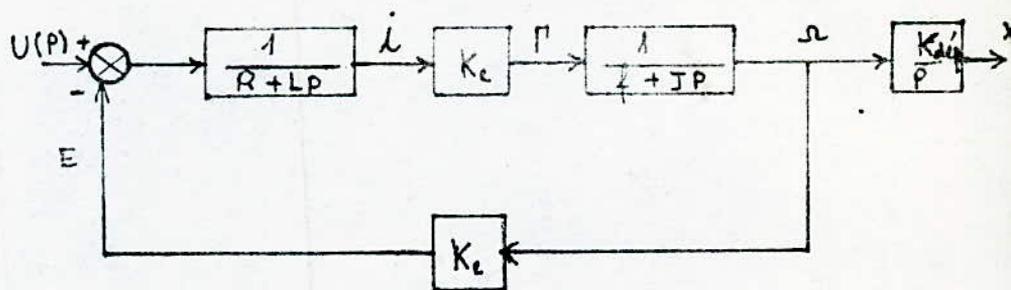


fig 2-6-b

Avant d'entamer les autres paragraphes faisons à priori les hypothèses suivantes :

- 1 - La température du gaz à l'intérieur de l'enceinte est uniformément répartie, l'enceinte est parfaitement calorifugée.
- 2 - La résistance de la thermistance varie linéairement avec la température dans un intervalle de 10 °C.
- 3 - La position du curseur du potentiomètre est proportionnelle à l'intégrale de l'erreur :

$$x = K \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau$$

On néglige les effets d'inertie du moteur, on suppose que sa vitesse est proportionnelle à la tension appliquée.

La variation de la quantité de chaleur Q est proportionnelle au déplacement du curseur, pour cela on choisit un potentiomètre tel que : le déplacement est proportionnel au carré de la résistance Rx.

II - 3 Schéma bloc du régulateur de température :

Ainsi, tenant compte des transmittances élémentaires des différents organes du montage de principe figure (2 - 1) et des hypothèses précédentes ; on est alors conduit au schéma fonctionnel de la figure (2 - 9) représentant les grandeurs de l'entrée et de sortie, ainsi que l'erreur, ou plus exactement leurs variations autour de régime établi.

La principale perturbation est constituée par les fluctuations de la température autour du point θ10 elle peut être interprétée sur le schéma fonctionnel par une variation proportionnelle dans le rapport est m° cp, supposant que cette perturbation apportera un certain nombre de frigories, il en résultera une diminution de la température de sortie, qui entrainera un accroissement de la quantité de chaleur due à celle qui résulte de l'amplification de l'erreur.

### II-3-1 Fonctions de transfert du système :

Comme on a à faire à un système linéaire qui est sollicité par deux excitations indépendantes, on peut remplacer le schéma général par deux schémas particuliers, qui intéressent l'un ou l'autre de ces deux signaux.

a/ Le signal d'entrée (avec  $\theta_z = 0$ )

Le schéma comme l'indique la figure (2 - 9 - a) comporte deux blocs en cascade sur la chaîne directe, et un bloc de retour.

- Blocs sur la chaîne principale :

$$K_2 \cdot G_2(P) = \frac{1/m^0 c_p}{1 + T_1 P} \quad \text{avec} \quad T_1 = \frac{M}{m \cdot c_p} ; \quad K_2 = 1/m \cdot c_p$$

$$K_1 \cdot G_1(P) = \frac{K_1}{P} \quad \text{avec} \quad K_1 = A \cdot k_{\text{pont}} \cdot K_m \cdot K_{\text{dep}} \cdot K_{\text{pot}}$$

Où :

$K_1$  est le gain astatique du contrôleur.

- Bloc de retour :

$$F(P) = \frac{1}{1 + T_2 P} \quad \text{avec} \quad T_2 = \frac{C}{\delta}$$

En débranchant du comparateur la chaîne de retour on en déduit la transmittance en chaîne ouverte :

$$KGF = K_1 \cdot G_1 \cdot K_2 \cdot G_2 \cdot F$$

$$KGF = K$$

$$P(1 + T_1 P)(1 + T_2 P)$$

Connaissant la transmittance en chaîne-ouverte, il est possible de calculer les transmittances en chaîne fermée, ainsi que la fonction de transfert écart/entrée.

On trouve :

$$W1(P) = \frac{\theta_s(P)}{\theta_e(P)} = \frac{K(1 + T2P)}{P(1 + T1P)(1 + T2P) + K}$$

$$W2(P) = \frac{\xi(P)}{\theta_e(P)} = \frac{P(1 + T1P)(1 + T2P)}{P(1 + T1P)(1 + T2P) + K}$$

b/ Le signal de perturbation (avec  $\theta_e = 0$ )

Le schéma de la figure (2.9) se transforme à un système à deux blocs, l'un monté sur la chaîne principale, dans la fonction  $K2 G2 (P)$ , l'autre sur la chaîne de retour, dans fonction de transfert  $K1 G1 F$ , comme le montre la figure (2 - 9.b).

Il est commode de calculer les transmittances. Sortie/perturbation ainsi que, l'erreur/perturbation.

on trouve :

$$W3 = \frac{\theta_s(P)}{\theta_z(P)} = \frac{P(1 + T2P)}{P(1 + T1P)(1 + T2P) + K}$$

$$W4 = \frac{\xi(P)}{\theta_z(P)} = \frac{P}{P(1 + T1P)(1 + T2P) + K}$$

Remarque : toutes les fonctions de transfert calculées ont la même équation caractéristique.

$$P(1 + T1P)(1 + T2P) + K = 0$$

Cette propriété peut être interprétée comme suit :

Quand un système à retour est soumis à une perturbation sa réaction est celle de l'ensemble, le système met en jeu tous ses organes combinés dans l'équation caractéristique.

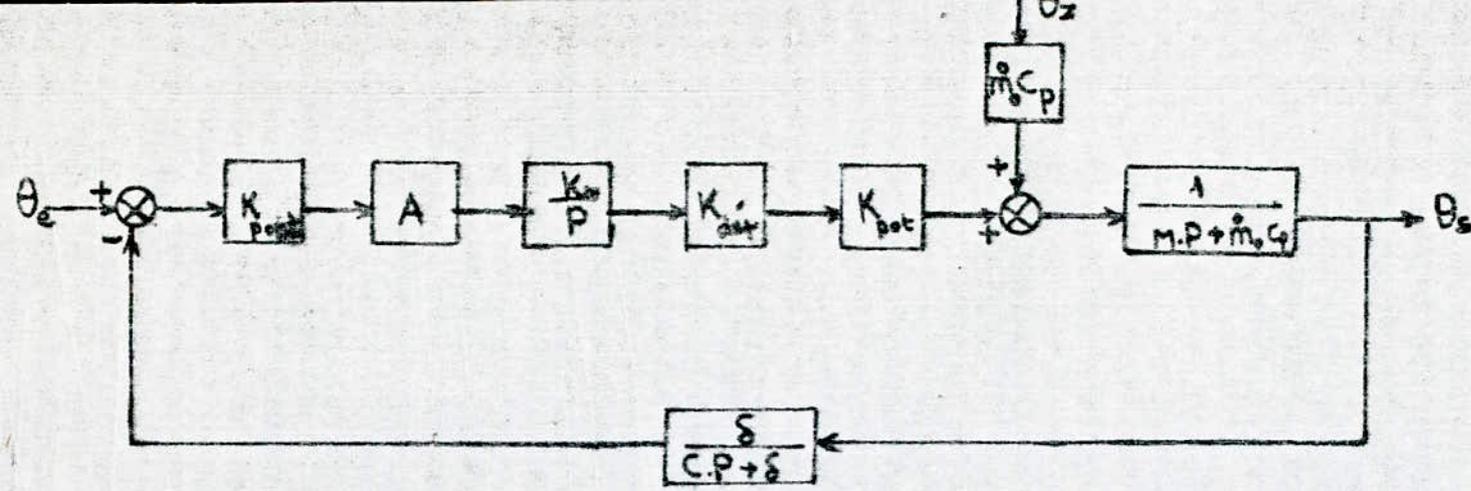


fig 2-9

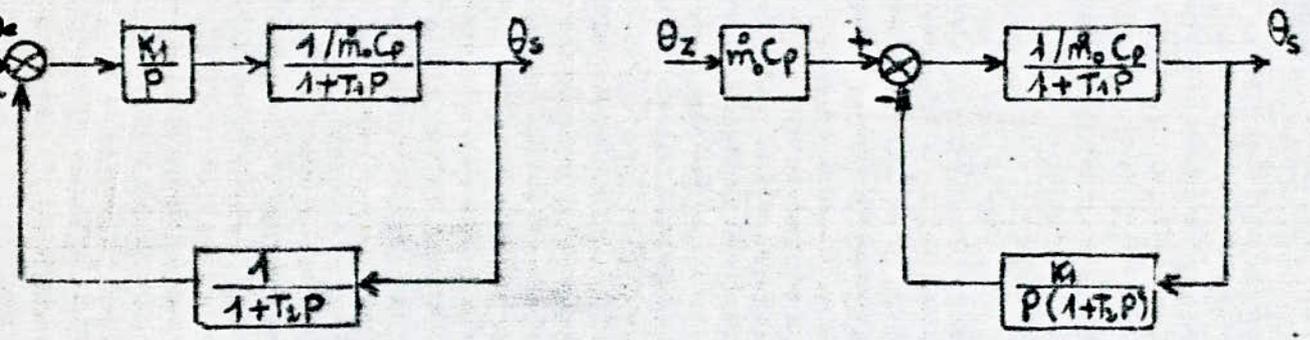


fig 2-9, b

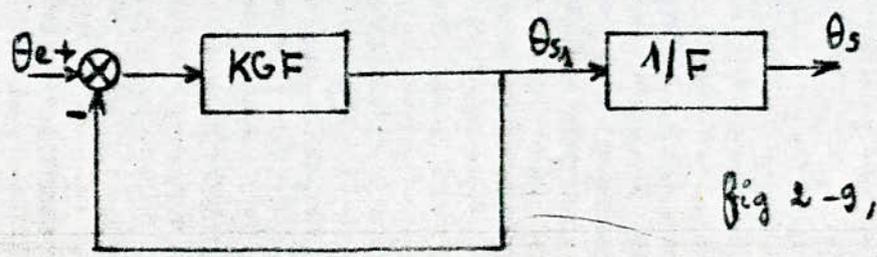


fig 2-9, c

Schémas blocs du Régulateur de température

### II-3- 2 Comportement du système en régime définitif :

quand un système asservi, supposé stable est soumis à une entrée de la forme parfaitement définie (échelon, rampe), le régime définitif de la sortie peut comporter ou non une erreur.

Le tableau de la figure (2.10) illustre le comportement du système en régime définitif, l'erreur dépend non seulement des éléments de chaîne, mais aussi de la nature des signaux.

$\theta_e(t)$	$\theta_r(t)$	$\theta_s(t)$	$E(t)$
$X_0 \mu(t)$	0	$X_0$	0
$X_1 t \mu(t)$	0	$X_1 t$	$X_1 / K$
$\delta(t)$	0	0	0
0	$X'_0 \mu(t)$	0	0
0	$X'_1 t \mu(t)$	$X'_1 t$	$-X'_1 / K$
0	$\delta(t)$	0	0

fig 2-10

#### Conclusion :

L'erreur de position est nulle, mais l'erreur de trainage finie (inversement proportionnelle à la valeur du gain.

- Le système est moins sensible aux perturbations, que son gain en boucle ouverte est élevé.

Ces résultats seront confirmés par le calcul des régimes transitoires, après avoir étudié le système photovoltaïque d'alimentation de la résistance chauffante au chapitre suivant.

## C H A P I T R E    I I I

## COUPLAGE ET ADAPTATION DU SYSTEME

## PHOTOVOLTAIQUE - THERMODYNAMIQUE

Le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et la charge est caractérisé par le point de fonctionnement. Un générateur photovoltaïque impose certaines règles au système quelque soit son utilisation, ceci nous amène à étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport à la charge et aux conditions climatiques du site .

## III - 1 - Caractéristique fondamentale (I-V) :

Cette caractéristique traduit la variation du courant en fonction de la tension aux bornes de la charge quand le rayonnement et la température ambiante sont maintenus constantes.

L'intersection entre la droite de charge, de pente  $1/R$ , est la caractéristique courant-tension correspond au point de fonctionnement du système photovoltaïque (figure III -1).

Pour un ensoleillement et une température ambiante constant, on constate qu'aux faibles valeurs de la résistance le point de fonctionnement décrit une partie de la caractéristique sensiblement parallèle à l'axe des tensions, le générateur photovoltaïque se comporte alors comme générateur à courant constant (droite correspondante à  $R1$  sur la courbe III - 1) ; par contre aux valeurs de plus en plus élevées de la résistance, le générateur s'apparente à un générateur à tension constant (c'est le cas de la droite  $1/R2$ ).

Au voisinage du point sur la caractéristique où la puissance délivrée à la charge est maximale, le générateur photovoltaïque ne peut s'assimiler à aucun des deux cas précédents.

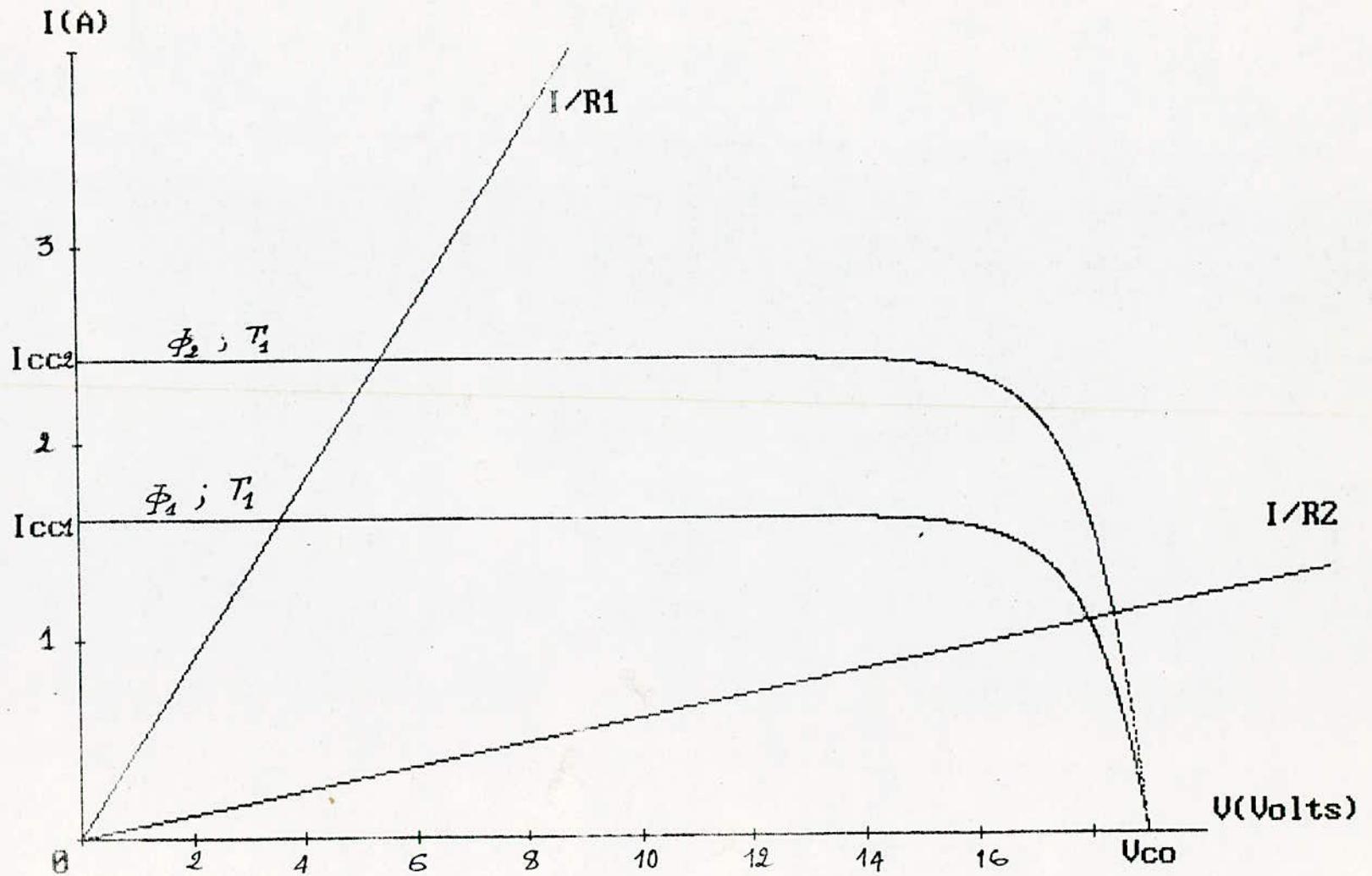


FIG. III -1- \*\*CARACTERISTIQUE FONDAMENTALE D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE\*\*

Quand le rayonnement solaire augmente de  $\phi_1$  à  $\phi_2$  le courant de court-circuit est proportionnel à celui-ci.

Quand à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  elle est théoriquement constante, de ce fait le point de fonctionnement ne demeure plus constant ce qui entraîne ainsi la variation de la puissance transférée à la charge. Néanmoins cette variation peut être importante quand le générateur opère sur la partie parallèle à l'axe des tensions, et de plus en plus négligeable quand le système photovoltaïque fonctionne en générateur de tension constante.

Ainsi la puissance fournie par un générateur photovoltaïque dépend non seulement de la charge mais aussi des paramètres climatiques ou site, essentiellement, le flux solaire.

### III-2 - Optimisation de l'orientation du capteur :

La captation de l'énergie solaire à l'aide des panneaux peut se faire selon trois procédés principaux :

- a/- Le système d'orientation automatique, permettant de positionner le panneau, à chaque moment, normalement aux rayons solaires incidents, l'inconvénient réside dans la consommation du dispositif d'asservissement une partie de l'énergie produite et le prix de revient du système de poursuite solaire.
- b/ L'orientation manuelle du capteur à chaque saison vers une direction où l'intensité du rayonnement serait maximale.
- c/ L'utilisation la plus simple consiste à orienter définitivement les panneaux vers une direction pour laquelle l'énergie moyenne collectée durant l'année est maximale. Ce procédé ne nécessite aucune intervention manuelle ou automatique, et l'énergie captée quotidiennement ne s'écarte pas trop de sa valeur moyenne annuelle, généralement l'orientation du capteur est à peu près la même que la latitude du lieu.

Les courbes théoriques qui traduisent la variation de  $E_j/e_0$  pour différentes orientations  $\theta$  du capteur sont représentées en annexe :

Où

$E_j$  : est l'énergie captée journalière avec une orientation  $\hat{\theta}$  du capteur durant l'année.

$E^0$  : est l'énergie reçue par un capteur plan horizontal.

On constate que les fluctuations d'énergie sont minimales pour une orientation du capteur  $\hat{\theta} = 37^\circ$  et elles sont maximales pour  $\hat{\theta} = 90^\circ$ , (concernant la région d'Alger).

Enfin la caractéristique pour  $\hat{\theta} = 37^\circ$  est mieux exploitable du point de vue stockage et orientation définitif optimal.

### III 3 - Exploitation des données météorologiques mesurées à la station de Bouzaréah (ALGER) :

Les données du rayonnement solaire global des trois années consécutives 1980, 1981 et 1982 enregistrée à la station de Bouzaréah ont été traduite sous forme de courbes en moyennes décadaires, mensuelles et annuelles (voir figure III-3-a, III-3-b, III-3-c en annexe).

Les courbes moyennes décadaires nous permettent d'apprécier les fluctuations mensuelles. L'énergie moyenne captée par un panneau orientée de  $\theta = 37^\circ$  par rapport à l'horizontale sont respectivement les suivantes :

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 522 \text{ W/m}^2 \text{ - fig (III - 3-a)} \\ \Phi_2 &= 553 \text{ W/m}^2 \text{ - fig (III - 3-b)} \\ \Phi_3 &= 443 \text{ W/m}^2 \text{ - fig (III - 3-c)} \end{aligned}$$

Pour la suite de notre calcul concernant le dimensionnement du générateur photovoltaïque on prendra une valeur moyenne égale à 500 W/m<sup>2</sup>.

### III- 4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Cette opération est très importante étant donné le prix élevé des photopiles.

L'estimation du nombre optimal des panneaux nécessaires à l'installation de chauffage nécessite la connaissance de la quantité de chaleur maximale qui doit être fournie au système thermodynamique.

Données de l'installation :

soient :

$m_g$  : le débit du gaz à l'entrée du système de contrôle  
Kg/s

$C_p$  : Chaleur calorifique du gaz naturel

$\theta_1$  : Température d'entrée du gaz °C

$\theta_2$  : Température de sortie du gaz °C

$\theta_1 \text{ max}$  : Température maximale d'entrée du gaz °C

$M$  : Masse équivalente en fluide.

La quantité de chaleur maximale nécessaire pour augmenter la température du gaz à  $\theta_2$  est proportionnelle au débit du gaz, à son accroissement de la température et à la chaleur calorifique du gaz :

$$Q \text{ max} = m_g \cdot c_p (\theta_2 - \theta_1 \text{ max})$$

- Application numérique :

$$m_g = 0.0077 \text{ kg/s} ; \theta_1 \text{ max} = -31^\circ\text{C}$$

$$C_p = 1960 \text{ j/kg} \cdot ^\circ\text{C} ; \theta_2 = 7^\circ\text{C}$$

$$\theta_1 = -30^\circ\text{C} ; M = 45 \text{ j/C}^\circ$$

D'où :

$$Q \text{ max} = 573,5 \text{ Watts}$$

Ainsi le nombre nécessaire à l'installation est donné par l'équation suivante :

$$N = \frac{Q \text{ max}}{\eta \cdot S \cdot \Phi_{\text{moy}} \cdot \eta_p}$$

où

$n$  : est le nombre des cellules constituant le module photovoltaïques (Arco-solar).

S : La surface d'une seule cellule

$\Phi_{\text{moy.}}$  : le flux solaire moyen

$\eta_p$  : Rendement de conversion du module photovoltaïque.

Application numérique :

n : 36 cellules ;  $\Phi_{\text{moy.}}$  = 500 Watts/m<sup>2</sup>

S : 90,25. 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> ;  $\eta_p$  = 13 %

D'où le nombre des panneaux est ; N = 27 panneaux.

### III-5 Type de couplage des panneaux :

Le choix du mode de couplage des panneaux dans un générateur photovoltaïque dépend des exigences et les besoins spécifiques de la charge. Généralement on utilise un couplage mixte pour éviter de fortes tensions quand ils sont couplés en série, et de forte intensité quand le couplage est en parallèle.

Dans notre cas, deux combinaisons peuvent se présenter :

soit :

a/- 3 panneaux en série avec 9 branches en parallèle

ou

b/- 9 panneaux en série avec 3 branches en parallèle.

Pour cette raison on est amené à analyser la sensibilité de la puissance fournie sous l'influence de la variation de la résistance chauffante.

#### - Résultats et interprétation :

En analysant les courbes (III-5-a) et (III-5-b) traduisant la variation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de la résistance pour les deux modes de couplage.

On constate que pour un ensoleillement donné dans le cas de 3 panneaux en série et 9 en parallèles (courbe III-5a), une faible variation de la résistance provoque une variation importante de la puissance.

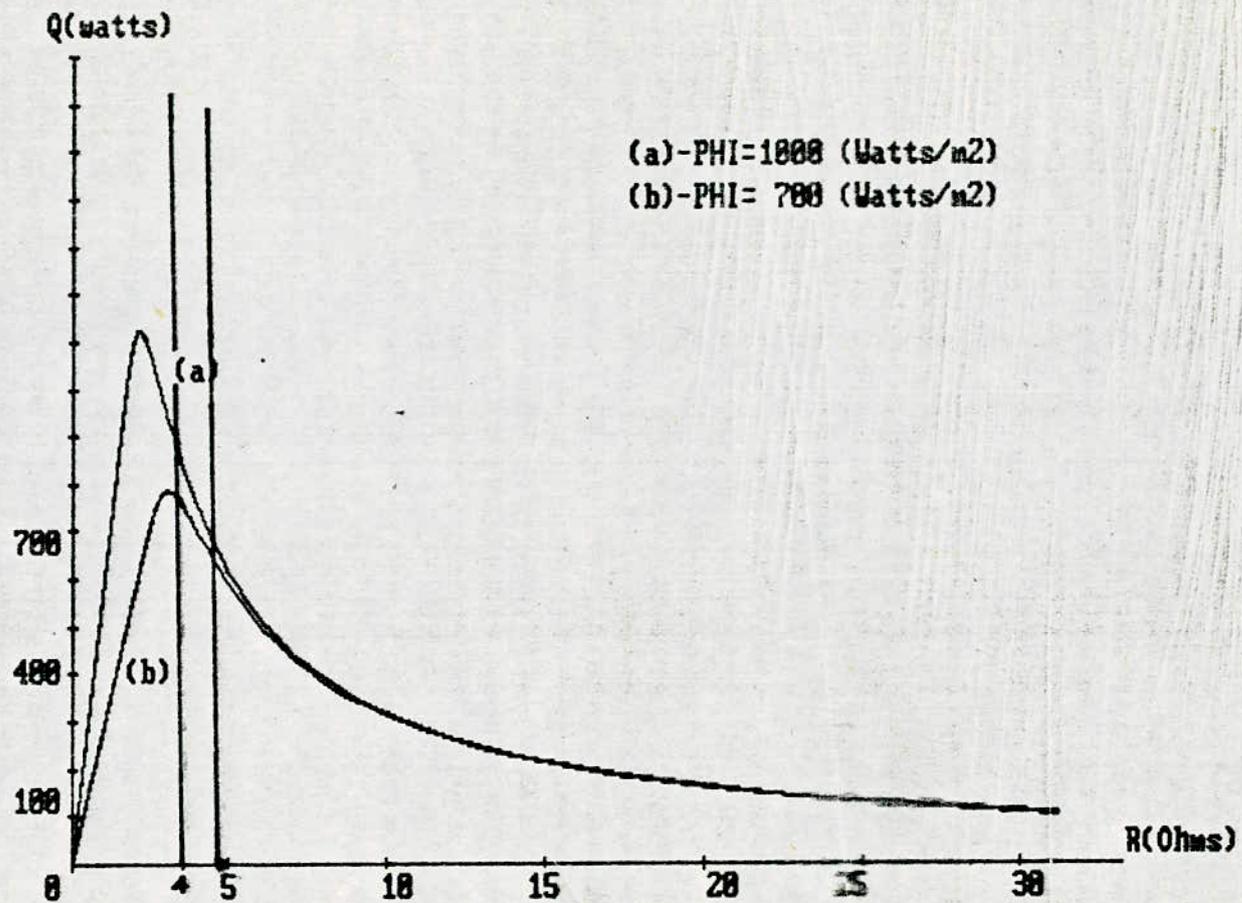


FIG - III - 5-a

$Q = f(R)$

Type de Couplage : 3 panneaux en série et 9 en parallèles

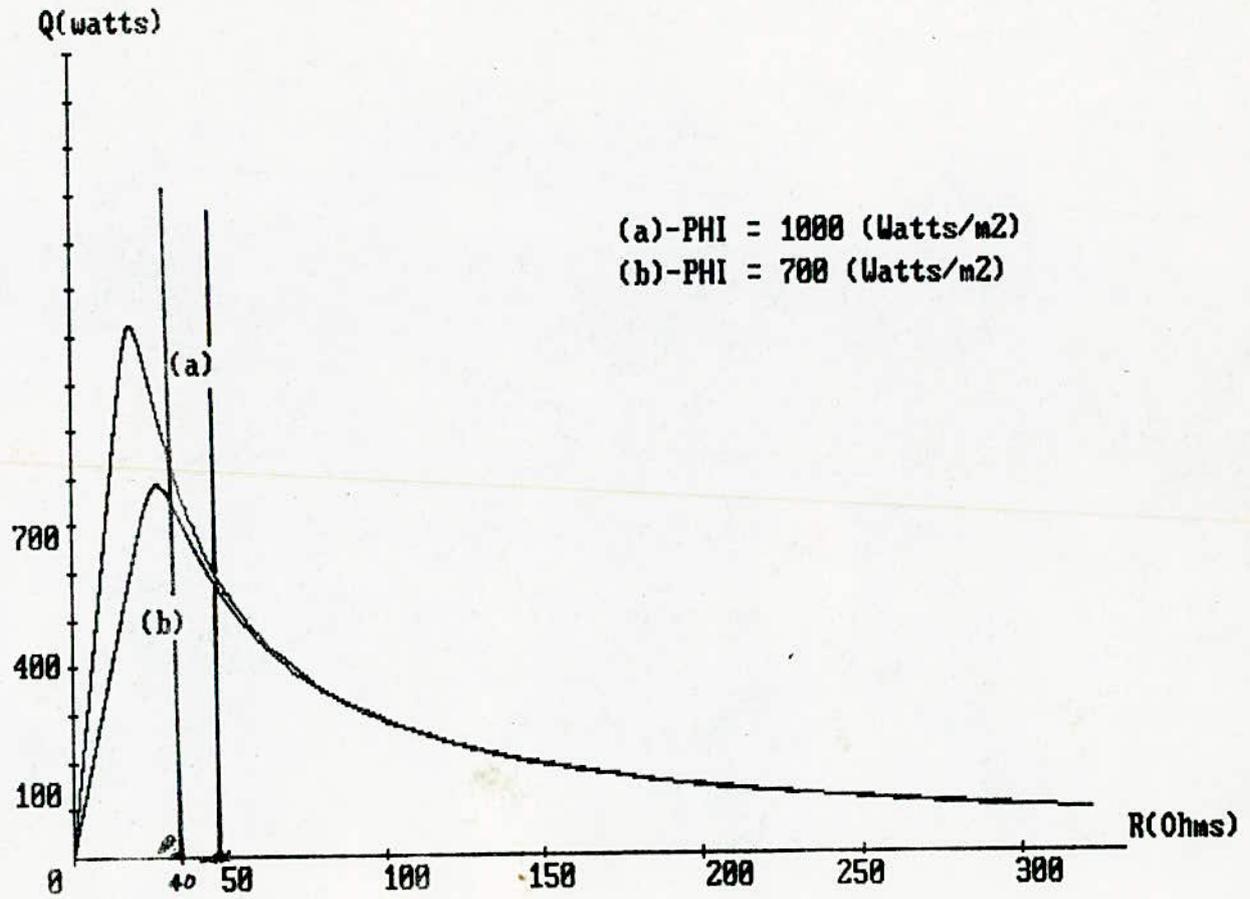


FIG - III - 5 b  $Q = f(R)$

Type de couplage: 9 panneaux en série et 3 en parallèles.

Pour un flux de  $700 \text{ W/m}^2$ , une variation de 1 ohm uniquement quand la résistance passe de 4 à 5 ohms provoque un abaissement de la puissance de 100 (Watts), elle vaut 200(Watts) pour un flux de  $1000 \text{ W/m}^2$ , par contre dans le second cas (courbe III - 5- b), on aperçoit que la puissance n'est relativement pas sensible aux faibles variations de R, puisque pour une variation de 10 ohms, c'est-à-dire dix fois la variation de R dans le premier cas, et pour le même flux, elle provoque les mêmes décroissances de la puissance correspondante.

Enfin cette analyse guide notre choix pour le second type de couplage des panneaux, surtout lorsqu'il s'agit d'une installation de chauffage où la résistance peut subir de faibles variations sous l'influence de la température du gaz thermodynamique à chauffer.

#### III-6 Détermination du point de fonctionnement :

Dans une installation de chauffage électrique classique, la variation de la quantité de chaleur transférée au milieu chauffant dépend uniquement de la consommation.

Par contre, dans un système photovoltaïque cette variation dépend en plus d'un paramètre climatique aléatoire qui est le rayonnement solaire ce qui perturbe le fonctionnement normal du système.

Le but essentiel de cette étude réside dans la détermination du point de fonctionnement où le système n'est pas trop sensible à la variation du rayonnement, et la quantité de chaleur fournie au système thermodynamique sera pratiquement indépendante du flux lumineux, ainsi, le problème d'adaptation sera résolu ; dans ce cas le générateur photovoltaïque peut être assimilé à une source électrique classique. Pour cela, on trace une famille de caractéristiques traduisant la variation de la quantité de chaleur en fonction de la résistance chauffante ( $R_c$ ) pour différentes valeurs de flux lumineux allant de  $200$  à  $1300 \text{ W/m}^2$  (voir courbe III - 6)

#### - Résultats et interprétations :

On constate d'une part que pour un flux solaire donné, la quantité de chaleur fournie au milieu chauffant varie linéairement aux faibles valeurs de la résistance ( $R_c$ ), au-delà d'une résistance dite critique pour laquelle le générateur peut fournir le maximum de puissance, la quantité de chaleur tend à s'annuler pour des valeurs de plus en plus élevées de la résistance.

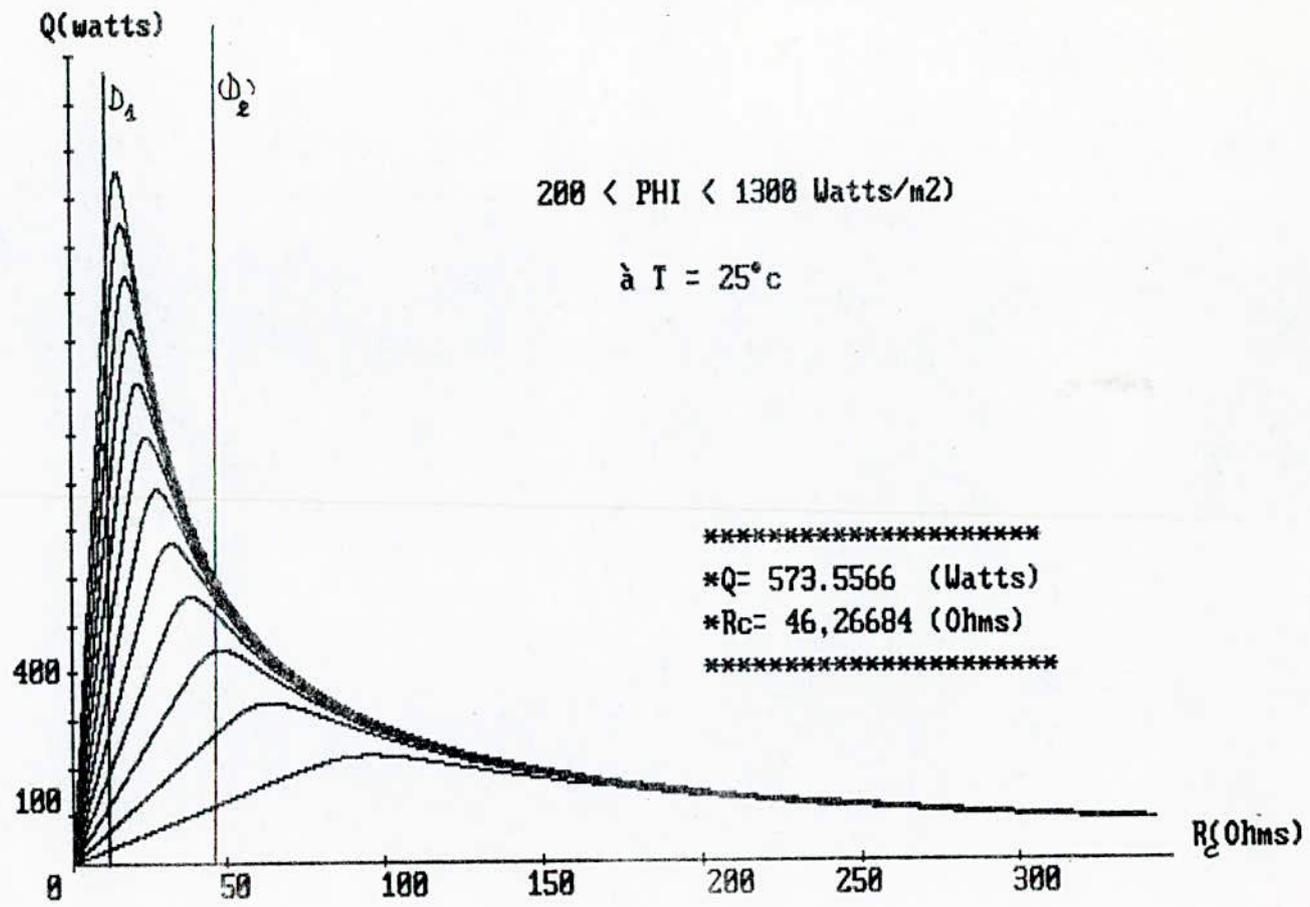


FIG - III - 6 - Variation de la quantité de chaleur en fonction de la résistance chauffante pour différentes valeurs de rayonnement

D'autre part, pour une résistance  $R_c$  donnée on s'aperçoit que l'effet important du flux solaire sur la variation de la puissance se traduit par le déplacement du point de fonctionnement du système photovoltaïque.

Dans ce cas, on distingue deux types de point de fonctionnement du point de vue sensibilité du système aux variations d'ensoleillement qui sont :

- a/- Quand le système fonctionne en générateur de courant constant représenté par la droite (D1) sur la courbe (III- 6).

La quantité de chaleur fournit au gaz est très sensible aux variations de rayonnement et peut provoquer de fortes variations de chaleur ce qui est néfaste pour la stabilité du système thermodynamique ; en plus le système ne peut fonctionner qu'au voisinage d'un flux lumineux bien précis ce qui réduit de beaucoup la durée du fonctionnement au fil du soleil.

à titre d'exemple :

pour  $R_c = 10$ . Ohms ;

quand :  $\Phi_1 = 200$  W/m<sup>2</sup> ;  $Q_1 = 50$  Watts

$\Phi_2 = 400$  W/m<sup>2</sup> ;  $Q_2 = 100$  Watts

$\Phi_3 = 700$  W/m<sup>2</sup> ;  $Q_3 = 350$  Watts

C'est-à-dire une augmentation du flux de 200 W/m<sup>2</sup> quand celui-ci passe de 200 à 400 W/m<sup>2</sup> provoque une élévation de la puissance de 50 Watts environ.

Et une croissance de 300 (Watts) quand le flux varie de 200 à 700 W/m<sup>2</sup>

- b/- Quand le générateur photovoltaïque opère comme un générateur de tension constante représentée par la droite (D2) ; on constate cette fois-ci que la quantité de chaleur transmise au gaz augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire jusqu'à une valeur de ce dernier bien déterminé et au-delà, la quantité de chaleur demeure constante, ainsi le point de fonctionnement reste pratiquement inchangé.

Ce dernier résultat répond parfaitement aux contraintes et exigences imposées par notre installation de chauffage à savoir :

- Assurer une quantité de chaleur insensible (dans une plage de variation bien déterminée) au rayonnement solaire.
- Assurer une large durée possible de fonctionnement au fil du soleil.
- Assimiler le générateur photovoltaïque à une source de tension classique.
- Une meilleure adaptation du système couplé photovoltaïque-thermodynamique.

\*- Application : (cas de notre étude)

D'après la courbe (III - 6) ; pour assurer la quantité de chaleur maximale au gaz naturel on trace une droite parallèle à l'axe des résistances correspondantes à  $Q = 573,5$  Watts.

L'intersection avec le point où les courbes se confondent présente le point de fonctionnement de notre installation de préchauffage du gaz. La résolution numérique donne la valeur de ( $R_c$ ) correspondante, elle vaut environ 46 Ohms, en ce point les courbes, pour un flux solaire supérieure ou égale à  $700 \text{ W/m}^2$ , se confondent pratiquement .

Dans cette plage de variation du rayonnement solaire, le générateur photovoltaïque est bien adapté au système thermodynamique et l'installation fonctionne au fil du soleil, la durée de cette plage du rayonnement est estimée pour une journée ensoleillée à 5 heures de fonctionnement. Pour des valeurs du flux inférieure à  $700 \text{ W/m}^2$ , l'utilisation d'un stockage par accumulateur devient indispensable.

#### II-7 Fonctionnement du système au fil du soleil :

La température de sortie du gaz, désigné par  $\theta_2$ , est liée directement à la quantité de chaleur dissipée par la résistance chauffante  $R_c$ , donc au flux solaire, ainsi la perturbation du rayonnement affecte directement la température  $\theta_2$ , pour mieux apercevoir le comportement du système lors du fonctionnement au fil du soleil, on trace la variation de la température de sortie ( $\theta_2$ ) du gaz avec les changements du rayonnement solaire (voir courbe III- 7).

La description mathématique de cette variation est exprimée par les équations suivantes :

D'après l'équation du courant déduite au chap.I

$$I_{ch} = I_{cc} - I_0 \left[ \frac{\text{Exp} (322,47 \cdot V_{ch}) - 1}{M(T+273)} \right]$$

et :

$$Q = m \cdot c_p (\theta_2 - \theta_1) = R_c I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R_c}$$

$$D'où V_{ch} = \sqrt{m \cdot c_p (\theta_2 - \theta_1) R_c} = \sqrt{Q \cdot R_c}$$

$$\text{et puisque } I_{cc} = \alpha \cdot \phi \cdot S$$

par substitution on obtient :

$$\phi \cdot \sqrt{Q \cdot R_c} / (N \cdot \alpha \cdot Z \cdot S)$$

où :

Q : est la quantité de chaleur fournie au gaz

Rc : est la résistance chauffante

N : nombre de panneaux mis en parrallèle

Z : est donnée par l'expression suivante :

$$Z = 1 - \left[ \frac{\text{Exp} (322,47 \cdot \sqrt{Q \cdot R_c}) - 1}{M (T + 273)} \right] / I_0$$

S : est la surface d'une cellule photovoltaïque.

-Résultats et interprétations :

Les courbes de la figure (III-7) traduisent essentiellement le fonctionnement du système au fil du soleil pour diverses valeurs de la résistance chauffante Rc. Ces courbes montrent également l'influence majeure que présente la résistance sur la stabilité de la température  $\theta_2$  et la durée du fonctionnement du système photovoltaïque au fil du soleil.

- (a) .. Rc=150 Ohms
- (b) .. Rc=80 Ohms
- (c) .. Rc=46 Ohms
- (d) .. Rc=30 Ohms
- (e) .. Rc=10 Ohms

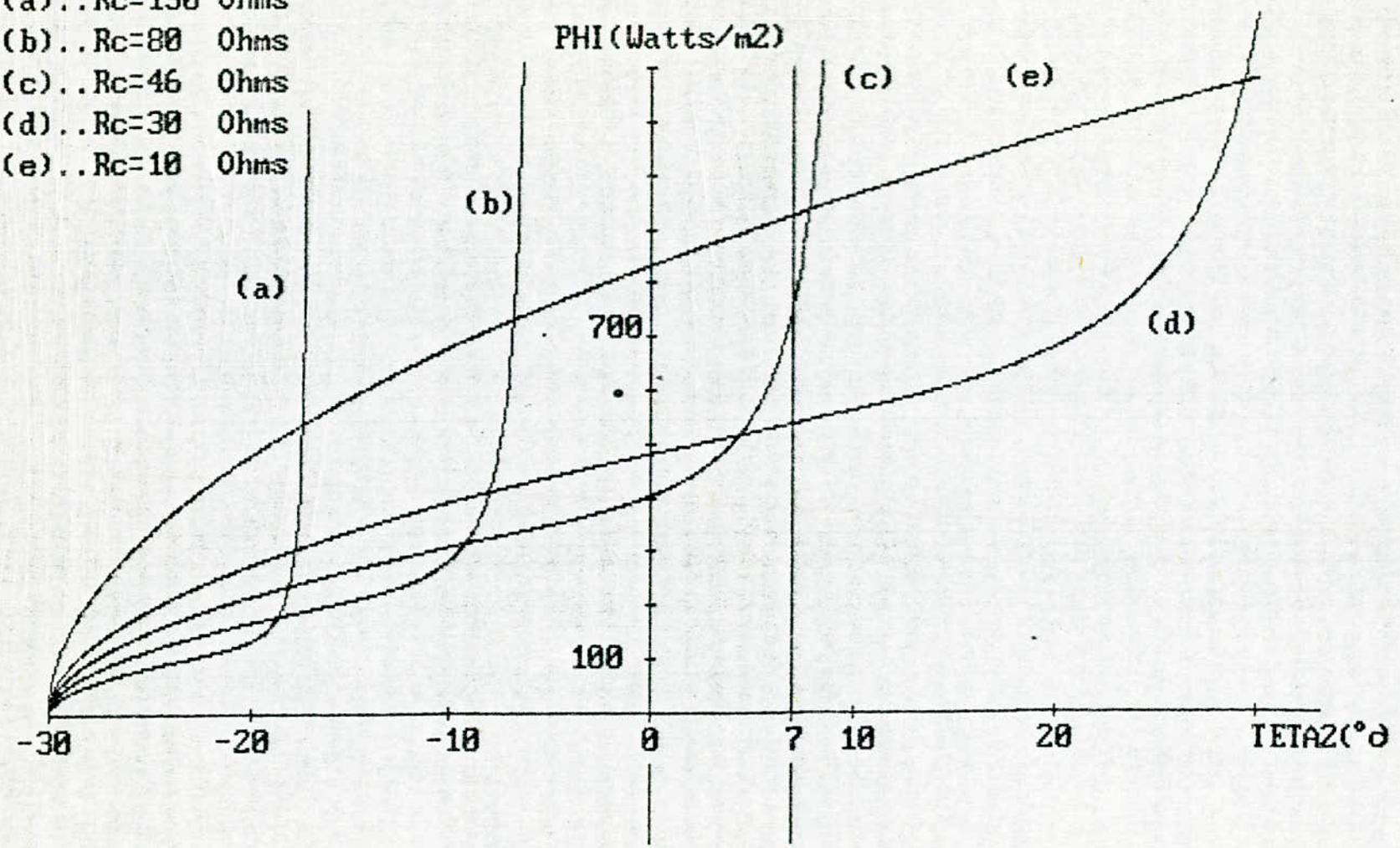


FIG. III-7 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AU FIL DU SOLEIL

On s'aperçoit clairement que certaine valeur de la résistance  $R_c$  entraînent une augmentation indéfinie de la température  $\theta_2$  quand le rayonnement solaire croît, ceci est traduit par la courbe (e) pour une faible valeur de  $R_c$ .

Par contre, pour les valeurs de plus en plus élevées de la résistance les courbes tendent à se stabiliser quelque soit le changement du flux solaire c'est le cas des courbes (a), (b), (c) et (d), dans ce cas, on dit que le système thermodynamique n'est pratiquement pas sensible aux changements du rayonnement solaire dans une plage bien précise.

Pour une résistance  $R_c$  de 150 (ohms) courbe (a) la température du gaz se stabilise théoriquement à  $-18^\circ\text{C}$  quand le flux varie au delà de  $200 \text{ W/m}^2$ , ainsi le système peut fonctionner le long de toute une journée au fil du soleil.

Par contre, on constate que la courbe (d), correspondante à  $R_c = 30 \text{ Ohms}$ , tend à se stabiliser pour des valeurs importantes du rayonnement ce qui réduit de beaucoup la durée du fonctionnement au fil du soleil.

Le cas de notre étude correspond à la courbe (c) où la température du gaz  $\theta_2$ , augmente avec la croissance du flux solaire puis se stabilise théoriquement au voisinage de  $7^\circ\text{C}$  quand le rayonnement atteint une valeur supérieure ou égale à  $700 \text{ W/m}^2$ .

Néanmoins, dans cette plage de variation du rayonnement, on aperçoit un faible écart de la courbe de la droite correspondante à  $7^\circ\text{C}$ , ceci se traduit par de très faibles fluctuations de la quantité de chaleur transférée au gaz thermodynamique subit par des changements importants du flux solaire quand ce dernier passe de  $700 \text{ W/m}^2$  à  $1300 \text{ W/m}^2$ . Ceci nous amène à étudier l'influence du rayonnement solaire sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque, ce qui revient à l'étude des fluctuations du courant et de la tension aux bornes de la résistance chauffante avec les changements du flux lumineux.

### III-8 Influence du rayonnement sur le courant :

D'après la caractéristique courant flux lumineux de la figure (III-8) tracée pour  $R_c = 46 \text{ Ohms}$  (cas de notre étude). On constate d'une part, que pour un flux inférieur à  $400 \text{ W/m}^2$  le courant est proportionnel au rayonnement solaire, au delà de cette valeur la courbe présente un coude puis tend à devenir constante au voisinage d'un courant bien déterminé quand le flux croît de  $700 \text{ W/m}^2$  à des valeurs supérieures.

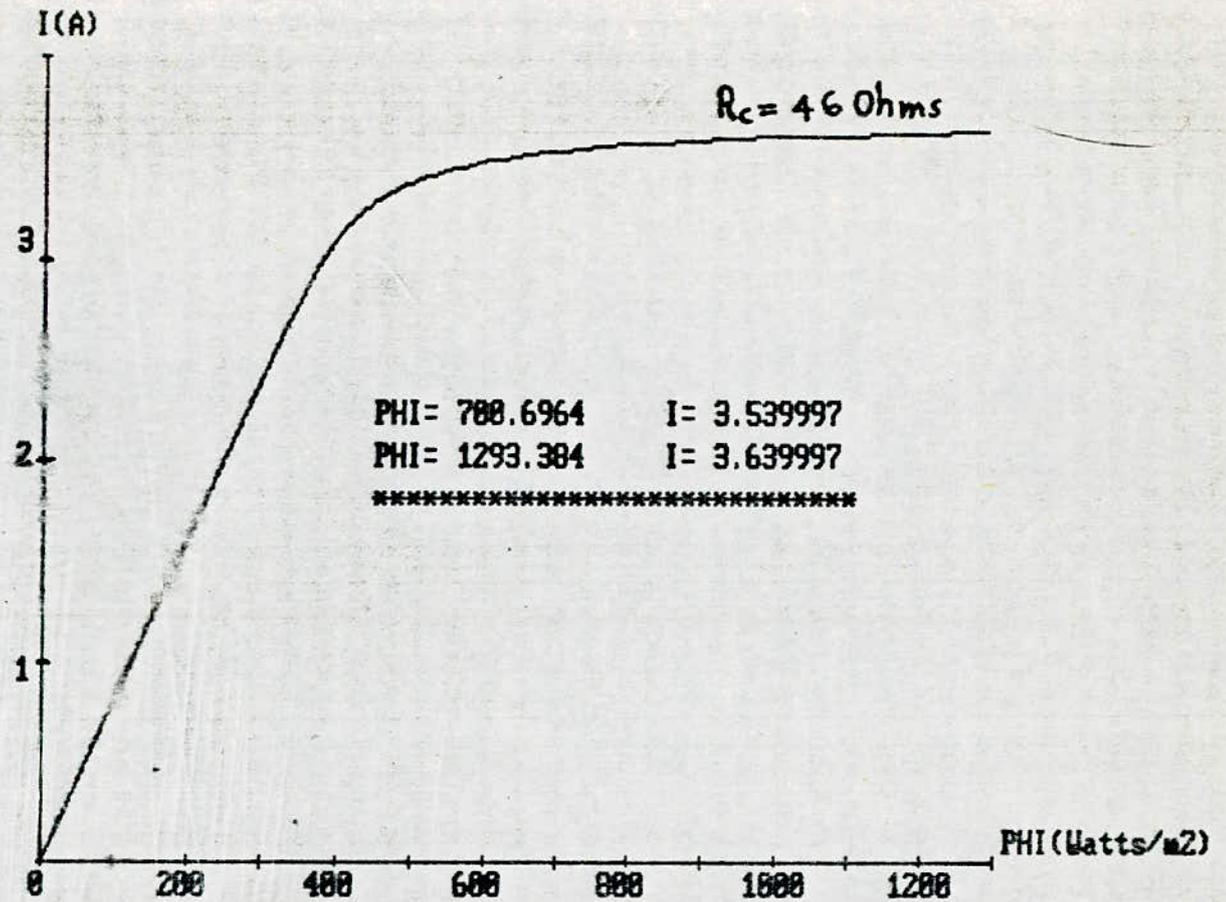


FIG. III -8 \*\*\* Caracteristique COURANT-FLUX LUMINEUX \*\*\*

FI

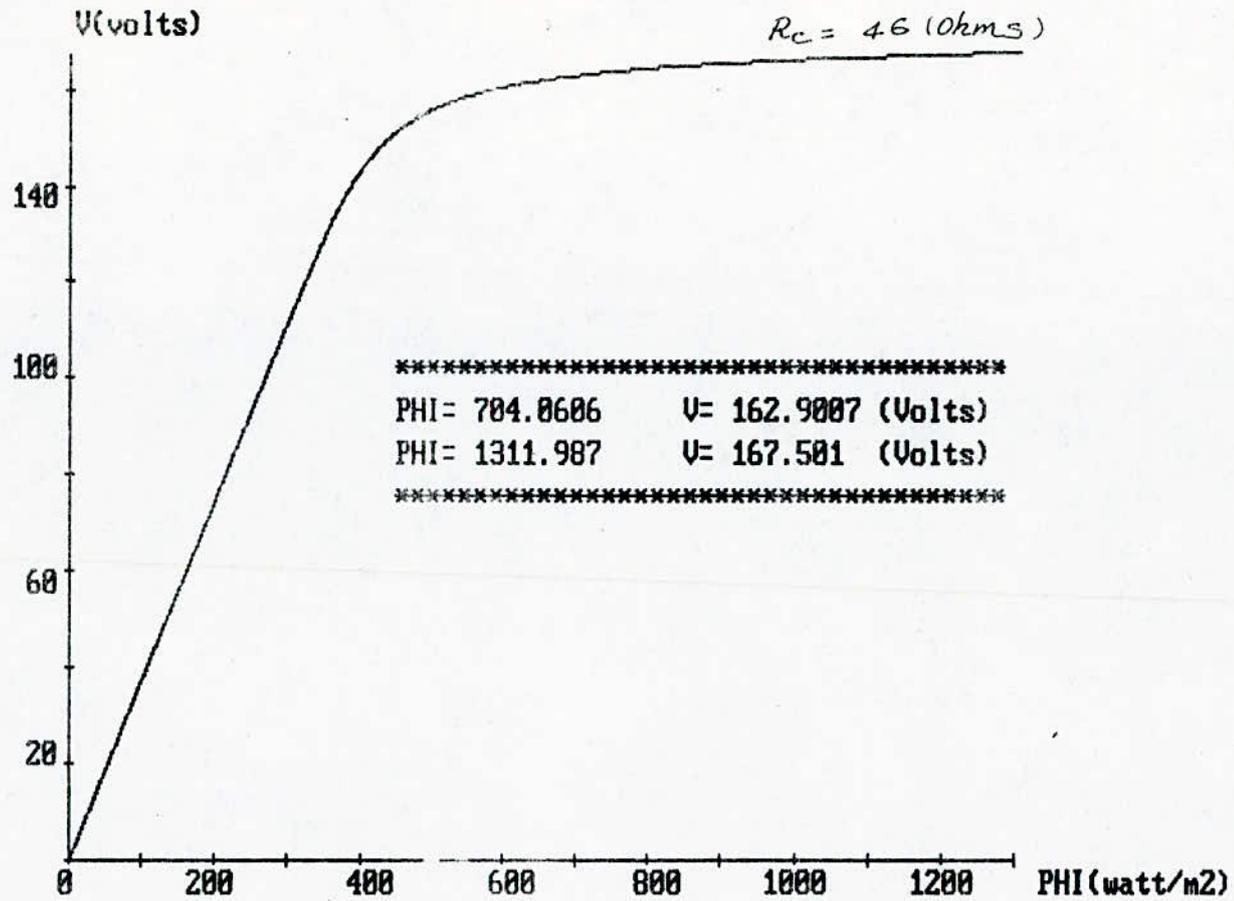


FIG - III - 9 - Caractéristique - Tension - Flux lumineux.

D'autre part, le courant n'est pratiquement pas influencé par les changements de flux allant de 700 à 1300 W/m<sup>2</sup> et même plus comme indiqué sur les courbes (III-8) la variation du courant correspondante ne dépasse pas 0,1 Ampère, c'est pourquoi au fonctionnement du système photovoltaïque au fil du soleil le courant demeure constant.

### III-9 Influence du rayonnement sur la tension :

L'allure de la caractéristique tension-flux lumineux (courbe III - 9) correspondant parfaitement à celle du courant.

Par contre, la variation de la tension peut augmenter quand le flux au delà de 700 W/m<sup>2</sup>.

Pour  $\Phi = 700 \text{ W/m}^2$  ;  $V_1 = 163 \text{ Volts}$

Pour  $\Phi = 1300 \text{ W/m}^2$  ;  $V_2 = 167 \text{ Volts}$

Par conséquence, afin d'atténuer les faibles fluctuations de la quantité de chaleur il est très important de stabiliser la tension à 163 Volts, ainsi le problème d'adaptation du système photovoltaïque-thermodynamique sera résolu et le générateur photovoltaïque peut être assimilé à une source d'énergie électrique classique. Et l'étude des performances globales de ce système sera abordé dans le chapitre suivant par les méthodes usuelles d'approches.

## C H A P I T R E I V

## REGLAGE DU GAIN EN BOUCLE OUVERTE

ET

## AMELIORATION DES PERFORMANCES DU REGULATEUR

## IV - 1. Introduction :

Comme nous l'avons dit au chapitre II, il est possible d'améliorer la précision et réduire l'influence des perturbations sur le système en donnant une valeur élevée au gain K.

Dans le présent chapitre, nous nous intéressons à l'influence du gain sur la stabilité ainsi que son réglage afin d'améliorer les performances du système.

- IV-1.1 Influence du gain en boucle ouverte sur la stabilité :  
Etant donné la fonction de transfert en boucle ouverte du schéma bloc de la figure (2-9) telle que :

$$KGF = K \frac{1}{P(1+T1P)(1+T2 P)}$$

avec

$$T1 = \frac{M}{m^{\circ}cp} \quad \text{et} \quad T2 = \frac{C}{\delta}$$

Nous introduisons les données numériques de l'installation qui sont les suivantes :

$$Cp = 1960 \text{ j/Kg C}^{\circ}$$

$$m^{\circ} = 0,0077 \text{ Kg/sec}$$

$$\theta_{10} = -30 \text{ C}^{\circ}$$

$$M = 45 \text{ j/C}^{\circ}$$

$$T2 = 2 \text{ secondes (constante de temps de la thermistance)}$$

La fonction en boucle ouverte devient :

$$KGF = \frac{K}{P(1+3P)(1+2P)}$$

On suppose que le seul paramètre réglable est le gain  $K$  en boucle ouverte.

On désire étudier l'influence des variations de  $K$  sur la stabilité du système.

Le programme n°1 permet de tracer la fonction de transfert en boucle ouverte sous l'influence du gain  $K$  dans le plan de Nyquist.

Comme le montre la figure (4 - 1), à mesure que le gain  $K$  croit, le lieu de  $KGF$  se rapproche du point  $(-1,0)$ , il peut même le dépasser à partir d'une valeur du gain  $K = 0,83$ .

D'autre part, on sait que d'après la règle de revers qu'un système asservi est stable si, en décrivant le lieu de transfert en boucle ouverte dans le sens des fréquences croissantes, on laisse le point  $(-1,0)$  dans le plan de Nyquist à sa gauche, il est instable dans le cas contraire.

On remarque d'après la règle de revers, que plus en se rapproche de la valeur critique  $K = 0,83$  dans le sens des fréquences croissantes, plus système possède une stabilité insuffisante.

Pour remédier à cet inconvénient, il est nécessaire de prévoir une certaine marge de sécurité pour le choix du gain.

Cette marge de sécurité se traduit par une marge de phase  $\phi_m$  qui représente le déphasage supplémentaire qui, dans la zone de résonance ferait passer le lieu  $KGF(j,\omega)$  de l'autre côté du point critique  $(-1,0)$ , elle se traduit aussi par une marge de gain  $K_m$  qui représente le nombre de décibels dont le gain en boucle ouverte  $K$  peut augmenter sans provoquer d'instabilité.

Ces deux marges garantissent la stabilité du système qui persistera malgré des variations imprévues du gain en boucle ouverte, et malgré un certain retard dont on a pas tenu compte dans les calculs.

On admet généralement une marge de phase située dans le domaine :

$$40^\circ < \phi_m < 50^\circ$$

et une marge de gain située dans l'intervalle :

$$12 < K_m < 15 \text{ dB}$$

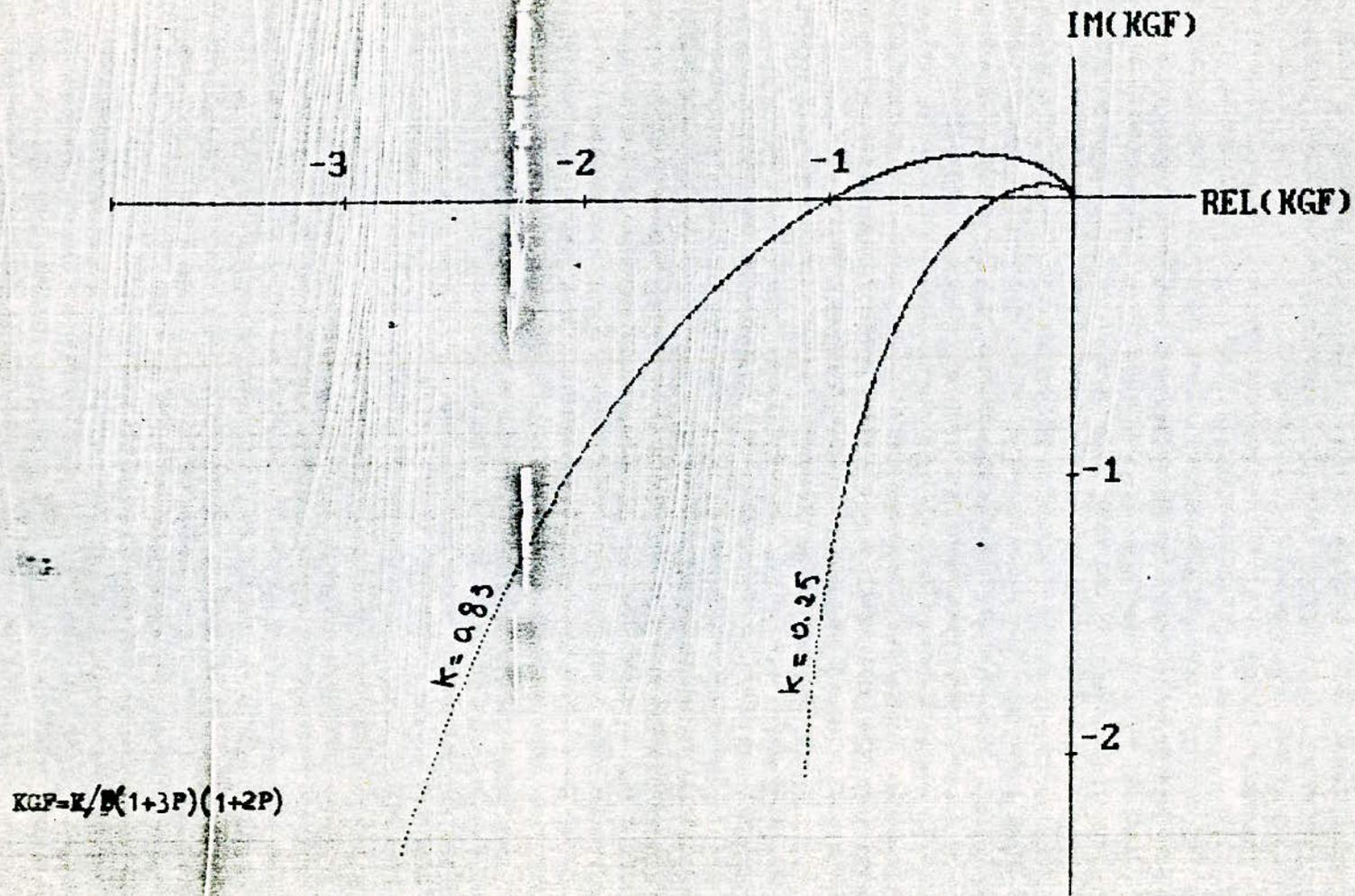


FIG 4-1 Influence du gain K en boucle ouverte sur la stabilité  
 ( Règle de Révers )

Réglage du gain en boucle ouverte :

IV-2 Pour prescrire une marge de phase de 45 à 50° et une marge de gain de 10 à 15 dB, on choisit une grandeur de gain  $K$  en boucle ouverte qui donne pour le système en boucle fermée un facteur de résonance  $Q$  à l'intérieur du domaine :

$$1,2 < Q < 1,5$$

soit :

$$Q = 1,3 ; Q \text{ (dB)} = 2,3$$

Le gain en question que nous noterons  $K_{1,3}$  est appelé gain optimal.

Pour résoudre le problème du réglage du gain  $K_{1,3}$ , l'étude est plus aisée en raisonnant géométriquement sur l'abaque de block (5)

IV-2-1 Détermination du gain optimal en boucle ouverte :

Lorsqu'on règle  $K$ , on doit tenir compte du fait que le système n'est pas à retour unitaire comme l'indique la figure (2-9), pour cela, on se ramène au système à retour unitaire suivi en cascade de la fonction de transfert  $1/F$  comme l'indique la figure (2-9-C).

Le but du réglage du gain est d'avoir un facteur de résonance  $Q = 1,3$  pour la fonction de transfert en boucle fermée  $\theta_s/\theta_e$  pour cela on devrait régler le facteur de résonance de la fonction  $\theta_{s1}/\theta_e$  à une valeur plus faible que 1,3 puisque :

$$\frac{\theta_s}{\theta_e} = \frac{\theta_{s1}}{\theta_e} \cdot \frac{\theta_s}{\theta_{s1}} \cdot \frac{1}{F} \quad (\text{voir figure (2-9-C)})$$

Le facteur de résonance du système sera :

$$Q = Q_1 \cdot \frac{|F(\omega)|}{|F(j\omega_r)|} \quad (*)$$

avec

$Q_1$  : est le facteur de résonance de la fonction de transfert  $\theta_{s1}/\theta_e$ .

Le programme n°2 permet non seulement de tracer sur la même échelle la fonction de transfert en boucle ouverte KGF sous l'influence de K, mais aussi les différents contours pour des facteurs de résonance donnés.

La technique d'utilisation du programme n°2 consiste à opérer sur le lieu KGF (jw) pour différentes valeurs de K afin qu'il soit tangent à un contour de facteur de résonance donné.

On choisit un facteur de résonance Q1 de la fonction de transfert  $\theta_{s1}/\theta_e$  égal à 1,25 soit 1,94 dB, cela après plusieurs approximations. La courbe KGF est tangente au contour 1,25 pour un gain optimal 0,25 en boucle ouverte, voir figure (4 -2).

La pulsation qui correspond au point de tangence est la pulsation de résonance du système, celle-ci peut être déterminée avec précision en mesurant la phase de ce point en se rapportant au diagramme de bode (programmes n°3, n°4) on trouve que :

$$\varphi = -136^\circ \text{ et } \omega R = 0,2 \text{ rad/sec ; voir figure (4-3, 4-4)}$$

Pour vérifier le choix de Q1 = 1,25, afin de garantir un facteur de résonance du système Q = 1,3

A l'aide de la formule (\*), on trouve que le facteur de résonance du système vaut Q = 1,34, ceci justifie notre choix de Q1.

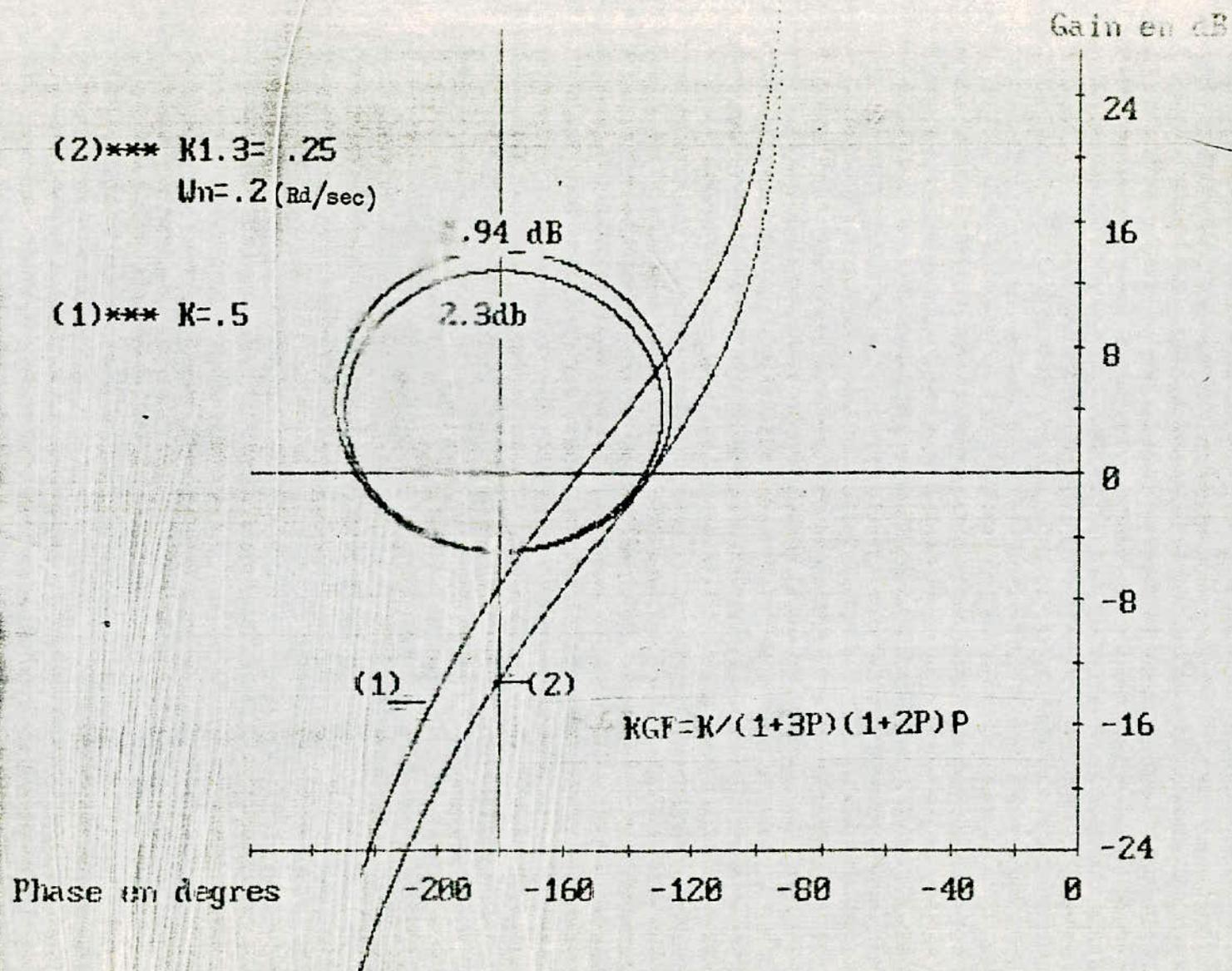
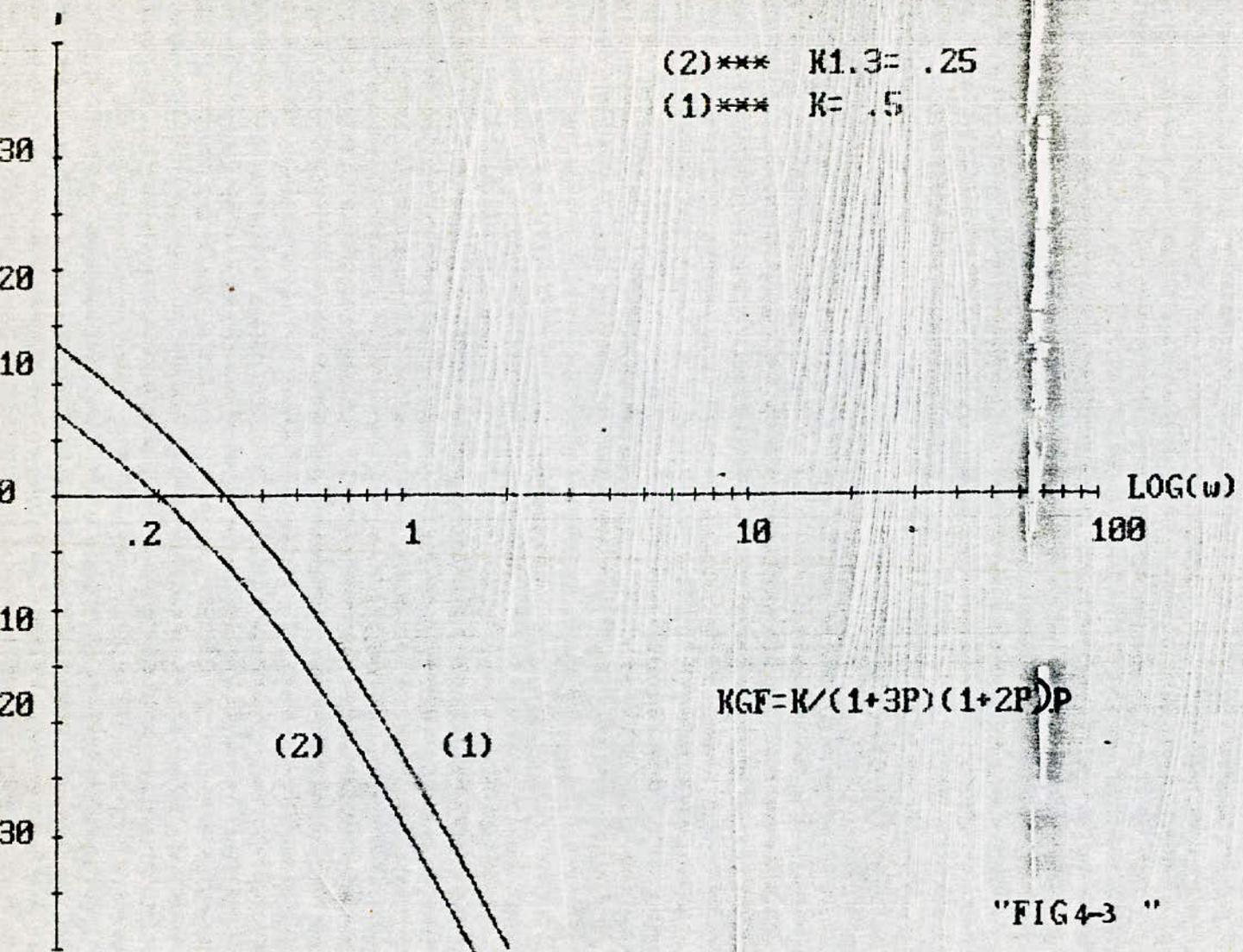


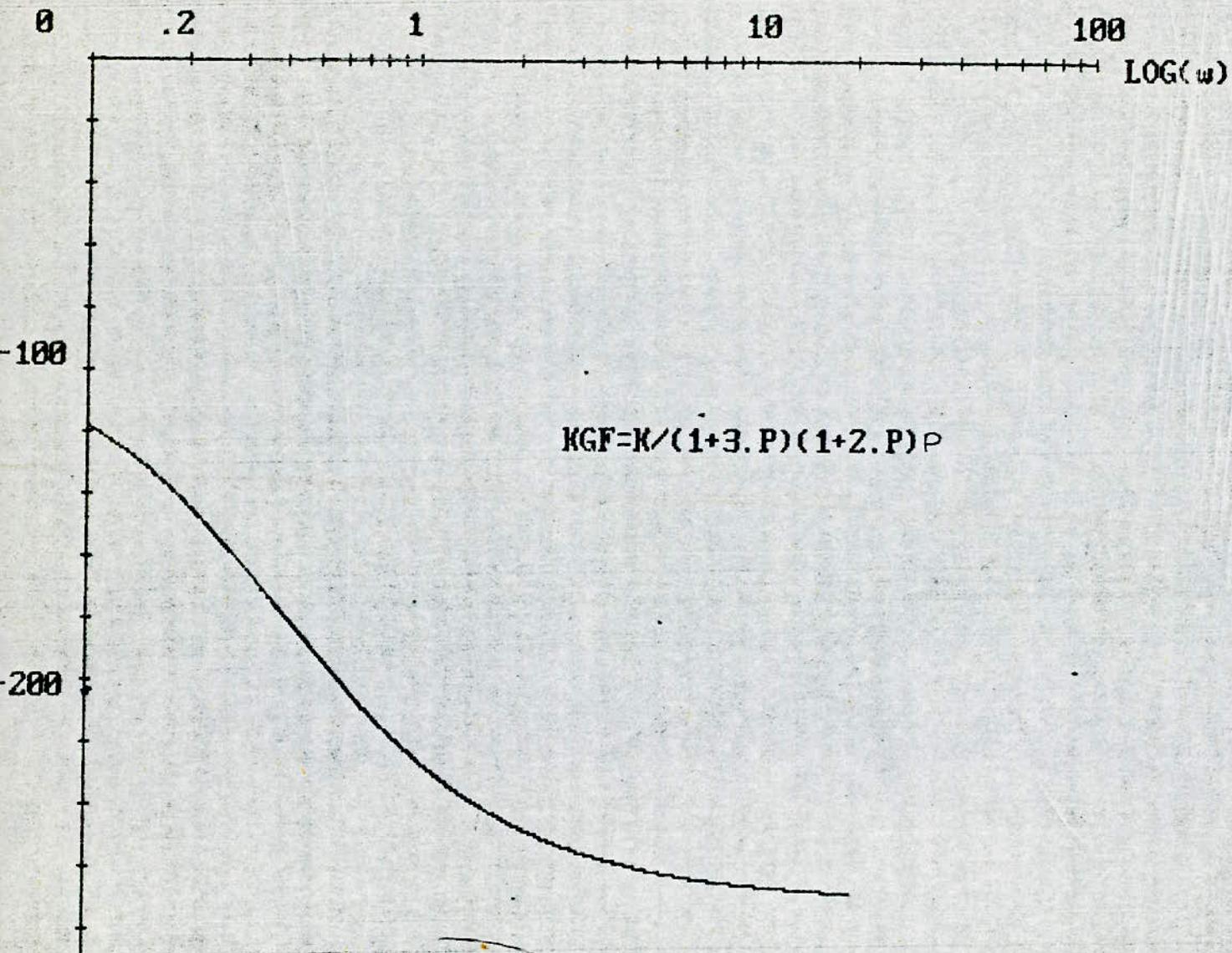
Fig 4-2 Réglage du gain en boucle ouverte

Gain(dB)



"FIG4-3 "

COURBES DE GAIN EN BOUCLE OUVERTE DU SYSTEME (SANS CORRECTEUR)



PHASE EN DEGRES

COURBE DE PHASE EN BOUCLE OUVERTE  
(SANS CORRECTEUR)

FIG 4-4

#### IV -3 L'influence des retards sur les performances du système

Quand on a mis en équation le système, on avait négligé les constantes de temps électrique et mécanique du moteur (le moteur se comporte comme un intégrateur).

Il est intéressant de connaître quantitativement de combien les retards peuvent modifier les performances du système, et quelle est la limite acceptable pour ces retards.

Pour cela une méthode consiste à comparer les performances du système avec et sans retard, en ajustant dans les différents cas le gain à  $K 1,3$  et en chiffrant les variations du gain et de la fréquence de résonance du système.

En l'absence de retard, le système aurait un gain en boucle ouverte égale :

$$K 1,3 = 0,25$$

et une fréquence de résonance égale :

$$WR = 0,2 \text{ rad/sec}$$

avec des retards schématisés par des constantes de temps  $T$  de :

$$0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 \text{ secondes}$$

Les performances du système deviennent :

T(S)	Q1	K1,3	WR (rd/s)	K 1,3 (%)	WR (%)
0,1	1,25	0,24	0,19	4	5
0,2	1,25	0,23	0,18	8	10
0,3	1,25	<b>0,225</b>	0,17	<b>10</b>	<b>15</b>
0,4	1,25	0,22	0,17	12	15
0,5	1,25	0,21	0,16	16	20

Conclusion : Un retard de 0,2 seconde fait abaisser de 10 % les performances du système, qu'on acceptable comme limite tolérable de plus, il constitue un critère de choix du servomoteur (cas de notre étude).

#### IV- 4 Etude du régime transitoire pour K1,3 = 0,25

La connaissance des transmittances du système permet de faire l'étude du comportement transitoire du système.

Pour cela on doit, déterminer sa réponse vis à vis du signal d'entrée  $\theta_e$ , mais encore vis à vis de la perturbation  $\theta_z$ , il est bien évident que ces différentes réponses ne peuvent être calculées ou mesurées dans les conditions normales de fonctionnement puisque les signaux sont aléatoires.

Pour caractériser le comportement transitoire du système on est amené à lui appliquer les signaux parfaitement définis (échelon, rampe).

Nous supposons que le système est au repos, ce qui nous dispensera des conditions initiales.

Revenons au schéma fonctionnel de la figure (2 - 9), nous nous intéressons aux quatre transmittances suivantes.

$$W1 = \frac{\theta_s}{\theta_e} = \frac{K(1+2P)}{P(1+3P)(1+2P) + K}$$

$$W2 = \frac{E}{\theta_e} = \frac{P(1+3P)(1+2P)}{P(1+3P)(1+2P) + K}$$

$$W3 = \theta_s = \frac{P(1+2P)}{\theta_z \frac{P(1+3P)(1+2P)+K}$$

$$W4 = E = \frac{-P}{\theta_z \frac{P(1+3P)(1+2P)+K}$$

Nous limiterons notre étude pour  $K = 0,25$

Pour déterminer les réponses transitoires aux échelons unitaires de  $\theta_e$ ,  $\theta_z$ .

Nous utilisons la méthode Heaviside, qui consiste à connaître les racines de l'équation caractéristique (voir annexe).

A l'aide du programme n°5 qui fait appel à la méthode de Newton pour déterminer la racine réelle de l'équation caractéristique on trouve pour la valeur du gain  $K = 0,25$  une racine réelle :

$$P^0 = -0,6781$$

Il suffit de diviser l'équation caractéristique par  $P - P^0$  ce qui conduit à une équation du deuxième degré, dont on connaît les racines. On trouve :

$$P1 = -0,077 + j 0,235$$

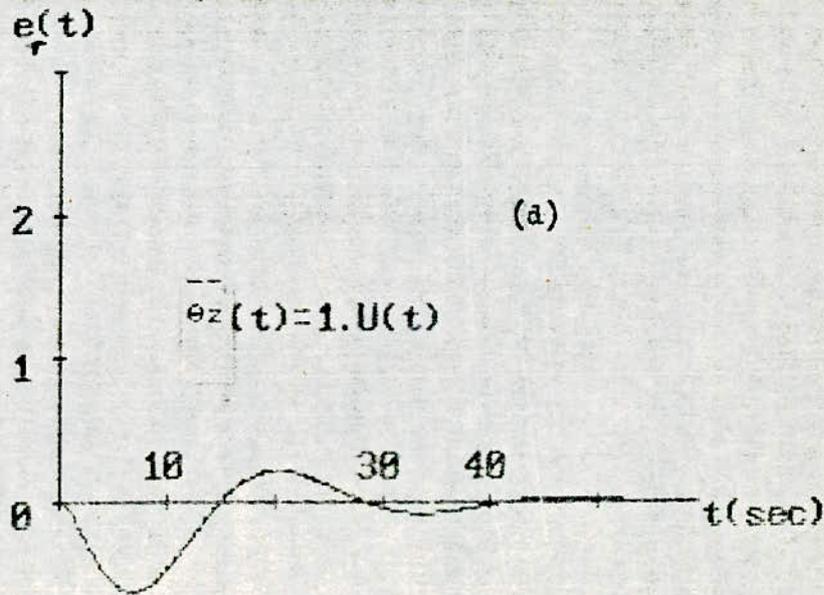
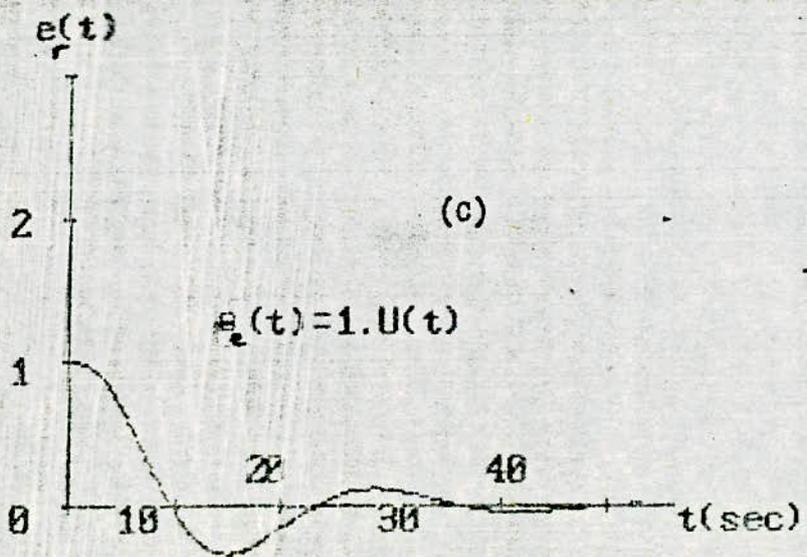
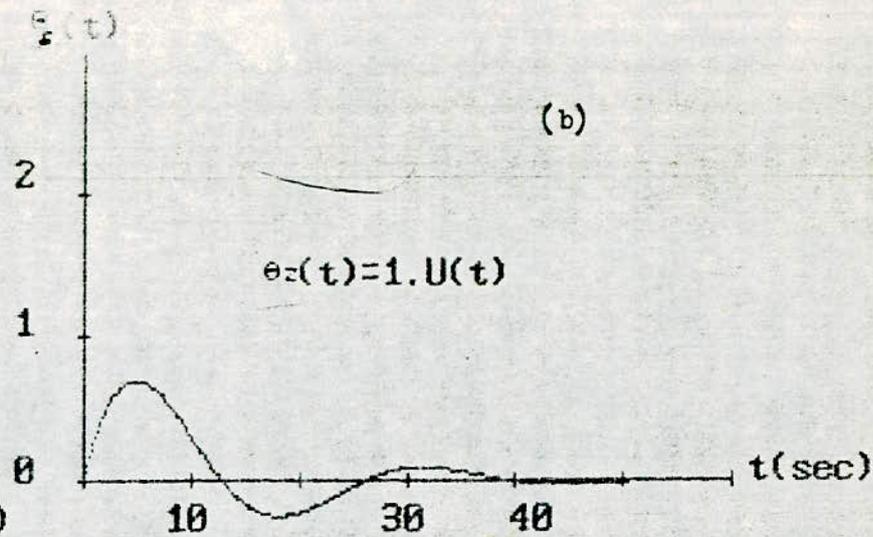
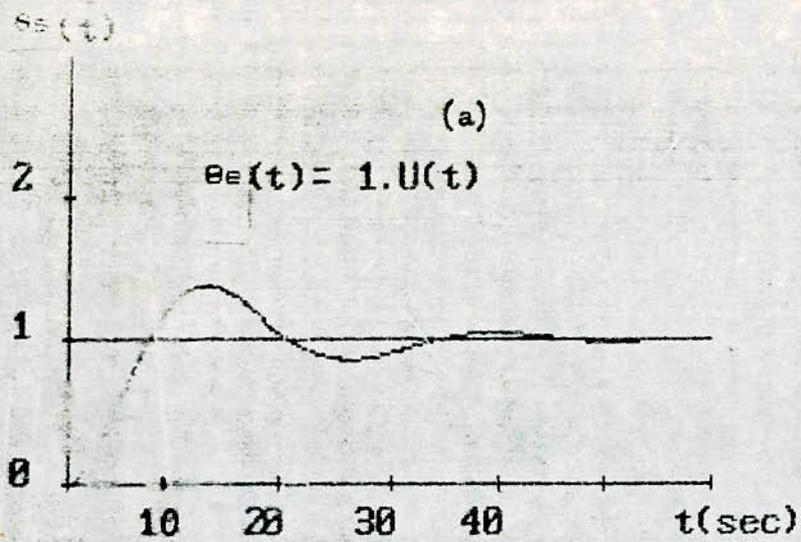
$$P2 = -0,077 - j 0,235$$

Les courbes correspondantes sont données par la figure (4-5) tracée à l'aide du programme n°6.

On sait que pour obtenir une réponse à une rampe, il est plus simple d'effectuer une intégration de la réponse à un échelon.

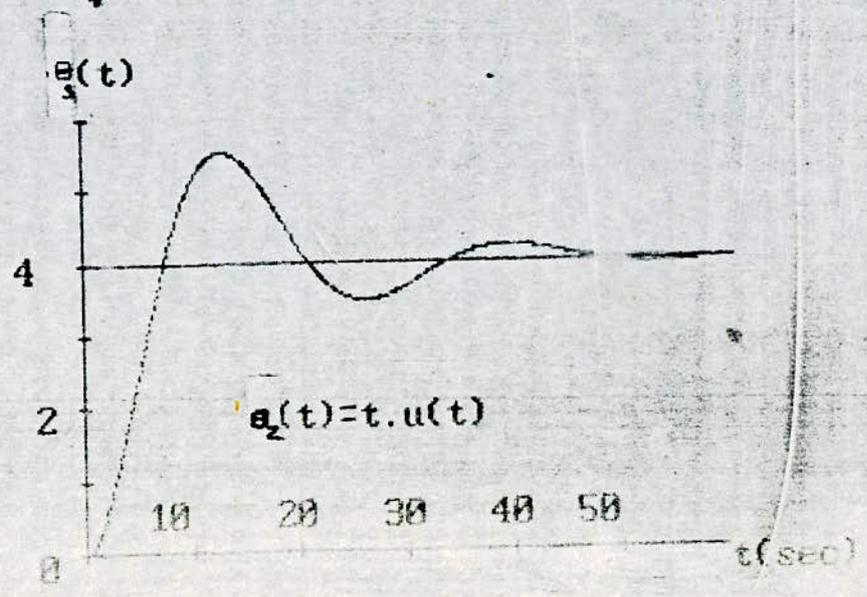
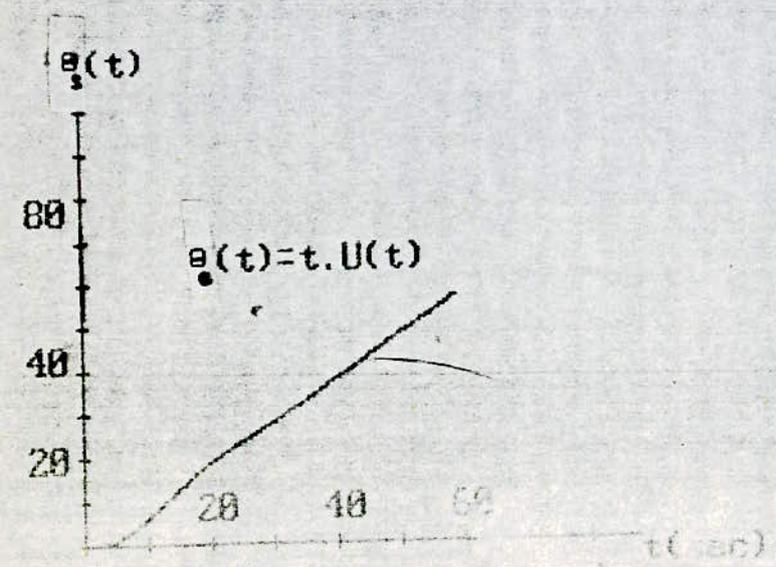
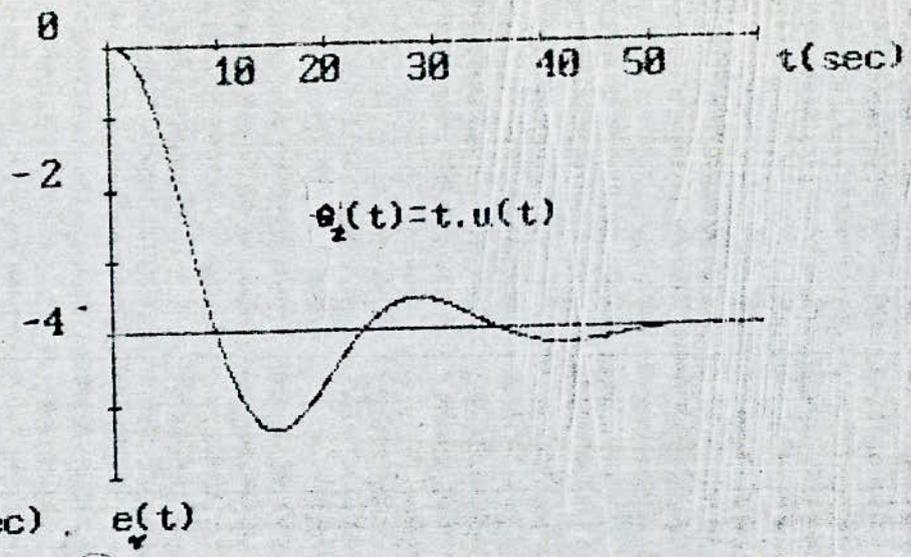
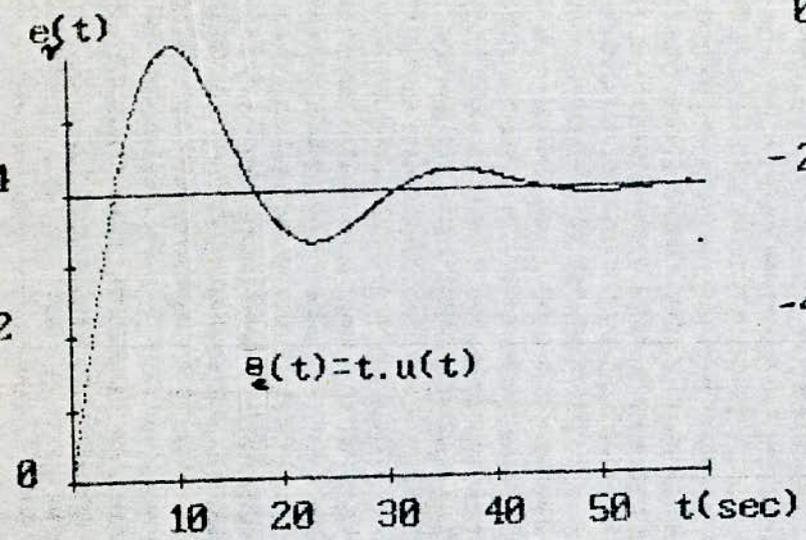
Les courbes correspondantes sont données par la figure (4-6) tracées à l'aide du programme n°7.

On constate clairement que le phénomène transitoire est le même pour chaque réponse, il se stabilise après 38 secondes, et présente un rebondissement de 36 % de la valeur finale (généralement acceptable entre 30 à 50 % de la valeur finale).



Réponses à un échelon unitaire pour un gain  $K_{1.3} = 0.25$

FIG 4-5



On constate également que l'erreur en régime permanent dépend de la nature du signal d'entrée, ainsi a-t-on pour un signal en échelon une erreur nulle, et pour un signal en rampe une erreur de trainage de l'ordre de 4° C.

Conclusion :

Le système pour un gain  $K = 0,25$  présente certaines anomalies qui le traduisent par la mauvaise précision (erreur de trainage), et par un temps de réponse relativement assez lent.

Pour remédier à tout cela on doit insérer un bloc correcteur dans la boucle de telle manière à réduire l'écart de trainage, et le temps de réponse du système.

#### IV- 5 Amélioration des performances du système :

Afin d'améliorer les performances du système du point de vue précision, rapidité. On intercale un réseau correcteur par avance de phase entre le détecteur et l'amplificateur.

Le rôle du correcteur est de transformer le signal d'erreur non corrigé en signal d'erreur corrigé.

Les réseaux correcteur usuels par avance de phase ont une fonction de transfert de la forme :

$$R(P) = \frac{1}{a} \frac{1 + T.a.P}{1 + T.P}$$

Où :

a : est le facteur qui caractérise l'avance de phase maximale.

T : La constante de temps.

Pour mieux juger l'influence du correcteur, on se donne les paramètres (a) et (T), puis on calcul le gain statique K de sorte que le pic de résonance en boucle fermée soit égale à 1,3. La stabilité étant ainsi assurée, on se contente de discuter si les autres performances sont acceptables (erreur de trainage, temps de réponse).

La fonction de transfert en boucle ouverte de la figure (2 - 9) devient :

$$T(P) = \frac{K(1 + T.a.P)}{P(1+3P)(1+2P)(1+TP)}$$

Le correcteur doit prescrire une avance de phase maximale la plus élevée possible. Cependant, si (a) est trop élevé cela conduit à une amplification des oscillations parasites de bruit du signal d'écart, la valeur couramment est  $a = 10$

Avec des constante de temps de 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5.

Les performances deviennent : (voir figure (4,8))

T(sec)	Q1	K 1,3	WR (Rad/sec)
0,05	1,2	0,26	0,21
0,1	1,2	0,31	0,24
0,15	1,2	0,37	0,27
0,2	1,2	0,43	0,30
0,25	1,12	0,45	0,33
0,3	1,12	0,49	0,38
0,35	1,1	0,5	0,40
0,4	1,08	0,5	0,43
0,45	1,06	0,48	0,46
0,5	1,05	0,45	0,47

Les figures (4-7, a, b, c, d) représentent les opérations correspondantes effectuées en coordonnées de BLACK en suivant pas à pas les techniques citées précédemment pour régler le gain à  $Q = 1,3$ .

On constate d'après la figure (4.8) que le réseau correcteur apporte une réduction maximale de l'erreur de vitesse dans la zone :  $0,3 < T < 0,45$  sec

Il en résulte également une augmentation de la pulsation de résonance qui s'accompagne d'une réduction de temps de réponse, alors que le pic de résonance  $Q = 1,3$  demeure le même.

$K1.3=0.49$   
 $A=10; T=0.3 \text{ sec}$   
 $\omega R=0.38 \text{ rd/sec}$

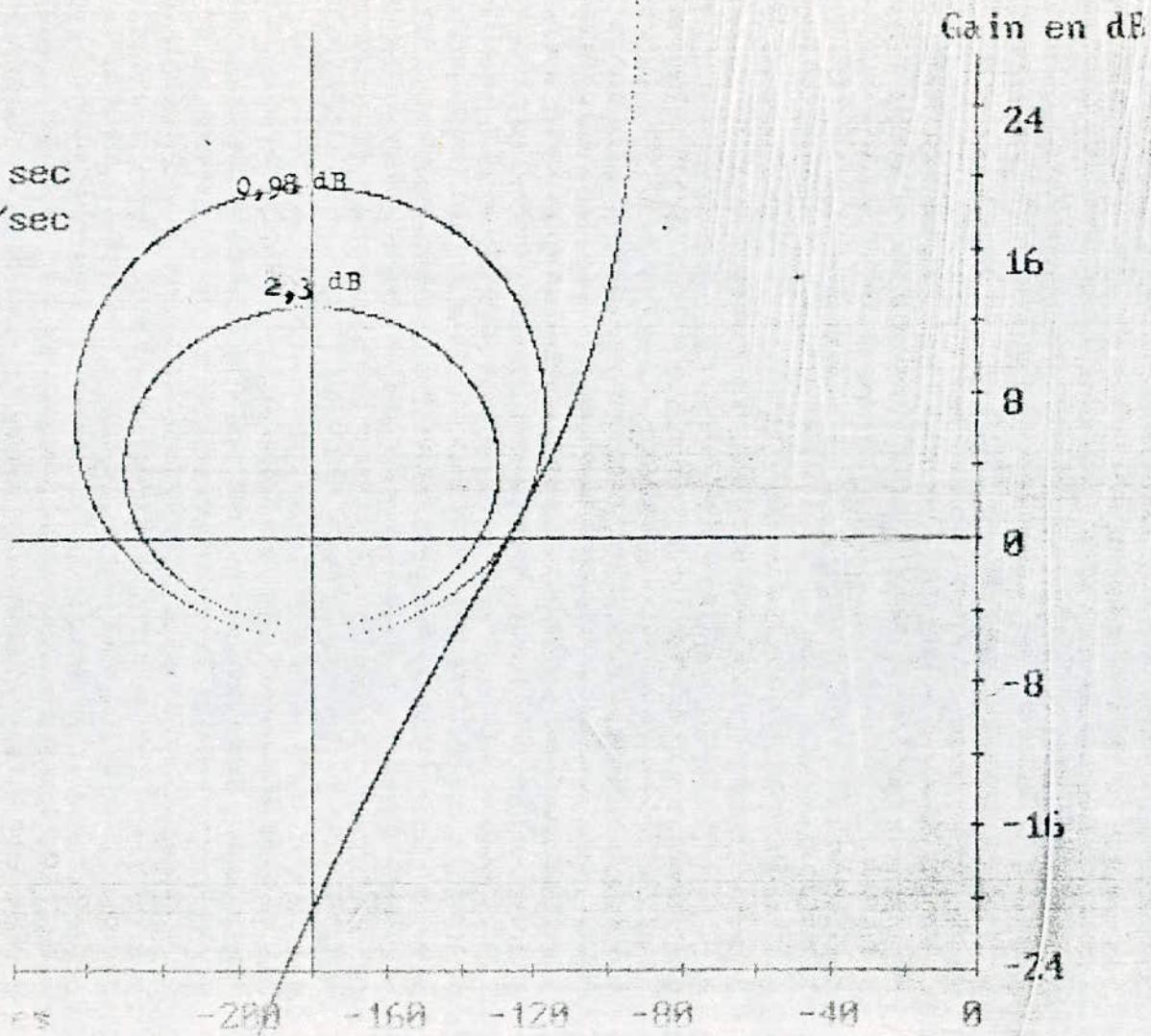


FIG 4-7-a

Régulation du gain optimal en boucle ouverte du système sous l'influence du correcteur.

- (1) --  $K_{1.3} = 0.25; A = 0; T = 0$
- (2) --  $K_{1.3} = .31; A = 10; T = .1 \text{ sec}$
- (3) --  $K_{1.3} = .49; A = 10; T = .3 \text{ sec}$
- (4) --  $K_{1.3} = .45; A = 10; T = .5 \text{ sec}$

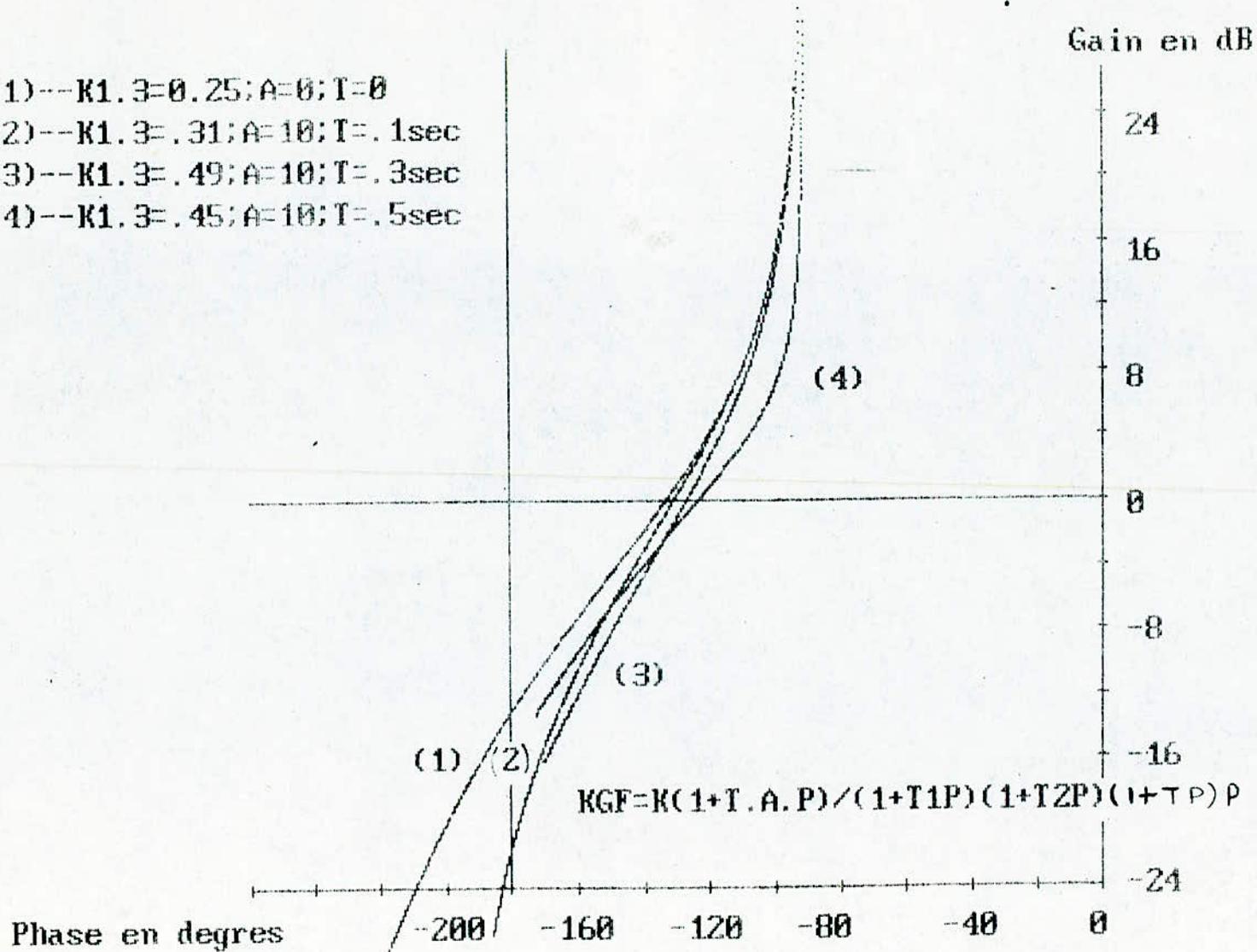
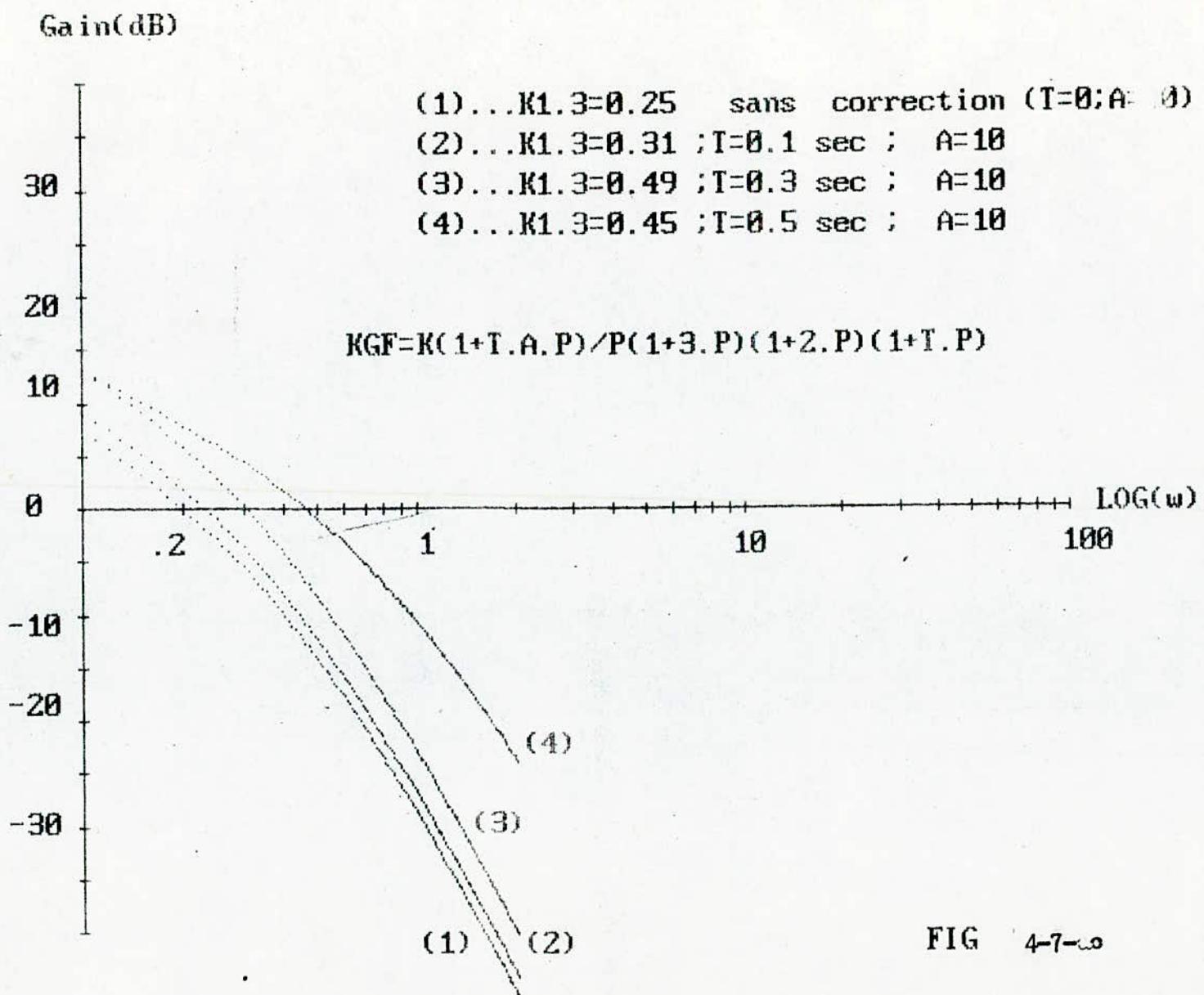
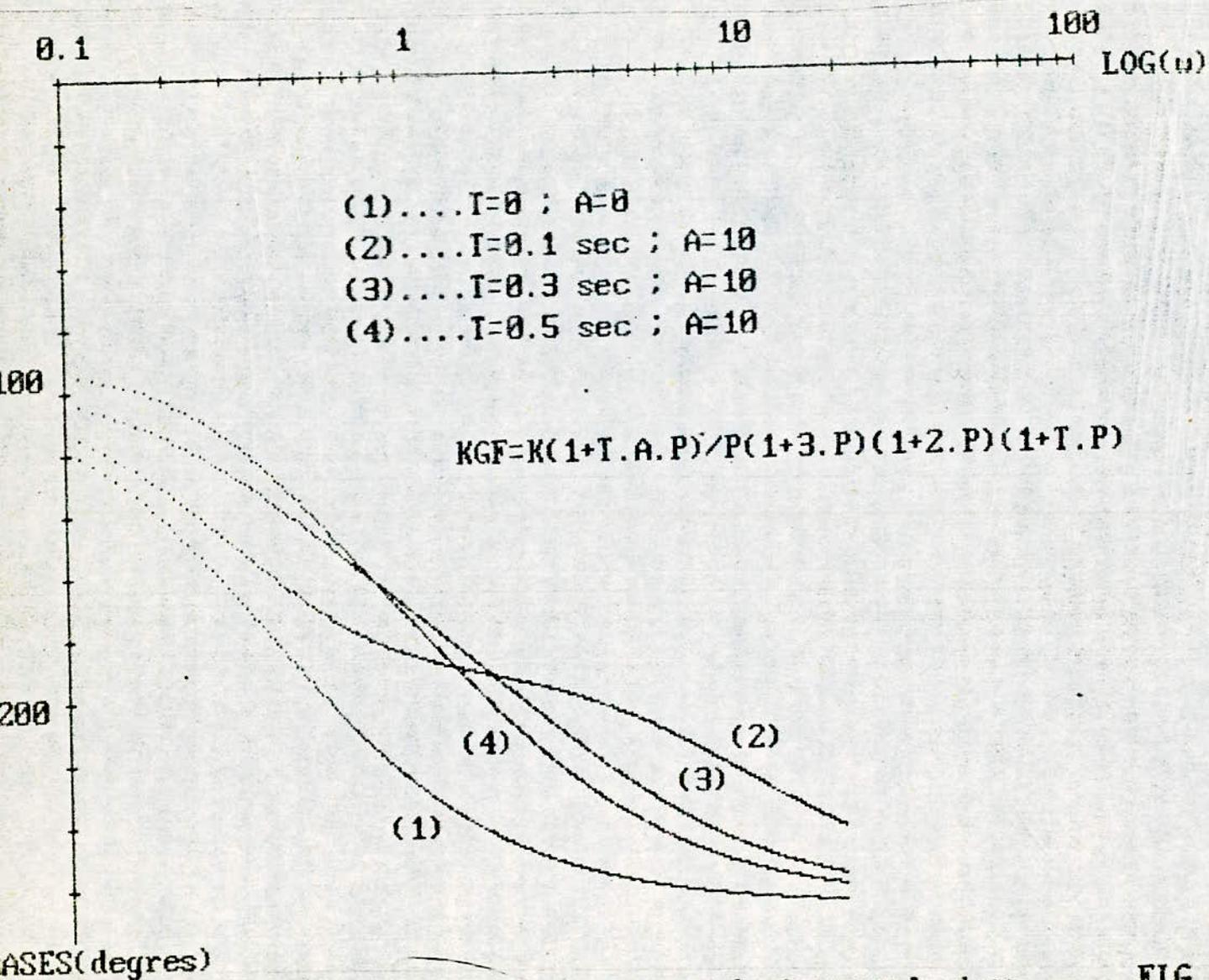


FIG 4-7, b Influence des parametres du correcteur par avance de phase sur le gain optimal du systeme

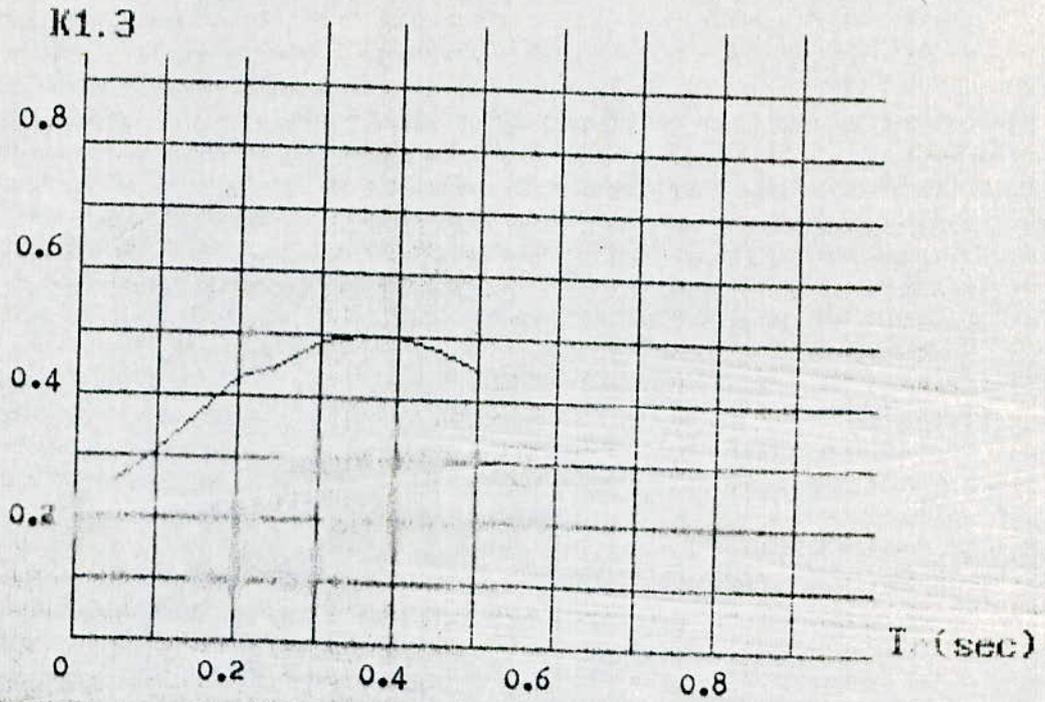


Courbes de gain en boucle ouverte du régulateur avant et après correction par avance de phase

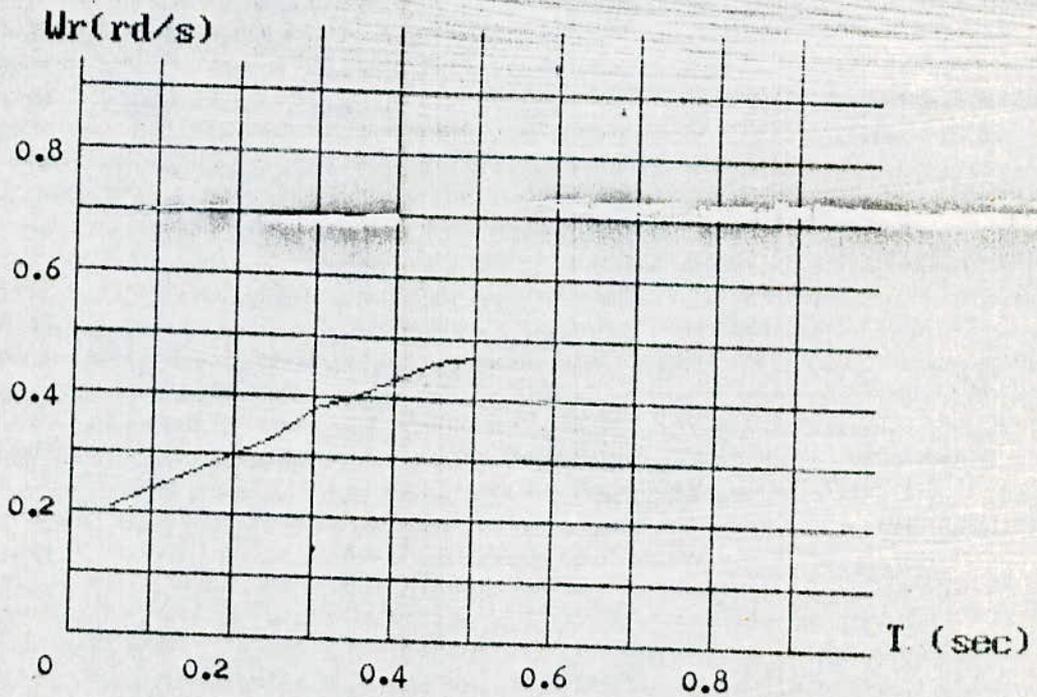


Influence du correcteur par avance de phase sur la phase.

FIG 4-7-d



COURBE K1.3 EN FONCTION DE T



COURBE  $\omega_r$  EN FONCTION DE T

Toutefois, il y a lieu de noter que la fréquence de résonance ne doit pas être trop élevée, car son augmentation signifie une large bande passante et une meilleure transmission des signaux utiles, elle a pour effet en contre partie l'augmentation des signaux parasites.

Pour illustrer ces résultats on étudie le régime transitoire pour le cas suivant :

$$K_{1,3} = 0,49$$

$$a = 10$$

$$T = 0,3$$

On procède de la manière indiquée au chapitre (IV- 4) .

La résolution de l'équation caractéristique donne :

$$P^0 = - 3,415$$

$$P_1 = - 0,21 + j 0,442$$

$$P_2 = - 0,21 - j 0,442$$

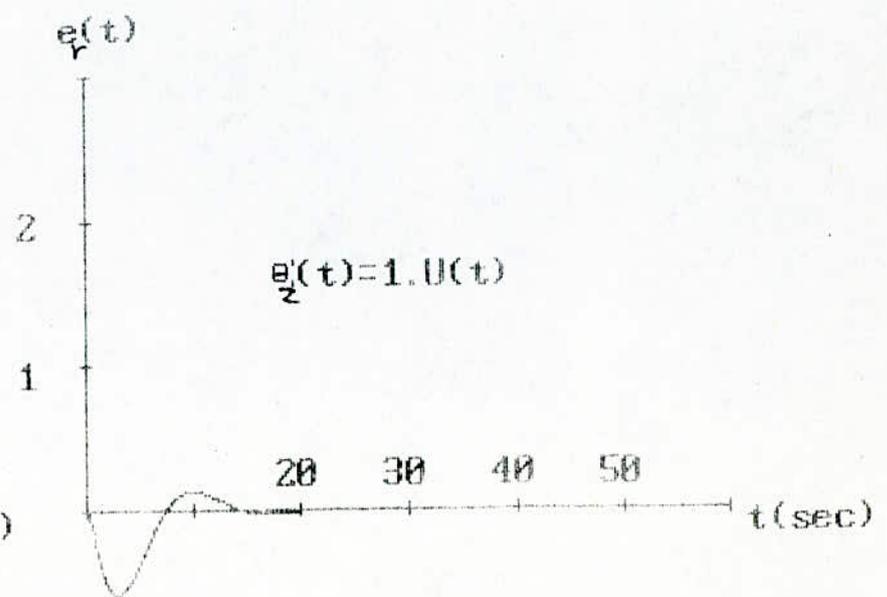
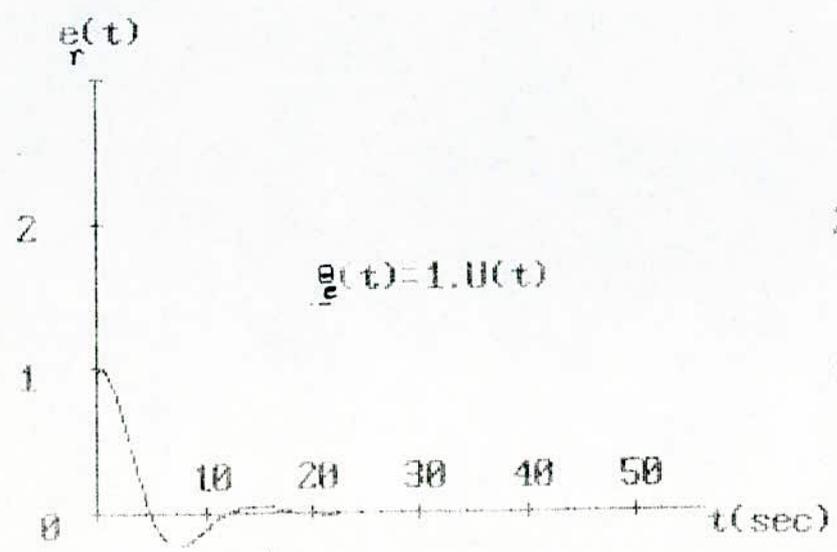
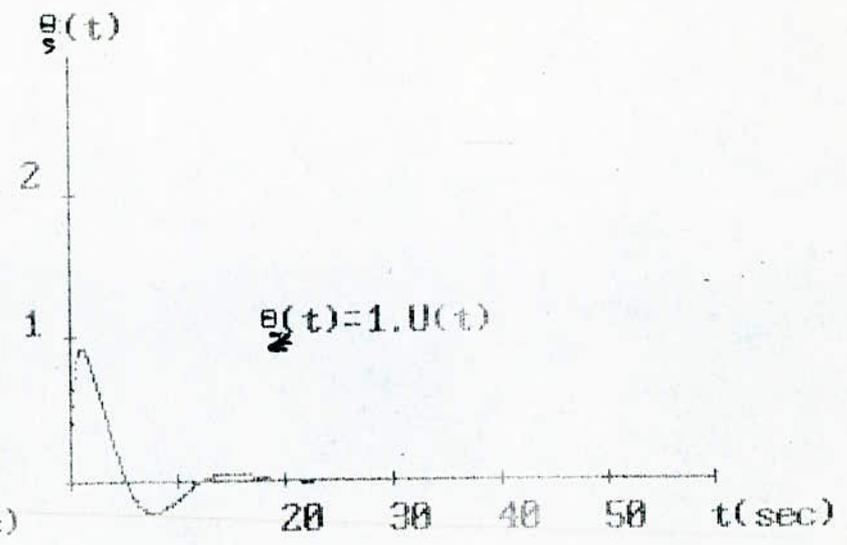
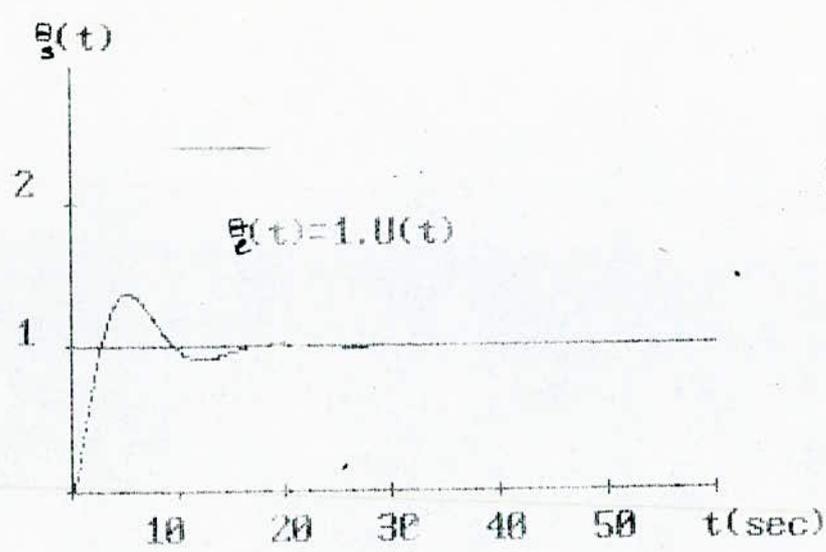
Les courbes représentatives pour des entrées en échelon et en rampe sont données par les figures (4,9) et (4-10) tracer respectivement à l'aide des programmes (n°8, n°9).

On constate que le régime transitoire se stabilise après 15 secondes et présente un rebondissement de 36 % de la valeur finale.

On constate également que l'erreur de trainage est de l'ordre de 2° C.

Conclusion :

Le correcteur par avance de phase améliore la rapidité et l'erreur de trainage du système.



Réponses à un échelon unitaire pour un gain  $k_{1.3} = 0.49$  ( $a = 10$  ;  $T_a = 0.3$  sec)

FIG 4-9

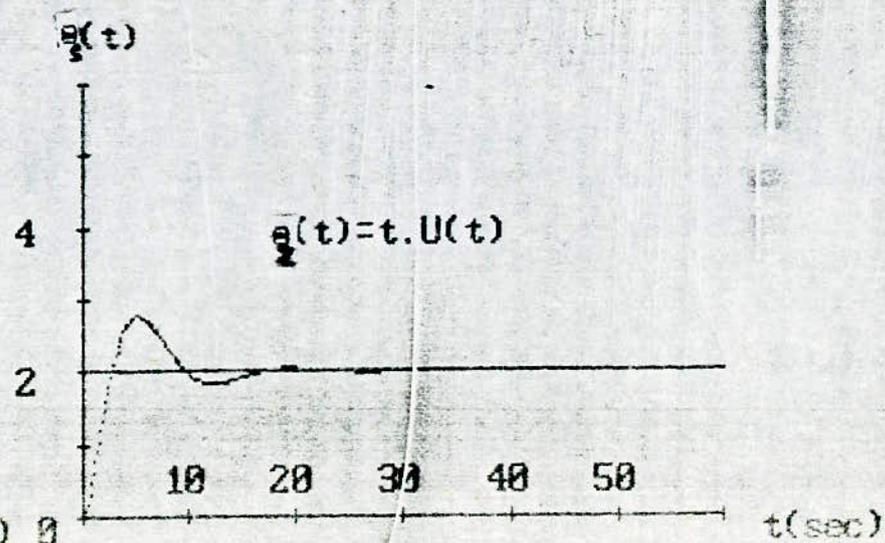
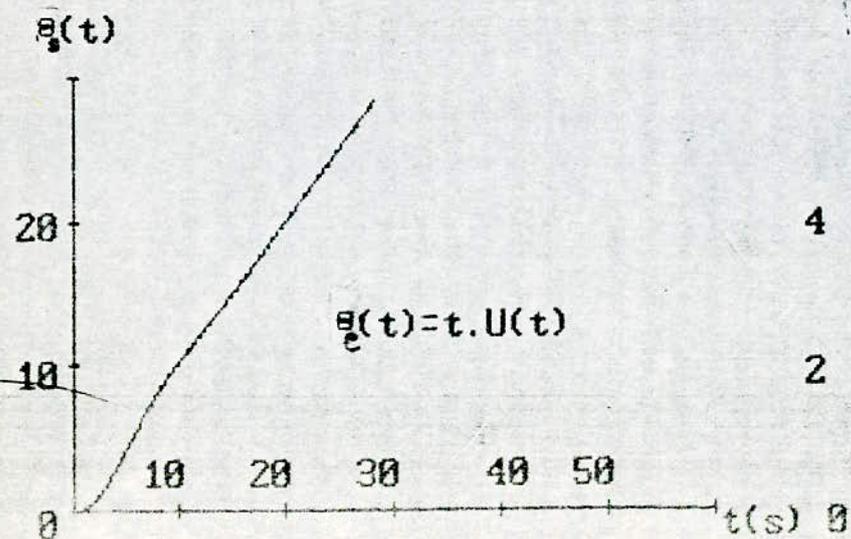
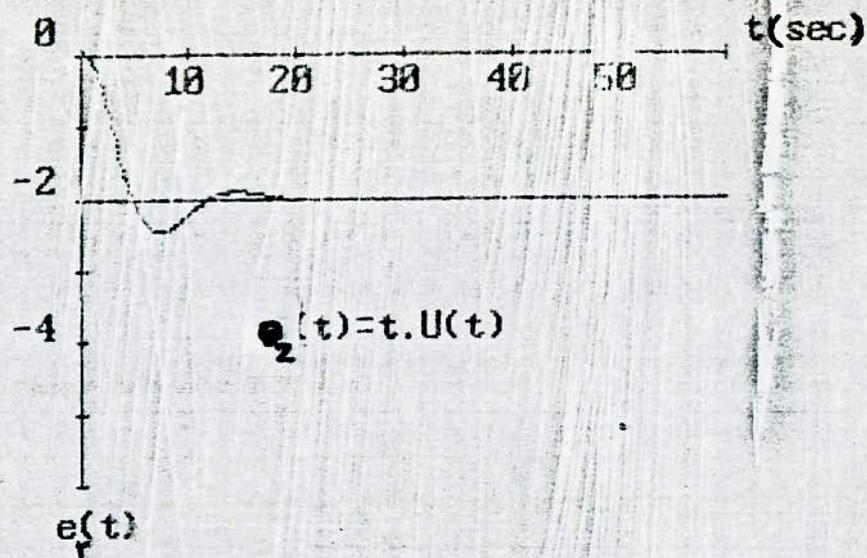
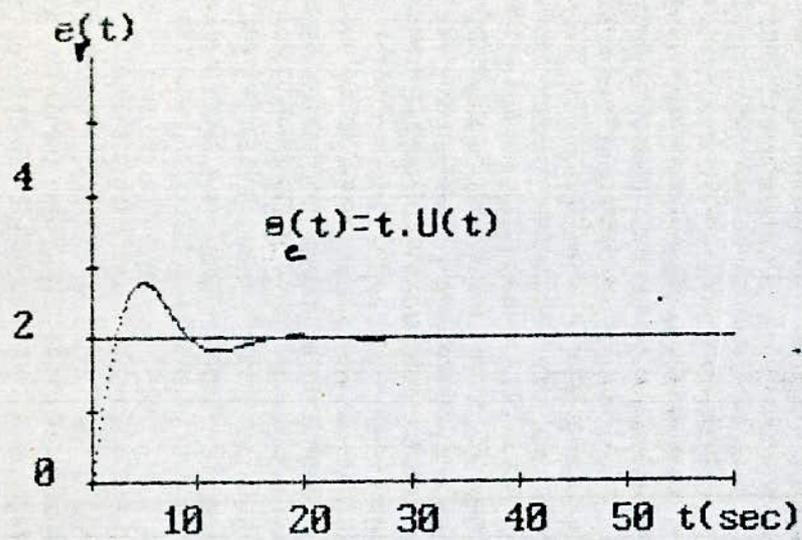


FIG 4-10 Réponses à des entrées en rampe pour  $\gamma = 0,49$  (Avec correction,  $A=10$   $T=0,3$ )

## Conclusion

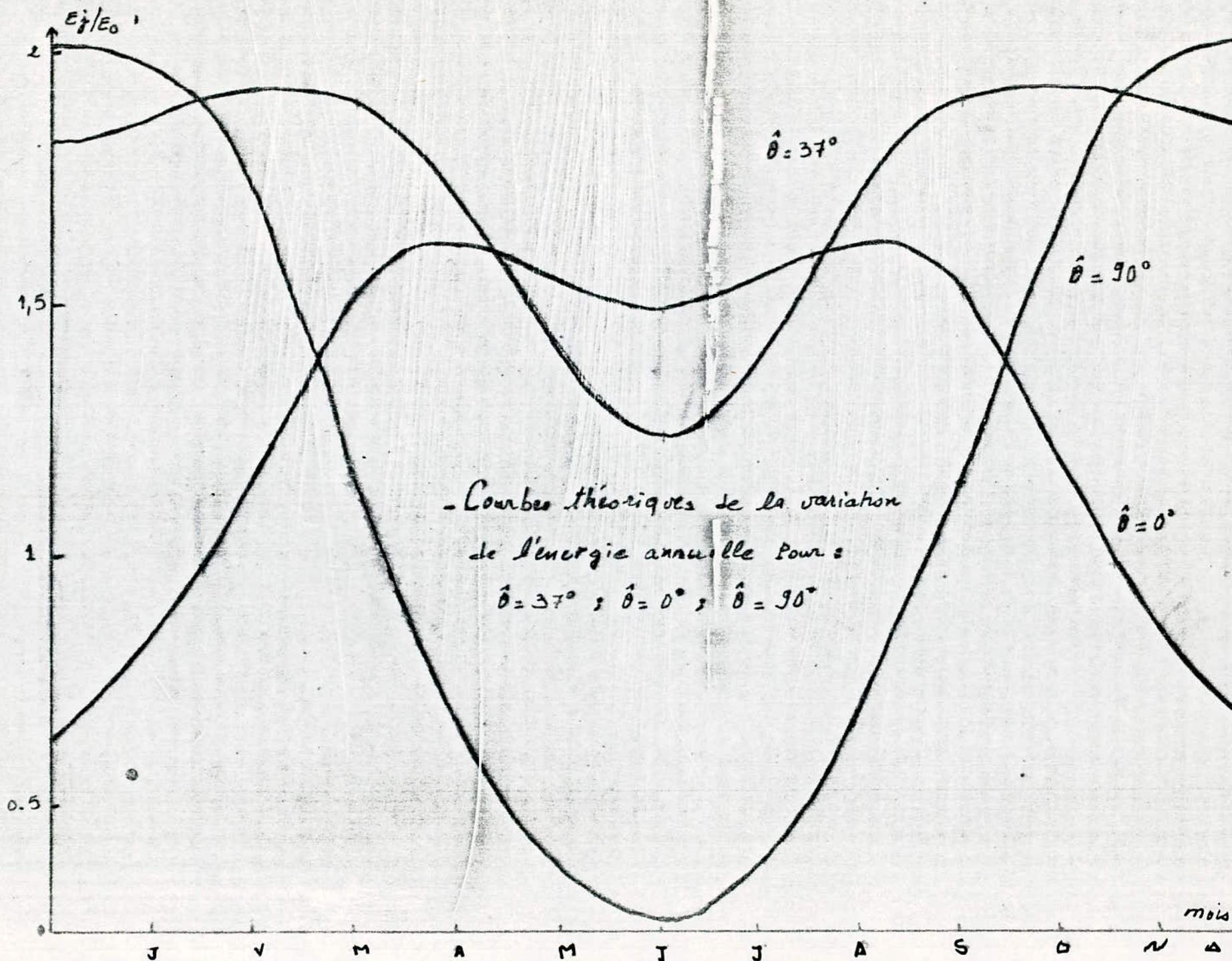
---

Ce travail nous a permis de faire une étude théorique du préchauffage d'un gaz à l'aide d'un système photovoltaïque, ainsi que l'étude d'un régulateur de température bien adapté au système.

Par un choix astucieux du point de fonctionnement du système photovoltaïque-thermodynamique, on a pu éliminer pratiquement l'influence du rayonnement solaire sur le comportement du système, en assurant ainsi un meilleur couplage et une bonne adaptation du système. Par conséquent, nous proposons ainsi une solution pratique au problème de refroidissement au niveau d'un poste de détente néanmoins, ce choix présente la mauvaise optimisation du générateur photovoltaïque ce qui influe sur le rendement de l'installation.

Enfin, on envisagera plus tard une étude expérimentale du système de préchauffage ce qui permet de dimensionner parfaitement l'installation.

ANNEXE



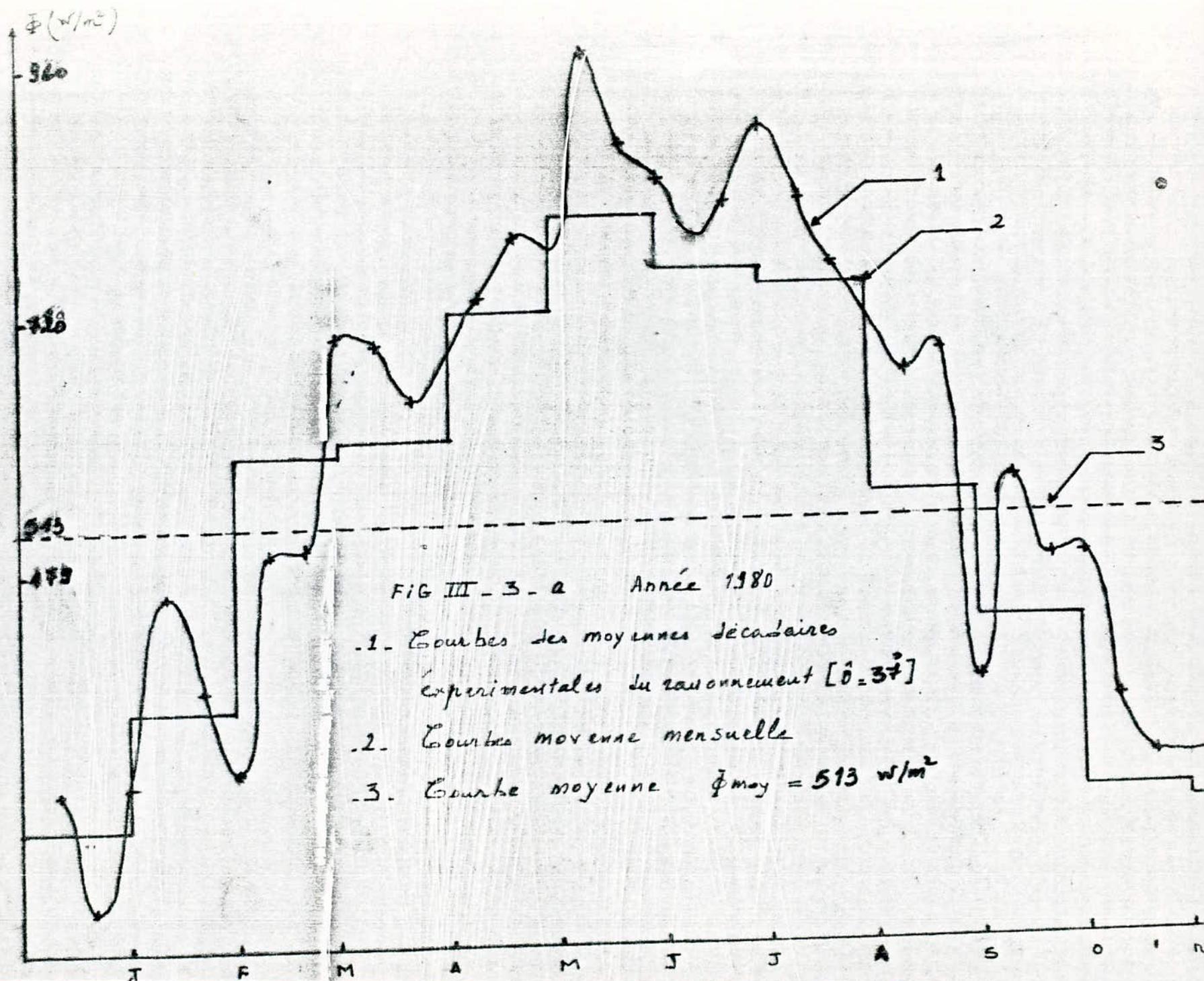


FIG III - 3 - a Année 1980

- 1. Courbes des moyennes décadales  
  Expérimentales du raisonnement [ $\delta = 3^\circ$ ]
- 2. Courbes moyenne mensuelle
- 3. Courbe moyenne  $\bar{\Phi}_{\text{moy}} = 513 \text{ w/m}^2$

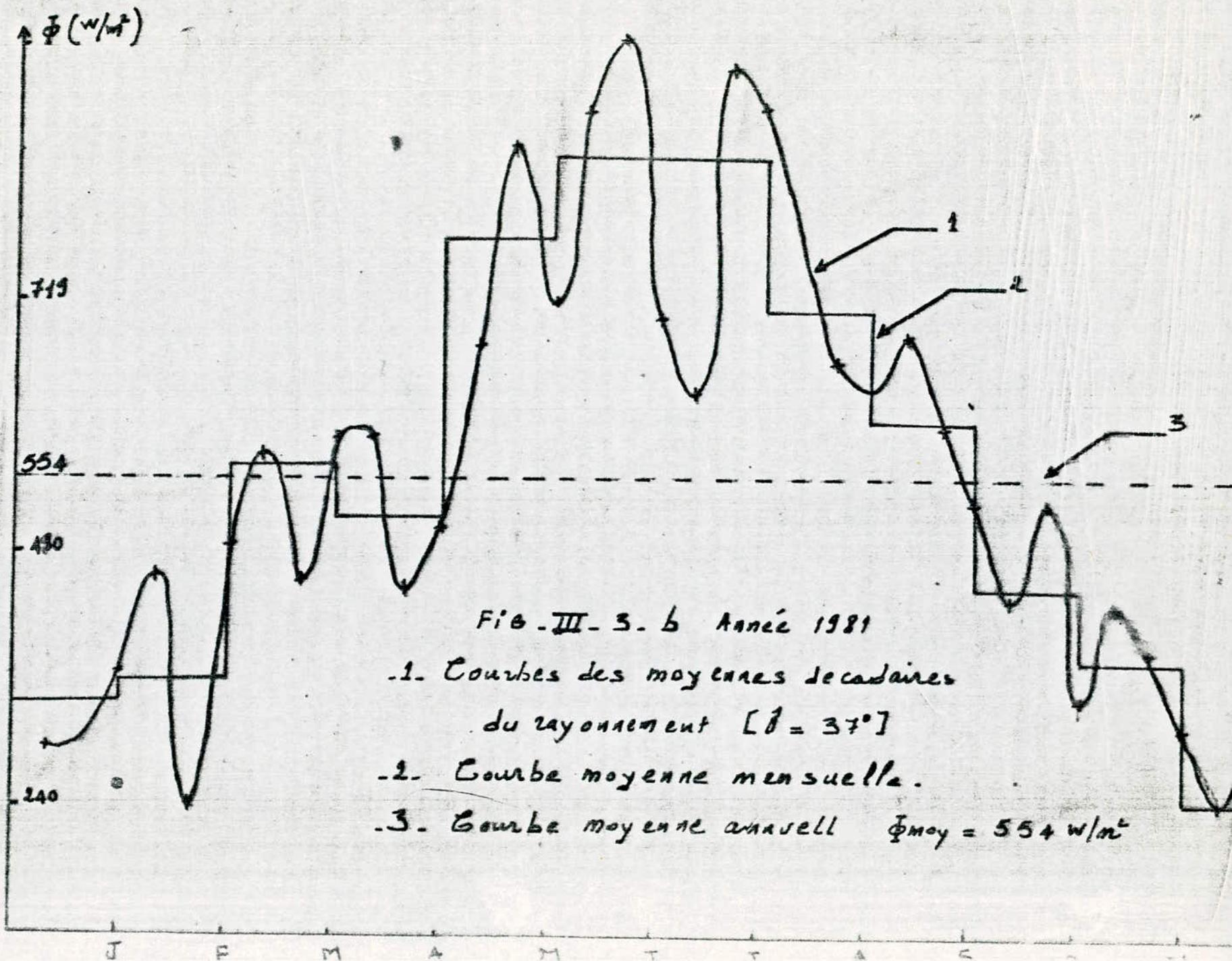


Fig. III-3. b Année 1981

- 1. Courbes des moyennes decadaires du rayonnement [ $\delta = 37^\circ$ ]
- 2. Courbe moyenne mensuelle.
- 3. Courbe moyenne annuelle  $\Phi_{moy} = 554 w/m^2$

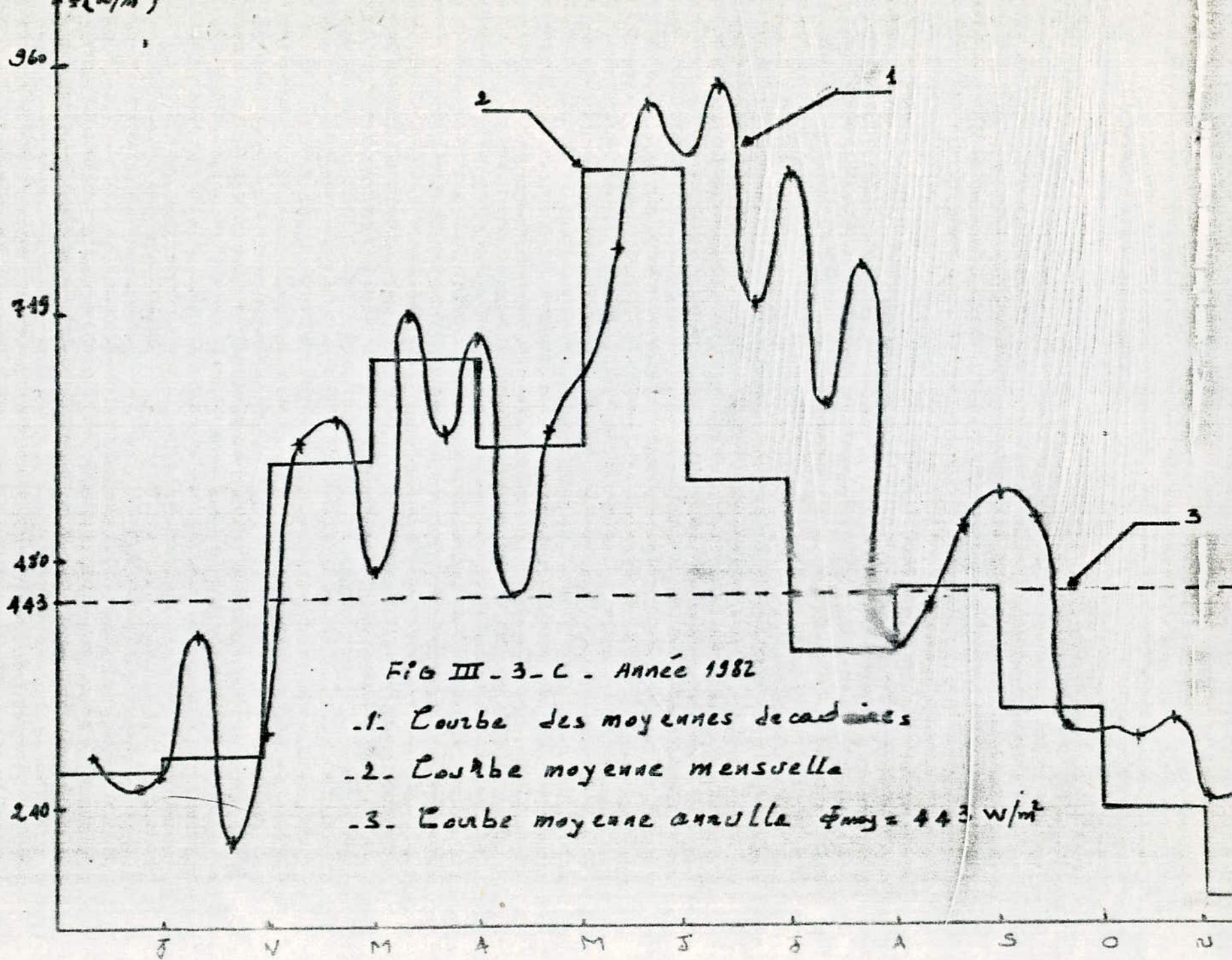


FIG III-3-C - Année 1982

- 1. Courbe des moyennes decadales
- 2. Courbe moyenne mensuelle
- 3. Courbe moyenne annuelle  $\phi_{\text{moy}} = 443 \text{ W/m}^2$

```

10 REM*CARACTERISIQUE FONDAMENTALE DU MODULE PHOTOVOLTAIQUE
20 REM "*****TYPE ARCO-SOLAIRE*****"
30 CLS:SCREEN 3:GOSUB 150
40 LOCATE 2,40:INPUT "PHI=";PHI
50 LOCATE 3,40:INPUT "T=";T
60 LOCATE 2,40:PRINT "          ":LOCATE 3,40:PRINT "
70 FOR V=0 TO 19 STEP .01
80 ALPHA=.00025*(T+273)+.224
90 X0 =ALPHA*PHI*.009025/(EXP(322.47*19/(T+273))-1)
100 XI=(ALPHA*PHI*.009025 - X0*(EXP(322.47*V/(T+273))-1))
110 X=30+V*24.74
120 Y=350-XI*75
130 PSET(X,Y): NEXT
140 GOTO 40
150 LINE(30,50)-(30,350):LINE(30,350)-(524.74,350)
160 FOR I=50 TO 350 STEP 75
170 LINE (28,I)-(32,I):NEXT
180 FOR I=30 TO 524.74 STEP 49.5
190 LINE(I,348)-(I,352):NEXT
200 LINE(30,350)-(250,50)
210 LINE(30,350)-(580,250)
220 LOCATE 3,3:PRINT "I(A) " :LOCATE 22,67:PRINT "V(Volts)"
230 RETURN

```



```

10 REM*FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AU FIL DU SOLEIL *
20 CLS:SCREEN 3:GOSUB 220
30 READ MG,CPG,TETA1,N,M:DATA .0077,1960,-30,3,9
40 LOCATE 2,2:INPUT "R=";R
50 LOCATE 2,2:PRINT " "
60 LOCATE 2,4:INPUT "T=";T
70 LOCATE 2,2:PRINT " "
80 X0=30 :Y0=300
90 FOR TETA2=-30 TO 30 STEP .05
100 Q=MG*CPG*(TETA2-TETA1)
110 W=EXP(322.47*19/(T+273))-1
120 Z=1-(EXP(322.47* SQR(Q *R)/(M*(T+273)))-1)/W
130 ALPHA=.00025*(T+273)+.224
140 PHI=SQR(Q/R)/(N*ALPHA*Z*.009025)
150 IF PHI<=1300 THEN 170
160 GOTO 40
170 X=300+TETA2*9
180 Y=300-PHI*.2083333
190 LINE(X0,Y0)-(X,Y)
200 X0=X:Y0=Y :NEXT
210 GOTO 40
220 LINE(300,50)-(300,350):LINE(30,300)-(600,300)
230 LINE(363,350)-(363,50)
240 FOR I=300 TO 50 STEP -20.83333
250 LINE( 298,I)-(302,I):NEXT
260 FOR I=30 TO 600 STEP 90
270 LINE(I,298)-(I,302):NEXT
280 LOCATE 20,72:PRINT "TETA2(°c)"
290 LOCATE 3 ,35:PRINT "PHI(Watts/m2)"
300 LOCATE 20,3:PRINT "-30":LOCATE 20,14:PRINT "-20"
310 LOCATE 20,26:PRINT "-10":LOCATE 20,38:PRINT "0"
320 LOCATE 20,46:PRINT "7" :LOCATE 20,49:PRINT "10"
330 LOCATE 20,60:PRINT "20"
340 RETURN

```

PROGRAMME N° 1

```

10 REM"INFLUENCE DU GAIN,DES PARAMETRES DU CORRECTEUR PAR AVANCE DE PHASE"
20 REM"*****ET DU RETARD EN BOUCLE OUVERTE SUR LA STABILITE *****"
30 CLS:SCREEN 3:GOSUB 100
40 PI=2.14159
50 T1=3:T2=1
60 LOCATE 15,3:INPUT "K=";K:LOCATE 15,3:PRINT " "
70 LOCATE 17,3:INPUT "T=";T:LOCATE 17,3:PRINT " "
80 LOCATE 18,3:INPUT "A=";A:LOCATE 18,3:PRINT " "
90 LOCATE 19,3:INPUT "T3=";T3:LOCATE 19,3:PRINT " "
100 A1=-(T2*T3+T1+T) B=(T2+T1)*(T3+T)+T1*T2+T3*T
110 C=(T1+T2)*T*T3+(T+T3)*T1*T2 D=T1*T2*T3*T
120 FOR W=.2 TO .PI STEP .001
130 E=W*(1+(T1*W)^2)*(1+(T2*W)^2)*(1+(T3*W)^2)*(1+(T*W)^2)
140 REL=K*(T*A*XD+W^5-(T*A*B+C)*W^3+(A1+T*A)*W)/E
150 IMG=-K*(1-(B+T*A*A1)*W^2+(D+T*A*XC)*W^4)/E
160 PSET(500+REL*100,100-IMG*100):NEXT
170 GOTO 60
180 LINE(500,50)-(500,350):LINE(100,100)-(550,100)
190 FOR I=100 TO 550 STEP 100
200 LINE(I,100)-(I,99):NEXT
210 FOR H=100 TO 350 STEP 100
220 LINE(495,H)-(500,H):NEXT
230 LOCATE 3,63:PRINT "IK(KGF)"
240 LOCATE 7,70:PRINT "REL(KGF)"
250 LOCATE 6,50:PRINT "-1" LOCATE 13,64:PRINT "-1"
260 LOCATE 6,37:PRINT "-2" LOCATE 19,64:PRINT "-2"
270 LOCATE 6,24:PRINT "-3"
280 RETURN

```

## PROGRAMME N° 2

```

10 REM "REGLAGE DU GAIN EN BOUCLE OUVERTE PAR L'ABAQUE DE BLACK"
20 CLS:SCREEN 3 :GOSUB 340
30 LOCATE 4,7:INPUT "K=";K
40 LOCATE 5,7:INPUT "A=";A
50 LOCATE 6,7:INPUT "T=";T
60 LOCATE 7,7 :INPUT "T3=";T3
70 LOCATE 4,7:PRINT "      "
80 LOCATE 5,7:PRINT "      "
90 LOCATE 6,7:PRINT "      "
100 LOCATE 7,7:PRINT "      "
110 T1=3 :T2=2
120 FOR W= .001 TO 2.5 STEP .01
130 ADB=20*(LOG(K)/LOG(10))-10*(LOG(W^2*(1+(T1*W)^2)*(1+(T2*W)^2))/LOG(10))+G+H
140 G=10*(LOG((1+(A*T*W)^2)/(1+(T*W)^2))/LOG(10))
150 H=-10*(LOG((1+(T3*W)^2))/LOG(10))
160 PHI=90+(ATN(T1*W)+ATN(T2*W)+ATN(T*W)+ATN(T3*W)-ATN(T*A*W))*(180/3.14159)
170 X=486.333-PHI*1.4333
180 Y=212-ADB*6.1428
190 PSET(X,Y):NEXT
200 LOCATE 3,7 :INPUT "M=";M
210 LOCATE 3,7:PRINT "      "
220 B=M^2/(M^2-1)
230 FOR R=M/(M+1) TO M/(M-1) STEP .01
240 ADB1=20*(LOG(R)/LOG(10))
250 S=- (B+R^2)/(2*R*B)
260 IF ABS(S)=1 THEN 310
270 PHI1=(1.57096-ATN(S/(SQR(1-S^5))))*(180/3.14159)
280 PHI2=-PHI1+360
290 X1=486.333 -PHI1*1.4333 :X2=486.333-PHI2*1.4333 :Y1=195.5-ADB1*6.1428
300 PSET(X1,Y1):PSET(X2,Y1)
310 PSET(228.333,195.5-ADB1*6.1428)
320 NEXT
330 GOTO 30
340 LINE(486.333,40)-(486.333,359.428)
350 LINE(113.666,359.428)-(486.333,359.428)
360 LINE(113.666,212)-(486.333,212)
370 LINE(228.333,40)-(228.333,359.428)
380 FOR X=113.666 TO 486.333 STEP 28.666
390 LINE (X,357.428)-(X,361.428) :NEXT
400 FOR Y=40 TO 359.428 STEP 24.57143
410 LINE(484.333,Y)-(488.333,Y):NEXT
420 LOCATE 3,60 :PRINT "Gain en dB"
430 LOCATE 24,2 :PRINT "Phase en degres"
440 LOCATE 13,63 :PRINT "0"
450 LOCATE 10,63 :PRINT "8"
460 LOCATE 7,63 :PRINT "16"
470 LOCATE 4,63 :PRINT "24"
480 LOCATE 16,63 :PRINT "-8"
490 LOCATE 19,63 :PRINT "-16"
500 LOCATE 22,63 :PRINT "-24"
510 LOCATE 23,61 :PRINT "0"
520 LOCATE 23,53:PRINT "-40"
530 LOCATE 23,45:PRINT "-80"
540 LOCATE 23,38:PRINT "-120"
550 LOCATE 23,31:PRINT "-160"
560 LOCATE 23,24 :PRINT "-200"
570 RETURN

```

PROGRAMME N° 3

```

10 REM"INFLUENCE DU GAIN ,DES PARAMETRES DU CORRECTEUR PAR AVANCE DE PHASE"
20 REM" ***** SUR L'AMPLITUDE *****
30 CLS :SCREEN 3 :GOSUB 170
40 LOCATE 3,60 :INPUT "K=";K :LOCATE 3,60 :PRINT "      "
50 LOCATE 4,60:INPUT "A=";A :LOCATE 4,60:PRINT "      "
60 LOCATE 5,60 :INPUT "T=";T:LOCATE 5,60 :PRINT "      "
70 LOCATE 6,60:INPUT "T3=";T3 :LOCATE 6,60 :PRINT "      "
80 T1=3 :T2=2
90 FOR W=.1 TO 15 STEP .01
100 ADB=20*(LOG(K)/LOG(10))-10*(LOG(W^2*(1+(T1*W)^2)*(1+(W*T2)^2))/LOG(10))+G+H
110 G=10*((LOG(1+(T*A*W)^2))/LOG(10))-10*((LOG(1+(T*W)^2))/LOG(10))
120 H=-10*((LOG(1+(T3*W)^2))/LOG(10))
130 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150
140 Y=200-ADB*4.25
150 PSET(X,Y) :NEXT
160 GOTO 40
170 LINE(50,200)-(500,200):LINE(50,30)-(50,370)
180 FOR W=.1 TO 1 STEP .1
190 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150
200 LINE(X,198)-(X,202) :NEXT
210 FOR W=1 TO 10 STEP 1
220 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150
230 LINE(X,198)-(X,202) :NEXT
240 FOR W=10 TO 100 STEP 10
250 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150
260 LINE(X,198)-(X,202) :NEXT
270 FOR Y=30 TO 370 STEP 21.25
280 LINE(48,Y)-(52,Y) :NEXT
290 LOCATE 1,5 :PRINT "Gain(dB) "
300 LOCATE 13,4 :PRINT "0"
310 LOCATE 10,4 :PRINT "10"
320 LOCATE 8,4 :PRINT "20"
330 LOCATE 5,4 :PRINT "30"
340 LOCATE 16,3 :PRINT "-10 "
350 LOCATE 18,3:PRINT "-20"
360 LOCATE 21,3:PRINT "-30"
370 LOCATE 14,11 :PRINT ".2"
380 LOCATE 14,26:PRINT "1"
390 LOCATE 14,44 :PRINT "10"
400 LOCATE 13,65:PRINT "LOG(w) "
410 LOCATE 14,63 :PRINT "100"
420 RETURN

```

— Programme n° 4 —

```
10 REM "*****INFLUENCE DES PARAMETRES DU CORRECTEUR PAR AVANCE *****"  
20 REM "      ***** SUR LA PHASE *****"  
30 CLS: SCREEN 3: GOSUB 140  
40 T1=3 :T2=2  
50 LOCATE 6 ,63:INPUT "T="; T :LOCATE 6,63:PRINT "      "  
60 LOCATE 7,63 :INPUT "A=";A:LOCATE 7,63:PRINT "      "  
70 LOCATE 8 ,63:INPUT "T3="; T3:LOCATE 8,63:PRINT "      "  
80 FOR W=.1 TO 10 STEP .01  
90 PHI=90+(ATN(T1*W)+ATN(T2*W)+ATN(T3*W)+ATN(T*W)-ATN(T*A*W))*(180/3.14159)  
100 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150  
110 Y=20+PHI*1.2  
120 PSET(X,Y) :NEXT  
130 GOTO 50  
140 LINE(50,20)-(50,370):LINE(50,20)-(500,20)  
150 FOR W=.1 TO 1 STEP .1  
160 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150  
170 LINE(X,18)-(X,22) :NEXT  
180 FOR W=1 TO 10 STEP 1  
190 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150  
200 LINE(X,18)-(X,22):NEXT  
210 FOR W=10 TO 100 STEP 10  
220 X=200+(LOG(W)/LOG(10))*150  
230 LINE(X,18)-(X,22) :NEXT  
240 FOR Y=20 TO 370 STEP 24  
250 LINE(48,Y)-(52,Y) :NEXT  
260 LOCATE 9,2:PRINT "-100"  
270 LOCATE 17,2:PRINT "-200"  
280 LOCATE 23,1:PRINT "PHASES(degrees)"  
290 LOCATE 1,6:PRINT "0.1"  
300 LOCATE 1,26 :PRINT "1"  
310 LOCATE 1,44:PRINT "10"  
320 LOCATE 2,65:PRINT "LOG(w)"  
330 LOCATE 1,62:PRINT "100"  
340 RETURN
```

PROGRAMME N° 5

```
10 REM"DETERMINATION DE LA RACINE REELLE DU POLYNOME DU 3° (NEWTON)"
20 CLS:READ T1,T2,EP5,N :DATA 3 ,2 ,0.0001,100
30 INPUT "A=";A :INPUT "B=";B : INPUT "K=";K
40 V1=3*T1*T2*X0^2+2*(T1+T2)*X0+1
50 V2=6*T1*T2*X0+2*(T1+T2)
60 FOR X0=A TO B STEP .01
70 IF V1*V2>0 THEN 100
80 NEXT X0
90 PRINT "INTERVALLE REJETTE":END
100 PRINT "X0=";X0
110 I=0
120 V3=T1*T2*X0^3+(T1+T2)*X0^2+X0+K
130 V4=3*T1*T2*X0^2+2*(T1+T2)*X0+1
140 X1=X0-V3/V4
150 V5=T1*T2*X1^3+(T1+T2)*X1^2+X1+K
160 IF ABS(V5) <= EP5 THEN 230
170 I=I+1
180 IF I<=N THEN 210
190 PRINT "PAS DE CONVERGEANCE APRES N-ITERATIONS"
200 GOTO 240
210 X0=X1
220 GOTO 120
230 PRINT "X1=";X1 :PRINT "V5=";V5
240 STOP
```

## PROGRAMME N° 6

```
5 REM "REponses INDICIELLES POUR K1.3=.25"
10 CLS: SCREEN 3:GOSUB 130
20 PI=3.14159
30 FOR T=0 TO 4*PI/.236 STEP PI/18
40 Y1=1+1.072*EXP(-.077*T)*(COS(.235*T+2.959))+.052*EXP(-.68*T)
50 Y2=-.142*EXP(-.68*T)-1.06*EXP(-.077*T)*(COS(.235*T-1.712))
60 Y3=.148*EXP(-.68*T)-1.108*EXP(-.077*T)*(COS(.235*T+2.454))
70 Y4=-.39*EXP(-.68*T)+1.1*EXP(-.077*T)*(COS(.235*T+1.205))
80 PSET(30+T*4,170-Y1*46.666)
90 PSET(330+T*4,170-Y2*46.666)
100 PSET(30+T*4,370-Y3*46.666)
110 PSET(330+T*4,370-Y4*46.666)
120 NEXT :END
130 LINE(30,30)-(30,170):LINE(30,170)-(270,170)
140 LINE(330,30)-(330,170):LINE(330,170)-(570,170)
150 LINE(30,230)-(30,370):LINE(30,370)-(270,370)
160 LINE(330,230)-(330,370):LINE(330,370)-(570,370)
170 LINE(30,123.333)-(270,123.333)
180 FOR X=30 TO 270 STEP 40
190 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
200 FOR Y=30 TO 170 STEP 46.666
210 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
220 FOR X=330 TO 570 STEP 40
230 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
240 FOR Y=30 TO 170 STEP 46.666
250 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
260 FOR Y=230 TO 370 STEP 46.666
270 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
280 FOR X=30 TO 270 STEP 40
290 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
300 FOR X=330 TO 570 STEP 40
310 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
320 FOR Y=230 TO 370 STEP 46.666
330 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
340 RETURN
```

## PROGRAMME N° 7

```
10 REM "REPONSES A UNE RAMPE (K1,3=0.25; SANS CORRECTION )
20 CLS: SCREEN 3:GOSUB 140
30 PI=3.14159
40 FOR T=0 TO 4.4*PI/.235 STEP PI/30
50 Y1= 4.001-.217*EXP(-.68*T)-4.485*EXP(-.077*T)*(SIN(.235*T+2.136))
60 Y2=.573*EXP(-.68*T)+4.45*EXP(-.077*T)*(SIN(.235*T+.889))-4.03
70 Y3=T+4.34*EXP(-.077*T)*(SIN(.235*T+2.642))-.076*EXP(-.68*T)-1.9989
80 Y4=.208*EXP(-.68*T)+4.01- 4.291*EXP(-.077*T)*(SIN(.235*T+1.396))
90 PSET(30+T*4,170-Y1*23.333)
100 PSET(330+T*4,30 -Y2*23.333)
110 PSET(30+T*2.4,370-Y3*1.4 )
120 PSET(330+T*4,370-Y4*23.333)
130 NEXT :END
140 LINE(30,30)-(30,170):LINE(30,170)-(270,170)
150 LINE(330,30)-(330,170):LINE(330,30)-(570,30 )
160 LINE(30,230)-(30,370):LINE(30,370)-(270,370)
170 LINE(330,230)-(330,370):LINE(330,370)-(570,370)
180 LINE(30,76.666)-(270,76.666 )
190 LINE(330,276.666)-(570,276.666)
200 LINE(330,123.333)-(570,123.333)
210 FOR X=30 TO 270 STEP 40
220 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
230 FOR Y=70 TO 170 STEP 23.333
240 LINE( 28,Y)-(32,Y):NEXT
250 FOR X=330 TO 570 STEP 40
260 LINE(X,28)-(X,32 ):NEXT
270 FOR Y=30 TO 170 STEP 23.333
280 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
290 FOR Y=230 TO 370 STEP 14
300 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
310 FOR X=30 TO 270 STEP 24
320 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
330 FOR X=330 TO 570 STEP 40
340 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
350 FOR Y=230 TO 570 STEP 23.333
360 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
370 RETURN
```

### PROGRAMME N° 8

```
5 REM "REPONSES INDICIELLES AVEC CORRECTION (A=10 ; T=0.3 )
10 CLS :SCREEN 3 : GOSUB 130
20 PI=3.14159
30 FOR T=0 TO 6*PI/.442 STEP PI/50
40 Y1=1+1.236*EXP(-.21*T)*(COS(.442*T+3.549))+.133*EXP(-3.415*T)
50 Y2=-.927*EXP(-3.415*T)- 1.234*EXP(-.21*T)*(COS(.442*T+2.422))
60 Y3=.022*EXP(-3.4153*T)-1.167*EXP(-.21*T)*(COS(.442*T+2.562))
70 Y4=-.159*EXP(-3.4153*T)+1.167*EXP(-.21*T)*(COS(.442*T+1.432))
80 PSET(30+T*4,170-Y1*46.666)
90 PSET(330+T*4,170-Y2*46.666)
100 PSET(30+T*4,370-Y3*46.666)
110 PSET(330+T*4,370-Y4*46.666)
120 NEXT T:END
130 LINE(30,30)-(30,170):LINE(30,170)-(270,170)
140 LINE(330,30)-(330,170):LINE(330,170)-(570,170)
150 LINE(30,230)-(30,370):LINE(30,370)-(270,370)
160 LINE(330,230)-(330,370):LINE(330,370)-(570,370)
166 LINE(30,123.333)-(270,123.333)
170 FOR X=30 TO 270 STEP 40
180 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
190 FOR Y=30 TO 170 STEP 46.666
200 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
210 FOR X=330 TO 570 STEP 40
220 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
230 FOR Y=30 TO 170 STEP 46.666
240 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
250 FOR Y=230 TO 370 STEP 46.666
260 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
270 FOR X=30 TO 270 STEP 40
280 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
290 FOR X=330 TO 570 STEP 40
300 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
310 FOR Y=230 TO 370 STEP 46.666
320 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
330 RETURN
```

## PROGRAMME N° 9

```
10 REM *REPONSES A UNE RAMPE (K1, J=0.49, A=10, T=0.3 sec ) *
20 CLS: SCREEN 3:GOSUB 140
30 PI=3.14159
40 FOR T=0 TO 4*PI/1.442 STEP PI/20
50 Y1=-.004*EXP(-3.415*T)+2! -2.386*EXP(-.21*T)*(SIN(.442*T+2.109))
60 Y2=.046*EXP(-3.415*T)+2.386*EXP(-.21*T)*(SIN(.442*T+.9894))-2!
70 Y3=T+2.527*EXP(-.21*T)*(SIN(.442*T+3.106))-.039*EXP(-3.415*T)-.052
80 Y4=.271*EXP(-3.415*T)+2! -2.523*EXP(-.21*T)*(SIN(.442*T+1.978))
90 PSET(30+T*4, 170-Y1*23.333)
100 PSET(330+T*4, 30 -Y2*23.333)
110 PSET(30+T*6, 370-Y3*4.6666)
120 PSET(330+T*4, 370-Y4*23.333)
130 NEXT T:END
140 LINE(30,30)-(30,170):LINE(30,170)-(270,170)
150 LINE(330,30)-(330,170):LINE(330,30)-(570,30)
160 LINE(30,230)-(30,370):LINE(30,370)-(270,370)
170 LINE(330,230)-(330,370):LINE(330,370)-(570,370)
180 LINE(30,123.333)-(270,123.333)
190 LINE(330,323.333)-(570,323.333)
200 LINE(330,76.666)-(570,76.666)
210 FOR X=30 TO 270 STEP 40
220 LINE(X,168)-(X,172):NEXT
230 FOR Y=30 TO 170 STEP 23.333
240 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
250 FOR X=330 TO 570 STEP 40
260 LINE(X,28)-(X,32):NEXT
270 FOR Y=30 TO 170 STEP 23.333
280 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
290 FOR Y=230 TO 370 STEP 46.666
300 LINE(28,Y)-(32,Y):NEXT
310 FOR X=30 TO 270 STEP 60
320 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
330 FOR X=330 TO 570 STEP 40
340 LINE(X,368)-(X,372):NEXT
350 FOR Y=230 TO 570 STEP 23.333
360 LINE(328,Y)-(332,Y):NEXT
370 RETURN
```

Règle de développement de Heaviside:

Détermination de la transformée inverse de  $H(p)$

$$H(p) = \frac{f(p)}{PF(p)} = \frac{N(p)}{D(p)} ; \text{ avec } F(p) = (p-p_1)(p-p_2)\dots(p-p_n)$$

On suppose que  $d^{\circ}D > d^{\circ}N$

$$H(p) = \frac{A}{p} + \frac{B_1}{p-p_1} + \frac{B_2}{p-p_2} + \dots + \frac{B_n}{p-p_n}$$

$$pH(p) = A + \frac{B_1 p}{p-p_1} + \dots + \frac{B_n p}{p-p_n}$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} pH(p) = A = \frac{f(0)}{F(0)}$$

$$(p-p_1)H(p) = \frac{A(p-p_1)}{p} + B_1 + \frac{B_2(p-p_1)}{p} + \dots$$

$$B_1 = \lim_{p \rightarrow p_1} [(p-p_1)H(p)] = \lim_{p \rightarrow p_1} \left[ \frac{f(p) \cdot (p-p_1)}{p(F(p)-F(p_1))} \right]$$

$$B_1 = \frac{f(p_1)}{p_1 F'(p_1)}$$

d'une manière générale:

$$B_n = \frac{f(p_n)}{p_n F'(p_n)}$$

$$h(t) = \frac{f(0)}{F(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{f(p_i)}{p_i F'(p_i)} e^{p_i t}$$

## B I B L I O G R A P H I E

- 1 M. ORGERET Les piles solaires - le composant et les applications.
- 2 Projet de fin d'étude département électronique.  
Expérimentation et optimisation d'une station pompage photovoltaïque" janvier 1985.
- 3 P. NASLIN Technologie et calcul pratique des systèmes asservis"
- 4 J. GILLE "Théorie et calcul des asservissements"
- 5 J.J DISTEFANO "Série SCHAUM"  
" Systèmes asservis"
- 6 F. MIL SANT "Asservissements linéaires"
- 7 J. MIGNOT "Mesures industrielles"  
J. VALLIER
- 8 E. ARMENSKI "Micromachines électriques"  
G. FALK
- 9 **Projet de Fin d'étude** département électronique  
"Etude expérimentale et simulation numérique du déséquilibre dans un générateur photovoltaïque " juin 1986.