

14/83

Université des Sciences et de la Technologie  
HOUARI BOUMEDIENE

200

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET :

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
التكنولوجية  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

Étude et Réalisation d'un  
Stabilisateur Ferrromagnétique

$U = 220 V$        $f = 50 HZ$

JUIN 1983

PROPOSE PAR :  
Mr KOROBV V.A.  
Maitre de Conférences

ETUDE PAR :  
INDRANO François

Université des Sciences et de la Technologie  
HOUARI BOUMEDIENE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET :



**Etude et Réalisation d'un  
Stabilisateur Ferrromagnetique  
U = 220 V      f = 50 HZ**

JUIN 1983

PROPOSE PAR :  
Mr KOROBV V.A.  
Maitre de Conférences

ETUDIE PAR :  
INDRANO François



- o - R E M E R C I E M E N T S - o -

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Mr KOROBV Professeur à l' ENPA , pour son dévouement et pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté.

Je tiens à remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation.

J'exprime les plus vifs remerciements à Mr MIRONOV, à la Direction de la Chaire d'Electrotechnique et Mr Ignace de l' INHC de Boumerdas.

Je tiens à remercier tous les enseignants et personnels du Département d'Electrotechnique, d'Electronique et du Centre de Documentation.

Enfin, tous les amis , tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail, trouveront ici l' expression de ma profonde gratitude.

Introduction	p 1
Chapitre I	
Généralités sur les stabilisateurs	
Introduction ;	p 4
1- Principe de fonctionnement d'un stabilisateur.....	4
2- Stabilisateur électronique à transistor.....	9
3- Stabilisateurs utilisant les inductances linéaires et non linéaires. ....	12
4- Stabilisateurs utilisant les transformateurs; ..	12
5- Stabilisateurs à ferrorésonance.....	14
Conclusion .....	19
Chapitre II	
Etude théorique du phénomène de ferrorésonance	
Introduction..	20
1- Rappel sur les circuits électriques linéaires.....	20
2- Bobine à noyau de fer .....	25
3- Couplage en serie de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur.....	29
4- Couplage en parallèle de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur.....	35
Chapitre III	
Méthodes de calcul d'un stabilisateur	
Introduction.....	40
1- Marche à vide.....	40
2- Régime de charge.....	42
Chapitre IV	
Etude expérimentale du phénomène de ferrorésonance	
Introduction.....	48
A. Première partie	
1- Couplage en serie de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur.....	48
2- Etude de la ferrorésonance des courants.....	51
B. Deuxième partie	

1- Caractéristique courant-tension de la bobine à vide.....p	61
2- Etude expérimentale de la résonance des tensions.....	63
3- Influence de la résistance série .....	64
4- Essais en charge .....	64
5- Détermination des paramètres de la maquette.....	70
Conclusion. . . . .	72
Conclusion générale.....	73
Bibliographie.....	74

## INTRODUCTION

Il est à peine besoin d'insister, à l'heure actuelle, sur l'utilité, voire la nécessité de la stabilisation des tensions et des courants. Les réseaux suivent en effet bien difficilement la demande, sans cesse croissante des utilisateurs de l'énergie électrique les obligeant à pâtir des écarts de tensions, alors que le développement des appareillages de contrôle, de régulation et la précision plus grande exigée dans les processus industriels entraînent une alimentation en tension d'une stabilité souvent très poussée.

Ces mêmes variations de la tension d'alimentation sont notamment responsables de la diminution de la durée de vie tubes électroniques ( tension de chauffage des filaments ) [ 4 ], de la perte des données en mémoire des ordinateurs et comme nous le savons tous, de la distorsion d'image et de son des téléviseurs etc...

Ces phénomènes sont d'ailleurs bien connus des photographes travaillant à la lumière artificielle et des utilisateurs de lampes de projection; les lampes utilisées ( dont on augmente le flux lumineux en les "survoltant" ) n'ont, en effet qu'une durée de vie de quelques heures. On a donc tout intérêt à les alimenter sous une tension constante afin de ne pas abréger davantage leur durée de vie.

Ainsi qu'on peut le voir sur la figure 1, avec une surtension de 5%, la durée de vie tombe à 55% et le flux lumineux n'augmente que de 18%; avec une surtension de 10%, la durée de vie tombe à 40% et le flux lumineux n'augmente que de 48%. Une sous-tension de 5% augmente la durée de vie à 220% environ et diminue la lumière de 18%; une sous-tension de 10% augmente la durée de vie de 420% mais diminue la lumière de 40% etc...

Pour des appareils nécessitant un éclairage absolument constant - par exemple mesure du spectre de la lumière, appareils d'agrandissement, photographie en couleur - les régulateurs de tension sont indispensables.

Or la tension nominale de service livrée aux usagers BT par les fournisseurs et distributeurs de l'énergie électrique est fixée à

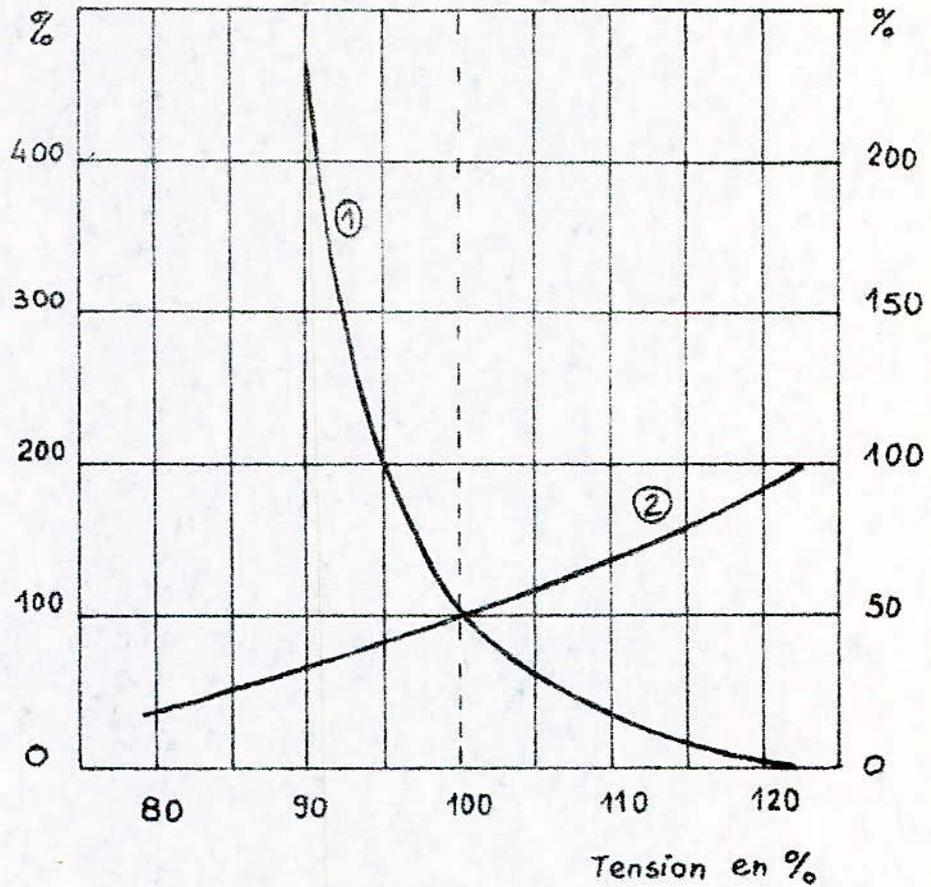


fig 1. Durée de vie et flux lumineux d'une lampe d'éclairage en fonction de la tension de chauffage

- ① Durée de vie
- ② flux lumineux

220/380V . Cette tension est susceptible de variation autour de sa valeur nominale dont la tolérance maximum est de:

$\pm 5\%$  pour les zones urbaines à usage éclairage prépondérant

$\pm 10\%$  pour les zones industrielles et rurales à usage force motrice prépondérant ( article 15 des cahiers de charge ).\*

Le problème tel qu'il est posé est non seulement vaste mais complexe; aussi, passerons-nous en revue les différentes méthodes utilisées couramment pour compenser ces écarts; ensuite nous étudierons en détail le stabilisateur du type ferromagnétique, son principe et ses performances et pour terminer nous nous proposons de réaliser une maquette de stabilisateur de ce type.

## CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LES STABILISATEURS

#### Introduction

Parmi les stabilisateurs utilisés, il existe des stabilisateurs statiques et d'autres qui ne le sont pas. Dans le cadre de cette étude, nous ferons abstraction des stabilisateurs qui ne sont pas purement statiques.

Dans la gamme des stabilisateurs statiques utilisés, il en ressort deux grandes classes:

- les regulateurs en chaîne ouverte
- les regulateurs en chaîne fermée du type proportionnel

Généralement, les regulateurs en chaîne ouverte ou stabilisateurs férromagnétiques utilisent les matériaux électrotechniques tels que la bobine à noyau de fer saturé tandis que les stabilisateurs à réglage proportionnel font appel en plus des matériaux électrotechniques à des éléments semi-conducteurs et à des amplificateurs opérationnels d'où leur dénomination de stabilisateurs électroniques.

#### I.1 Principe de fonctionnement d'un stabilisateur

##### a) Définition

Un regulateur est un dispositif automatique capable de maintenir une grandeur pratiquement constante. [2]

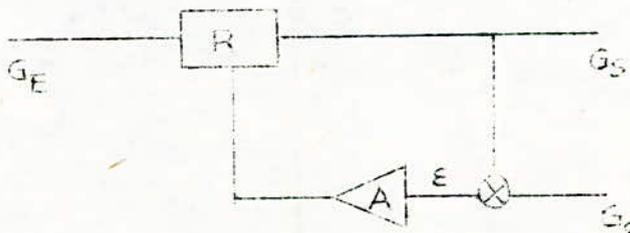


Fig.I.1 Schéma fonctionnel d'un regulateur

- $G_E$  - grandeur d'entrée
- $G_S$  - grandeur de sortie
- R - régulateur
- A - amplificateur de commande
- $\varepsilon$  - signal d'erreur ou écart
- $G_o$  - grandeur de référence

La figure I.1 montre le schéma classique d'un régulateur dont la sortie est maintenue constante quelque soit la variation de la grandeur d'entrée.

L'organe régulateur est en plus commandé par le signal d'erreur  $\varepsilon$  après amplification convenable provenant du comparateur. La grandeur de référence  $G_o$  est supposée pratiquement constante.

Dans le cas qui nous préoccupe, c'est-à-dire si la grandeur considérée est la tension, il s'agit d'un régulateur à réglage proportionnel et nous verrons au I.2 le stabilisateur électronique à titre d'exemple.

Le régulateur en chaîne ouverte ou stabilisateur sans asservissement fait appel à un élément non linéaire (fig. I.2a) : un tel élément délivre une tension de sortie pratiquement indépendante du courant demandé, tout au moins dans toute la gamme d'utilisation normale de l'appareil. C'est le cas du stabilisateur ferromagnétique, dont l'élément non linéaire est une bobine à noyau de fer, travaillant dans la zone de saturation, et qui, associée à un condensateur monté en série ou en parallèle forme un circuit résonnant.

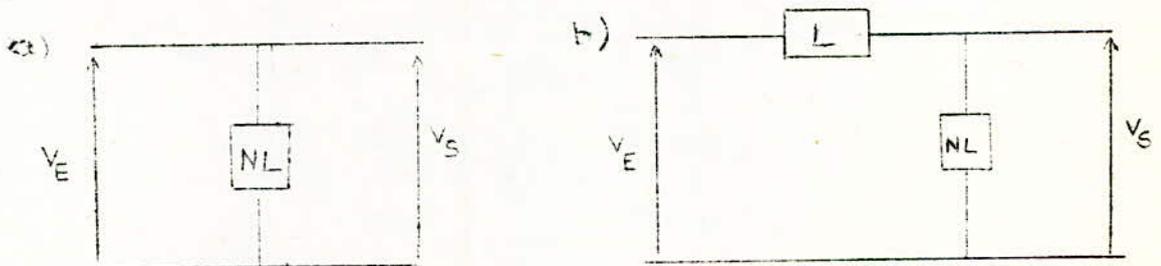


Fig. I.2 a) Schéma de base d'un stabilisateur  
b) Schéma pratique d'un stabilisateur

b) Schéma de principe d'un stabilisateur

Dans la pratique les stabilisateurs sont conçus sur la base des systèmes linéaire et non linéaire (fig.I.2b).

Sur la figure I.2b représentant le schéma pratique d'un stabilisateur de tension :

L est une impédance linéaire donc saturée.

NL est une impédance non linéaire telle que la tension de sortie à ses bornes soit pratiquement indépendante du courant qui la traverse. Dans ces conditions toutes les variations de la tension d'entrée  $V_E$  apparaît comme une chute de tension aux bornes de l'impédance linéaire L qui constitue un élément ballast.

c) courbe de fonctionnement d'un stabilisateur

La version la plus simple est le stabilisateur à fer saturé simple (fig.I.3a ) étudié par Bedell et Kuhn . [3]

Dans la figure précitée :

L représente inductance linéaire cad non saturable

NL sera une inductance non linéaire notée Ls

En examinant les courbes de fonctionnement (fig.I.4a ), on remarque qu'à une certaine variation  $\Delta V_E$  de la tension d'entrée correspond une variation  $\Delta I$  du courant très important et une modification de la tension de sortie  $\Delta V_S$  nettement inférieure à  $\Delta V_E$  mais n'est pas nulle.

Or, on veut avoir à la sortie une tension presque constante c'est-à-dire une variation  $\Delta V_S$  pratiquement nulle.

On adjoint donc au circuit précédent un enroulement L'(fig.I.3b) monté en opposition de phase à l'enroulement non linéaire de tel sorte que la tension deviendra  $V'_S = V_S + V_{L'}$  et qui sera pratiquement constante (fig.I.4b).

L'enroulement L' constitue l'enroulement de compensation.

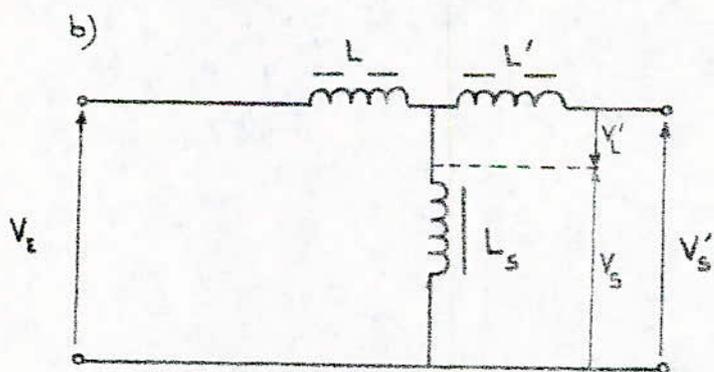
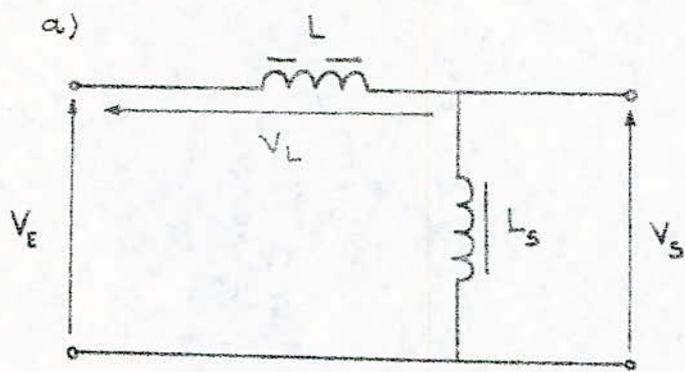


Fig I.3

a) Stabilisateur à fer saturé simple

b) Stabilisateur à fer saturé simple compensé

d) Caractéristiques d'un stabilisateur de tension

- stabilité en tension

La stabilité en tension se définit par la variation relative maximale admise de la tension d'entrée ( $U_E$ ) du stabilisateur pour une variation de la tension de sortie ( $U_S$ ); tout autre paramètre tel que la charge, la fréquence, la température ambiante étant maintenu constante: [4] la tension d'alimentation pouvant varier de 10 à 15% par rapport à sa valeur nominale.

On appelle gain en stabilité ou coefficient de stabilité le rapport de la variation relative de la tension d'entrée par la variation relative de la tension de sortie.

$$K_{st} = \frac{\Delta U_E / U_E}{\Delta U_S / U_S} = \frac{\Delta U_E}{\Delta U_S} \cdot \frac{U_S}{U_E}$$

- autres caractéristiques

Par le principe même de fonctionnement non linéaire, le stabilisateur présente une forte distorsion harmonique, atténuée si nécessaire par des filtres d'harmoniques.

Les stabilisateurs sont en général de très faible puissance (depuis 10 VA jusqu'à quelques kilovolts ampères).

Leur rendement augmente avec la puissance; leur facteur de puissance peut atteindre 0,7 à 0,9 s'il y a la ferrorésonance, sinon ne dépasse pas 0,6 pour une charge purement active.

## I.2 Stabilisateur électronique à transistor

Les stabilisateurs électroniques utilisent les propriétés non linéaires des semi-conducteurs (diode, transistors, thermistances...)

L'élément régulateur est constitué par la résistance interne d'un transistor dont on modifie la polarisation à l'aide d'un courant continu produit par le détecteur d'erreur. (fig. 1.5) [2]

Le transistor ballast  $tr$  est connecté dans la diagonale d'un pont diodes afin d'être toujours parcouru par un courant unidirectionnel, de sens convenable, ce qui permet d'agir de façon symétrique sur les deux alternances du courant alternatif. La résistance interne Collecteur-Emetteur du transistor apparaît donc aux bornes AB du pont.

En réalité le montage est peu utilisable; En effet étant donné que la tension appliquée au transistor,  $V_{CE}$  varie en fonction du temps entre  $0$  et  $V_{CE\max}$ , puisque il s'agit d'une alternance de l'alimentation (fig. I.6), le point de fonctionnement  $M$  se déplace continuellement sur le réseau de caractéristiques (OAM).

Le courant collecteur ne sera donc pas sinusoïdal en raison de la forme non linéaire des caractéristiques. Il ne pourrait l'être en se limitant sur la région OA mais l'action polarisante de la résistance interne du transistor serait nulle. Il en résulte donc une distorsion de la forme de l'onde par harmoniques impaires

Sur la version usuelle du stabilisateur à transistor (fig. I.7) on fait fonctionner le transistor en courant continu filtré en connectant un filtre passe-bas  $L_1, C_1, L_2, C_2$  entre le pont et le transistor de manière à n'appliquer à celui-ci que la tension moyenne. Le condensateur  $C$  accorde le secondaire du transformateur sur l'harmonique "3", terme prépondérant dans la distorsion de l'onde de sortie.  $L$  permet d'assurer un débit permanent, la régulation série utilisée disparaissant à charge nulle.

$Z_1$  et  $Z_2$ , diodes Zener montées en série inverse ou en tête bêche aux bornes du transformateur, sont destinés à limiter la tension aux bornes du pont.

Ces stabilisateurs sont limités à une puissance inférieure à 500 VA en raison de leur rendement médiocre ( $< 50\%$ ) car la régulation est obtenue par une action de courant continu sur le transistor.

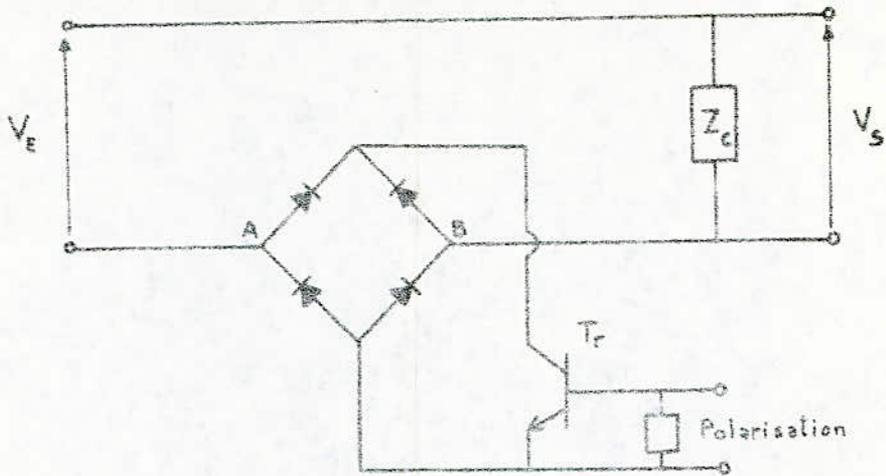


fig I.5 Régulateur électronique à transistor

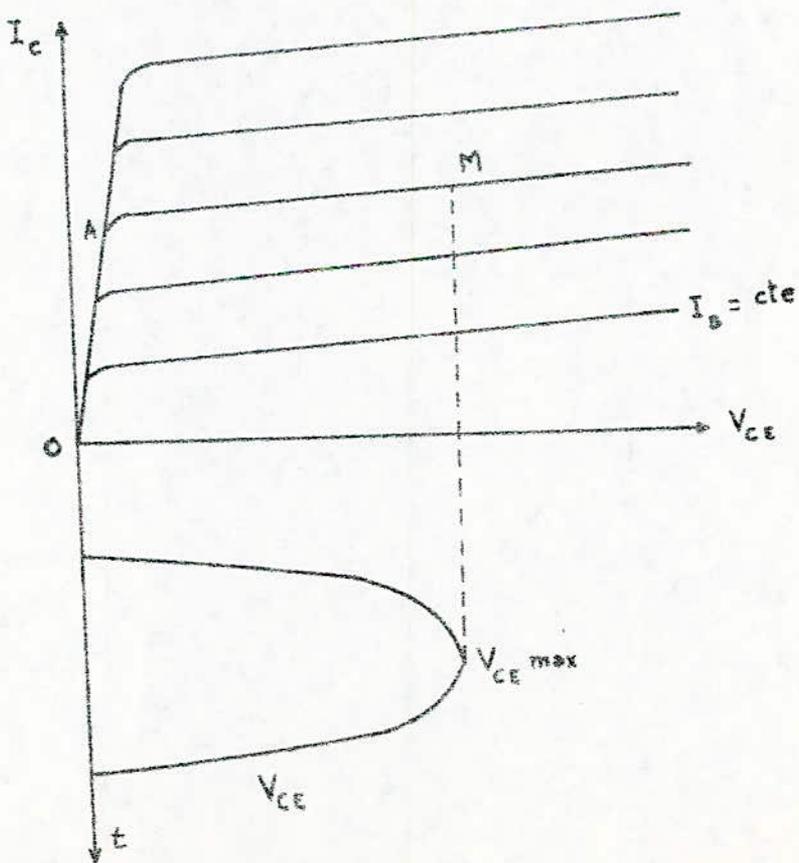


fig I.6 Courbes caractéristiques d'un transistor npn

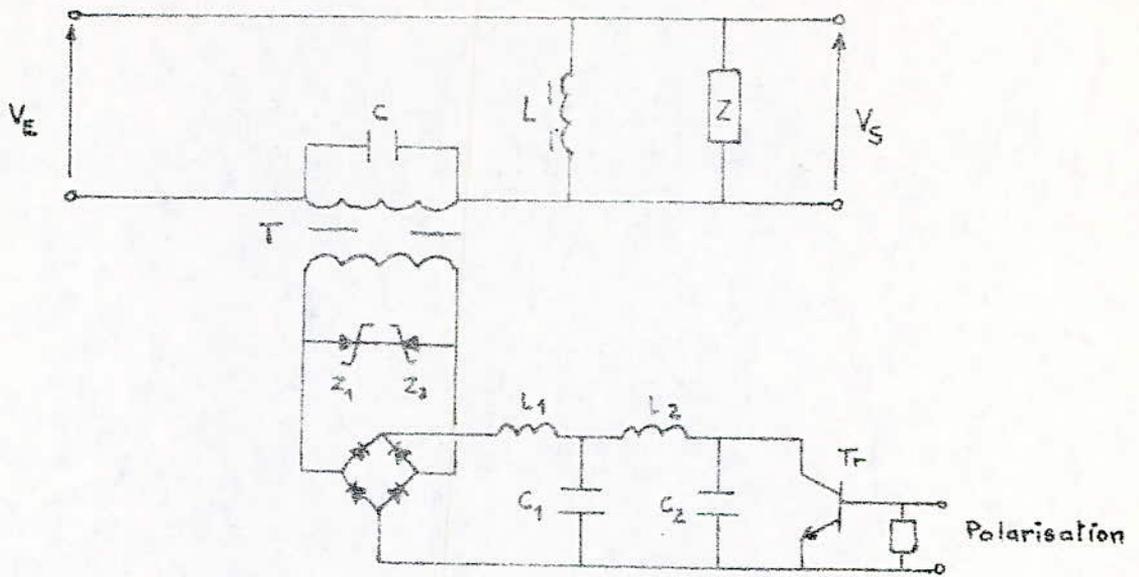


fig I.7 Regulateur électronique à transistor

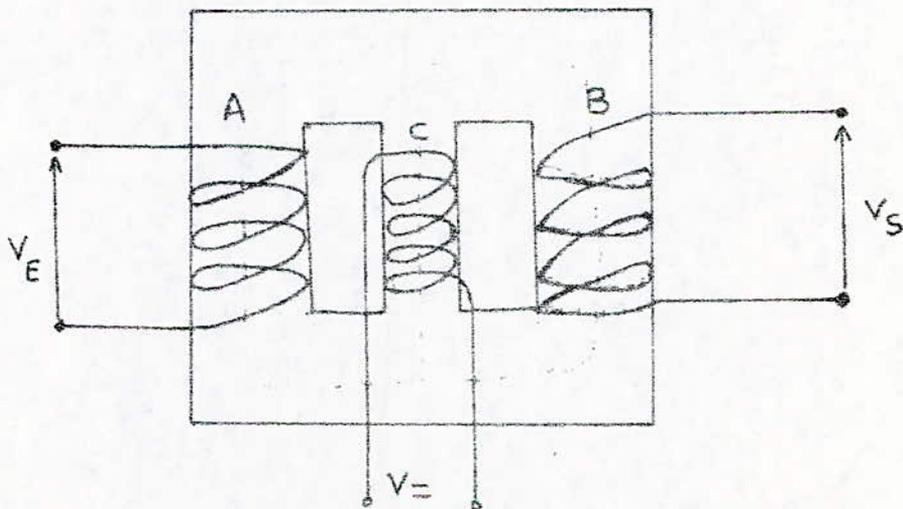


fig I.9 Stabilisateur à transformateur  
à trois noyaux

est obtenue par dissipation d'énergie dans une résistance ballast. De plus il faut une tension minimum aux bornes du pont.

Par contre leur temps de reponse est rapide, de l'ordre de millisecondes mais limité par la constante de temps des filtres  $L_1 C_1$  et  $L_2 C_2$ .

### I.3 Stabilisateurs utilisant les inductances linéaires et non linéaires

Nous avons déjà étudié ce genre de stabilisateur au § I.1 . Disons seulement un mot quant à ses performances: il permet de stabiliser la tension de 10% à l'entrée jusqu'à 1 à 2% à la sortie.

### I.4 Stabilisateurs utilisant les transformateurs

On utilise deux transformateurs en serie dont un seul est saturé (Ts) et dont les secondaires sont connectés en opposition de phase (fig.I.8).

Les tensions primaires et secondaires de chaque transformateur restent toujours dans le rapport des nombres de spires, quelque soit l'état de saturation.

De la figure I.8b on peut en déduire le principe de fonctionnement:

$$V_E = V_1 + V_{S1} \text{ est la tension à stabiliser}$$

$$V_S = V_2 + V_{S2} \text{ est la tension stabilisée}$$

Pour des rapports de transformation convenablement choisis, il est facile de voir que la tension de sortie  $V_S$  est indépendante de la tension d'alimentation dans toute la zone de saturation de Ts;

Une autre réalisation de ce stabilisateur utilise un transformateur à trois noyaux dont un seul est saturé. (fig.I.9) page 10.

L'enroulement centrale C est parcouru par un courant continu dit courant de réglage saturant les deux branches A et B.

Ce procédé a l'avantage de réduire l'encombrement, donc la masse du transformateur et le prix.

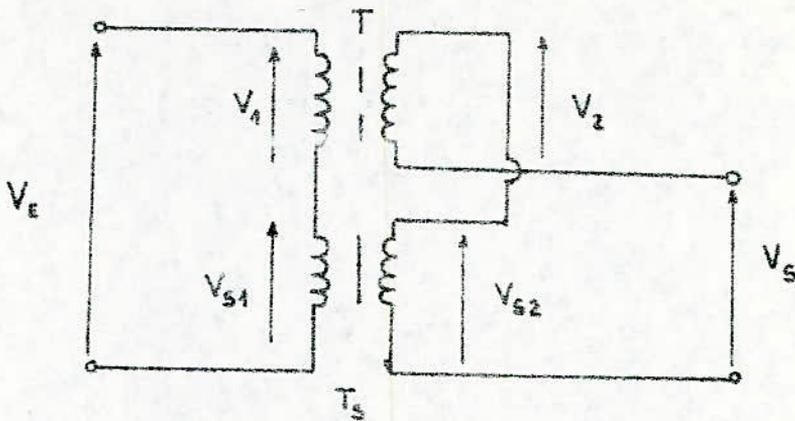


Fig I 8 a Stabilisateur de tension à transformateur saturé

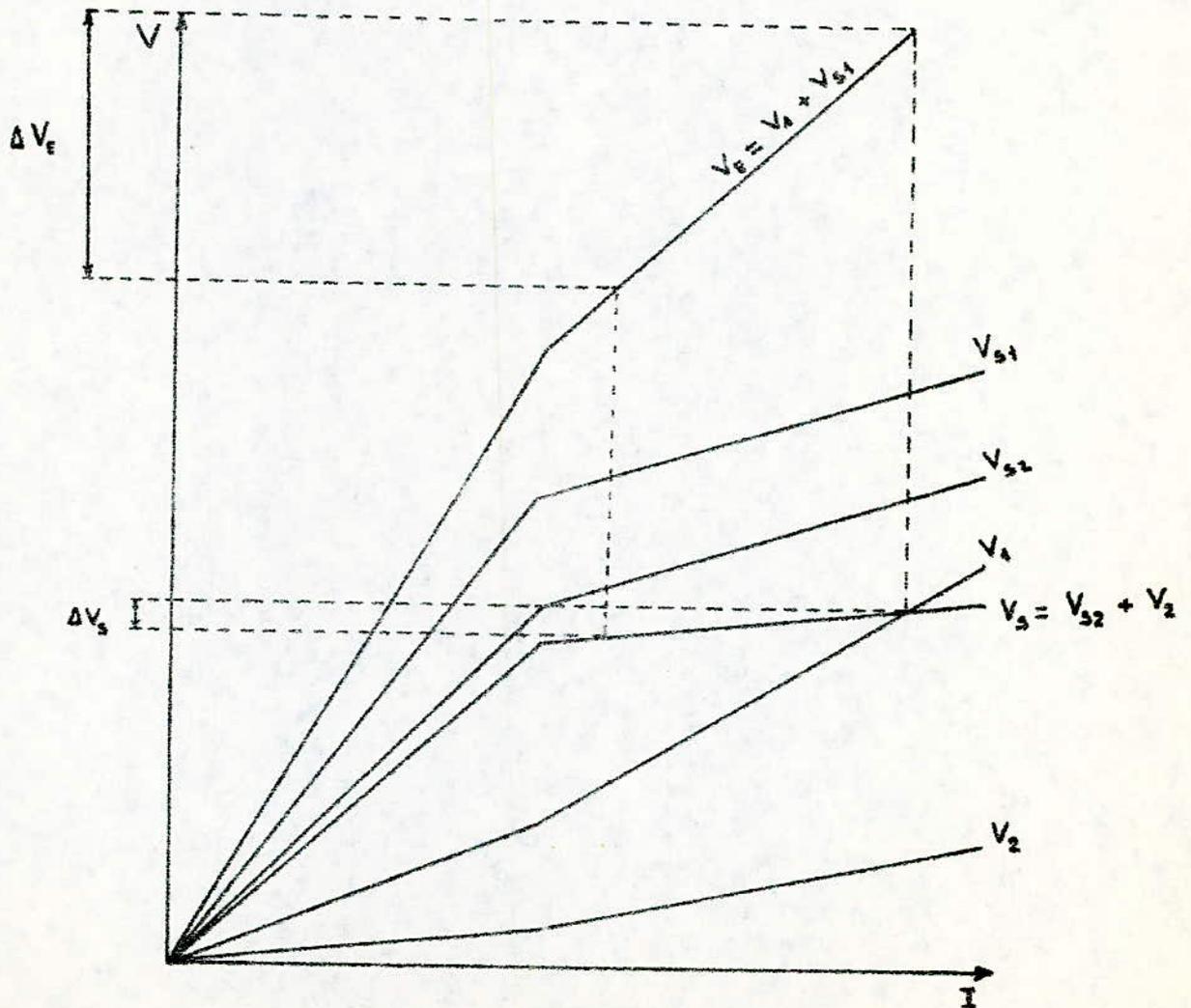


Fig I.8 b Courbes de fonctionnement du stabilisateur

Cependant ces stabilisateurs fonctionnent avec un facteur de puissance très faible vis à vis du réseau, en raison du courant magnétisant absorbé pour placer en point de saturation convenable l'élément saturé.

### I.5 Stabilisateurs à ferrorésonance

L'introduction de la capacité a pour principal avantage d'améliorer le facteur de puissance (le  $\cos \varphi$ ).

#### a) Couplage de la capacité en dérivation

On ajoute au stabilisateur à fer saturé simple (fig;I.3a), une capacité de ferrorésonance pour fournir le courant magnétisant nécessaire à la saturation de l'inductance saturable (fig.I.10a).

On suppose nulles les pertes dans le circuit parallèle constitué par  $L_s$  et  $C$ . Le courant  $I_C$  est compté négativement vis à vis de  $I_L$  puisque ces courants sont en opposition de phase.

A vide on a :

$$\bar{I} = \bar{I}_C + \bar{I}_{L_s}$$

et

$$\bar{V}_E = \bar{V}_L + \bar{V}_S$$

La figure I.10b représente les courbes de fonctionnement de chaque inductance en fonction du courant.

De ces courbes, on constate que les variations  $\Delta V_S$  de la tension de sortie sont réduites vis à vis des variations  $\Delta V_E$  de la tension d'entrée.

L'introduction d'un circuit de compensation ne fait qu'améliorer les performances du stabilisateur.

#### b) Couplage de la capacité en série

Le condensateur monté en série avec l'inductance saturable joue le rôle à la fois de capacité de ferrorésonance et d'élément linéaire dans le circuit.

Nous verrons en détail le cas particulier de ce couplage dans la partie expérimentale ( chapitre IV ).

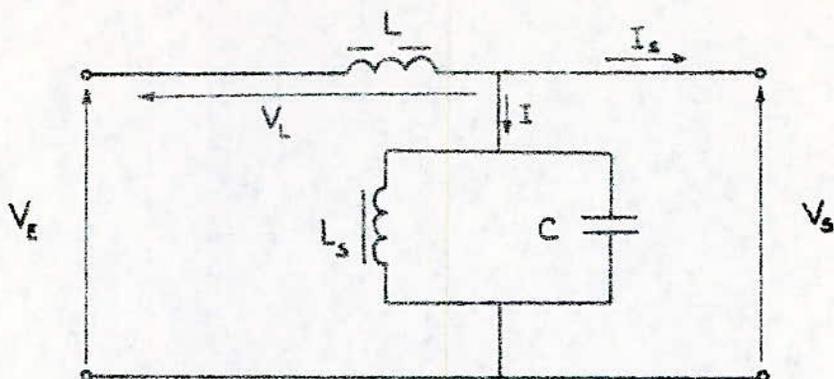


fig I. 10a. Stabilisateur de tension à ferrésonance

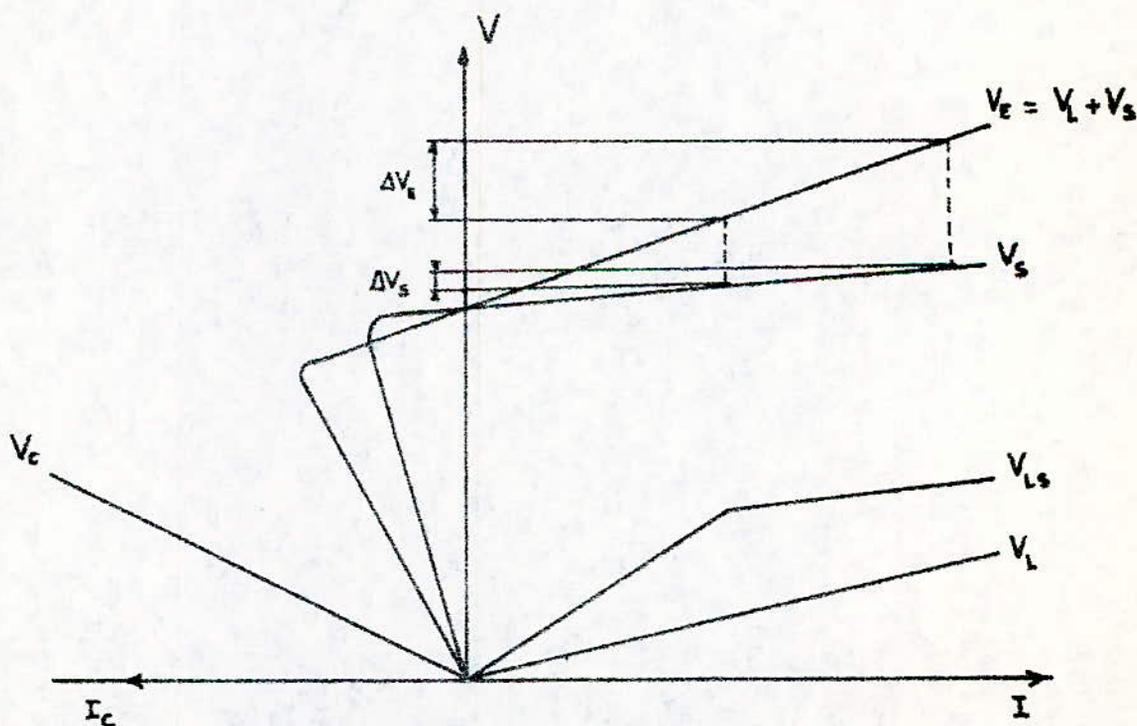


fig I. 10. b Courbes de fonctionnement du stabilisateur de tension à ferrésonance

c) Montage en autotransformateur

Le montage en autotransformateur de l'inductance saturable  $L_s$  derive du stabilisateur compensé à ferrorésonance.

Un des avantages de ce montage est qu'on peut faire fonctionner le condensateur à une tension double de la tension de sortie

$$V' = 2V_s \quad V_s = V'/2$$

Pour une même énergie réactive

$$Q = \frac{1}{2} V_s^2 C = \frac{1}{2} \left( \frac{V'}{2} \right)^2 C = \frac{1}{2} V'^2 \frac{C}{4}$$

la capacité est divisée par 4 et elle n'a pas besoin d'être surdimensionnée.

De plus on dispose d'un paramètre supplémentaire d'adaptation en agissant sur le rapport de transformation de l'autotransformateur

Analysons à cet effet la figure I.11

L'augmentation du nombre de spires  $n$  du ballast augmente la plage des tensions admissibles à l'entrée.

$n'$  (nombre de spires de l'enroulement compensatoire) doit être tel que  $V_s$  soit bien horizontale par rapport à  $V_E$ ; cependant une valeur trop forte entraînerait une surcorrection de  $V_s$ .

$n_1$  est calculé pour que la saturation du circuit magnétique soit atteinte pour la tension minimale du réseau.

L'enroulement  $n_2$  correspond au secondaire de l'autotransformateur. Il permet d'ajuster la tension de sortie de l'appareil à la tension de correction près.

L'enroulement  $n_3$  doit être tel que la tension aux bornes de ( $n_2 + n_3$ ) corresponde à des valeurs usuelles de la capacité  $C$ , choisie en papier et non polarisée dans la série 600 V. La tension  $V_C$  atteint facilement 300 à 400 V, pour une tension du réseau égale à 220 V. L'accroissement de  $n_3$ , augmente la plage de régulation vers les tensions d'entrée basses, mais accroît la contrainte sur le condensateur.

On peut réaliser le même montage sans point commun entre le réseau et l'utilisation. (fig. I.12)

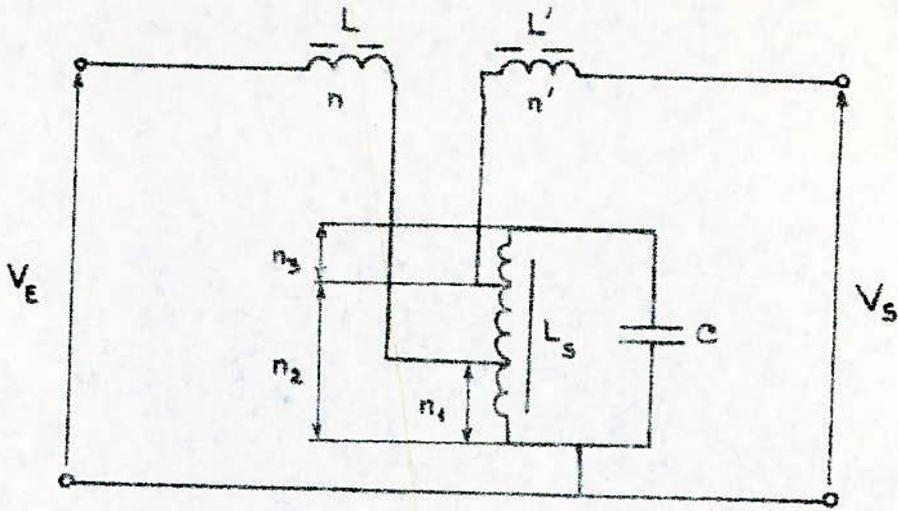


fig I.11. Montage en auto transformateur du stabilisateur compensé à ferrorésonance

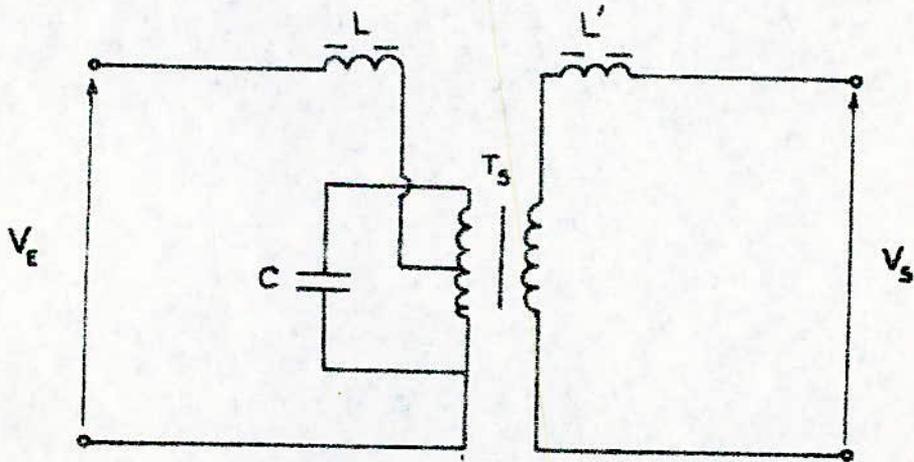


fig I.12 Autre version du montage en auto transformateur

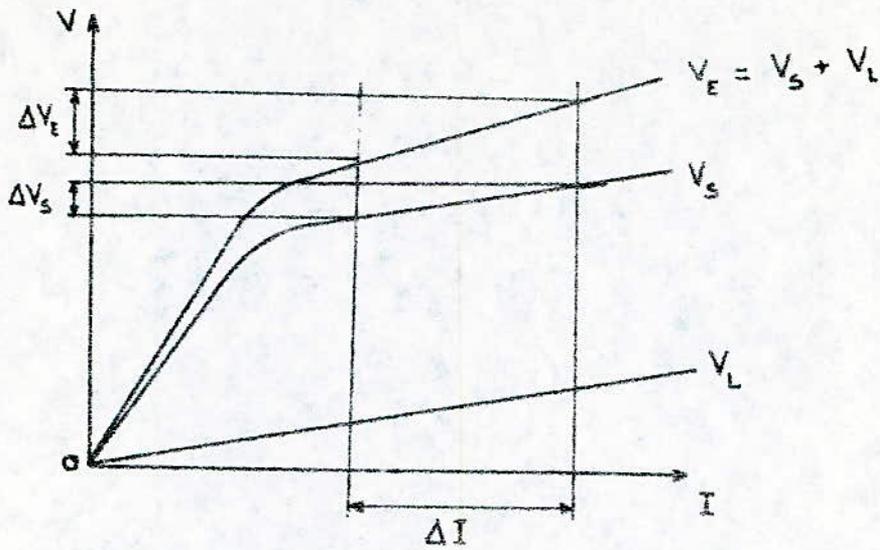


fig I.4a Courbes de fonctionnement du stabilisateur à fer saturé simple

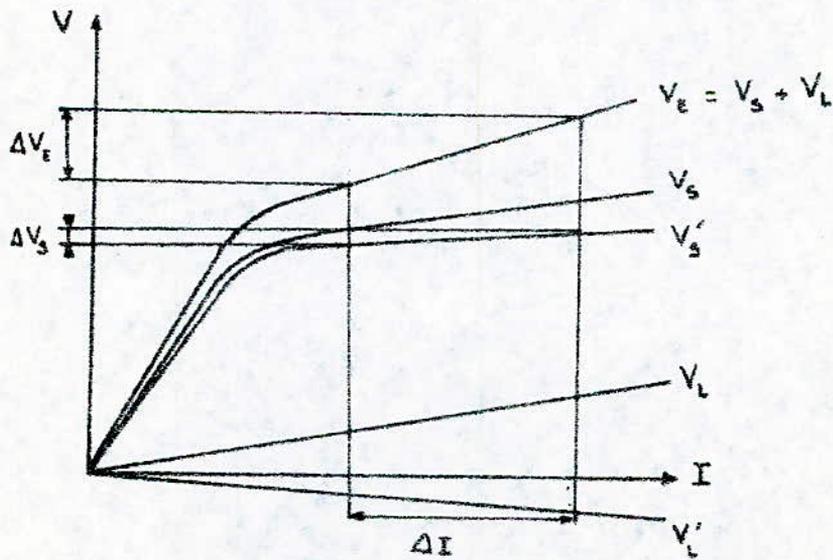


fig I.4b Courbes de fonctionnement du stabilisateur à fer saturé simple compensé

### Conclusion

Nous avons constaté qu'il existe plusieurs variantes dans la réalisation d'un stabilisateur mais le principe reste le même : l'utilisation des éléments linéaires et non linéaires.

Le modèle commercial le plus répandu est le montage en autotransformateur.

La particularité de chaque variante repose sur la nature de la charge à alimenter qui constitue un critère de choix.

Si cette charge est sensible à la valeur moyenne de la tension (pont à redresseur par exemple ) la tension de sortie est mal régulée; les filtres d'harmoniques sont nécessaires sinon indispensables.

Du point de vue performances, les stabilisateurs électroniques présentent un haut degré de stabilité ( $\pm 10\%$  à l'entrée jusqu'à  $\pm 0,1 - 0,01\%$  à la sortie ). Ils ont souvent ce mérite, de pouvoir alimenter plusieurs récepteurs à la fois, à partir d'un même appareil. Mais leur prix reste très élevé.

On peut se contenter des stabilisateurs ferromagnétiques de part leur simplicité et leur prix bon marché et ils permettent de stabiliser la tension à l'entrée de  $\pm 10 - 25\%$  jusqu'à  $\pm 1,5 - 2,5\%$  à la sortie. Ces plages de régulation sont largement suffisantes dans plusieurs domaines d'application.

CHAPITRE II

ETUDE THEORIQUE DU PHENOMENE DE FERRORESONANCE

II.1\_ Rappel concernant les circuits electriques linéaires

Considérons un circuit entre deux points A et B: ce circuit peut comporter des résistances R, des bobines d'induction de résistance nulle L ou non nulle R,L et des condensateurs C. A l'instant  $t=0$  on établit entre A et B la tension  $v=V_m \cos \omega t$ . Rappelons que les lois de l'Electrocinétique s'appliquent aux valeurs instantanées.

a) circuit comprenant une bobine d'induction de résistance non nulle

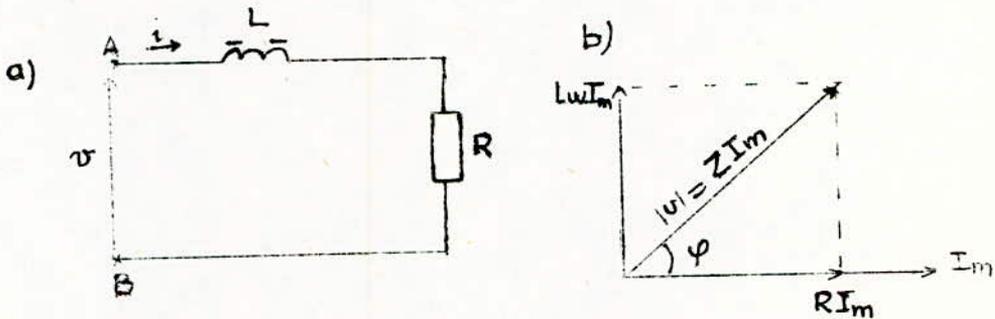


fig.II.1 a/ circuit R,L

b/ diagramme vectoriel du circuit

La tension aux bornes du circuit d'après la loi d'Ohm est:

$$u = u_R + u_L$$

avec  $u_R = Ri$

$$u_L = n \frac{d\varphi}{dt}$$

$n$  étant le nombre de spires de la bobine

$\varphi$  le flux instantané qui la traverse

La loi d'Ohm appliquée aux circuits magnétiques donne la fmm

$$\mathcal{E} = ni = \mathcal{R}\varphi$$

$\mathcal{R}$  étant la réluctance du circuit magnétique

$$U_L = \frac{nd}{dt} \left( \frac{ni}{\mathcal{R}} \right) = \frac{n^2}{\mathcal{R}} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (L \text{ et } \mathcal{R} \text{ étant constantes})$$

En prenant le courant comme origine des phases et en utilisant la méthode symbolique, l'impédance complexe du circuit est:

$$Z = Z_R + Z_L = R + jL\omega = Z e^{j\varphi}$$

$$Z = |Z_R + Z_L| = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

$$v = Z(i)$$

$$|v| = V_m = Z I_m$$

Le courant est déphasé de  $\varphi$  par rapport à la tension. ( $\varphi > 0$ )

b) circuit comprenant une résistance et un condensateur

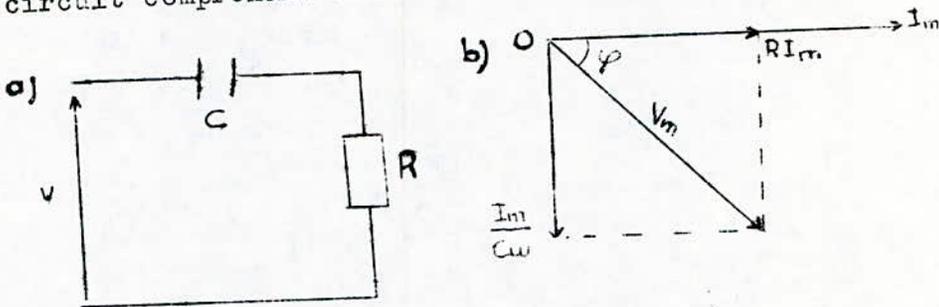


fig. II.2 a) circuit R C

b) diagramme vectoriel

L'impédance du circuit est :

$$Z = Z_R + Z_C = R - \frac{j}{C\omega} = Z e^{j\varphi}$$

$$Z = |Z_R + Z_C| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-1}{R C \omega}$$

comme  $v = Z(i)$

$$|v| = Z I_m$$

L'intensité est en avance sur la tension d'un angle  $\varphi$ . ( $\varphi < 0$ )

c) circuit R L C et résonance série

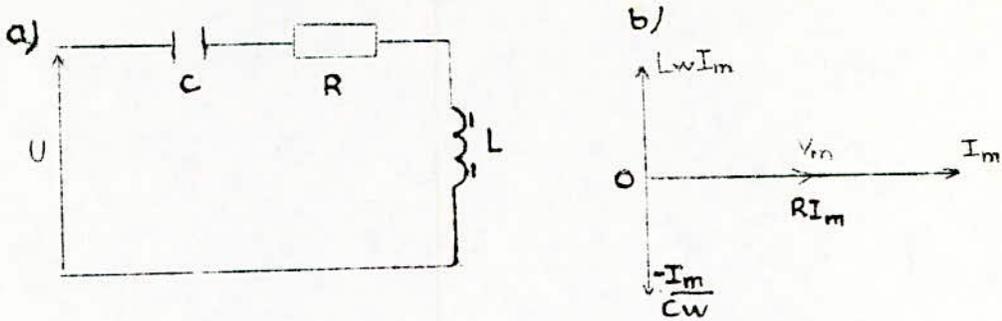


fig.II.3 a) circuit R L C serie

b) diagramme vectoriel à la résonance

Considérons un circuit à courant alternatif comprenant une résistance R une bobine inductive L et un condensateur C. (fig.II.3 a)

La tension  $u = U \sin \omega t$  appliquée à ce circuit est formée de 3 composantes

- la tension active  $U_a = RI$  en phase avec le courant I.
- la tension inductive  $U = j\omega LI$  en avance de  $90^\circ$  sur le courant
- la tension capacitive  $U_c = \frac{-jI}{C\omega}$  en retard sur le courant de  $90^\circ$

La figure II.4. a représentent les courbes des valeurs instantanées du courant, des tensions partielles et de la tension appliquée lors du couplage en serie de la resistance, d'une bobine et d'un condensateur.

Comme les tensions inductives et capacitive ont des phases opposées, leur composition géométrique est équivalente à la soustraction des grandeurs absolues correspondantes.

Le diagramme vectoriel (fig.II.4b) est construit dans le cas où la tension inductive est plus grande en valeur absolue que la tension capacitive, la tension réactive résultante a pour expression:

$$U_r = j(\omega L - \frac{1}{C\omega})I = jXI$$

$X = \omega L - 1/C\omega$  est la réactance du circuit

est en avance de  $90^\circ$  sur le courant.

La tension appliquée U est l'hypoténuse du triangle OAB et d'après le théorème de Pythagore:

$$U = U_a^2 + U_r^2 = RI^2 + XI^2 = (R^2 + X^2) I^2$$

$$\text{d'où } I = \frac{U}{(R^2 + X^2)^{1/2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/C\omega)^2}}$$

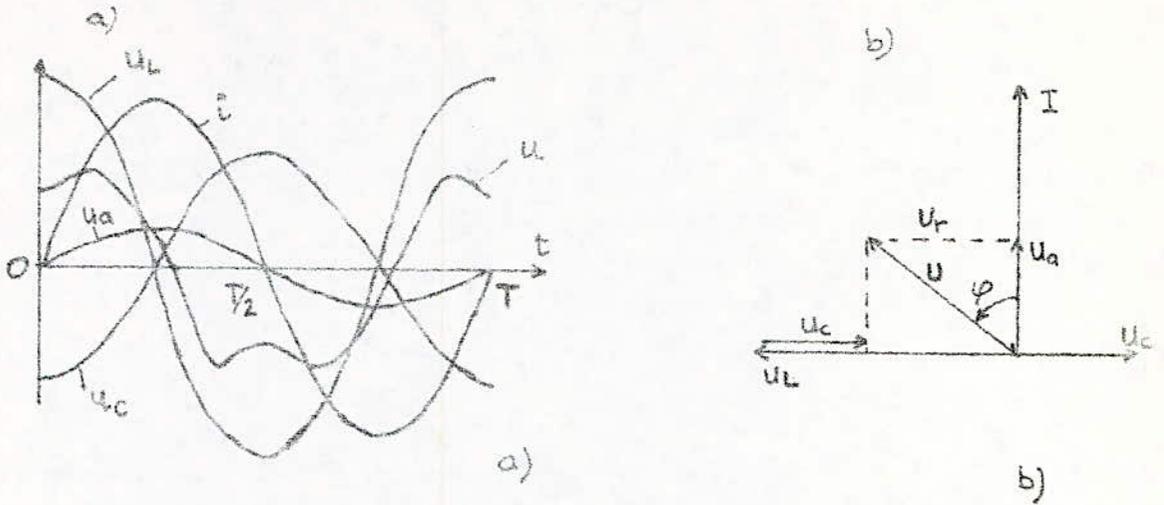


Fig 11.4 a) Courbes des valeurs instantanées (circuit RLC serie)  
 b) Diagramme vectoriel pour  $|U_L| > |U_C|$  ;  $\varphi > 0$

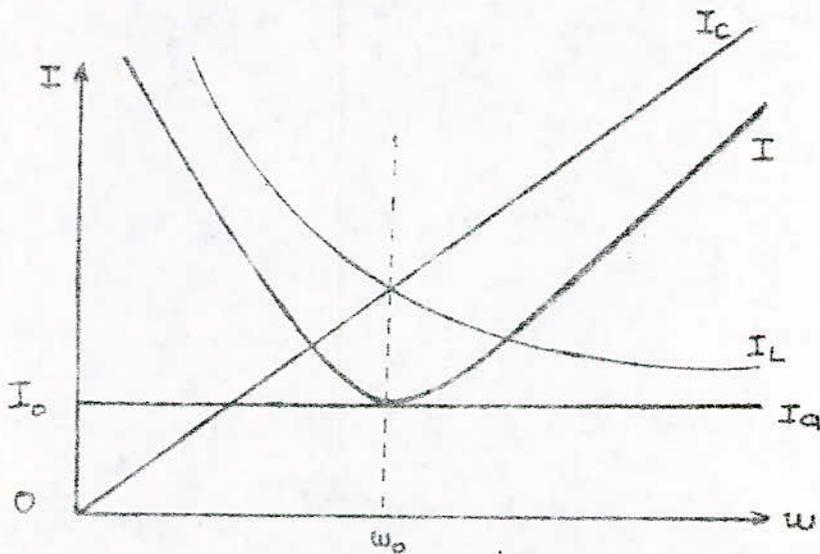


fig 11.6 Circuit RLC parallèle :  
 Courbes des courants en fonction de la fréquence

en posant  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

$I = \frac{U}{Z}$

$\varphi = \text{Arctg} \frac{L\omega - 1/C\omega}{R}$

$\varphi$  étant le déphasage entre le courant et la tension

Il est important de voir la variation de  $Z$  en fonction de  $\omega$ , dans la mesure où il conditionne le courant efficace  $I = U/Z$ .

En particulier  $Z$  est minimum pour  $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0$  ou  $LC\omega^2 = 1$ . Dans ces conditions, les réactances de capacité et d'induction se compensent mutuellement, par variation de la capacité ou de la valeur de l'inductance ou la pulsation du circuit d'alimentation (ou tous les trois ensemble) on obtient la résonance: soit pour une fréquence telle que  $\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{CL}}$

$\omega_0$  est la pulsation propre du circuit

ou la pulsation de résonance

A cette fréquence correspond un courant maximum  $I = \frac{U}{R}$  et un déphasage nul entre le courant et la tension. ( $\varphi = 0$ ) (fig II 3b)

d) circuit R L C et résonance parallèle [5]

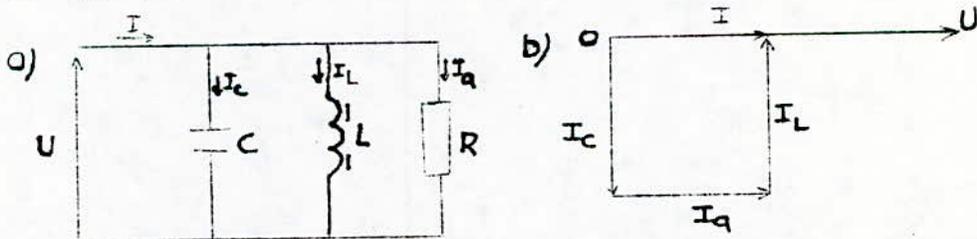


fig.II.5 a) circuit R L C parallèle

b) diagramme vectoriel à la résonance

Les éléments d'un circuit oscillant (inductances et capacités) sont couplés en parallèle sur la source de courant alternatif. (fig.II.5a)

La loi d'Ohm appliquée à ce circuit est exprimée par la formule:

$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$

$g$  = conductance

$b_L$  = susceptance inductive     $b_C$  = susceptance capacitive

La condition générale de la résonance parallèle est donnée par l'égalité de la susceptance capacitive et inductive ( $b_C = b_L$ )

$$\text{ou } \omega C = 1/L\omega$$

ce qui correspond à une valeur particulière de la pulsation  $\omega = \omega_0 = \sqrt{1/CL}$  appelée aussi pulsation propre du circuit .

On peut obtenir la résonance parallèle en faisant varier la fréquence, l'inductance ou la capacité .

La figure II.6 donne les courbes des courants en fonction de la fréquence . A la résonance , le courant atteint sa valeur minimale  $I = U/g$  et est en phase avec la tension (fig.II.5b). ( $\varphi = 0$ )

## II.2 Bobine à noyau de fer

### a) considérations générales

Si on alimente par un courant alternatif une bobine à noyau de fer, les phénomènes dont il est l'objet est très complexe. Tout d'abord l'inductance d'une telle bobine n'est plus constante: elle varie avec l'intensité du courant car le flux magnétique dans le fer n'est pas proportionnel au courant magnétisant. [5]

Aussi , on est obligé de revenir à la relation fondamentale  $e = -n \frac{d\psi}{dt}$

où  $n$  est le nombre de spires de la bobine

$\psi$  le flux total créé par la bobine

En supposant la résistance pure et les pertes négligeables, on peut écrire d'après la loi d'Ohm :

$$u = Ri - e$$

puo pour  $R = 0$  la tension  $U$  appliquée est à chaque instant égale en valeur absolue à la force électromotrice induite qui serait sinusoïdale si la tension est sinusoïdale

$$\text{Prenons } e = E_m \sin \omega t$$

$$- n \frac{d\psi}{dt} = E_m \sin \omega t$$

$$\psi = \frac{E_m}{\omega n} \cos \omega t = \psi_m \cos \omega t$$

$\psi_m$  amplitude maximale du flux magnétique total

b) courbe du courant magnétisant dans la bobine

En négligeant les pertes par hystérésis et par courant de Foucault, il est facile d'établir la relation qui existe entre le flux magnétique et le courant  $i$ , qui parcourt la bobine. On utilise pour cela la courbe d'aimantation  $B = f(H)$ . Car le flux est proportionnel à  $B$  et  $H$  est proportionnel au courant, on peut construire  $\phi = f(i)$ .

Lorsque la tension appliquée est sinusoïdale, le flux l'est aussi. En utilisant la courbe  $\phi = f(i)$  on détermine la valeur du courant d'après une valeur du flux connue à chaque instant. (fig.II.7).

La courbe du courant diffère considérablement de la sinusoïde mais reste périodique. Elle contient des harmoniques supérieures impaires.

c) influence des pertes dans le fer

La relation entre le courant et le flux magnétique compte tenu de l'hystérésis se détermine par la boucle d'hystérésis (fig.II.8). Ainsi la forme de la courbe du courant  $i$  lors de la variation du flux n'est pas la même : lorsque le flux augmente la courbe du courant passe au-dessus de la courbe  $i$  construite sans tenir compte de l'hystérésis; et lorsque le flux diminue, elle passe en dessous. Cependant la valeur maximale du courant reste la même.

Les pertes par courants de Foucault et les pertes dans la résistance pure changent encore la courbe du courant dans la bobine. On peut déterminer la valeur efficace du courant et la considérer comme la valeur efficace du courant sinusoïdal équivalent.

d) courant sinusoïdal équivalent

Le courant efficace est le courant alternatif qui produirait la même quantité de chaleur qu'un courant continu à travers une même résistance  $R$  pendant un intervalle de temps  $T$ .

$$Q = RI^2 T = \int_0^T Ri^2 dt$$

si on pose  $w = 2\pi f = 2\pi/T$

et  $x = wt$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 dx}$$

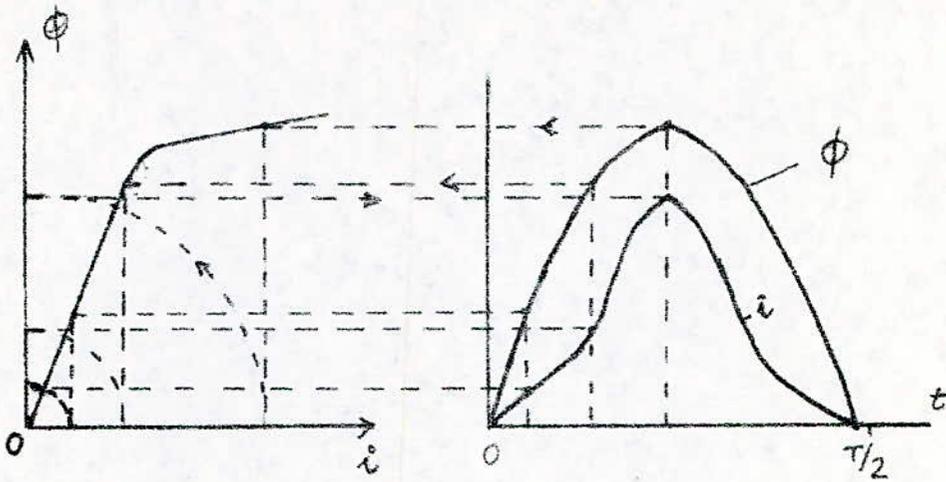


fig II.7 Courbe du courant magnétisant en négligeant les pertes

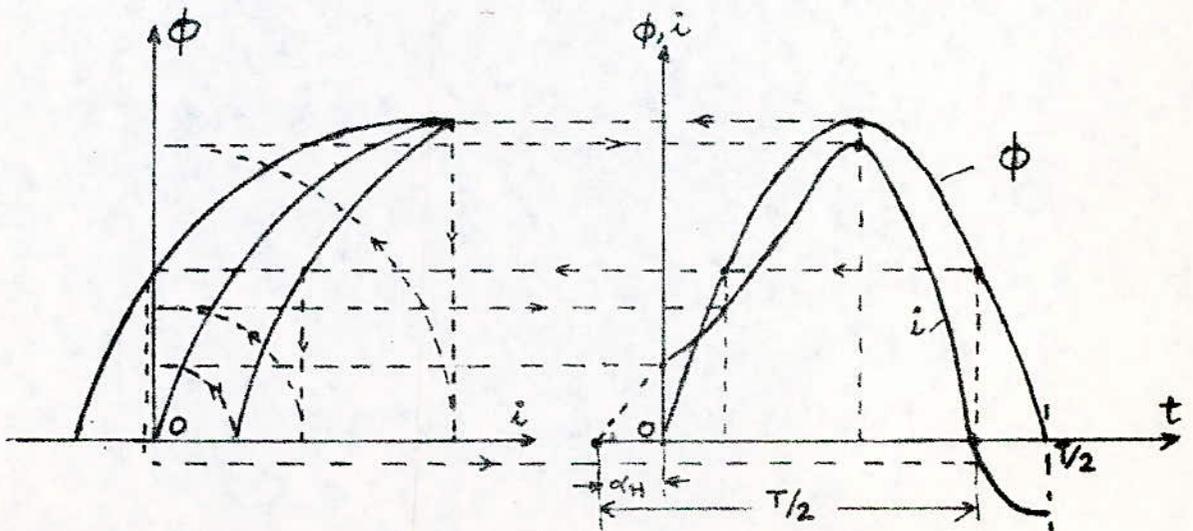


fig II 8 . Courbe du courant tenant compte des pertes fer

En faisant appel au développement de Fourier d'une fonction périodique, on n'obtient que les harmoniques impaires.

$$i = i_1 + i_3 + i_5 + \dots = \sum i_k$$

$i_k$  désignant la valeur instantanée de l'harmonique  $k$

$$i^2 = (\sum i_k)^2 = \sum i_k^2 + 2 \sum i_k i_n, \quad n > k$$

or  $i_k = I_{kn} \sin(kx + \varphi_k)$

$i_n = I_{nn} \sin(nx + \varphi_n)$

$I_{kn}$  et  $I_{nn}$  sont les amplitudes des harmoniques d'ordre  $k$  et  $n$ .

On remarque que le double produit est nul :

$$\int_0^{2\pi} i_k i_n dx = 0$$

$$I = \sqrt{\sum \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k^2 dx}$$

Cette dernière expression représente le carré de la valeur efficace de l'harmonique d'ordre  $k$ . Par suite :

$$I = I_{eq} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

$I_{eq}$  est le courant sinusoïdal équivalent, de même période que le courant efficace. [6]

Nous envisageons maintenant de construire le diagramme vectoriel en considérant en plus du flux utile qui passe dans le noyau ferromagnétique du flux de fuite qui se referme dans l'air. (fig. 19a)

$$\varphi_t = \varphi_u + \varphi_f$$

$$L_t = L_s + L_f$$

$\varphi_t$  : flux total,  $\varphi_u$  : flux utile,  $\varphi_f$  : flux de fuite

$L_f$  inductance de fuite sans fer ni résistance,  $L_t$  inductance totale

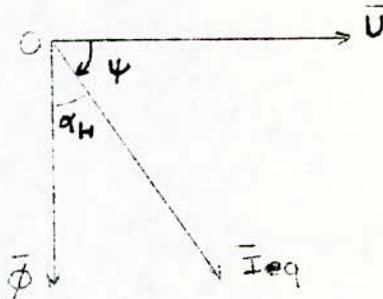
En considérant tout d'abord les pertes par hystérésis

$$P_h = UI_{eq} \cos \psi = UI_{eq} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = UI_{eq} \sin \alpha_H$$

$\alpha_H$  angle d'avance hystérétique

avec  $i = I_{eq} \sqrt{2} \sin(\omega t - \psi) = I_m \sin(\omega t - \psi)$

$$\begin{aligned} \bar{U} &= n\omega S B \frac{1}{\sqrt{2}} = n\omega \phi \frac{1}{\sqrt{2}} \\ B &= B_m / \sqrt{2} \quad \phi = \phi_m / \sqrt{2} \quad \bar{I}_{eq} = I_{eq} e^{j\alpha_H} \\ \frac{\bar{U}}{\bar{I}_{eq}} &= \frac{n\omega \phi}{I_{eq}} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\alpha_H} \end{aligned}$$



L'introduction des pertes par courant de Foucault et des pertes totales peut aussi être considérée comme ajoutant un déphasage  $\alpha'$  à l'angle d'avance hystérétique:  $\alpha = \alpha_H + \alpha'$

Dans le diagramme vectoriel fig.II.9c et schéma équivalent fig.II 9b

$$\begin{aligned} \bar{U} &= R\bar{I}_{eq} + j(L_s + L_f) \omega \bar{I}_{eq} = R\bar{I}_{eq} + jL_s \omega \bar{I}_{eq} + jL_f \omega \bar{I}_{eq} \\ \bar{Z} &= R + jL_s \omega + jL_f \omega \\ \phi_t &= \phi_u + \phi_f \\ U'' &= \frac{nd\phi_u}{dt} \quad \text{et} \quad U' = \frac{-nd\phi_f}{dt} \end{aligned}$$

La méthode de Kapp ou du courant sinusoïdal équivalent a l'avantage de linéariser le problème et permettre la mise en équation facile. Cette méthode est suffisante dans de nombreux cas.

### II.3 Couplage en serie de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur

Le condensateur est un élément linéaire et la bobine à noyau de fer excitée au-delà du coude de la courbe d'aimantation est une inductance non linéaire, qui varie en fonction du courant ou de la tension (vu les relations non linéaires entre le flux magnétique et le courant). [5]

C'est pourquoi lors de l'alimentation du couplage en serie d'une bobine à noyau de fer et d'un condensateur par une source de tension sinusoïdale, le courant et les tensions des éléments du circuit sont non sinusoïdaux, ce qui complique l'analyse du circuit.

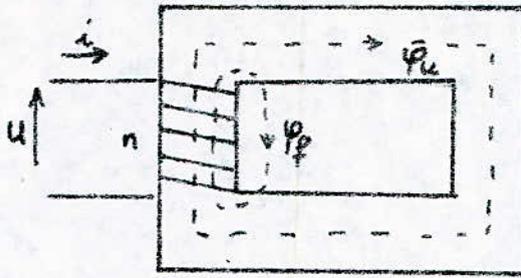


fig II 9a. Schéma de la bobine à noyau de fer

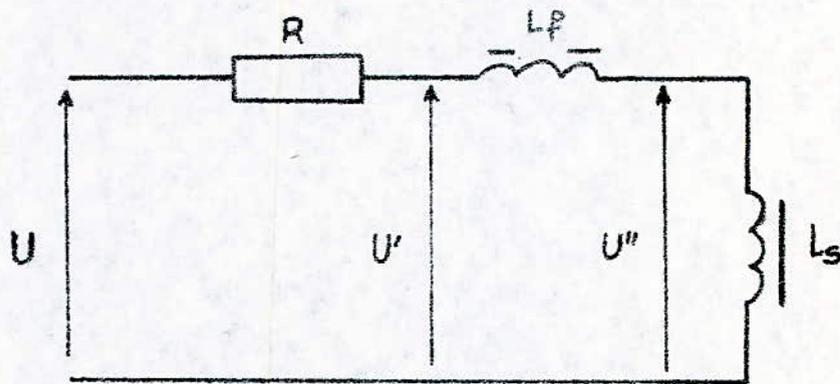


fig II 9b. Schéma équivalent de la bobine

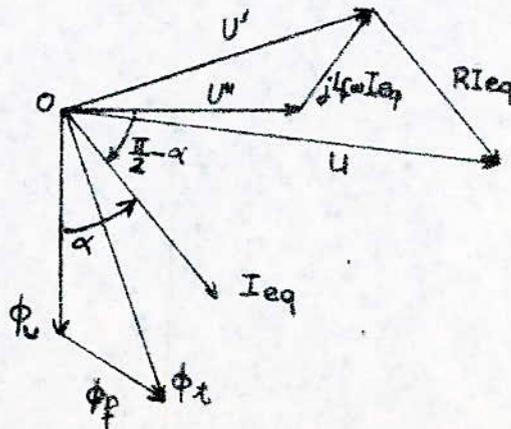


fig II.9c - Diagramme vectoriel de la bobine

Pour simplifier l'analyse d'un circuit pareil on remplace les grandeurs non sinusoïdales par des grandeurs sinusoïdales équivalentes. Cela permet d'utiliser les diagrammes vectoriels et les graphiques qui représentent correctement les phénomènes, du point de vue qualitatif.

a) Première approximation: on néglige la résistance, les pertes dans le fer et on considère le courant comme sinusoïdal

Nous venons de voir (§II.1c) que pour un couplage en série de l'inductance et de la capacité on peut obtenir la résonance série par la variation de la fréquence ou de l'inductance ou de la capacité.

Pour le couplage en série de la bobine à noyau de fer avec un condensateur (fig.II.10) la résonance peut être atteinte par la variation du courant ou de la tension d'alimentation sans aucun réglage de la bobine ou du condensateur.

La résonance obtenue est appelée ferrorésonance série ou ferrorésonance des tensions, c'est-à-dire coïncidence en phase de la première harmonique des courants avec la tension d'alimentation.

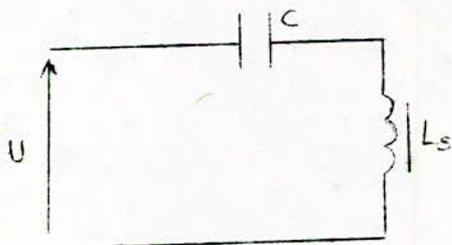


fig.II.10

Etant donné que la composante réactive  $U_L$  de la tension aux bornes de la bobine est proportionnelle à l'amplitude du flux magnétique,

$$U_L = 4,44nf \phi_m$$

$n$  - nombre de spires de la bobine

$f$  - fréquence

$\phi_m$  - amplitude du flux magnétique

la caractéristique de la tension en fonction de l'intensité pour la bobine aura une forme analogue à la courbe d'aimantation (fig.II.11). Cette même caractéristique a été tracée pour le condensateur sur la même courbe.

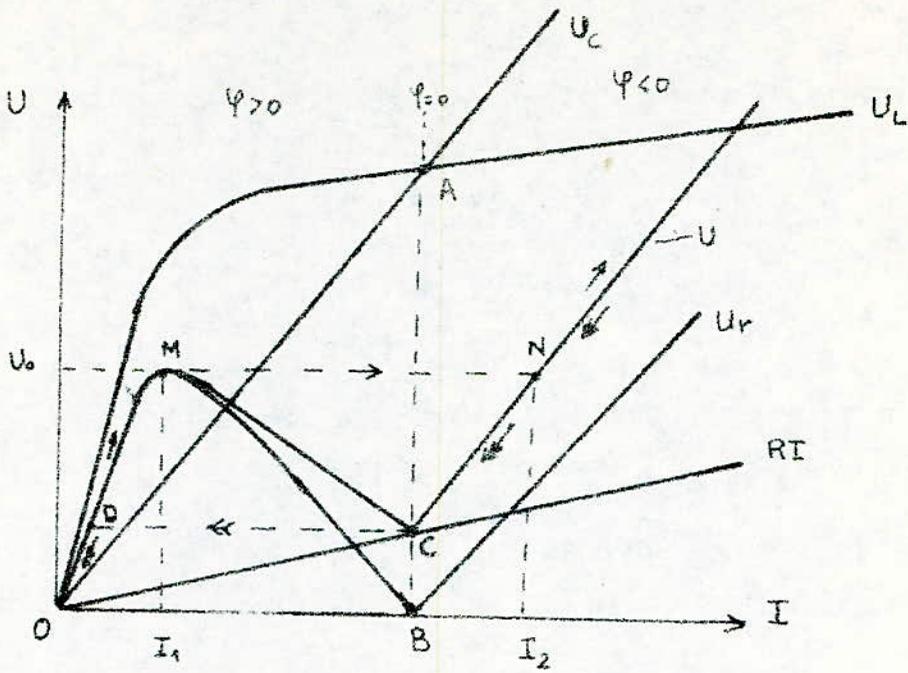


Fig. II. 11. Férrésonance serie

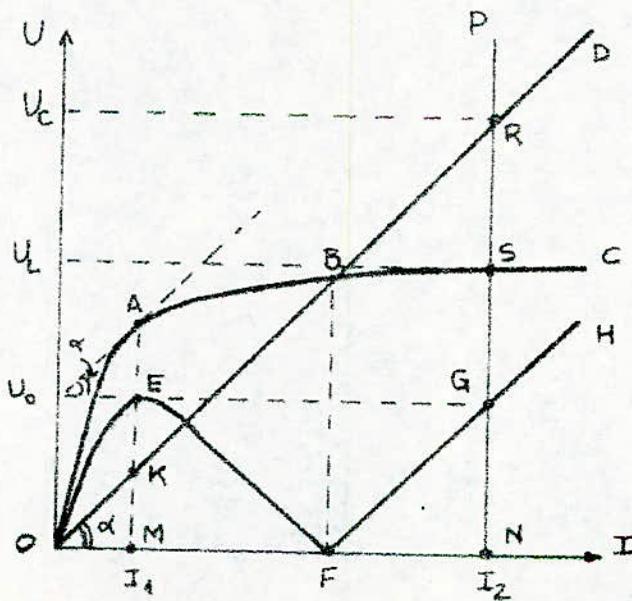


Fig. II. 12 Méthodes graphiques pour le calcul de la capacité

d'après l'équation :  $U_C = \left| \frac{I}{\omega C} \right|$  qui représente une droite.

Etant donné que  $U_L$  et  $U_C$  sont en opposition de phase (fig. II.11) la caractéristique de la tension réactive (en valeur absolue)  $U_r = |U_L - U_C|$  en fonction du courant passe par zéro pour un courant qui correspond au point d'intersection A des deux caractéristiques  $U_L$  et  $U_C$  c'est à dire pour  $U_L = U_C$  c'est le point de résonance.

Il est que pour une capacité dont la caractéristique courant - tension n'a pas d'intersection avec la caractéristique de la bobine, la ferrorésonance est impossible.

b) Deuxième approximation: influence de la résistance de la bobine

En réalité la bobine possède une résistance propre R. La tension active  $U_a = RI$  est représentée par la droite OC. On peut donc tracer la tension d'alimentation du circuit en fonction du courant d'après la formule :

$$U = \sqrt{U_r^2 + (RI)^2}$$

On voit que la tension U croît d'abord avec l'augmentation régulière du courant puis diminue jusqu'à son minimum au voisinage du point de résonance et enfin croît de nouveau.

Cette courbe ne peut être relevée expérimentalement que lors de l'augmentation du courant, le circuit étant alimenté par une source de courant. Lorsque on augmente régulièrement la tension (alimentation par une source de fem) à partir de 0, le courant varie d'abord de 0 jusqu'au point M ( $U_L > U_C$  ;  $\varphi > 0$ ), puis l'accroissement ultérieur de la tension provoquera un bond du courant vers le point N ( $U_L < U_C$  ;  $\varphi < 0$ ), après lequel l'augmentation du courant devient régulière de nouveau. Si maintenant on diminue la tension, le courant diminue régulièrement jusqu'au point C. La diminution ultérieure de la tension provoque un bond du courant vers le point D, après lequel son allure devient de nouveau régulière jusqu'à zéro.

c) Stabilisation de la tension

Considérons le fonctionnement d'un circuit inductance non linéaire - condensateur pour des forts courants, c'est à dire après la ferrorésonance.

On voit que pour une variation considérable de la tension d'entrée, on a une variation de la tension de sortie relativement faible aux bornes de l'inductance saturable. Cela permet d'utiliser le montage à ferrorésonance pour la stabilisation de la tension c'est-à-dire d'obtenir la tension de sortie pratiquement constante malgré les fluctuations considérables de la tension du secteur.

d) Calcul approximatif de la capacité

Première méthode

Pour le calcul approximatif de la capacité ( où il existe le phénomène de ferrorésonance) on utilise la méthode graphique.

Sur la figure II.12 on a représenté la courbe OABC la caractéristique courant-tension de la bobine à noyau de fer, la droite OBD la caractéristique courant-tension du condensateur, et la courbe OEFGH la caractéristique courant-tension du couplage en série de l'inductance saturable et du condensateur (construites pour les sinusoides équivalentes sans tenir compte des pertes dans le fer et dans le cuivre de la bobine).

Lors de l'augmentation de la tension d'alimentation du circuit jusqu'à la valeur  $U_0$ , le courant augmente brusquement de la valeur  $I_1$  à  $I_2$ .

Il est évident de la construction graphique l'égalité des tronçons suivants:  $AK = EM = GN = RS$ . Le tronçon EM correspond à la tension d'alimentation  $U_0$ , pour laquelle on obtient l'augmentation brusque du courant. De l'autre côté, le tronçon AK correspond à la distance maximale entre la caractéristique de la bobine (portion OAB) et la caractéristique du condensateur.

Pour calculer la capacité on trace tout d'abord en échelle la caractéristique expérimentale de la bobine OABC. Sur l'axe I il faut marquer la valeur donnée du courant après un bond:  $I_2$  (le tronçon ON). Traçons la droite NP parallèle à l'axe U. Choisissons une position de la droite OD telle que le tronçon RS sur la verticale NP soit égale à la distance maximale AK entre les deux caractéristiques. Après avoir tracé la droite OD, construisons la caractéristique de la tension U en fonction du courant I (la courbe OEFGH). D'après cette courbe, déterminons la tension  $U_0$ , pour laquelle on a un bond du courant.

Le tronçon RN en échelle de tension détermine la tension  $U_C$  et SN la tension  $U_L$ .

Sachant  $U_C$  et le courant  $I_2$ , on peut calculer  $X_C$  :

$$|X_C| = U_C / I_2$$

$$|X_C| = 1/2\pi fC$$

$$\text{d'où } C = 1/2\pi |X_C|$$

Deuxième méthode

Si on connaît la caractéristique  $U_L = f(I)$  et la tension  $U_C$  pour laquelle le courant fait un bond, lors de l'augmentation de la tension: on trace une tangente à la courbe  $U = f(I)$  à partir du point  $U_C$  pris à l'axe des tensions et parallèlement à cette droite, la caractéristique  $U_C = f(I)$  à partir de l'origine des axes.

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{wC} = X_C$$

$$|X_C| = \frac{m_u}{m_i} \text{tg } \alpha$$

$m_u$  : échelle des tensions

$m_i$  : échelle des courants

On mesure  $\alpha$  puis on calcule  $\text{tg } \alpha$  et  $X_C$  (fig.II;12)

$$C = \frac{1}{w|X_C|}$$

$$\text{avec } w = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ rad/s}$$

Il faut noter que la précision de ces calculs est relativement faible car il est difficile d'avoir la valeur exacte de  $U_C$ , mais peut donner un ordre d'idée sur le choix de la capacité.

#### II.4 Couplage en parallèle de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur

a) Analyse de la ferrorésonance parallèle

Pour le couplage en parallèle de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur (fig.II.13) la résonance peut avoir lieu.

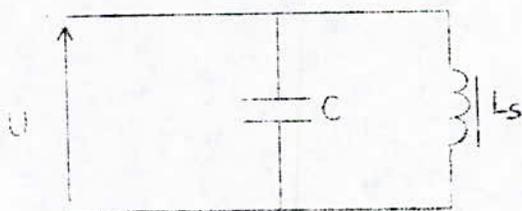


fig II. 13

Examinons ce phénomène en négligeant les pertes dans la bobine et en considérant le courant comme sinusoïdal.

Les caractéristiques courant-tension  $I_L(U)$  et  $I_C(U)$  sont représentées sur la figure II.14. Etant donné que  $I_L$  et  $I_C$  sont en opposition de phase, la caractéristique du courant total  $I = I_L - I_C$  peut être construite par la soustraction des abscisses des deux caractéristiques ( la courbe en pointillé ).

Il est évident que pour une certaine valeur de la tension  $U$  on a  $I_L = I_C$  et le courant total est égal à zéro. C'est la ferrorésonance théorique des courants. En réalité à cause de la résistance pure et des pertes totales, le courant dans la bobine n'est pas sinusoïdale et la ferrorésonance des courants s'explique par la composante réactive de la première harmonique du courant inductif qui est égale au courant  $I$ . C'est pourquoi le courant total n'est pas égal à zéro: il comprend la composante active et les harmoniques supérieures du courant  $I_L$ . La dépendance pratique  $I(U)$  - en trait plein - est différente de celle théorique. Cette courbe ne peut être relevée que lors de la variation de la tension.

#### b) Détermination des composantes harmoniques

On peut choisir une valeur de la tension  $U$ , pour laquelle la composante réactive de la première harmonique du courant  $I_L$  soit égale au courant  $I$ .

Dans ce cas le courant total  $I$  contient la composante active de l'harmonique 1 qui est en phase avec la tension et des harmoniques supérieures du courant dans la bobine. On peut noter que l'harmonique "3" a la plus grande amplitude.

C'est pourquoi le courant total dans le régime de ferrorésonance varie en fonction du temps avec la fréquence triple par rapport à la fréquence de la tension d'alimentation.

De ce qui précède on peut représenter le schéma équivalent du circuit (fig.II.15).

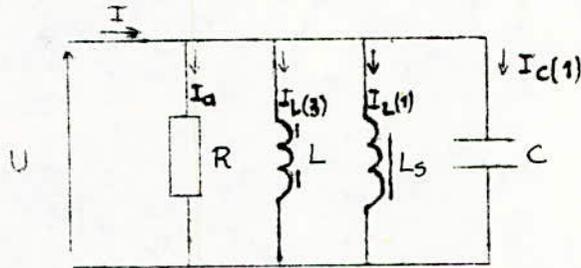


fig.II.15 Schéma équivalent de la bobine

Dans le régime de ferrorésonance le courant réactif de la première harmonique de la bobine  $I_L(1)$  est opposé et égal au courant de la première harmonique du condensateur  $I_C$ . Alors la valeur efficace du courant total :

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_L^2(3)}$$

La valeur efficace du courant de la bobine

$$I_L = \sqrt{I_a^2(1) + I_L^2(1) + I_L^2(3)}$$

où  $I_a(1)$  - la composante active du courant de la bobine qui tient compte des pertes

En mesurant la puissance consommée dans le circuit LC parallèle (fig.II.13) et la tension d'alimentation, on peut calculer  $I_a$  :

$$I_a = P/U = I_0 \cos \varphi$$

En mesurant le courant total I, on détermine  $I_L(3)$  et  $I_L(1)$

$$I_L(3) = \sqrt{I^2 - I_a^2(1)}$$

$$I_L(1) = \sqrt{I_L^2(3) - I_a^2(1)}$$

Lorsqu'on alimente le circuit à ferrorésonance parallèle par la source de courant, on observe des bonds de tension. L'augmentation du courant I de 0 à I provoque un bond du point 1 au point 2 (fig.II.14).

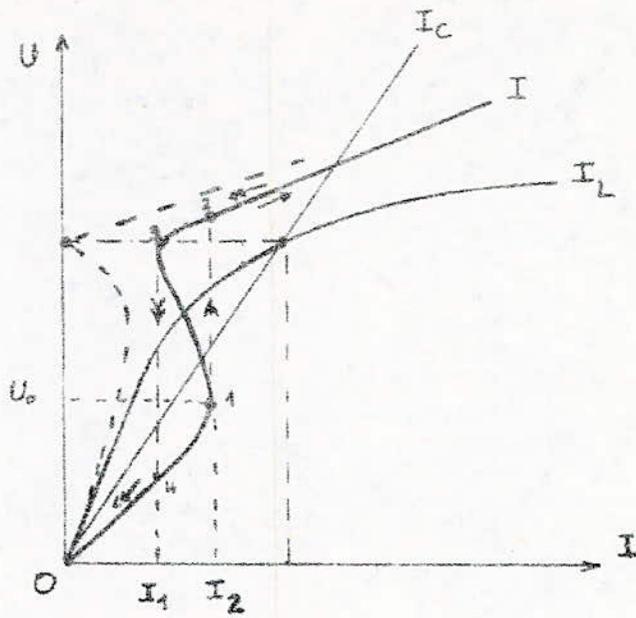


fig II.14 Ferrésonance des courants

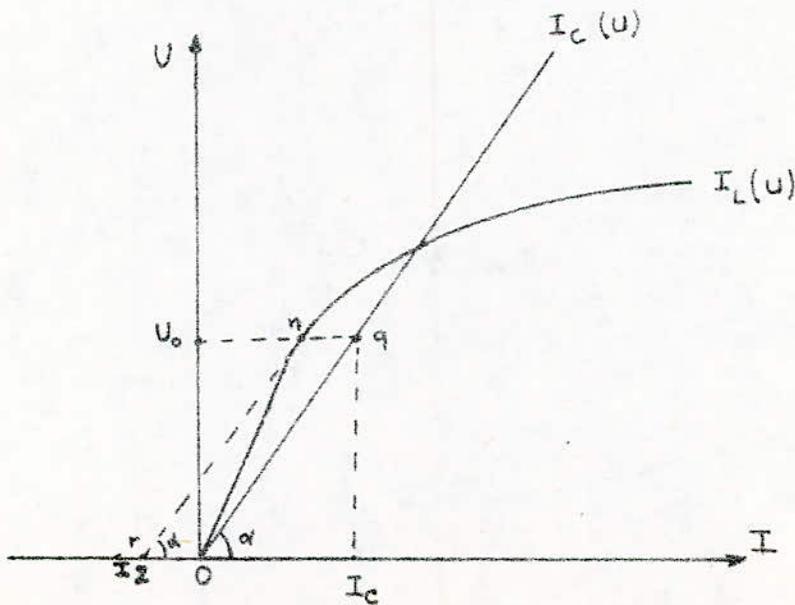


fig II. 16 Méthode de calcul de la capacité

La diminution du courant est suivie par un bond de tension du point 4 au point 5.

c) Calcul approximatif de la capacité

On donne la caractéristique  $U = f(I)$  (fig; II.16) .

$I_2$  est le courant pour lequel il y a un bond de tension; on demande de déterminer  $C$ .

On utilise la méthode dite de première harmonique: on néglige la résistance pure de la bobine et les harmoniques supérieures ( $n > 1$ ). Seule l'harmonique d'ordre 1 est prise en considération.

On trace  $I_2$  à gauche de zéro ( $O_r$ ) et une tangente en  $n$  à la courbe  $U = f(I)$  à partir du point  $r$ .

Le point  $n$  donne la tension de bond  $U_0$ .

Traçons maintenant la droite  $U_c = f(I)$  parallèlement à cette tangente à partir de l'origine des axes.

Le point  $q$  appartenant à la caractéristique courant-tension de la capacité a pour coordonnées  $U = U_0$  et  $I = I_c$ .

On peut calculer  $|X_C|$

$$|X_C| = \frac{U_0}{I_c}$$

$$|X_C| = \frac{1}{\omega C}$$

$$\text{avec } \omega = 2\pi f$$

$$\text{d'où } C = \frac{1}{2\pi f |X_C|}$$

$$\text{avec } |X_C| = \frac{m_u}{m_i} \lg \alpha$$

$m_u$  = échelle des tensions

$m_i$  = échelle des courants

### CHAPITRE III

#### METHODES DE CALCUL D'UN STABILISATEUR

##### Introduction

Dans ce chapitre nous allons analyser les régimes de fonctionnement d'un stabilisateur simple de tension continue, afin d'examiner les méthodes générales de calcul des stabilisateurs.

##### III.1 Marche à vide

La figure III.a représente un circuit non linéaire comprenant une résistance linéaire  $R$  et une résistance non linéaire  $R_S$  couplés en série.

On donne :

$$R = 2 \text{ k}\Omega$$

$R_S$  = est donnée par sa caractéristique courant-tension

On demande de déterminer les limites maximales et minimales de la tension d'entrée, dans lequel le schéma peut fonctionner comme stabilisateur.

a) Première méthode : méthode graphique de la construction de la caractéristique résultante

La méthode graphique utilise la caractéristique courant-tension résultante ( courbe 3 ) de la résistance linéaire ( courbe 2 ) et de la résistance non linéaire ( courbe 1 ) de la figure III.lb .

$$U_{E0} = U_R + U_{R_S}$$

$$U_{S0} = U_{R_S}$$

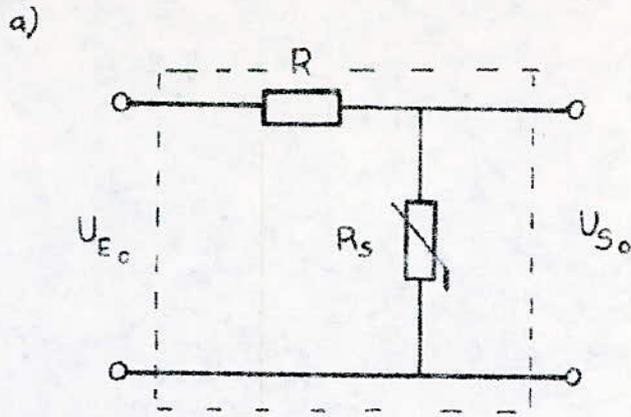
$$U_{Emin} = 158 \text{ V}$$

$$U_{Emax} = 210 \text{ V}$$

b) Deuxième méthode : méthode de l'intersection

A vide, les résistances  $R$  et  $R_S$  sont parcourues par le même courant  $I$ ; la pente de la courbe 2 dépend de la valeur de la résistance.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{OA}{OB} \frac{n_u}{n_i} = \text{tg}\alpha \frac{n_u}{n_i}$$



a) schéma simplifié du stabilisateur

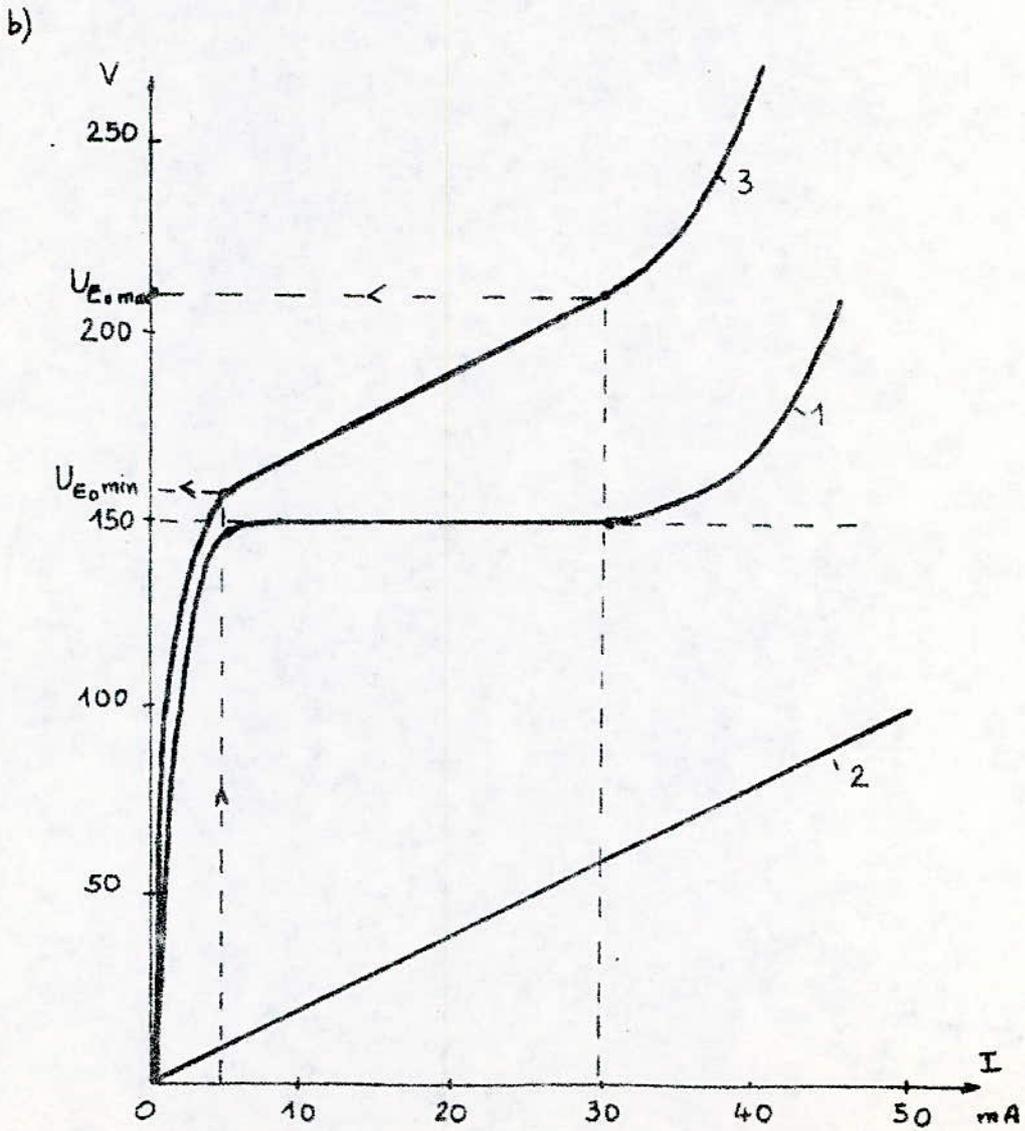


Fig III.1 b) Construction de la caractéristique résultante courant-tension du stabilisateur à vide

$n_u$  : échelle des tensions

$n_i$  : échelle des courants

$$n_i = 5 \text{ mA/cm}$$

$$n_u = 20 \text{ V/cm}$$

$$\text{tg } \alpha = R \frac{n_i}{n_u} = 2 \cdot 10^3 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{20} = 0,5$$

$$\alpha = 26^\circ 40'$$

D'après la figure III.2 on obtient :

$$U_{E\text{min}} = 158 \text{ V}$$

$$U_{E\text{max}} = 210 \text{ V}$$

On retrouve les mêmes résultats que dans le cas précédent.

### III.2 Régime de charge

On donne :

$$R = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{ch} = 5 \text{ k}\Omega$$

et la caractéristique courant-tension d'un stabilovolt 150C 5 - 30 .

a) On demande de déterminer la variation admissible de la tension d'entrée du stabilisateur si la tension de sortie  $U_S = 150 \text{ V}$ , avec la charge fixe.

D'après la méthode du générateur équivalent ( ou du générateur de Thévenin ), on débranche le circuit comprenant la résistance non linéaire. La tension à vide entre les bornes c et d ( fig.III.3a):

$$U_{cd} = U_E \frac{R_{ch}}{R + R_{ch}} = U_E \frac{5}{2 + 5} = 0,713 U_E$$

$$U_{cd} = 0,713 U_E$$

La résistance d'entrée de la partie linéaire du schéma vu des bornes c et d

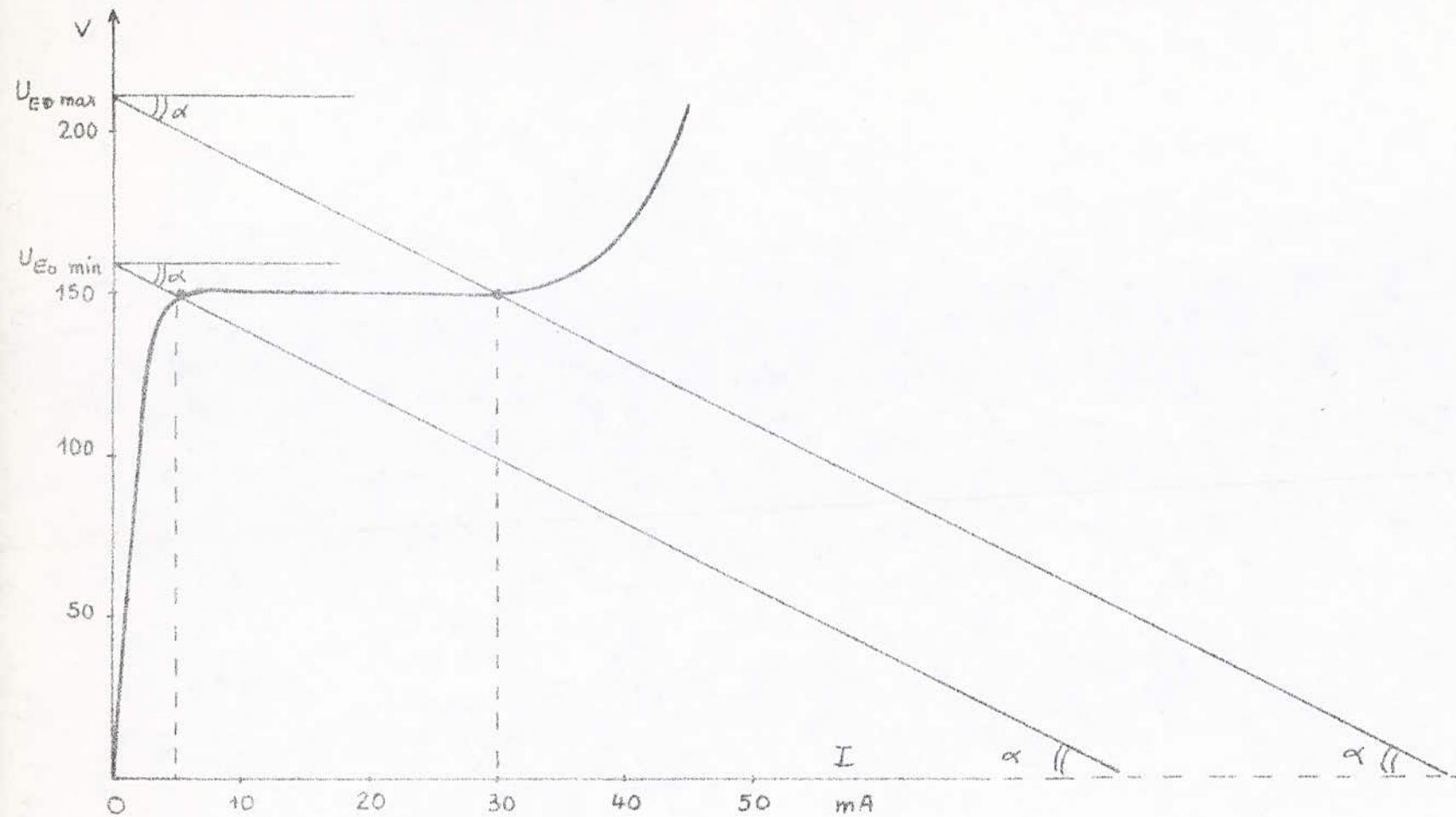


Fig III. 2 Méthode de l'intersection

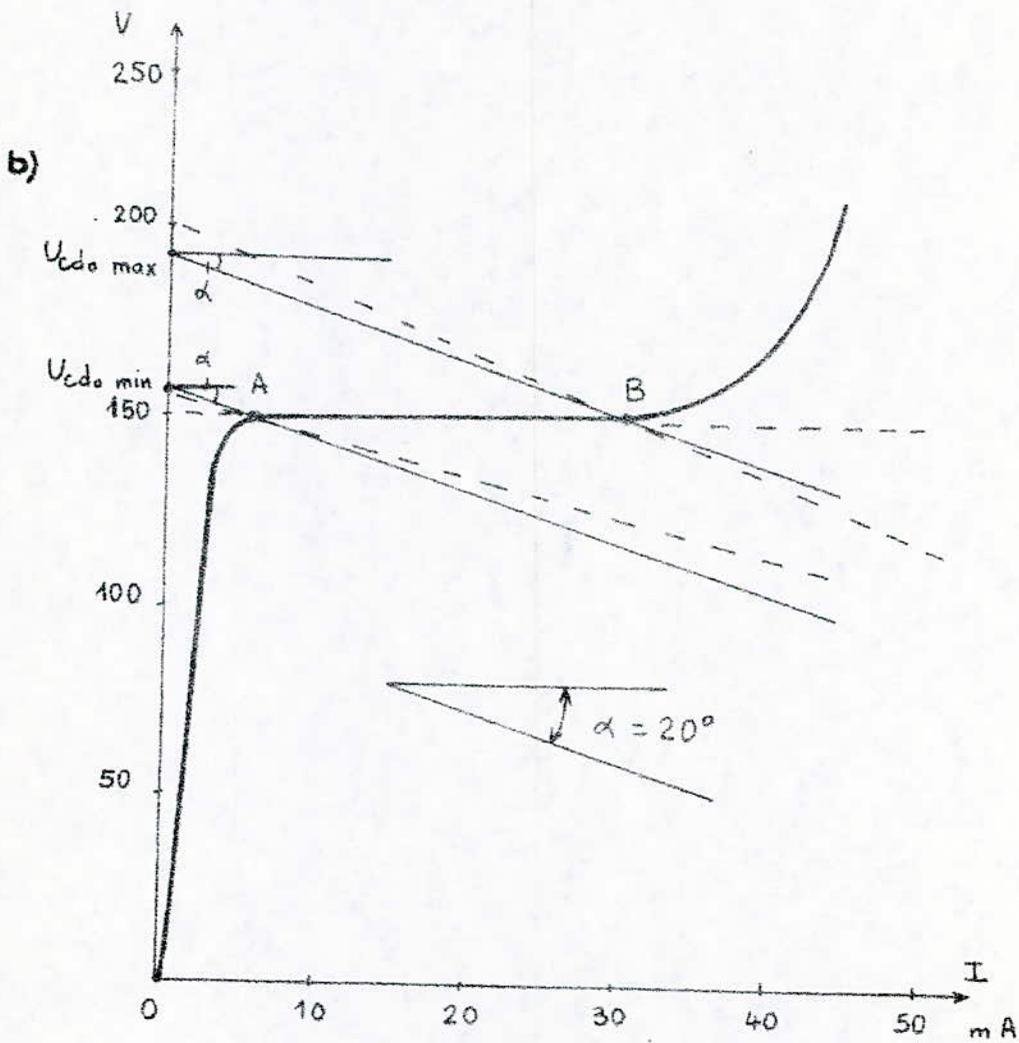
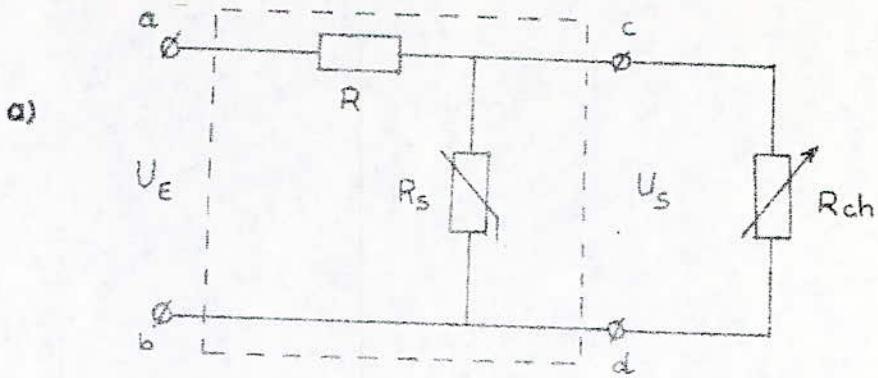


Fig III.3 Méthode l'intersection d'après le théorème de Thévenin

$$R_{cd} = \frac{R \cdot R_{ch}}{R + R_{ch}} = \frac{2 \cdot 10^5}{(2+5)10^3} = 1427 \Omega$$

A partir des points A et B traçons deux droites (fig.III.3b) de telle façon que:

$$R_{cd_0} = \frac{n_u}{n_i} \operatorname{tg} \alpha$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_i}{n_u} R_{cd_0} = \frac{5 \text{ mA/cm}}{20 \text{ V/cm}} 1427 = 0,357$$

$$\alpha = 19^\circ 40' \approx 20^\circ$$

Par construction graphique (fig.III.3b) ou à partir de la caractéristique à vide résultante de la figure III.1b on peut obtenir  $U_{cd}$  minimale et maximale.

$$U_{cd \text{ min}} = 157 \text{ V}$$

$$0,713 U_E \text{ min} = 157 \text{ V}$$

$$U_E \text{ min} = \frac{157}{0,713} = 220 \text{ V}$$

$$U_{cd \text{ max}} = 192 \text{ V}$$

$$0,713 U_E \text{ max} = 192 \text{ V}$$

$$U_E \text{ max} = \frac{192}{0,713} = 269 \text{ V}$$

Par conséquent la tension d'entrée peut varier de 220 V à 269 V.

Le stabilisateur fonctionne comme un dévolteur automatique avec les paramètres nominales suivantes:

$$U_E = 220 \text{ V} + 22\%$$

$$U_S = 150 \text{ V}$$

Les mêmes résultats peuvent être trouvés à partir de la figure III.4, par construction de la caractéristique courant-tension résultante (courbe 5).

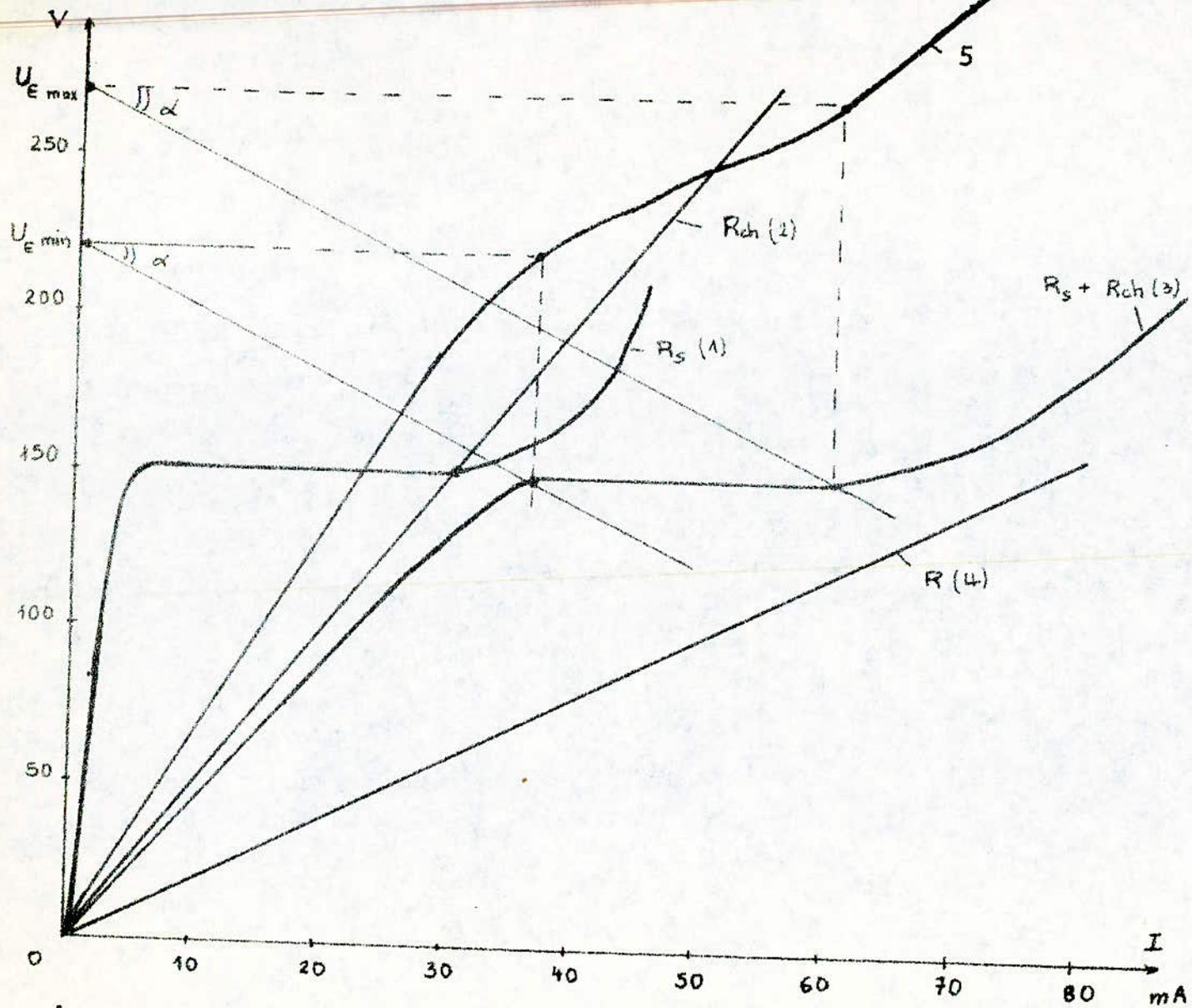


Fig III.4 Construction de la caractéristique courant-tension résultante du stabilisateur stabilisateur en charge

b) On demande de déterminer le diapason de la charge  $R_{ch}$  ; si la tension d'entrée est égale à 250 V .

Si on utilise la méthode du générateur équivalent :

$$U_{cd} = U_E \frac{R_{ch}}{R + R_{ch}} = 250 \frac{R_{ch}}{R_{ch} + 2000}$$

$$R_{cd} = \frac{n_u}{n_i} \operatorname{tg} \alpha$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_i}{n_u} R_{cd} = 2,5 \cdot 10^{-4} R_{cd}$$

$$R_{cd} = \frac{R_{ch} \cdot R}{R_{ch} + R} = \frac{2000 R_{ch}}{2000 + R_{ch}}$$

On utilise la méthode des approximations successives : on fixe arbitrairement  $R_{ch}$  et on en déduit  $R_{cd}$  et  $U_{cd}$  et  $\operatorname{tg} \alpha$  . Le tableau suivant donne une famille de droites caractérisant  $R_{ch}$  ; on peut choisir aisément les valeurs extrêmes de  $R_{ch}$  . ( fig. III.3b )

$R_{ch} (k\Omega)$	$U_{cd} (V)$	$R_{cd} (\Omega)$	$\operatorname{tg} \alpha$	$\alpha (^\circ)$
3	150	1200	0,3	17°
4	167	1330	0,33	19°
5	178	1425	0,35	20°
6	187	1500	0,37	20°
7	194	1555	0,38	21°
8	200	1600	0,4	22°
9	205	1636	0,41	22°
10	208	1666	0,42	23°

$3k\Omega < R_{ch \min} < 4k\Omega$  et  $R_{ch \max} = 8k\Omega$  .

## CHAPITRE IV

### ETUDE EXPERIMENTALE DU PHENOMENE DE FERRORESONANCE

#### Introduction

Cette étude expérimentale comprend deux parties:

La première partie concernant la ferrorésonance des tensions avec l'influence de la variation de la valeur de la capacité et la ferrorésonance des courants a été effectuée aux Laboratoires de la Chaire d'Electrotechnique de l'INHC de Boumerdès.

La deuxième partie a été effectuée aux Laboratoires de l'ENPA.

#### A. PREMIERE PARTIE

##### IV.A-1 Couplage en serie de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur

Nous allons étudier les phénomènes ayant lieu dans le circuit ( la ferrorésonance des tensions lors de la variation de la tension d'alimentation, l'apparition des régimes de relais etc...)

a) Caractéristique courant-tension de la bobine à noyau de fer à vide  $U = f(I)$  et  $C = 0$  (fig.IV.A-1)

Le montage doit comprend :

- une source de tension alternative 220 V
- un interrupteur à fusible
- un autotransformateur AT
- un milliampèremètre calibre 200 mA
- un ampèremètre calibre 1 A
- un voltmètre calibre 150 V
- une bobine à noyau de fer  $L_B$

Mode opératoire:

Après avoir fermé l'interrupteur à fusible, on augmente lentement la tension à l'aide de l'autotransformateur AT et on relève la tension et le courant correspondant. Tant que le courant reste faible ( $< 200$  mA) on se sert du milliampèremètre pour avoir une plus grande sensibilité; et

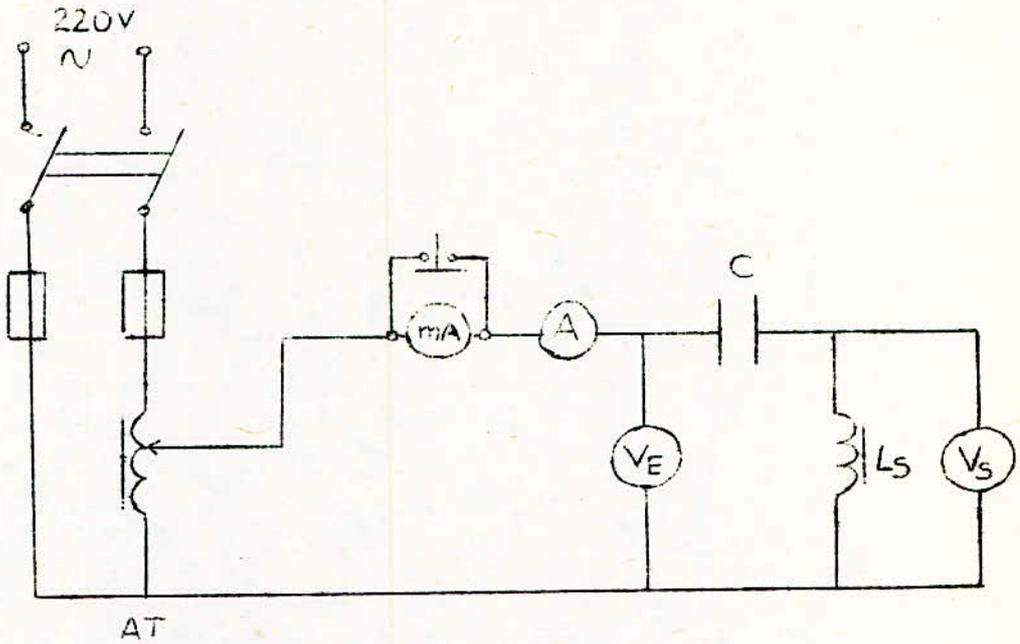


fig. IV. A.1 Schéma général (circuitserie)

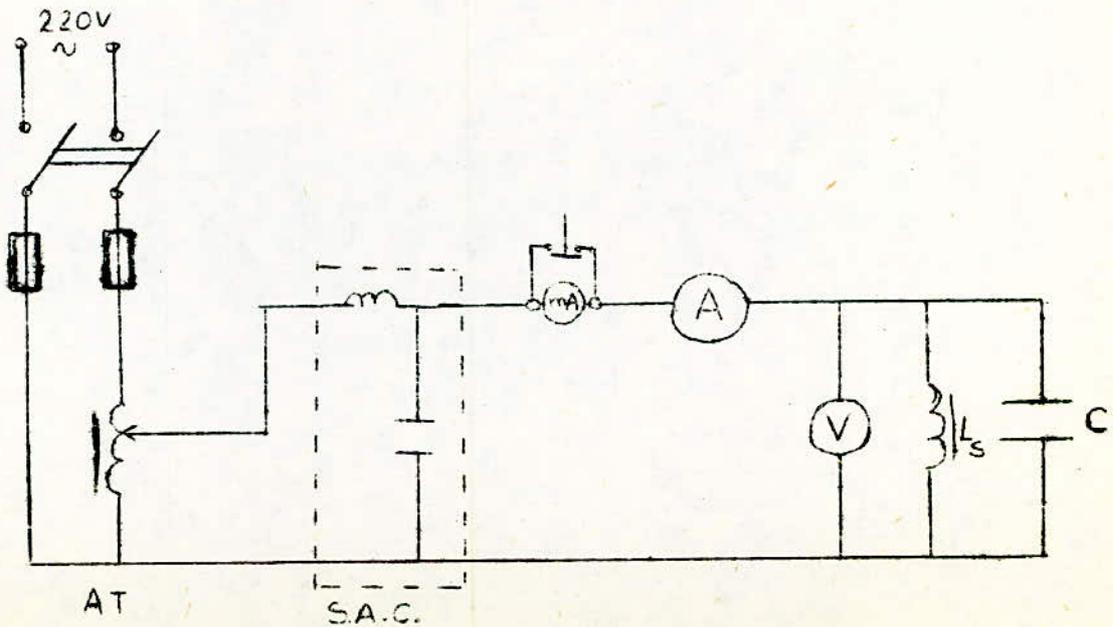


fig. IV. A-2 . Ferrorésonance parallèle

lorsque les limites de ce dernier sont atteintes, on le court-circuite et est remplacé automatiquement par l'ampèremètre placé en série.

Les résultats des mesures  $U = f(I)$  sont consignés dans le tableau A-1. L

La courbe de la figure IV.A-3 représente la caractéristique courant tension  $U_L = f(I)$  de la bobine à vide.

b) Couplage en série de la bobine à noyau de fer avec un condensateur  $C = 18 \mu F$

Les résultats des mesures sont consignés dans le tableau A-2.

On constate, sur la caractéristique courant - tension  $U = f(I)$  qu'on obtient la ferrorésonance des tensions. (fig.IV.A-4)

Le courant augmente régulièrement avec la tension, et lorsque la tension atteint la valeur  $U_0 = 37 V$ , fait un bond de 120 mA jusqu'à 820 mA puis devient à nouveau régulier. En diminuant la tension, il effectue son deuxième saut pour la valeur  $I = 610 mA$  jusqu'à une valeur très proche de zéro ( $U = 15 V$ ) puis devient régulier à nouveau.

c) Influence de la capacité

Dans le montage précédent (fig.IV.A-1) on fait prendre à la capacité de ferrorésonance différentes valeurs.

Les résultats sont résumés dans les figures et tableaux suivants :

- figure IV.A-5 et tableau A-3 :  $C = 8 \mu F$
- figure IV.A-6 et tableau A-4 :  $C = 10 \mu F$
- figure IV.A-7 et tableau A-5 :  $C = 14 \mu F$

On remarque que si on diminue la capacité, la tension  $U$  correspondant au bond de courant diminue et inversement. Cela s'explique par le déplacement du point de résonance qui est l'intersection des caractéristiques  $U_L = f(I)$  et  $U_C = f(I)$ . Nous savons que  $U_C = f(I)$  est une droite d'équation  $U_C = I / 2\pi f C$ , dont la pente varie en fonction de  $C$ . En effet si on diminue  $C$ , la pente  $1 / 2\pi f C$  augmente et à la limite on n'obtiendra plus la ferrorésonance si les caractéristiques  $U_L = f(I)$  et  $U_C = f(I)$  n'ont d'autre point d'intersection que l'origine.

#### IV.A-2 Etude de la ferrorésonance des courants

Pour l'étude du couplage en parallèle de la bobine à noyau de fer avec un condensateur nous présentons deux cas :

- le premier sans source de courant
- le second avec source artificielle de courant

Le montage utilisé est celui de la figure IV.A-2 .

##### a) Etude de la ferrorésonance parallèle sans source de courant

Le condensateur est monté en dérivation avec la bobine à noyau de fer . On a pris  $C = 18\mu F$  .

Le mode opératoire est le même que précédemment.

Les résultats de cette expérience sont présentés dans le tableau A-6 et transmis sur la figure IV.A-8 .

On remarque qu'on obtient ici la courbe réelle de la ferrorésonance parallèle : le courant augmente régulièrement avec la tension puis diminue en passant par un minimum -qui n'est pas nul- puis augmente de nouveau. Le circuit est alimenté par une source de force électromotrice.

Mais il n'y a pas de bond de tension.

##### b) Ferrorésonance parallèle avec source artificielle de courant

Le tableau A-7 contient les résultats de cette expérience.

Tandis que si on alimente le circuit par une source artificielle de courant (S.A.C.), on obtient un bond de tension pour la valeur  $U_0 = 62,5V$  lors de l'augmentation du courant, puis la tension varie très peu après le bond, quand on continue à augmenter le courant. Lors de la diminution du courant la tension est d'abord régulière jusqu'à  $U_0 = 96,5 V$  pour un courant correspondant  $I = 220 mA$ ; puis fait un bond et devient régulière de nouveau.

Il est important de souligner que la non-nullité du courant à la résonance est due à la résistance pure de la bobine .

A - TABLEAUX DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A-1

U (V)	35.5	40	50	60	65	70	80	90	100
I (A)	0,04	0,055	0,092	0,13	0,165	0,205	0,330	0,545	0,867

A-2

U (V)	24	32	35	37	37	55	65	25	15
I (A)	0,036	0,058	0,088	0,12	0,82	1	1,15	0,7	0,61

A-3

U (V)	10	20	21	21	25	30	35	40	45	55	15	11,5	8
I (A)	0,0165	0,039	0,064	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,395	0,23	0,21	0,175

A-4

U (V)	10	20	23,5	23,5	30	40	50	56	62,5	75	20	17,5	8,5
I (mA)	15	40	80	330	360	410	455	490	510	50	310	300	210

A-5

U (V)	10	20	25	32	32	40	50	57,5	62,5	75	20	15	10
I (mA)	13	31	44	97	580	635	700	750	790	870	500	460	390

A-6

U (V)	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100	105	110	85
I (A)	0,12	0,17	0,23	0,27	0,3	0,305	0,29	0,28	0,34	0,41	0,51	0,825	0,275

A-7

U (V)	10	15	25	40	50	60	105	108	110	115	103	99	96,5
I (A)	0,06	0,10	0,145	0,22	0,26	0,29	0,51	0,62	0,74	0,95	0,4	0,255	0,22

Fig IV-A-3 Caractéristique courant-tension de la bobine à  
noyau de fer  $U_e = f(I)$

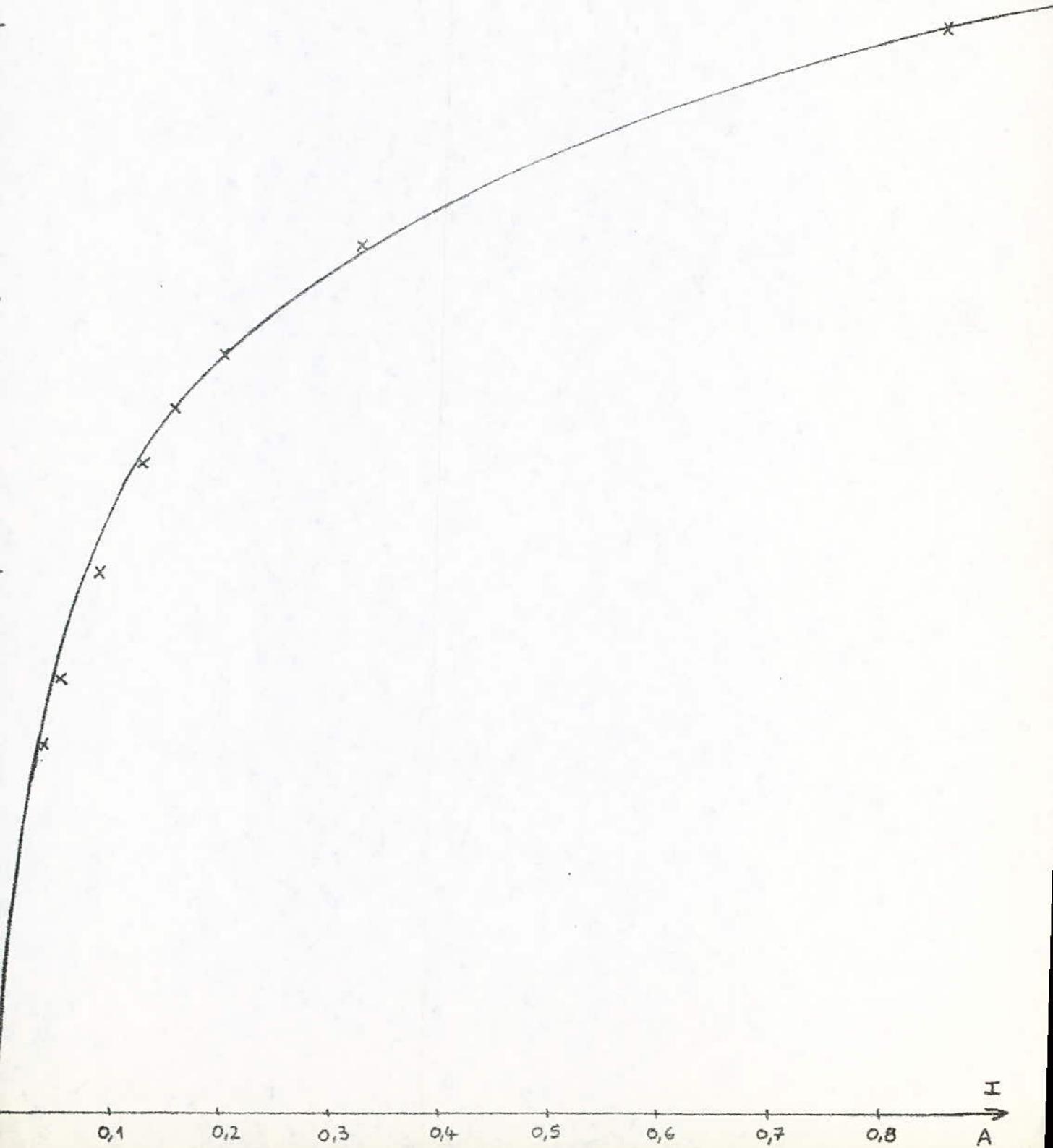


Fig N-A-4  $U_E = f(I)$

$C = 18 \mu F$

Caractéristique courant-tension du couplage en série du condensateur et de la bobine à noyau de fer

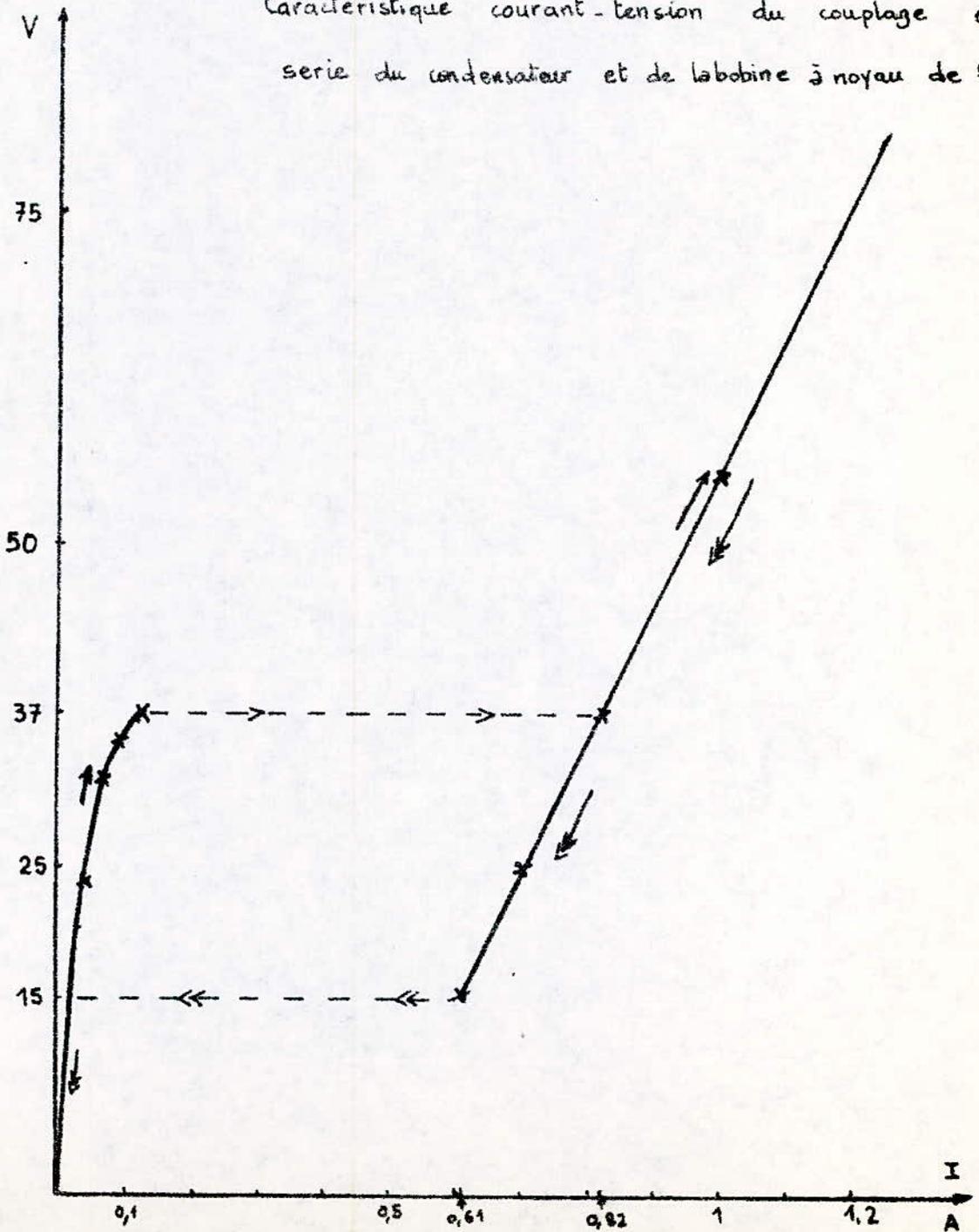


fig IV-A -5 Ferrorésonance serie

$$U_E = f(I) \quad C = 8 \mu F$$

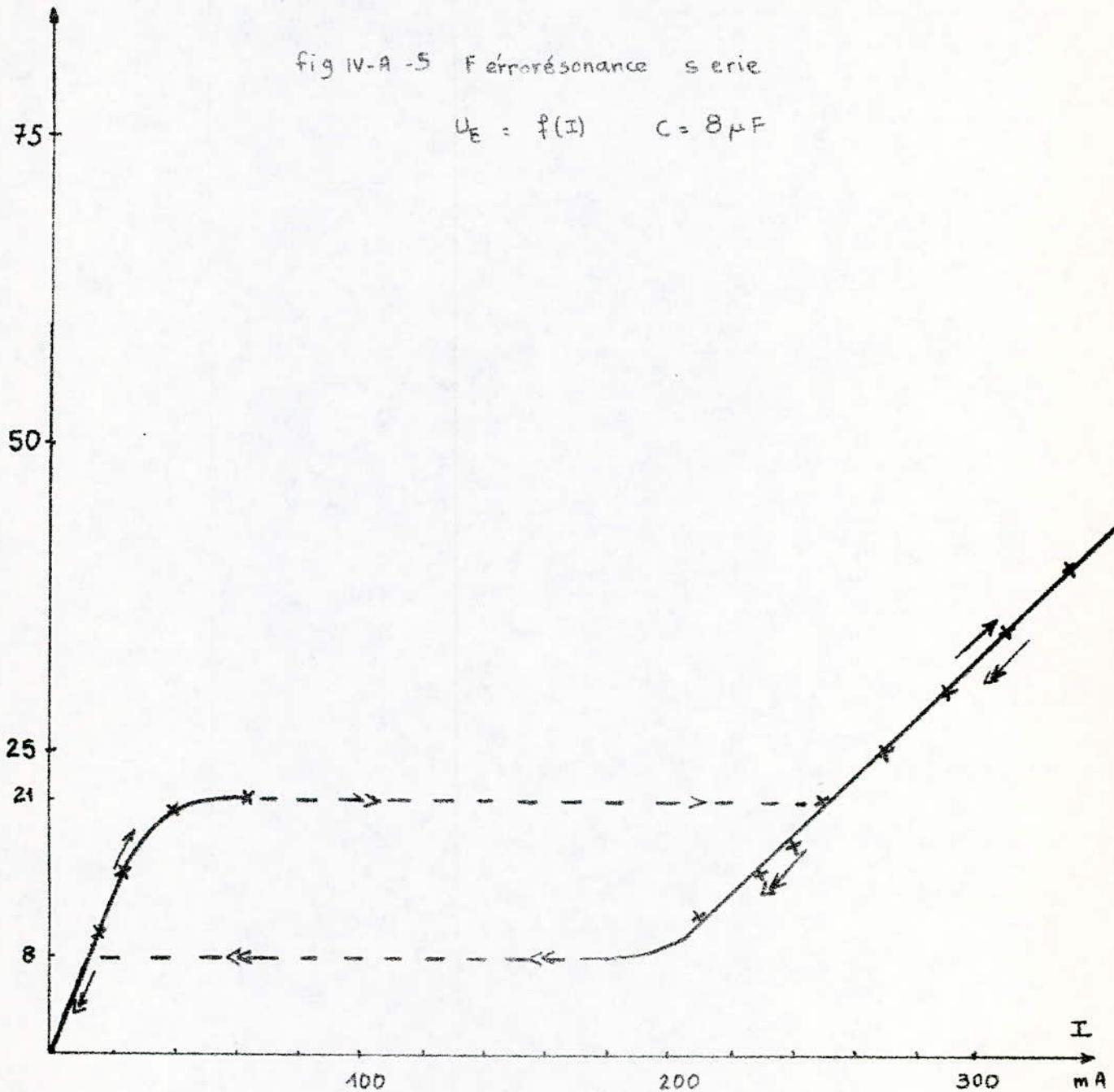


Fig IV-A-6 Ferrorésonance serie

Caracteristique courant - tension  $U_E = f(I)$

$C = 10 \mu F$

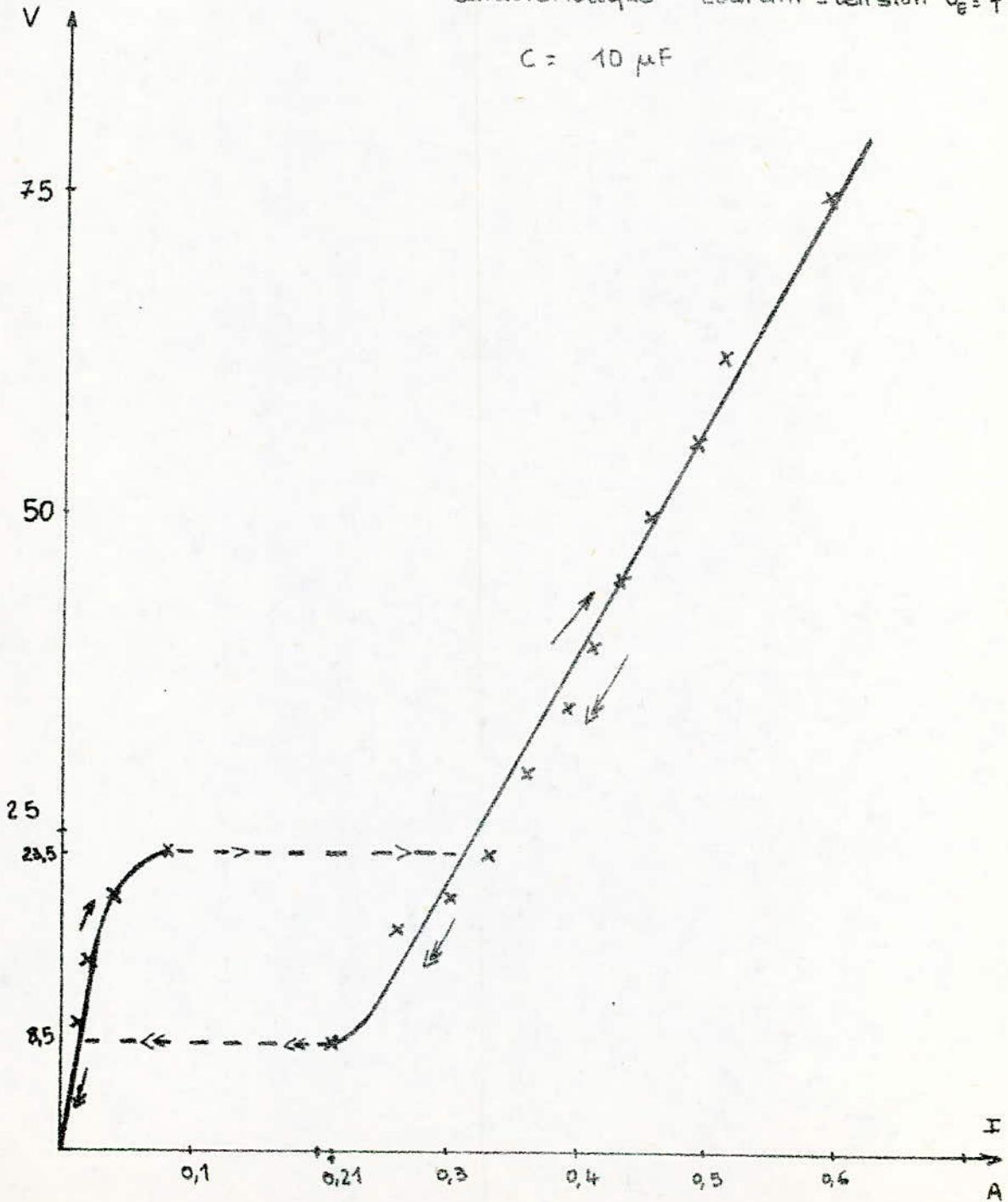
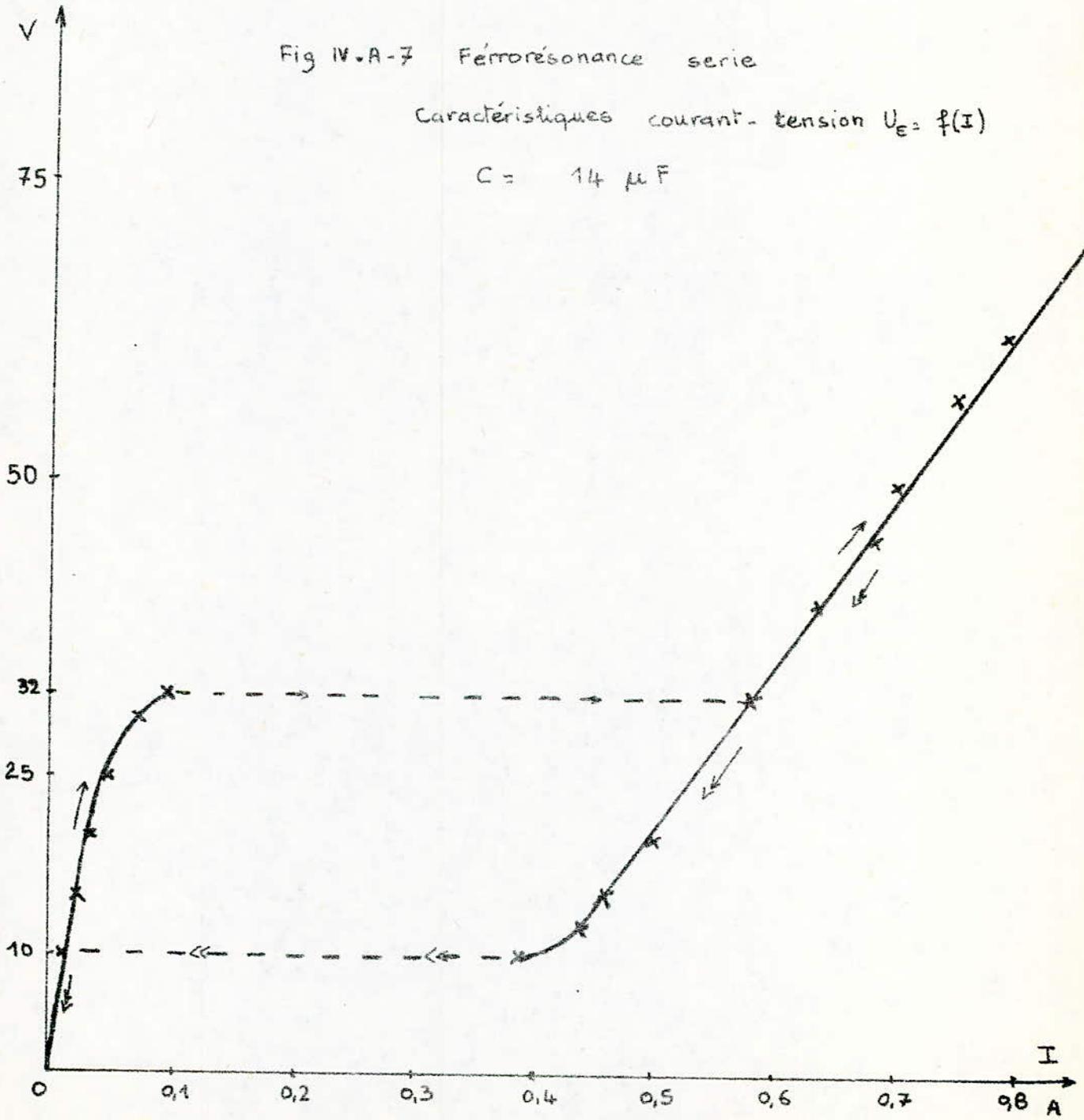


Fig IV.A-7 Ferrorésonance serie

Caractéristiques courant-tension  $U_E = f(I)$

$C = 14 \mu F$



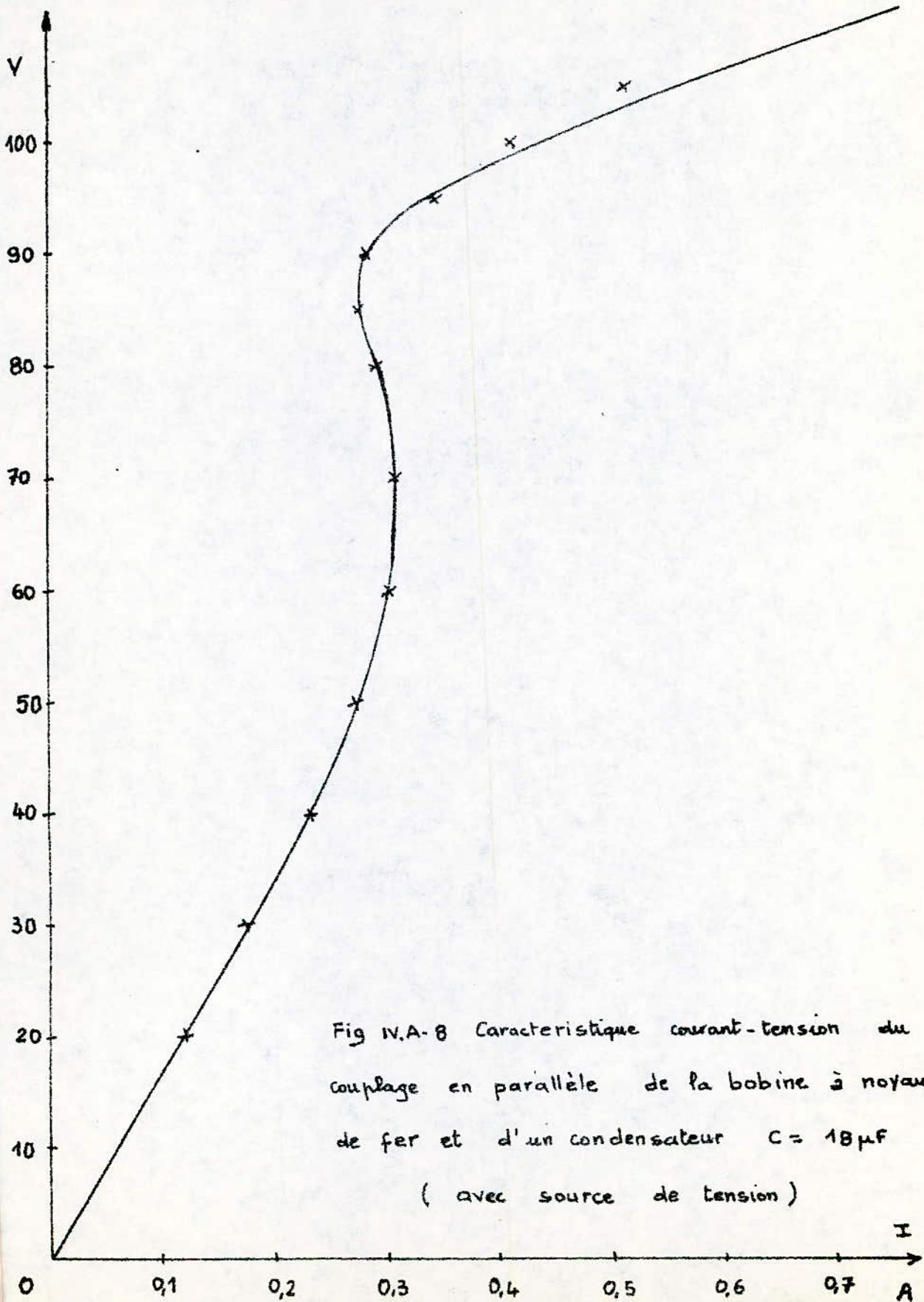


Fig IV.A-8 Caractéristique courant-tension du couplage en parallèle de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur  $C = 18 \mu F$  ( avec source de tension )

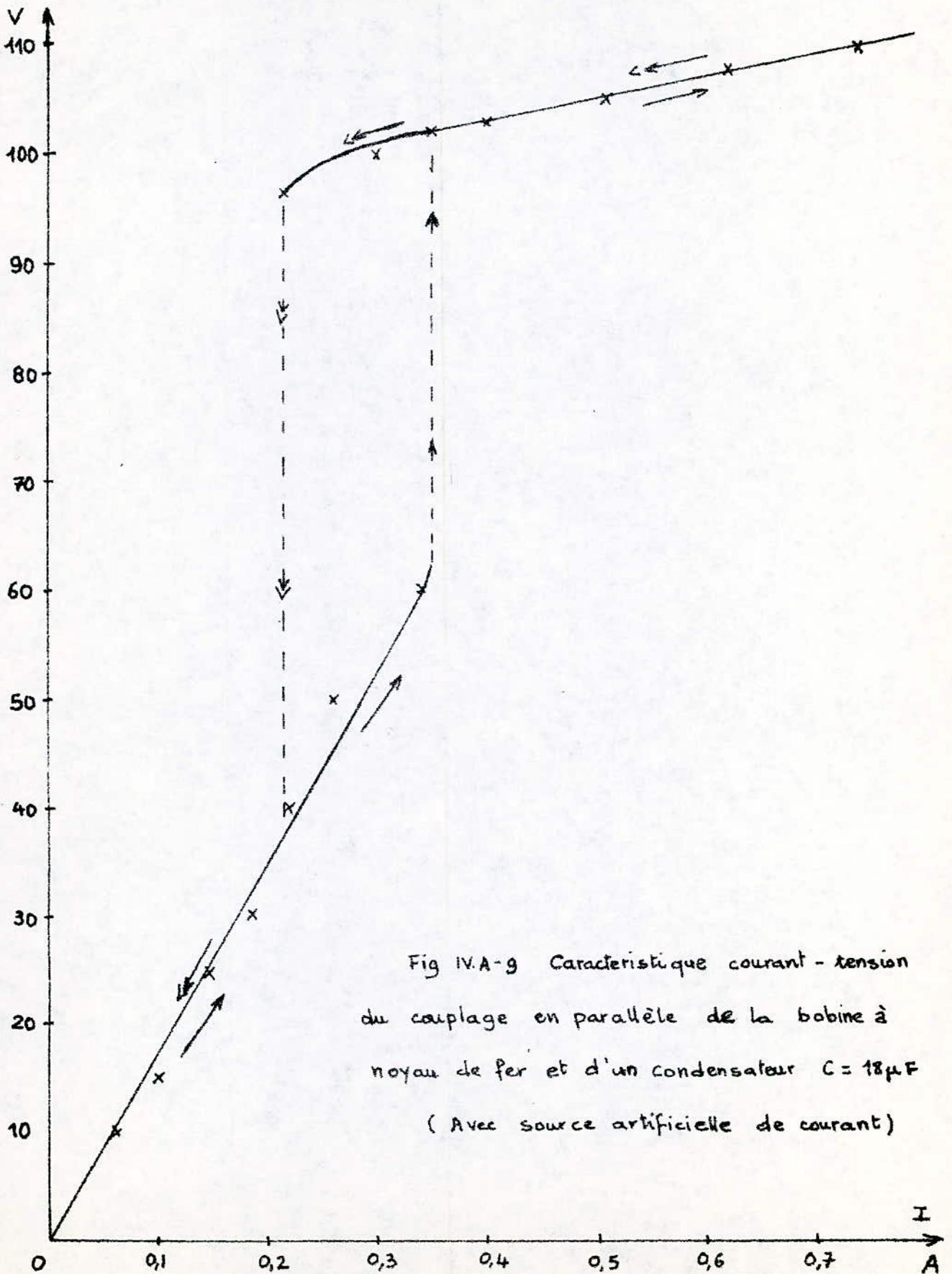


Fig IV.A-9 Caractéristique courant - tension  
du couplage en parallèle de la bobine à  
noyau de fer et d'un condensateur  $C = 18 \mu F$   
( Avec source artificielle de courant )

## B. DEUXIEME PARTIE

### Introduction

La deuxième partie de l'étude expérimentale est consacrée à la caractéristique tension-courant de la bobine à vide, au phénomène de ferrorésonance des tensions, à l'influence de la résistance série et aux essais en charge.

Le schéma général de l'installation est celui de la figure IV.B-1.

### IV.B-1 Caractéristique courant-tension de la bobine à vide

$$\text{Rad} = "0", \quad C = 0$$

On fait varier la tension d'entrée à l'aide de l'alternostat ou autotransformateur AT. On relève la tension à l'aide d'un voltmètre ferromagnétique et le courant à l'aide d'un ampèremètre magnéto-électrique à redresseur multicalibre.

Dans le cas particulier de ce montage, l'alternostat n'étant pas disponible a été remplacé par un montage potentiométrique mais limite la valeur de la tension à celle du réseau ( 0 à 220 V ).

### Description du montage

- Alimentation: Réseau alternatif direct du pupitre
- Interrupteur à fusible
- Rhéostat : 10,56 A 25  $\Omega$
- Ampèremètre magnéto-électrique à redresseur
  - calibre utilisé : 1 A ; 3 A
  - sur les divisions: 100 ; 30
  - classe : 2,5
- Voltmètre ferromagnétique
  - calibre : 300 V
  - divisions: 300
  - classe : 0,5

### Bobine à noyau de fer

Les résultats des mesures se trouvent sur le tableau B-1 ; et la courbe correspondante sur la figure IV.B-2 .

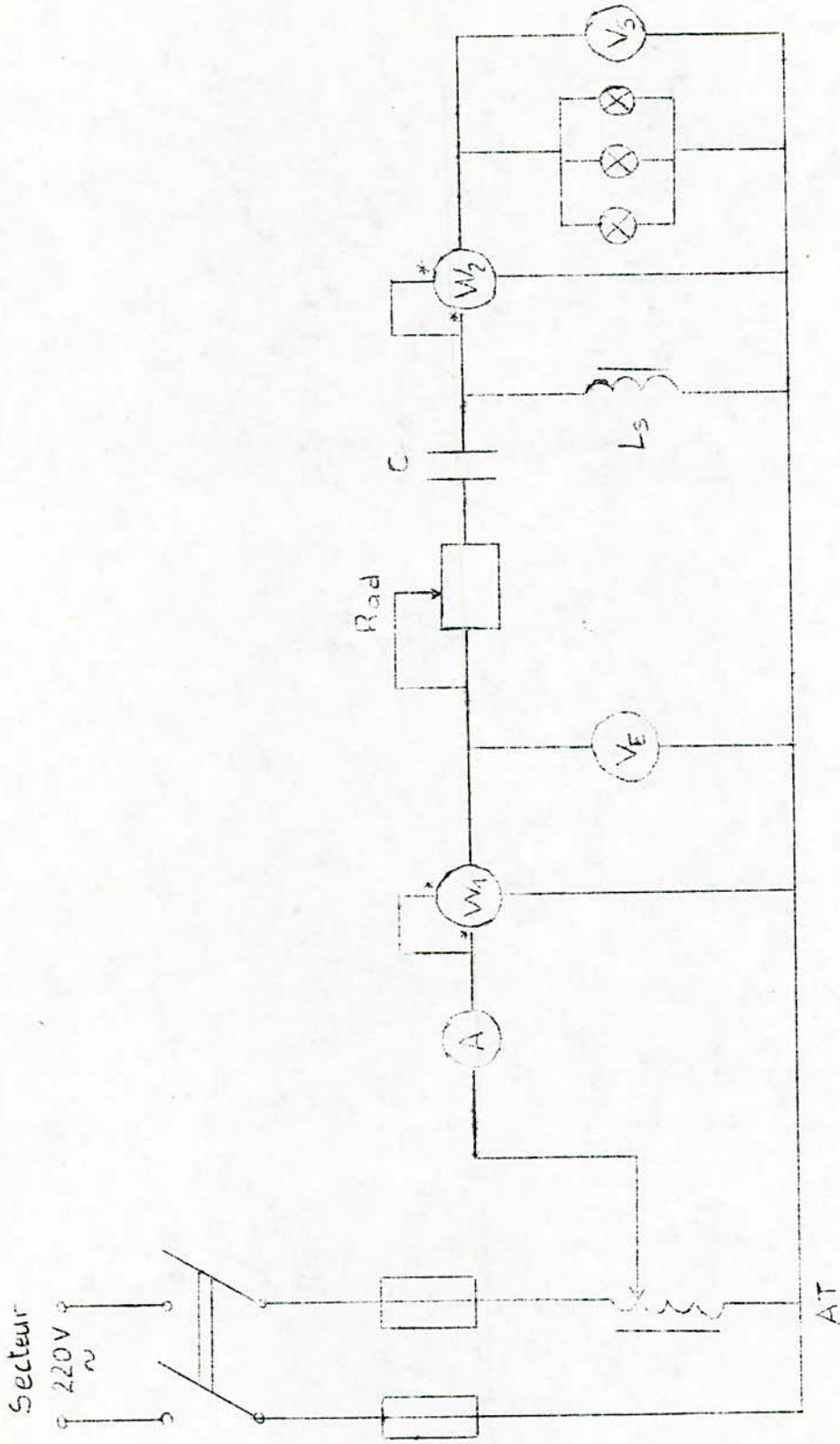


Fig IV. B-1 Schéma général

#### IV.B-2 Etude expérimentale de la résonance des tensions

##### a) Mesure directe

Comme on a vu dans la partie théorique, il est intéressant de connaître le phénomène de ferrorésonance afin de l'utiliser pour la stabilisation de la tension.

Il en résulte donc une légère modification par rapport au circuit précédent, celle de l'introduction en série d'un condensateur en papier dont le rôle est de fournir le courant magnétisant nécessaire à la saturation du circuit magnétique de l'inductance non linéaire.

$$C = 9 \mu\text{F}$$

C est constitué par deux condensateurs en papier disposés en parallèle

$$C = C_1 + C_2$$

$$C_1 = 5 \mu\text{F} \pm 5\%$$

$$C_2 = 4 \mu\text{F} \pm 5\%$$

Les résultats des mesures sont résumés dans le tableau B-2 .

La courbe (fig.IV.B-2) représente la caractéristique courant-tension de l'inductance saturable couplée en série avec un condensateur. On constate que pour une valeur de la tension  $U_0 = 82 \text{ V}$  et du courant  $I = 20 \text{ mA}$ , on obtient le premier saut de courant, c'est-à-dire la ferrorésonance des tensions dans la partie ascendante. Le deuxième saut est obtenu pour des valeurs décroissantes de la tension à  $U = 54 \text{ V}$  et  $I = 56 \text{ mA}$ .

##### b) Mesure indirecte

Sachant qu'on peut obtenir la tension d'entrée  $U_E$  en additionnant vectoriellement la tension aux bornes du condensateur et celle aux bornes de la bobine, plaçons le voltmètre  $V_E$  aux bornes du condensateur et  $V_S$  aux bornes de la bobine.

Calibre  $V_E$  : 600 V

Divisions : 300

Classe : 0,5

Calibre  $V_S$  : 300 V

Divisions : 150

classe : 0,5

Les résultats des mesures effectuées figurent au tableau B-3 .

On remarque que la tension capacitive est très élevée. Pour une valeur de  $U_L = 216$  V, correspond une tension capacitive  $U_C = 408$  V .

Par ailleurs , on obtient une courbe analogue à celle trouvée par la mesure directe mais diffère par la valeur de la tension de bond, lors de l'accroissement comme lors de la diminution de la tension. ( fig IV.2-4 )

#### IV.B-3 Influence de la résistance serie

Sur les courbes B-3 et B-4 nous avons remarqué qu'au voisinage du point de résonance la tension n'est pas nulle. Cela provient du fait que l'inductance non linéaire et le condensateur présentent chacun leur résistance propre qui s'ajoutent pour provoquer une chute de tension dans le circuit.

Appelons cette résistance , résistance additionnelle notée  $R_{ad}$  ; car cette valeur prise égale à "0" ne l'est pas en réalité.

Tout se passe comme si le couplage en serie d'une bobine à noyau de fer et d'un condensateur se comporte comme un circuit R L C serie classique

Faisons prendre différentes valeurs à cette résistance additionnelle en mettant un rhéostat en serie dans le circuit.

Le tableau B-2 correspond à  $R_{ad1} = "0"$

Le tableau B-4 correspond à  $R_{ad2} = "17\Omega"$

Le tableau B-5 correspond à  $R_{ad3} = "30\Omega"$

Les courbes IV.B-5 , IV.B-6 , IV.B-7 représentent les trois caractéristiques courant-tension relatives à  $R_{ad1}$  ,  $R_{ad2}$  ,  $R_{ad3}$  .

On constate que l'augmentation de la résistance additionnelle va dans le sens de l'augmentation de la chute de tension.

#### IV.B-4 Essais en charge

Dans l'essai en charge , nous avons modifié le montage précédent comme suit :

- D'une part, pour avoir une plus large plage de la tension d'entrée, nous avons choisi comme source d'alimentation , la tension régulée variable du pupitre. Mais cette tension a le défaut de ne pas être stable , car le moteur fournissant cette tension ne tourne pas à une vitesse constante.

- D'autre part, nous avons remplacé l'ampèremètre magnéto-électrique à redresseur par un ampèremètre ferromagnétique par souci de fidélité à la charge - résistive pure - sensible à la valeur efficace du courant.

Matériels utilisés:

- 2 Ampèremètres ferromagnétiques :  $A_1$  et  $A_2$

calibre : 1,5 A

divisions: 1,5

classe : 0,5

- 2 Wattmètres électrodynamiques

calibre U : 300 V

calibre I : 2,5 A

divisions : 150

classe : 2,5

- 2 voltmètres ferromagnétiques

$V_E$  - calibre : 300 V

divisions : 150 V

$V_S$  calibre : 300 V

divisions : 300

classe : 0,5

- 1 bobine à noyau de fer

- 1 condensateur en papier  $C = 9 \mu F$

- charge purement résistive constituées par des lampes à incandescence

On fait varier la tension d'alimentation de 150 à 280 V; on relève la tension d'entrée et de sortie, la puissance d'entrée et de sortie en fonction du courant d'entrée.

On calcule le rendement et le facteur de puissance cas par cas.

Sachant que  $\eta = \frac{P_{21}}{P_{22}} = \frac{P_2}{P_1}$

$$P_1 = V_E I_1 \cos \varphi_1 \Rightarrow$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{V_E I_1}$$

Les résultats sont consignés dans les tableaux B-6 à B-10.

B. TABLEAUX DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

B-1

U (V)	30	40,5	55	66	79	94	114	125	170	180	190	194	198	206	216
I (mA)	60	70	90	100	120	140	180	200	510	500	700	760	830	920	970

$C = 9 \mu F$        $R_{ad1} = "0"$

B-2

$U_E$ (V)	20	30	40	50	60	70	82	82	100	120	140	160	180	200	220	54
I (mA)	0,06	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,2	0,65	0,7	0,76	0,83	0,88	0,92	0,97	1,02	0,56

$|V_L - V_C| = f(I)$        $C = 9 \mu F$

B-3

$V_L$	58	60	80	100	122	172	182	186	190	196	200	204	212	216	172	170
$V_C$	25	35,5	45,5	56	59	227	244	266	288	324	352	364	396	408	196	192
$ V_L - V_C $	13	24,5	34,5	44	53	55	62	80	98	128	152	160	184	272	24	22
I (A)	0,07	0,1	0,13	0,16	0,2	0,6	0,65	0,71	0,75	0,84	0,9	0,94	1	1,2	0,55	0,52

$C = 9 \mu F$        $R_{ad2} = "47 \Omega"$

B-4

U (V)	20	50	80	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	70	58
I (A)	0,06	0,1	0,2	0,6	0,65	0,67	0,73	0,77	0,83	0,7	0,95	1	1,05	0,55	0,47

$C = 9 \mu F$        $R_{ad_3} = " 30 \Omega "$

B-5

U(V)	20	50	75	83,5	83,5	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	75
I(A)	0,06	0,1	0,14	0,2	0,55	0,59	0,62	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	0,5

$R_{ch_1}: P_1 = 60 W, U = 220 V$

B-6

$V_E(V)$	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	280
$V_S(V)$	178	184	186	190	192	194	197	198	200	203	205	207	211
$I_1(A)$	0,8	0,88	0,95	1,02	1,08	1,13	1,17	1,21	1,23	1,27	1,29	1,31	1,34
$P_1(W)$	75	80	80	85	87,5	90	90	95	96	97,5	100	102,5	110
$P_2(W)$	45	45	45	45	46	47,5	50	50	50	50	50	52,5	60
$\eta$	0,6	0,56	0,56	0,53	0,53	0,53	0,56	0,53	0,52	0,51	0,5	0,51	0,54
$\cos \varphi$	0,62	0,57	0,5	0,46	0,43	0,4	0,37	0,36	0,34	0,32	0,31	0,3	0,3

-68-

Rech<sub>2</sub> :  $P_2 = 75W$ ,  $U = 220V$

B-7

$U_E (V)$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	300
$U_S (V)$	150	174	180	185	188	192	194	197	200	202	204	205	207	211
$I_1 (A)$	0,53	0,77	0,85	0,94	1	1,05	1,11	1,15	1,2	1,23	1,26	1,3	1,32	1,36
$P_1 (W)$	65	85	90	95	100	102,5	105	107,5	110	112,5	115	117,5	120	125
$P_2 (W)$	45	55	60	60	62,5	65	65	65	67,5	70	70	70	70	75
$\eta$	0,69	0,64	0,66	0,63	0,62	0,63	0,62	0,60	0,61	0,62	0,61	0,6	0,58	0,6
$\cos\varphi$	0,76	0,63	0,58	0,53	0,5	0,46	0,43	0,40	0,38	0,36	0,36	0,33	0,32	0,31

Rech<sub>3</sub> :  $P_3 = 100W$ ,  $U = 220V$

B-8

$U_E (V)$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	300
$U_S (V)$	102	116	130	156	170	-	184	-	190	-	196	-	202	206
$I_1 (A)$	0,42	0,46	0,51	0,63	0,73	-	0,93	-	1,09	-	1,18	-	1,27	1,34
$P_1 (W)$	45	55	62,5	75	90	-	120	-	120	-	125	-	135	140
$P_2 (W)$	35	40	45	55	70	-	75	-	80	-	85	-	87,5	90
$\eta$	0,77	0,72	0,72	0,73	0,77	-	0,62	-	0,66	-	0,68	-	0,65	0,64
$\cos\varphi$	0,67	0,70	0,68	0,62	0,61	-	0,58	-	0,45	-	0,4	-	0,38	0,34

Rch4  $P_4 = 120\text{w}$ ,  $U = 220\text{V}$

B-9

$U_E$ (V)	160	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	300
$U_3$ (V)	89	110	120	134	154	169	177	184	187	191	194	196	202
$I_1$ (A)	0,42	0,49	0,52	0,58	0,68	0,83	0,93	1	1,07	1,11	1,17	1,21	1,29
$P_1$ (W)	40	55	60	72,5	90	107,5	115	122,5	127,5	130	135	140	145
$P_2$ (W)	32,5	40,5	47,5	55	70	80	8,5	90	90	90	95	95	100
$\eta$	0,81	0,77	0,79	0,79	0,77	0,74	0,74	0,73	0,70	0,69	0,70	0,67	0,69
$\cos\varphi$	0,59	0,62	0,60	0,62	0,63	0,59	0,53	0,51	0,47	0,45	0,43	0,41	0,37

Rch5:  $P_5 = 200\text{w}$ ,  $U = 220\text{V}$

B-10

$U_E$ (V)	160	170	180	200	220	240	260	280	300
$U_3$ (V)	44	50	62	72	80	93	104	120	140
$I_1$ (A)	0,45	0,48	0,5	0,56	0,61	0,67	0,71	0,78	0,86
$P_1$ (W)	25	30	30	40	52,5	67,5	77,5	95	120
$P_2$ (W)	20	25	25	35	45	55	65	80	95
$\eta$	0,8	0,83	0,83	0,87	0,83	0,81	0,84	0,84	0,79
$\cos\varphi$	0,34	0,36	0,33	0,36	0,39	0,42	0,42	0,43	0,46

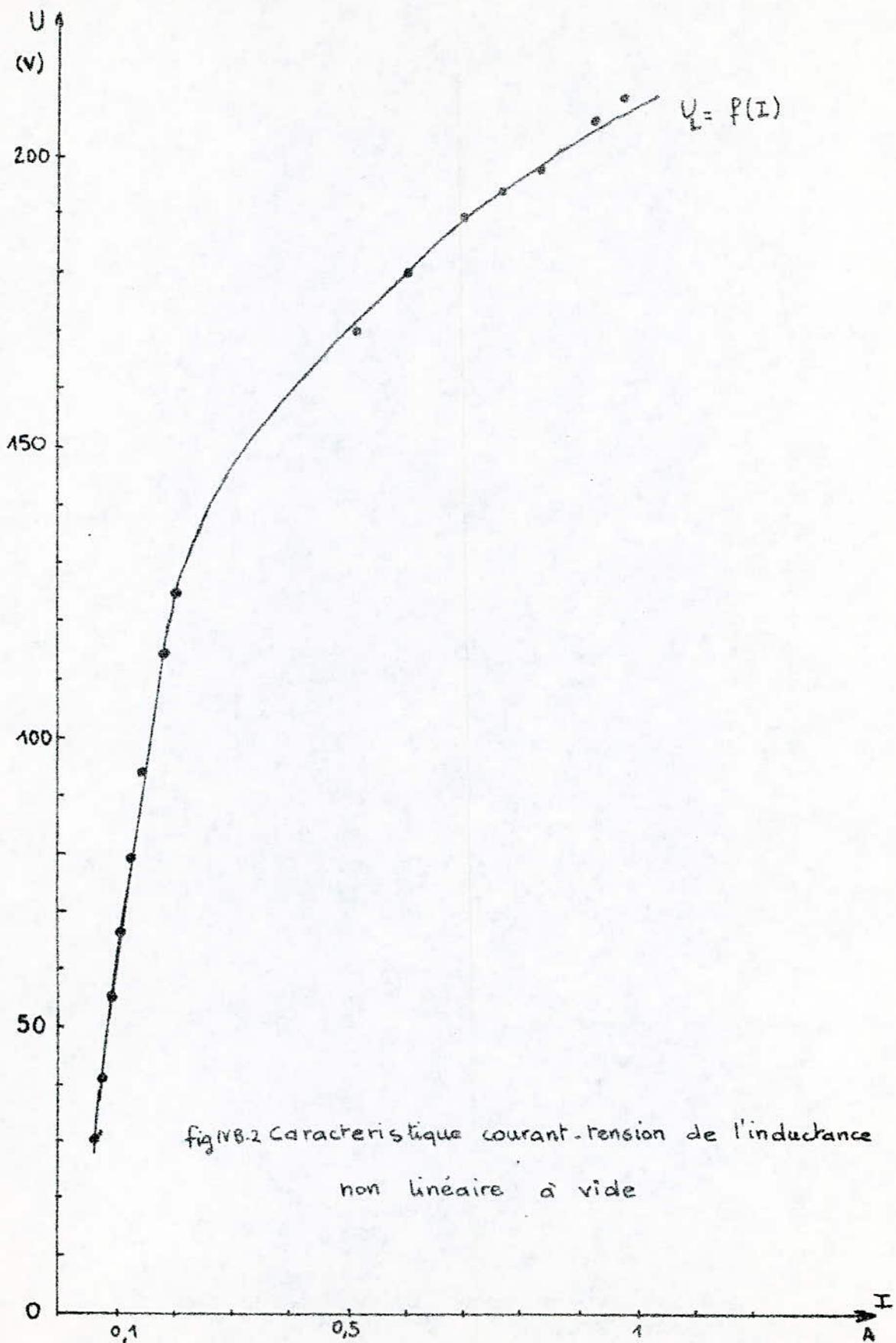


fig 118.2 Caractéristique courant-tension de l'inductance non linéaire à vide

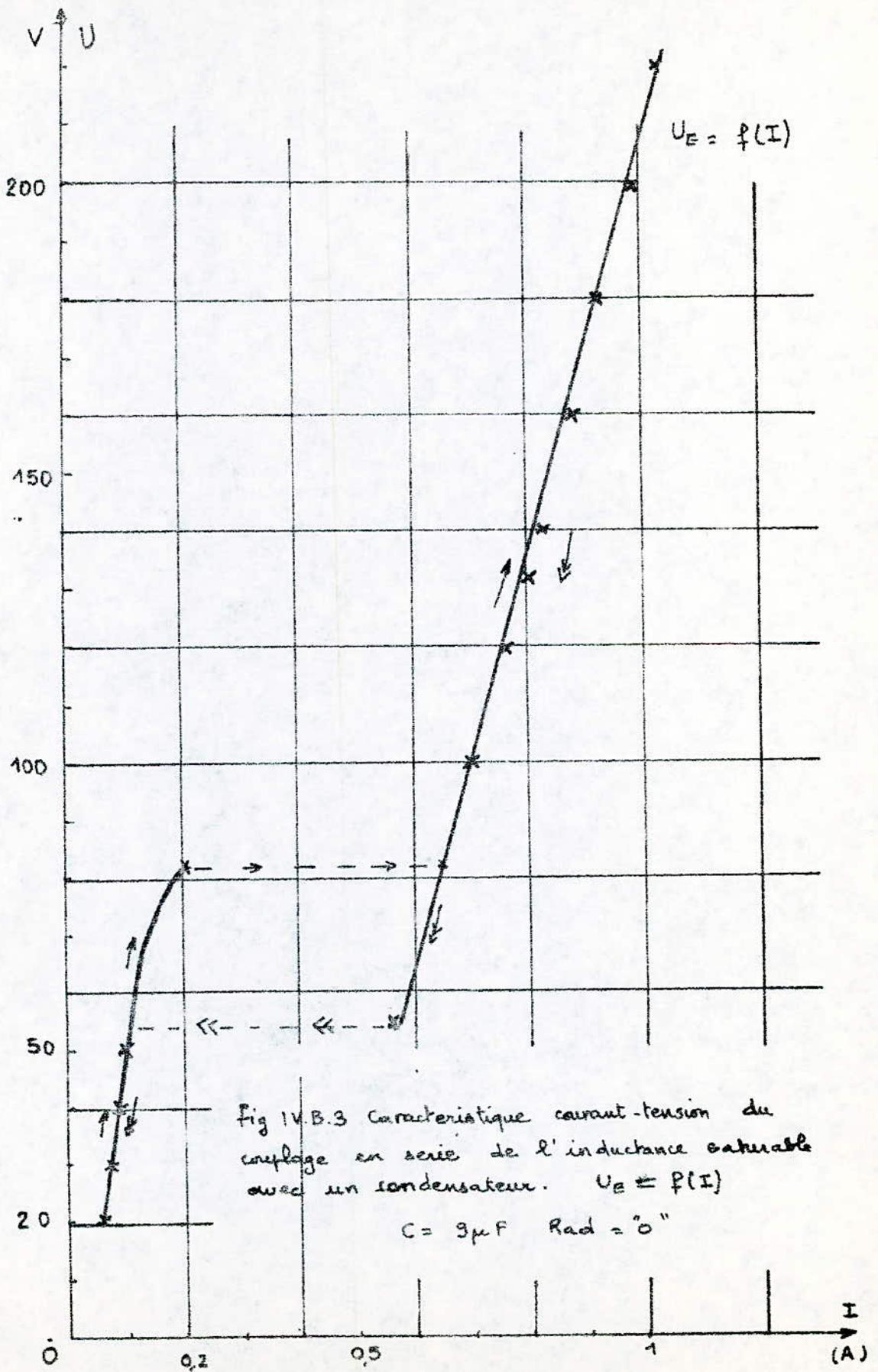


Fig IV.B.3 Caractéristique courant-tension du couplage en série de l'inductance saturable avec un condensateur.  $U_E = f(I)$

$C = 3 \mu F$  Rad = "0"

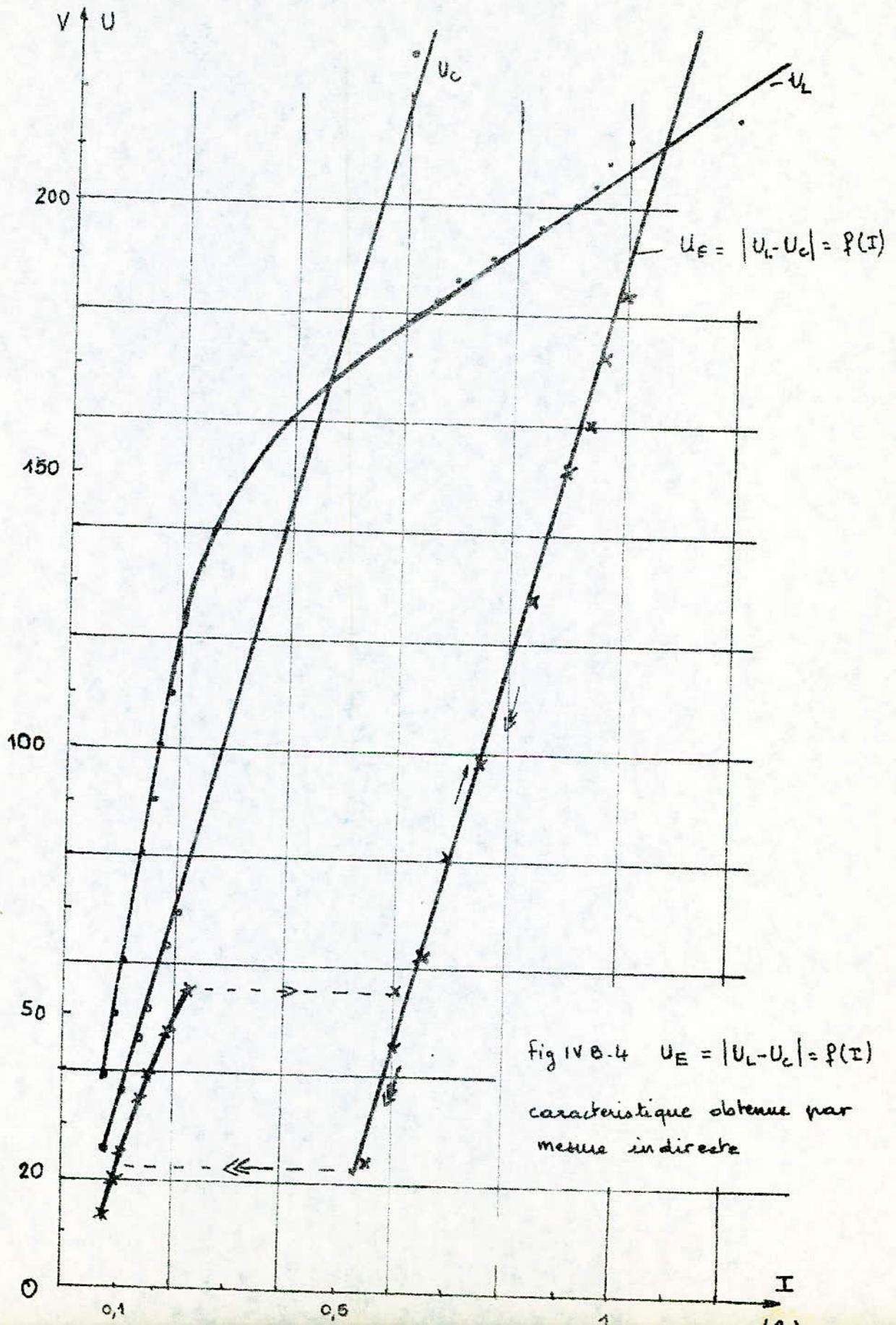


fig IV B-4  $U_E = |U_L - U_C| = f(I)$

caractéristique obtenue par  
mesure indirecte

Fig IV-B-5  $R_{ed} = "0"$   $C = 9 \mu F$

$$U_E = f(I)$$

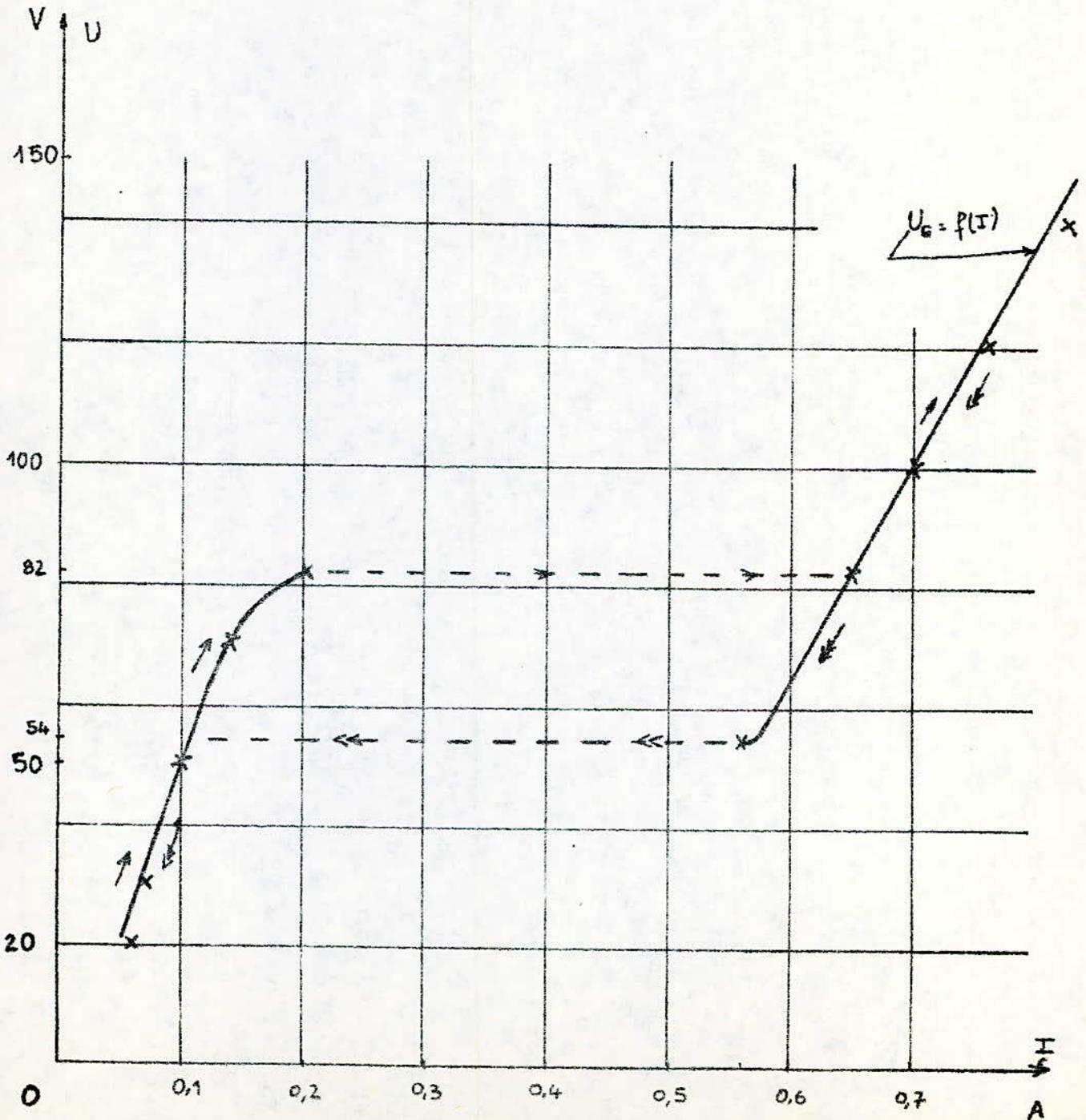


Fig. IVB-6  $C = 9 \mu F$   $R_{ad2} = "17 \Omega"$

$$U_E = f(I)$$

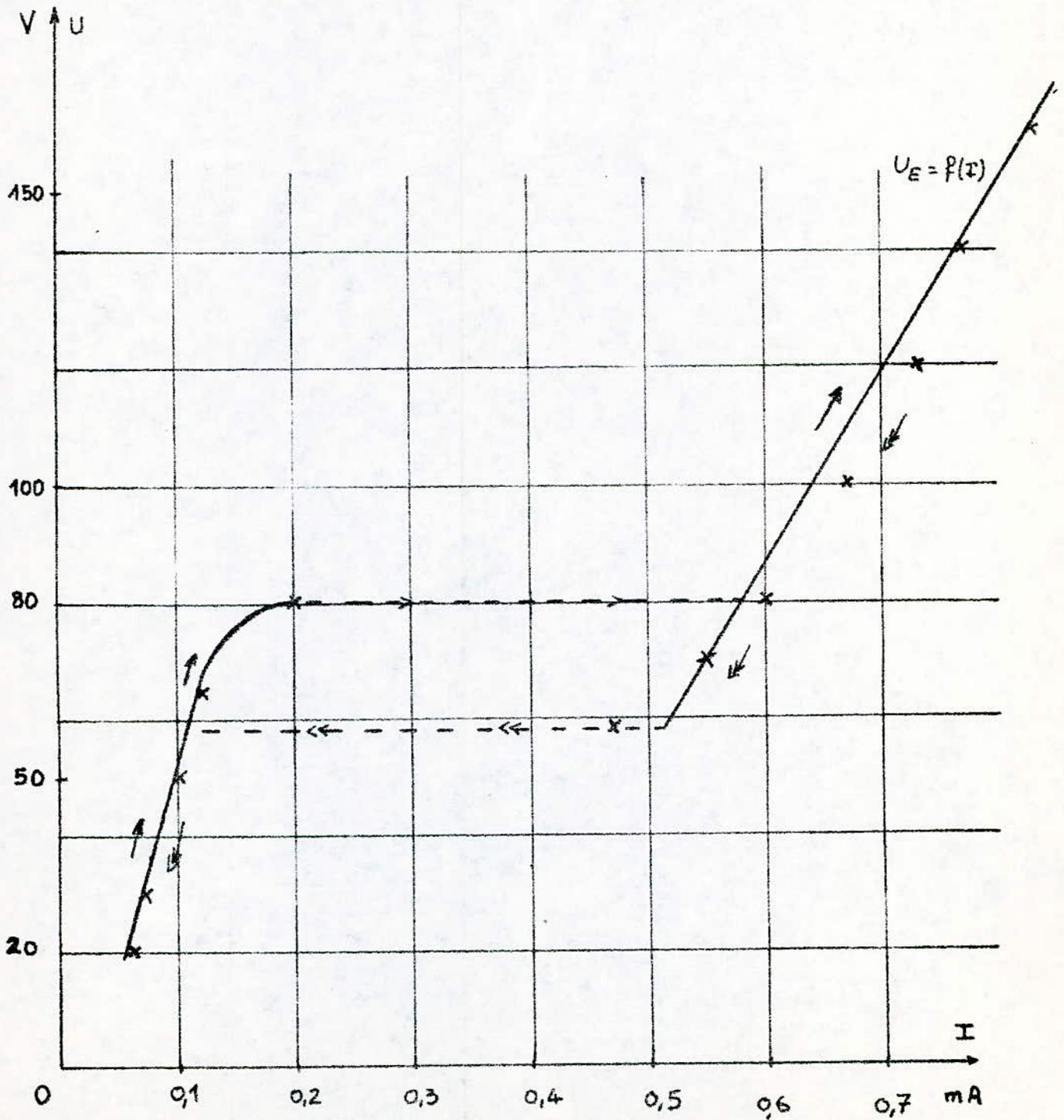
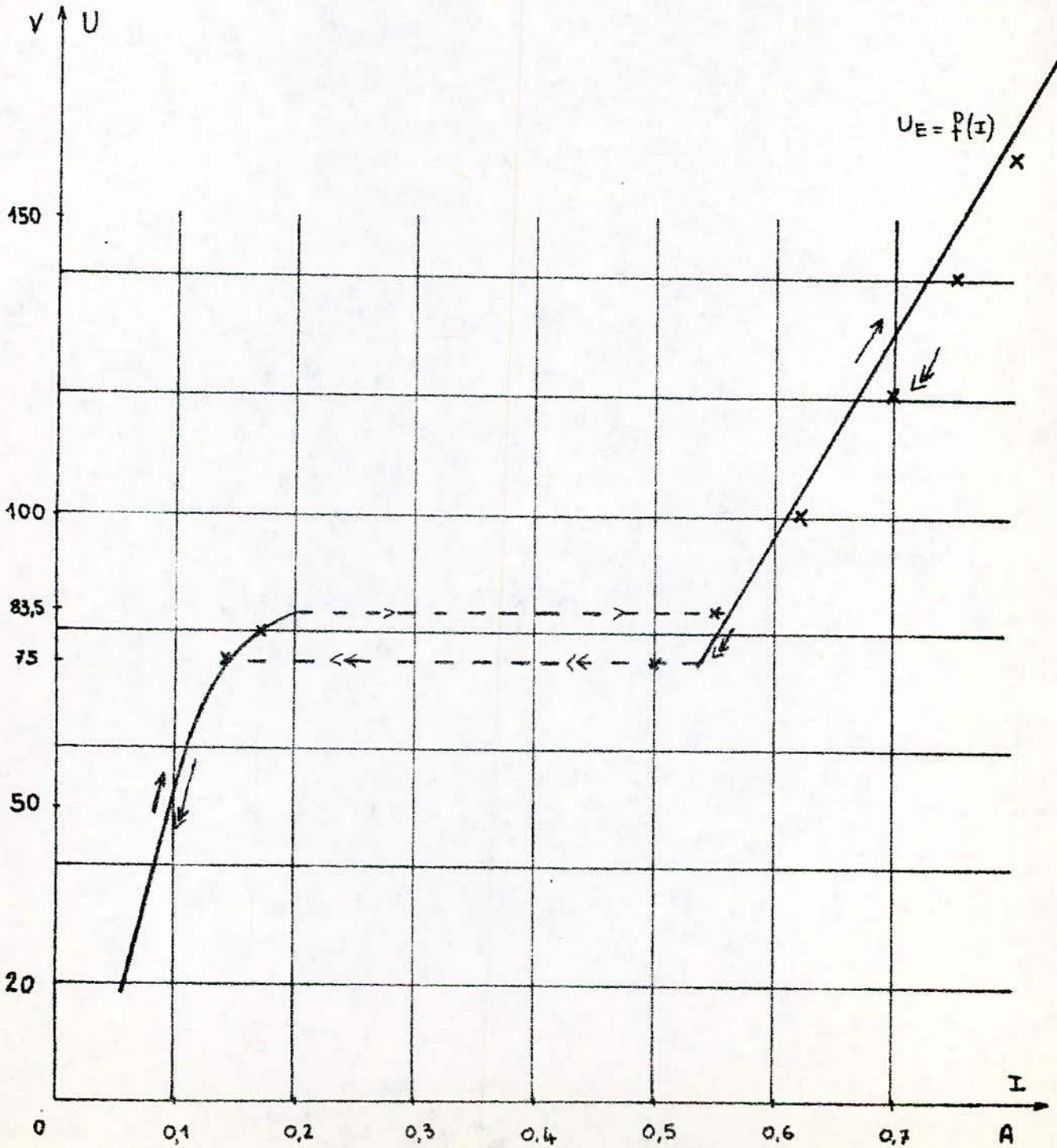


Fig. IV.B-7  $C = 9 \mu F$   $R_{ad3} = "30 \Omega"$

$$U_E = f(I)$$



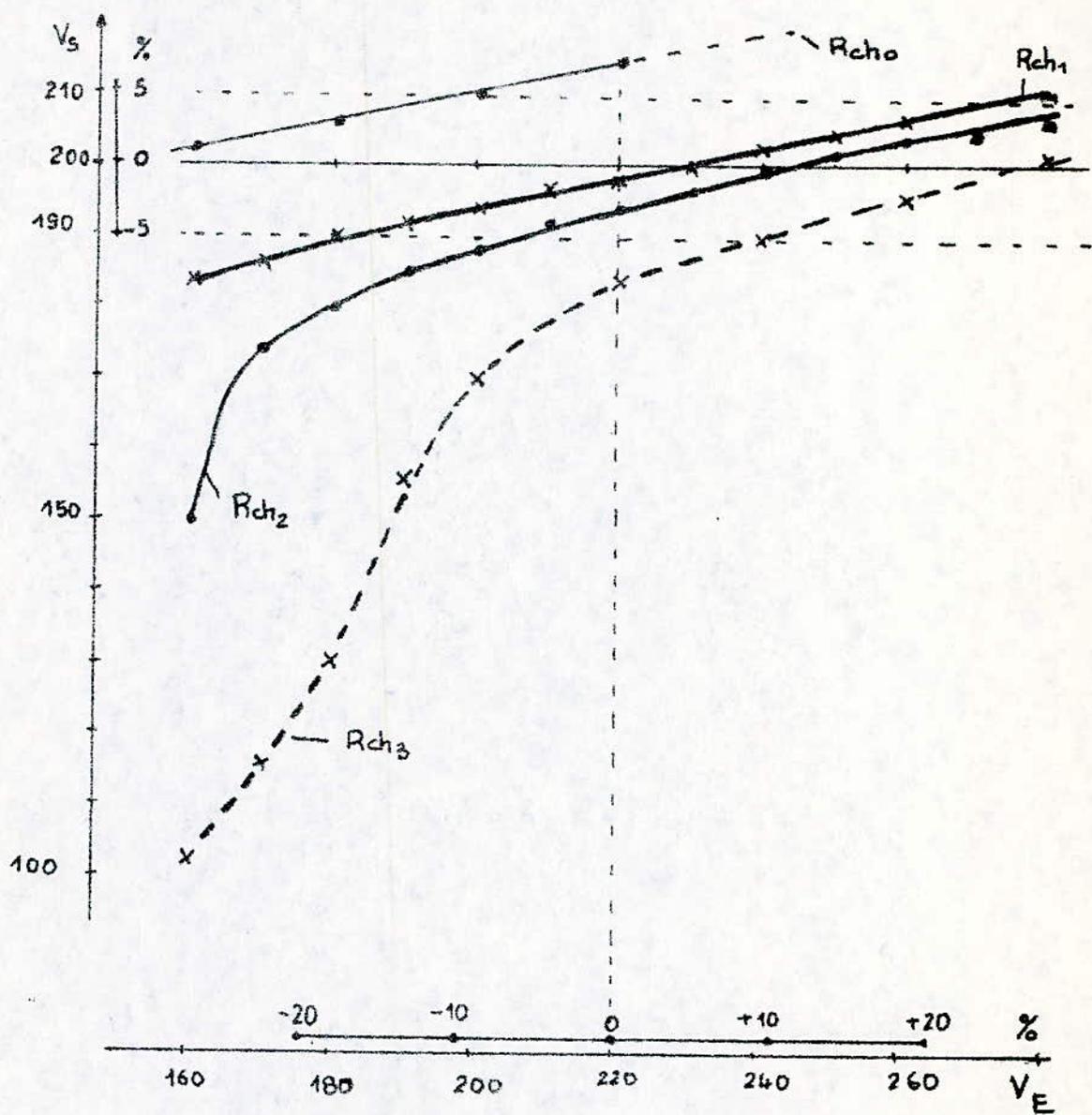


fig IV.B-8 Stabilité de la tension  $V_S = f(V_E)$

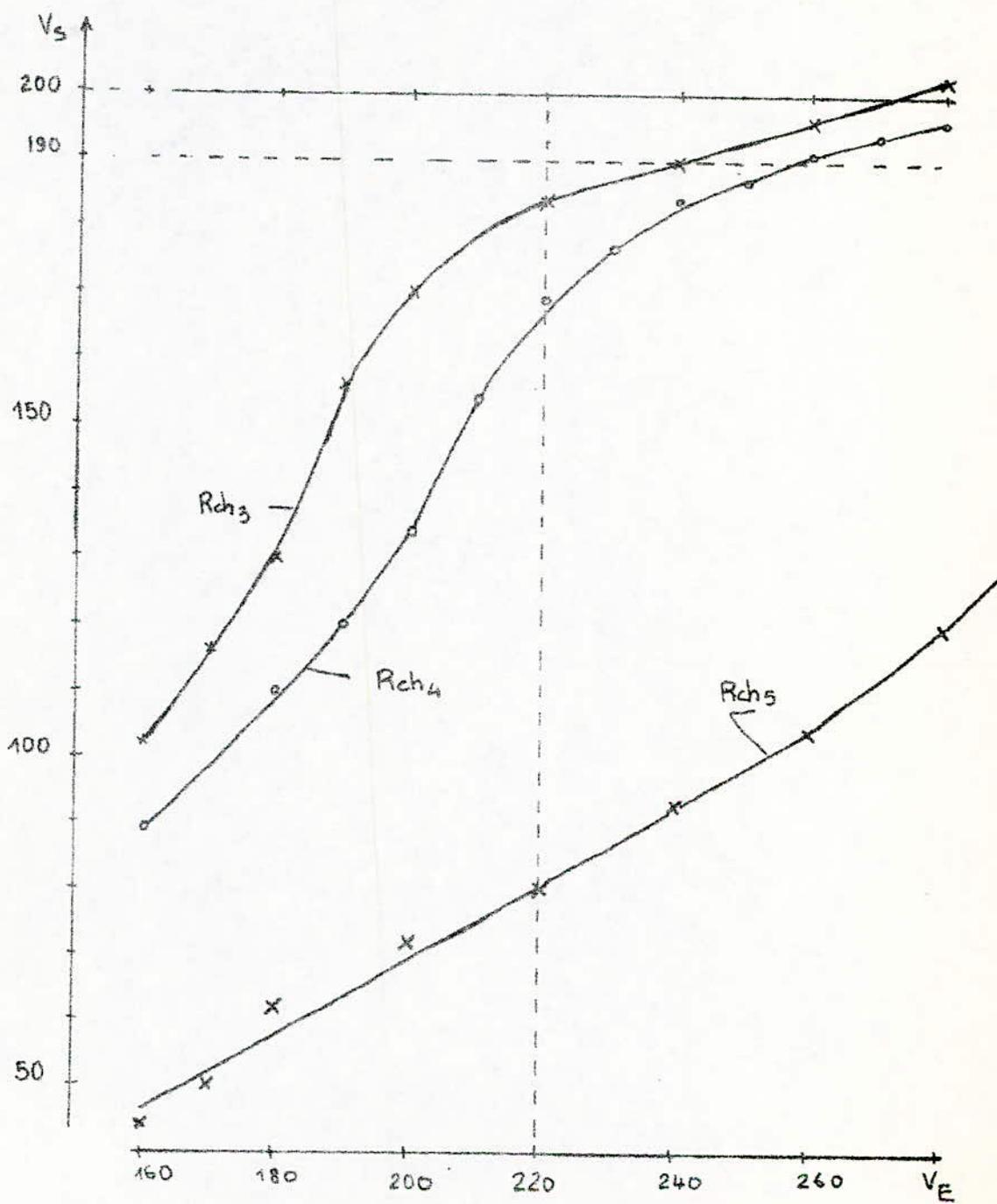


Fig. IV.B-3 Instabilité de la tension  $V_s = f(V_E)$

#### IV.B-5 Détermination des paramètres de la maquette

##### a) Interprétation des résultats

Lorsque le stabilisateur alimente une charge résistive pure (lampes à incandescence) on obtient un réseau de caractéristiques qui varie avec la charge ( fig.IV.B-8 et 9 ).

En première approximation, nous pouvons dire qu'on peut avoir une stabilisation de la tension de sortie autour de 200 V pour une lampe de puissance nominale 60 et 75 W . ( fig.IV.B-8 ), pour une large plage de la tension d'entrée autour de 220 V .

Les paramètres nominaux de la maquette sont les suivantes/ :

$$U_E = 220 \text{ V } \pm 10\% \text{ et } + 20\%$$

$$U_s = 200 \text{ V } \pm 5\%$$

$$P_n = 75 \text{ W}$$

A partir d' une charge dont la puissance nominale dépasse 100 W ( fig. IV.B-9 ) , la tension de sortie n'est pas du tout stabilisée.

Le rendement varie entre 50% pour une puissance de 60 W et 60% pour une puissance de 75 W , ce qui est assez faible en présence de la capacité de ferrorésonance.

Le facteur de puissance est très faible ( 0,3 à 0,6 ).

##### B) Paramètres électriques et géométriques de la bobine

Nous savons qu'une bobine à noyau de fer est un transformateur sans secondaire ou un transformateur dont le secondaire est à vide. [7]  
Le transformateur nous a été fourni sans aucune indication.

On se propose donc d'identifier le transformateur:

On branche la bobine aux bornes d'un autotransformateur; on dispose en série une résistance aux bornes de laquelle est branché un oscilloscope. Lorsque la saturation est atteinte, par augmentation progressive de la tension à l'aide de l'alternostat, le courant devient très déformé: alors on n'est plus loin de la tension d'utilisation.

Cette déformation du courant est très nette au voisinage de 110 V, ce qui

nous laisse supposer que 110 V est la tension d'utilisation comme il s'agit de la tension courante la plus proche.

On a fait les essais en court-circuit et à vide

Essai à vide:  $U_{10} = 130 \text{ V}$   
 $U_{20} = 12,7 \text{ V}$   
 $I_{10} = 0,38 \text{ A}$   
 $P_{10} = 17,5 \text{ W} = P_f$

$$m = \frac{U_{10}}{U_{20}} = 10$$

Essai en court-circuit  $U_{1cc} = 13,2 \text{ V}$   
 $I_{1cc} = 2,68 \text{ A}$   
 $I_{2cc} = 30 \text{ A}$   
 $P_{1cc} = 38,5 \text{ W} = P_j$

Pertes totales =  $P_f + P_j = 56 \text{ W}$

Pour essayer de recouper les informations recueillies ci-dessus, on a voulu déterminer la puissance nominale par un procédé dont nous nous contentons de décrire:

On mesure la puissance absorbée  $P_a$  et la puissance utile due à la charge. Si le rendement vrai [7]  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$  est proche de 0,9 par augmentation graduelle de la charge, on est près de la puissance nominale du transformateur. L'insuffisance de la charge résistive au laboratoire n'a pas permis la mise en application de ce procédé.

Par ailleurs nous disposons d'un autre paramètre, la section du cuivre.

$$\phi = 1,38 \text{ mm} \quad S_{\text{coul}} = 1,5 \text{ mm}^2$$

( il s'agit de la valeur normalisée la plus proche des mesures )

D'après la norme UTE NF C 32-012 ( HO7 V-U ), l'intensité admissible du conducteur est de 15 A, et dans ces conditions le transformateur aurait une puissance apparente de  $130 \times 15 = 2250 \text{ VA}$ , ce qui est impossible.

Le dernier paramètre est la section du fer. Là aussi, nous avons abouti à une impasse car seules figurent sur les courbes universelles les transformateurs de moyenne et grosse puissance.

En conclusion , bien que nous n'avons pas pu déterminer tous les paramètres exactes de la bobine, nous pouvons affirmer qu'en l'utilisant sous une tension de 220 V , nous sommes sûr de travailler dans la zone de saturation.

La plage de regulation obtenue donne seulement une solution approchée du problème ,car la charge considérée ne peut atteindre sa puissance nominale qu'étant alimentée sous sa tension nominale ( 220 V) .

### CONCLUSION GENERALE.

Il est possible d'utiliser le couplage en serie de la bobine à noyau de fer et d'un condensateur comme stabilisateur de tension alternative , comme il était question au cours de cette étude.

Mais cela suppose la stabilité de la fréquence , où les variations autour de la valeur nominale de 50 Hz ne dépasse guère l'ordre de 0,1 Hz . Ces variations de 0,2% ont une influence négligeable dans la plupart des cas d'application . [4]

Au-delà de cette limite , la sensibilité à la fréquence se traduit par deux effets: variation de la tension de sortie et déplacement de la plage de regulation. [8]

De plus pour avoir une regulation fine en aval, il est nécessaire de tenir compte de l'influence des paramètres étudiés tels que la variation de la capacité, l'introduction de l'enroulement de compensation, le nombre de spires de la bobine etc...

Mais cela ne peut être possible que dans le cadre d'une étude plus approfondie.

- [1] HALDEMANN ( H. )  
La stabilisation des tensions  
Electronique industrielle septembre 1962 p.273 - 277
- [2] BELOT ( A. )  
Regulateurs statiques de tensions alternatives  
Technique de l'ingénieur D 455 1972
- [3] BEDELL (F.) & KUHN (J.)  
Voltage regulating auto-transformer  
J. Sc. Instruments N°3 1932 p. 20 -23
- [4] VASTRADE ( C. )  
Un stabilisateur de tensions à hautes performances  
Revue E N°11 1968 p; 361 - 374
- [5] KASSATKINE & PERECALINE  
Cours d'Electrotechnique  
Editions Mir, Moscou 1967
- [6] BELOT ( A. )  
Bobine à noyau de fer saturé  
Technique de l'ingénieur D 1972
- [7] FOUILLE ( A. )  
Electrotechnique à l'usage des ingénieurs  
Tome 2 Dunod Paris 1980
- [8] PASCAL & PELLEGRINO  
L'alimentation des ordinateurs et des mini-ordinateurs  
RGE Octobre 1972 p. 619 -622

