

# ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### S U J E T

IDENTIFICATION D'UNE  
MACHINE SYNCHRONNE

Proposé par :

S.Mekhtoub

Etudié par :

M.Guehaiz

A.Haddad

Dirigé par :

S.Mekhtoub

PROMOTION : Juin 1989

DEDICACES

--A la memoire de ma grand-mere.

--A ma grand-mere maternelle.

--A mes parents.

--A mes oncles et tante .

--A mes frères et soeurs.

--A mes cousins et cousines.

--Aux copins.

Ahlal

--A toute ma famille.

--A tous ceux qui me sont chers.

Mourad

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

// Nous tenons à remercier Monsieur S. MEKHTOUB notre promoteur pour ses conseils et son aide précieuse qu'il nous a apportés au long de notre travail.

Nous tenons plus particulièrement à remercier Monsieur Z. SARI pour ses conseils utiles.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce projet.

SOMMAIRE:

INTRODUCTION:

CHAPITRE I:

RAPPELS THEORIQUES

I- Description:

II- Principes de fonctionnement.

III- Modele mathematique de la machine.

1- Hypothéses simplificatrices et convention de signe :

2- Equations électriques et magnetiques.

3- Transformation de Park:

4- Equations électriques et magnetiques suivant les axes d et q.

IV- Equations sous forme opérationnelle:

V- Définition des reactances et constantes de temps usuelles .

VI- Regime permanent à la vitesse de synchronisme.

VII- Regimes transitoires:

1- Court-circuit triphasé brusque à vide.

2- Retablissement de tension lors du declenchement d'un c/c triphasé permanent.

CHAPITRE II.

METHODES DE DETERMINATION DES PARAMETRES  
DE LA MACHINE SYNCHRONE.

I - Grandeurs intervenant dans les régimes permanents.

- ✓ 1 - Mesure des resistances.
- ✓ 2 - Essai à vide et essai en court-circuit triphasé permanent.
- 3 - Essai ~~en~~ dewatté.
- ✓ 4 - Essai à faible glissement.
- ✓ 5 - Essai d'excitation négative.
- ✓ 6 - Essai d'alimentation en monophasé des trois phases.
- ✓ 7 - Essai de court-circuit permanent entre deux phases et le point neutre.
- ✓ 8 - Essai de court-circuit entre deux phases.
- ✓ 9 - Essai de rotation inverse.

II - Grandeurs intervenant dans les régimes subtransitoires et transitoires.

- 1 - Essai de rétablissement de la tension.
- 2 - Essai de court-circuit triphasé brusque.
- 3 - Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert.
- 4 - Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit.
- 5 - Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert.
- 6 - Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit.

III - Essais statiques.

- 1 - Essai d'application d'une tension en position longitudinale et transversale.
- 2 - Essai d'application d'une tension dans une position quelconque du rotor.

IV - Essais fréquentiels.

- 1 - Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt.
- 2 - Essais indiciels.

CHAPITRE III.

ETUDE PRATIQUE.

- I - Mesure des paramètres à partir d'essais effectués en régime permanent.
- II - Mesure des paramètres à partir d'essais effectués en régimes transitoire et subtransitoire.
- III - Mesure des paramètres à partir des essais statiques.
- IV - Mesure des paramètres à partir des essais fréquentiels.

CHAPITRE IV.

ETUDE COMPARATIVE.

CONCLUSION.

NOMENCLATURE .

- $R_S$  ( $\Omega$ ) : résistance d'une phase de l'induit  
 $R_F$  ( $\Omega$ ) : résistance de l'inducteur  
 $R_D$  ( $\Omega$ ) : résistance de l'amortisseur d'axe direct  
 $R_Q$  ( $\Omega$ ) : résistance de l'amortisseur d'axe transversal  
 $X_d$  ( $\Omega$ ) : reactance synchrone longitudinale  
 $X_q$  ( $\Omega$ ) : reactance synchrone transversale  
 $X'_d$  ( $\Omega$ ) : reactance transitoire longitudinale  
 $X'^*_q$  ( $\Omega$ ) : reactance transitoire transversale  
 $X''_d$  ( $\Omega$ ) : reactance subtransitoire longitudinale  
 $X''_q$  ( $\Omega$ ) : reactance subtransitoire transversale  
 $X_i$  ( $\Omega$ ) : reactance inverse  
 $X_o$  ( $\Omega$ ) : reactance homopolaire  
 $i_a$  (A) : valeur instantanée du courant statorique  
 $I_a$  (A) : valeur efficace du courant statorique  
 $I_f$  (A) : courant d'excitation  
 $I_d$  (A) : composante directe du courant statorique  
 $I_q$  (A) : composante transversale du courant statorique  
 $I_o$  (A) : composante homopolaire du courant statorique  
 $I_D$  (A) : courant dans l'amortisseur d'axe direct  
 $I_Q$  (A) : courant dans l'amortisseur d'axe transversal  
 $V_i$  (V) : valeur efficace de la la tension de la phase i  
 $V_d$  (V) : composante d'axe direct de la tension aux bornes de l'alternateur  
 $V_q$  (V) : composante transversale de la tension aux bornes de l'alternateur  
 $V_o$  (V) : composante homopolaire de la tension aux bornes de l'alternateur  
 $V_f$  (V) : tension d'excitation  
 $E$  (V) : f.e.m à vide de l'alternateur  
 $C_e$  (N.m) : couple electromagnetique resistant  
 $C_s$  (N.m) : coefficient de couple synchronisant  
 $w_s$  (rd/s) : pulsation synchrone  
 $\theta$  (rd) : position angulaire du rotor  
 $\delta$  (rad) : angle interne  
 $P$  (W) : puissance active fournie par l'alternateur au réseau  
 $Q$  (VAR) : puissance reactive fournie par l'alternateur au reseau

- $L_f$  ( H ) : inductance propre de l'inducteur  
 $L_D$  ( H ) : inductance propre de l'amortisseur d'axe direct  
 $L_Q$  ( H ) : inductance propre de l'amortisseur d'axe transversal  
 $L_d$  ( H ) : inductance synchrone d'axe direct  
 $L_q$  ( H ) : inductance synchrone d'axe transversal  
 $M_{af}$  ( H ) : inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit  
 $M_{ad}$  ( H ) : inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe direct et l'induit  
 $M_{aq}$  ( H ) : inductance mutuelle entre l'amortisseur d'axe transversal et l'induit  
 $M_{fD}$  ( H ) : inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct  
 $T'_{do}$  ( S ) : constante de temps transitoire d'axe direct avec induit ouvert  
 $T''_{do}$  ( S ) : constante de temps subtransitoire d'axe direct avec induit ouvert  
 $T'_d$  ( S ) : constante de temps transitoire d'axe direct avec induit court-circuité  
 $T''_d$  ( S ) : constante de temps subtransitoire d'axe direct avec induit court-circuité  
 $T''_{q0}$  ( S ) : constante de temps subtransitoire transversale avec induit ouvert  
 $T''_q$  ( S ) : constante de temps subtransitoire transversale avec induit en court-circuit  
 $T_D$  ( S ) : constante de temps de fuite d'amortisseur d'axe direct  
 $P$  ( S<sup>-1</sup> ) : opérateur différentiel ( $\frac{d}{dt}$ )  
 $P_1$  : nombre de paires de pôles .

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

I N T R O D U C T I O N .

## INTRODUCTION :

Les machines synchrones jouent un rôle primordial dans la conversion électromécanique de l'énergie, la quasi totalité des machines tournantes produisant de l'énergie électrique alternative (à partir de l'énergie mécanique) sont des machines synchrones, et sont dans ce cas d'utilisation appelées alternateurs.

Néanmoins elles peuvent également fonctionner en moteurs synchrones. Pour les deux modes de fonctionnement, l'étude du comportement de la machine est très importante :

- Dans le premier cas d'utilisation, les contraintes électriques et celles dues aux forces électrodynamiques nécessitent une connaissance précise des paramètres de l'alternateur lors des régimes transitoires et cela à la fréquence nominale.

- Dans le deuxième cas, c'est la connaissance de l'évolution des paramètres internes de la machine avec la fréquence qui est avantageux dans le but d'asservir la vitesse du moteur synchrone, ainsi que la simulation des différents régimes de fonctionnement.

Le but de notre travail est justement de déterminer ces différents paramètres, à savoir les résistances, réactances et les constantes de temps qui interviennent dans l'analyse des divers fonctionnements de cette machine.

Notre travail comporte quatre chapitres :

- Le premier est consacré aux rappels théoriques sur la machine synchrone.
- Le deuxième traite des différentes méthodes d'identification des paramètres de la machine.
- Le troisième chapitre regroupe les résultats des essais ainsi que le calcul des différentes grandeurs.
- Le quatrième chapitre est consacré à la comparaison des valeurs des paramètres déterminés par les différentes méthodes.
- Et la conclusion.

C H A P I T R E I

RAPPELS THEORIQUES .

## RAPPELS THEORIQUES:

### I-DESCRIPTION:

La machine synchrone se compose généralement d'un induit fixe formé d'un système d'enroulement triphasé appelé stator et d'un inducteur tournant alimenté en continu formant un système de  $p_p$  paires de pôles alternés appelé rotor.

Pour les machines de faible puissance, cette disposition de l'induit et de l'inducteur est fréquemment inversé et le courant alternatif est recueilli à l'aide de bagues collectrices.

Selon la puissance, la machine est soit à pôles lisses, soit à pôles saillants. Cette dernière comporte en plus des enroulements amortisseurs qui sont des barres conductrices logées dans des encoches longitudinales au voisinage de la périphérie des pôles reliées entre elles par des anneaux conducteurs; Les amortisseurs ont pour effet de s'opposer à toute variation brusque du flux et de réduire les harmoniques.

Dans les machines à pôles lisses c'est la partie massive du fer rotorique qui joue le rôle d'amortisseurs.

### II-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

Lorsque la machine est excitée, le rotor étant entraîné à la vitesse de synchronisme un champ d'induction apparaît dans l'entrefer donnant naissance à des forces électromotrices aux bornes du système d'enroulements triphasés.

En branchant un récepteur aux bornes de l'induit, les trois phases de celui-ci débitent un système de courants triphasés de même pulsation  $\omega$  que les f.e.m qui les produisent. Le passage de ces courants crée une f.m.m tournante à la vitesse du rotor  $\frac{\omega}{p_p}$  et l'interaction des deux jeux de pôles crée le couple électromagnétique.

Quand on applique aux enroulements d'induit des tensions triphasées de pulsation  $\omega$ , on aura des courants triphasés de même pulsation créant un champ tournant à la vitesse  $\Omega = \frac{\omega}{p_p}$  et la machine fonctionne en moteur.

Par ailleurs, la circulation des courants dans l'induit produit un flux de réaction d'induit qui se compare à celui de l'inducteur. L'influence de la réaction d'induit diffère selon que le débit du courant s'effectue sur une charge inductive et dans ce cas le flux utile donc les f.e.m induites diminue et la réaction est dite démagnétisante.

- capacitive et dans ce cas les f.e.m augmentent et la réaction est dite magnétisante

### III-MODELE MATHEMATIQUE DE LA MACHINE:

Pour pouvoir etudier le comportement de la machine synchrone, aussi bien en regime permanent qu'en regime transitoire (en cas de perturbation comme le court-circuit, brusque variation de la charge, à coups de couple) on est appellé à adopter un modèle mathématique basé sur des hypothèses simplificatrices.

La machine dont nous allons étudier la mise en équation est une machine bipolaire à pôle saillants correspondant à la figure (I.1.) dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation :

- au stator, les bobinages a,b,c des trois phases décalées 2 à 2 de  $120^\circ$  électriques
- au rotor suivant l'axe direct, le bobinage inducteur f et l'amortisseur Kd.
- au rotor suivant l'axe en quadrature, le bobinage de l'amortisseur Kq.

Les 2 roulements amortisseurs sont court-circuités.

#### -1- HYPOTHESES SIMPLIFICATRICE ET CONVENTION DE SIGNE :

##### a/ HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES :

Vu la complexité des expressions des inductances propres et mutuelles des enroulements statoriques et rotoriques, on est amené à poser les hypothèses simplificatrices suivantes :

- on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturée, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- on néglige les courants de Foucault et l'hystérésis.
- la densité de courant est supposée uniforme dans la section des conducteurs ce qui permet d'exclure l'effet pelliculaire.
- on néglige les couplages capacitifs entre enroulements.
- on admettra aussi que les f.m.m. des enroulements statoriques sont à répartition sinusoïdale ; donc on ne considérera que le premier harmonique d'espace de la distribution de f.m.m. crée par chaque phase de l'induit.

## b/ CONVENTION DE SIGNE :

Les conventions associées aux équations électriques et magnétiques sont les suivantes:

- un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- une f.e.m positive fait circuler un courant positif.
- l'inducteur et l'induit sont considérés comme récepteurs.
- le sens positif de la vitesse et des angles est le sens horaire.
- la position de l'inducteur est caractérisée par l'angle que fait l'axe de la phase a avec l'axe polaire  $O_d$  soit  $\theta_a$  :

$$\theta_a = (\theta_a, \theta_d) = \theta$$

$$\theta_b = (\theta_b, \theta_d) = \theta - \frac{2\pi}{3}$$

$$\theta_c = (\theta_c, \theta_d) = \theta - \frac{4\pi}{3}$$

La vitesse de rotation de la machine est  $w = \frac{d\theta}{dt}$

## 2. EQUATIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES :

### a/ EQUATIONS ELECTRIQUES :

Aux bornes des enroulements statoriques et rotoriques, les équations générales des tensions sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ V_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ V_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} V_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = R_D \cdot i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ 0 = R_Q \cdot i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

En désignant par :

$R_s$  = résistance d'un enroulement d'induit.

$R_f$  = résistance de l'enroulement inducteur.

$R_d$  et  $R_q$  = résistance des enroulements d'amortisseurs direct et en quadrature.

$\psi_i$  = flux traversant l'enroulement  $i$

### b/ EQUATIONS MAGNETIQUES :

Les flux et les courants sont liés par la relation matricielle suivante :-

$$[\psi] = [\mathcal{L}] \cdot [i]$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & \mathcal{L}_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & \mathcal{L}_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & \mathcal{L}_f & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & \mathcal{L}_D & M_{DQ} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & M_{fQ} & M_{DQ} & \mathcal{L}_Q \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

Avec  $\mathcal{L}_i$  = inductances propre de l'enroulement  $i$

$M_{ij}$  = mutuelle inductance de l'enroulement  $i$  avec l'enroulement  $j$ .

### c/ EXPRESSION DES DIFFERENTES INDUCTANCES :

Explicitons d'abord ces coefficients en l'absence d'hypothese sinusoïdale :

L'inductance propre d'un enroulement de phase est maximale lorsque l'axe direct du rotor coïncide avec l'axe de la phase considerée, et inversement minimale pour l'axe transversal.

L'inductance mutuelle au stator est en valeur absolue minimale lorsque l'axe direct du rotor coïncide avec la bissectrice de l'angle formé par les axes magnétiques des deux enroulements et inversement maximale quand c'est l'axe transversal qui coïncide avec cette bissectrice.

Ces differents coefficients sont fonctions de l'angle de rotation  $\theta$ .

$\mathcal{L}_a$  est une foction periodique de  $\theta$  dont le developpement en serie de Fourier:

$$\mathcal{L}_a(\theta) = \mathcal{L}_{a0} + \mathcal{L}_{a2} \cos 2\theta + \mathcal{L}_{a4} \cos 4\theta + \dots$$

$\mathcal{L}_b$  et  $\mathcal{L}_c$  se deduisent de  $\mathcal{L}_a$  en remplaçant  $\theta$  par  $(\theta - \frac{2\pi}{3})$  et  $(\theta - \frac{4\pi}{3})$

$M_{ab}$  est une fonction periodique de  $\theta$ , de periode  $\pi$ , et a pour expression:

$M_{bc}$  et  $M_{ac}$  se deduisent de  $M_{ab}$  en remplaçant  $\theta$  par respectivement  $(\theta - \frac{2\pi}{3})$  et  $(\theta - \frac{4\pi}{3})$

$M_{af}$  est une fonction de periode  $2\pi$  : extremale pour  $\theta = k\pi$  ( $k \in \mathbb{N}$ ).

$$M_{af}(\theta) = M_{af_1} \cos \theta + M_{af_3} \cos 3\theta + \dots$$

$M_{bf}$  et  $M_{cf}$  se deduisent de  $M_{af}$  en remplaçant  $\theta$  par  $(\theta - \frac{2\pi}{3})$  et  $(\theta - \frac{4\pi}{3})$ .

On a de meme  $M_{aD}$ ,  $M_{bD}$ ,  $M_{cD}$ ,  $M_{aQ}$ ,  $M_{bQ}$ ,  $M_{cQ}$  qui s'ecrivent.

$$M_{aD} = M_{aD_1} \cos \theta + M_{aD_3} \cos 3\theta + \dots$$

$$M_{aQ} = -M_{aQ_1} \sin \theta - M_{aQ_3} \sin 3\theta - \dots$$

Les coefficients d'inductance propre et mutuelle relatifs au rotor seul sont tous des constantes à cause du caractère cylindrique de l'induit (flux constant).

On écrira donc :

$$\mathcal{L}_f = L_f = \text{constante}$$

$$\mathcal{M}_{fd} = M_{fd} \quad ; \quad \mathcal{L}_D = L_D \quad ; \quad \mathcal{L}_Q = L_Q \quad ; \quad \mathcal{M}_{fQ} = \mathcal{M}_{DQ} = 0$$

L'hypothèse de distribution sinusoidale des f.m.m d'induit nous amène à ne considérer dans tous les développements en série de Fourier, que les termes constants et fondamentaux.

Il en résulte comme conséquences que :

- Les inductances propres et mutuelles relatives à l'induit seul sont la somme d'un terme constant et d'un harmonique de rang 2.

Le coefficient de ce dernier est le même pour les inductances propres et mutuelles.

$$\mathcal{M}_{ab_2} = \mathcal{M}_{ac_2} = \mathcal{M}_{bc_2} = L_{a_2} = L_{b_2} = L_{c_2}$$

On démontre de même que :

$$-\frac{L_{ao}}{2} = M_{abo} = M_{aco} = M_{bco} = -\frac{L_{bo}}{2} = -\frac{L_{co}}{2} \quad (\text{si on néglige les fuites})$$

- L'inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et une phase de l'induit suit une loi sinusoidale en fonction de l'angle  $\theta$ , dont le coefficient est le quotient, par le courant de l'enroulement rotorique considéré, du flux fondamental qu'il crée à travers la phase considérée.

La relation liant flux et courants devient en tenant compte de l'hypothèse sinusoidale :

$$[\mathcal{L}] = \begin{bmatrix} L_a + L_{a_2} \cos 2\theta & M_{ab_0} + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{ab_0} + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & M_{af} \cos \theta & M_{ad} \cos \theta & -M_{aq} \sin \theta \\ M_{ab_0} + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_a + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & M_{ab_0} + L_{a_2} \cos 2\theta & M_{af} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{ad} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{aq} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{ab_0} + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & M_{ab_0} + L_{a_2} \cos 2\theta & L_a + L_{a_2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{af} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & M_{ad} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -M_{aq} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ M_{af} \cos \theta & M_{af} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{af} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{ad} \cos \theta & M_{ad} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{ad} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & M_{fd} & L_D & 0 \\ -M_{aq} \sin \theta & -M_{aq} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{aq} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

-3- TRANSFORMATION DE PARK :

La transformation de park permet la substitution des enroulements de phases a,b,c de l'induit à deux enroulements d et q dont les axes magnetiques sont solidaires du rotor et tournent avec lui. (fig.I-2).

La decomposition selon les deux axes d et q perpendiculaires des 3 f.m.m créés par le stator ( fig.I-3) donne:

$$F_d = A. ( i_a \cos \theta + i_b \cos (\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos (\theta - \frac{4\pi}{3}) )$$

$$F_q = A. ( -i_a \sin \theta - i_b \sin (\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_c \sin (\theta - \frac{4\pi}{3}) )$$

A partir de ces deux relations, on peut définir la relation de park qui consiste à associer aux variables réelles leurs composantes:

- d'axe longitudinal ou direct (indice d)
- d'axe transversal ou en quadrature ( indice q )
- homopolaire ( indice 0 )

La composante homopolaire est introduite car en ajoutant une meme quantité à  $i_a, i_b, i_c, F_d$  et  $F_q$  sont inchangées. Ceci est dû au fait tres connu que la composante homopolaire ne participe pas à la création de f.m.m sinusoidale d'entrefer. On definit alors  $i_d, i_q, i_0$  tels que:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \cdot \frac{2}{3} \quad \text{ou. } [i_p] = A(\theta) \cdot [i]$$

La composante  $\vec{F}_0$  est représentée sur un axe perpendiculaire aux axes d et q.

La transformation inverse sera:

$$A^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

Le changement de variable relatif aux flux et aux tensions est defini de la meme manière que pour le courant

Il est avantageux sur le plan théorique d'utiliser la transformation de park modifiée qui consiste à remplacer les termes  $2/3$  et  $1/2$  de la matrice de passage de park par les coefficients  $\sqrt{2/3}$  et  $1/\sqrt{2}$  :

$$A(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos \theta & -\sin \theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$A^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Ainsi écrite, la transformation de park devient orthogonale. Elle conserve l'invariance de la puissance instantanée et conduit à des schémas où les inductances mutuelles sont reciproques.

#### -4- EQUATIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES SUIVANT LES AXES d & q :

Soient les différentes matrices suivantes:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} ; [V_R] = \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; [I_s] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} ; [I_R] = \begin{bmatrix} I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}$$

$$[V_{cs}] = \begin{bmatrix} V_o \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} ; [I_{cs}] = \begin{bmatrix} I_o \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_R] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} ; [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{fd} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} ; [M_{RS}] = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{ad} & M_{aq} \\ M_{bf} & M_{bd} & M_{bq} \\ M_{cf} & M_{cd} & M_{cq} \end{bmatrix} ; [M_{SR}] = [M_{RS}]^t$$

En outre on a :

$$[V_{cs}] = A^{-1}(\theta) \cdot [V_s]$$

$$[I_{cs}] = A^{-1}(\theta) \cdot [I_s]$$

En explicitant le système d'équation (1) sous forme matricielle et en introduisant l'opérateur:  $\vec{A}(\theta)$  :

$$[V_{cs}] = [R_s] \cdot [I_{cs}] + \vec{A}(\theta) \left\{ \frac{d}{dt} \left\{ [L_{ss}] \cdot A(\theta) \cdot [I_{cs}] + [M_{sr}] \cdot [I_R] \right\} \right\}$$

$$[V_R] = [R_R] \cdot [I_R] + \frac{d}{dt} \left\{ [M_{rs}] \cdot A(\theta) \cdot [I_{cs}] \right\} + [L_{rR}] \cdot \frac{d}{dt} [I_R]$$

Après avoir effectué les différents produits matriciels et en remplaçant l'opérateur différentiel  $\frac{d}{dt}$  par  $p$  et  $\frac{d\theta}{dt}$  par  $w$ , on obtient la relation matricielle suivante:

$$(2) \dots \dots \dots \begin{bmatrix} V_o \\ V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_o \cdot p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s + L_d \cdot p & -L_q \cdot w & M_f \cdot p & M_D \cdot p & -M_q \cdot w \\ 0 & L_d \cdot w & R_s + L_q \cdot p & M_f \cdot w & M_D \cdot w & M_q \cdot p \\ 0 & M_f \cdot p & 0 & R_f + L_f \cdot p & M_{fD} \cdot p & 0 \\ 0 & M_D \cdot p & 0 & M_{fD} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ 0 & 0 & M_q \cdot p & 0 & 0 & R_q + L_q \cdot p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_q \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned} L_d &= L_{a0} - M_{a0} + \frac{3}{2} L_{a2} & ; & & M_f &= \sqrt{\frac{3}{2}} M_{af} \\ L_q &= L_{a0} - M_{a0} - \frac{3}{2} L_{a2} & ; & & M_D &= \sqrt{\frac{3}{2}} M_{aD} \\ L_o &= L_{a0} + 2M_{a0} & ; & & M_q &= \sqrt{\frac{3}{2}} M_{aq} \end{aligned}$$

On obtient ainsi un système d'équations dont les coefficients sont constants et indépendants de  $\theta$ .

\* Mise en évidence des flux:

En designant par :

- $\psi_d$  flux total à travers la bobine équivalente au stator placée sur l'axe d.
- $\psi_q$  flux total à travers la bobine équivalente au stator placée sur l'axe q.
- $\psi_o$  flux propre produit par le courant homopolaire.

$$\psi_d = L_d I_d + M_f I_f + M_D I_D$$

$$\psi_q = L_q I_q + M_q I_q$$

$$\psi_f = L_f I_f + M_f I_d + M_{fD} I_D$$

$$\psi_D = L_D I_D + M_D I_d + M_{fD} I_f$$

$$\psi_q = L_q I_q + M_q I_q$$

$$\psi_o = L_o I_o$$

Les équations des tensions peuvent s'écrire:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 = R_s I_0 + p \cdot \Psi_0 \\ V_d = R_s I_d + p \Psi_d - w \cdot \Psi_q \\ V_q = R_s I_q + p \Psi_q + w \cdot \Psi_d \\ V_f = R_f \cdot I_f + p \cdot \Psi_f \\ 0 = R_D I_D + p \cdot \Psi_D \\ 0 = R_Q I_Q + p \cdot \Psi_Q \end{array} \right. \quad (3)$$

\* Expression du couple simplifiée :

La puissance électrique instantanée aux bornes de la machine synchrone est définie par:  $P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c$ .

En remplaçant les tensions et les courants par la transformation de park:

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q + V_0 I_0$$

En utilisant les relations du système (3) on aura:

$$P_e = p \cdot (\Psi_d I_d + \Psi_q I_q) + \Psi_0 I_0 + R_s (I_d^2 + I_q^2 + I_0^2) + w \cdot (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d)$$

La première parenthèse représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.

La deuxième parenthèse représente les pertes joules dans l'induit.

La troisième parenthèse représente la puissance mécanique transformée en puissance électrique à l'intérieur de la machine.

Le couple électromagnétique sera:

$$C_e = \frac{P_{em}}{w} = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d \quad (4)$$

IV- EQUATIONS SOUS FORME OPERATIONNELLE - IMPEDANCES OPERATIONNELLES:

Le systeme(2) etant à coefficients constants, p peut représenter l'operateur symbolique de Heaviside, à condition que les valeurs initiales des variables soient nulles.

- Des équations écrites sous forme operationnelle, on deduit les impedances operationnelles suivant les axes d et q.

Ces impedances permettent la determination des differentes constantes de temps et reactances qui interviennent dans les regimes transitoires.

En négligeant la composante homopolaire qui est complètement decouplée des autres, le systeme (2) peut s'écrire:

$$\begin{bmatrix} R_s + L_d \cdot p & -L_q \cdot w & M_f \cdot p & M_D \cdot p & -M_a \cdot w \\ L_d \cdot w & R_s + L_q \cdot p & M_f \cdot w & M_D \cdot w & M_a \cdot w \\ \hline M_f \cdot p & 0 & R_f + L_f \cdot p & M_{fD} \cdot p & 0 \\ M_D \cdot p & 0 & M_{fD} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ \hline 0 & M_a \cdot p & 0 & 0 & R_a + L_a \cdot p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Et on designe par les différents courants et tensions du systeme (5) les transformées en p correspondant **B.S.**

On aura alors:

$$\begin{bmatrix} [A] & [B] & [C] \\ [D] & [F] & [O] \\ [H] & [O] & [J] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \\ [I_3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \\ [V_3] \end{bmatrix} \quad (6)$$

En resoluant le systeme (6) qui est plus simple que le systeme (5), on aura:

$$\begin{bmatrix} V_d - p \cdot G(p) \cdot V_f \\ V_q - w \cdot G(p) \cdot V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot \mathcal{L}_d(p) & -w \cdot \mathcal{L}_q(p) \\ w \cdot \mathcal{L}_q(p) & R_s + p \cdot \mathcal{L}_q(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathcal{L}_d(p)$  et  $\mathcal{L}_q(p)$  sont les inductances operationnelles suivant respectivement les axes d et q. Elles ont pour expressions:

$$\mathcal{L}_d(p) = L_d - \frac{p^2(L_D M_f^2 + L_f M_D^2) + p(R_D M_f^2 + R_f M_D^2) - 2 \cdot p^2 \cdot M_f M_{fD} M_D}{p^2(L_f L_D - M_{fD}^2) + p \cdot (R_f L_D + R_D L_f) + R_f \cdot R_D}$$

$$\mathcal{L}_q(p) = L_q - \frac{p \cdot M_a^2}{p \cdot L_a + R_a}$$

$$G(p) = \frac{R_D \cdot M_f + p \cdot (M_f \cdot L_D - M_D \cdot M_{fD})}{R_D \cdot R_f + p \cdot (L_D \cdot R_f + R_D \cdot L_f) + p^2 (L_D \cdot L_f - M_{fD}^2)}$$

$G(p)$  étant une quantité opérationnelle.

$\mathcal{L}_d(p)$ ,  $\mathcal{L}_q(p)$  et  $G(p)$  peuvent se mettre sous les formes suivantes:

$$\mathcal{L}_d(p) = L_d \cdot \frac{(1 + T'_d \cdot p)(1 + T''_d \cdot p)}{(1 + T'_{d0} \cdot p)(1 + T''_{d0} \cdot p)}$$

$$\mathcal{L}_q(p) = L_q \cdot \frac{1 + T''_q \cdot p}{1 + T''_{q0} \cdot p}$$

$$G(p) = \frac{M_f}{R_f} \frac{1 + T_D \cdot p}{(1 + T'_{d0} \cdot p)(1 + T''_{d0} \cdot p)}$$

Avec :

$$T'_d = \frac{L_f}{R_f} \left( 1 - \frac{M_f^2}{L_d \cdot L_f} \right)$$

$$T''_d = \frac{L_D}{R_D} \left( 1 - \frac{L_d \cdot M_{fD}^2 + L_f \cdot M_D^2 - 2 M_f \cdot M_{fD} \cdot M_D}{L_D (L_d \cdot L_f - M_{fD}^2)} \right)$$

$$T'_{d0} = \frac{L_f}{R_f}$$

$$T''_{d0} = \frac{L_D}{R_D} \left( 1 - \frac{M_{fD}^2}{L_f \cdot L_D} \right)$$

$$T''_q = \frac{L_q}{R_q} \left( 1 - \frac{M_q^2}{L_q \cdot L_q} \right)$$

$$T''_{q0} = \frac{L_q}{R_q}$$

$$T_D = \frac{L_D}{R_D} \left( 1 - \frac{M_{fD} \cdot M_D}{M_f \cdot L_D} \right)$$

\* Expression du couple electromagnetique sous forme operationnelle:

En réécrivant la 2<sup>e</sup> et la 3<sup>e</sup> équation du systeme (3) sous forme operationnelle et en l'identifiant au systeme (7), on aura les expressions des flux:

$$\Psi_d(p) = \mathcal{L}_d(p) \cdot I_d + G(p) \cdot V_f$$

$$\Psi_q(p) = \mathcal{L}_q(p) \cdot I_q$$

Le couple electromagnetique sera:

$$C_e(p) = \Psi_d(p) \cdot I_q - \Psi_q(p) \cdot I_d$$

V- DEFINITION DES REACTANCES ET CONSTANTES DE TEMPS USUELLES:

a) Definition des regimes transitoire, subtransitoire et permanent:

1/ Regime Subtransitoire:

C'est le regime qui s'etablit au premier instant d'un phenomene transitoire. Il dure jusqu'à extinction des courants dans les circuits d'amortisseurs.

2/ Regime transitoire:

C'est le regime qui s'etablit lorsque tous les courants variables s'éteignent dans le circuit inducteur. Il correspond en général à l'amortissement de toutes les composantes aperiodiques.

b) Definition des constantes usuelles:

$1/T'_{d0}$ : Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert c'est la constante de temps de l'inducteur avec les enroulements induits et amortisseurs ouverts. C'est aussi le temps necessaire pour que la composante lentement amortie de la tension à circuit ouvert decroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368^*$  fois sa valeur initiale à la suite d'une brusque variation des conditions de fonctionnement de la machine.

---

\*e = 2,718

2/  $T_{d0}''$ : Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert c'est la constante de temps de l'amortisseur direct, l'enroulement d'induit ouvert et celui de l'inducteur en court circuit.

Cela correspond en outre au temps nécessaire pour que la composante rapidement amortie de la tension d'induit à circuit ouvert due au flux longitudinal décroisse jusqu'à 1/e fois sa valeur initiale lors d'une brusque variation des conditions initiales.

3/  $T_d'$ : Constante de temps transitoire Longitudinale en court circuit c'est la constante de temps de l'inducteur en présence de l'induit en court circuit cela correspond au temps nécessaire pour que la composante variant lentement du courant longitudinal dans l'induit en court circuit décroisse jusqu'à 1/e fois sa valeur initiale lors d'une variation brusque des conditions de fonctionnement.

4/  $T_d''$ : Constante de temps subtransitoire longitudinale en court circuit c'est la constante de temps de l'amortisseur d'axe direct en présence de l'inducteur et de l'induit court circuités. C'est aussi le temps nécessaire pour que la composante rapidement amortie du courant longitudinal dans l'induit en court circuit décroisse jusqu'à 1/e fois sa valeur initiale.

5/  $T_q''$ : Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert c'est la constante de temps de l'amortisseur d'axe *transversal* face à l'induit en court circuit. C'est aussi le temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide du courant transversal dans l'induit en court circuit décroisse jusqu'à 1/e fois sa valeur initiale.

6/  $T_{q0}''$ : Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert c'est la constante de temps de l'amortisseur, l'induit ouvert. C'est aussi le temps nécessaire pour que la composante rapidement amortie de la tension d'induit à circuit ouvert due au flux transversal décroisse jusqu'à 1/e fois sa valeur initiale.

7/  $T_D$ : Constante de temps des fuites de l'amortisseur d'axe direct

c) Definition des reactances:

Soient les reactances operationnelles respectivement longitudinale et transversale:

$$X_d(p) = w \cdot \mathcal{L}_d(p)$$

$$X_q(p) = w \cdot \mathcal{L}_q(p)$$

1/  $X_d''$ : Reactance subtransitoire d'axe direct

c'est le quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la tension d'induit produite par le flux longitudinal d'induit total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante longitudinale du courant d'induit, la machine tournant à sa vitesse nominale.

C'est la reactance operationnelle longitudinale au temps  $t=0$  ( $p = \infty$ ):

$$X_d'' = X_d(\infty) = w \left( L_d - \frac{L_D M_f^2 + L_f M_{fD}^2 - 2 M_f M_{fD} M_D}{L_f L_D - M_{fD}^2} \right)$$

2/  $X_d'$ : Reactance transitoire d'axe direct

c'est la meme definition que pour  $X_d''$ , seulement on ajoutera que les composantes à décroissance rapide pendant les premieres périodes sont enlevées. C'est aussi la valeur de  $X_d''$  lorsqu'on peut negliger l'influence de l'amortisseur d'axe direct, il suffit pour cela de tendre  $p$  vers l'infini

$$X_d' = w \cdot \left( L_d - \frac{M_f^2}{L_f} \right)$$

3/  $X_d$ : Reactance synchrone d'axe direct

c'est le quotient en regime etabli du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal total dû au courant d'induit longitudinal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

C'est aussi la valeur de  $X_d'$  lorsqu'on neglige les effets de l'inducteur ( $L_f = \infty$ )

$$X_d = L_d \cdot w$$

4/  $X_q''$  : Reactance subtransitoire d'axe transversal

C'est le quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal d'induit total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante transversale du courant d'induit, la machine tournant à sa vitesse assignée

Son expression est donnée par la reactance operationnelle transversale à l'instant initial ( $p = \infty$ ) soit:

$$X_q'' = X_q(\infty) = \omega \cdot \left( L_q - \frac{M_q^2}{L_d} \right).$$

5/  $X_q$  : Reactance synchrone d'axe transversal

C'est le quotient de la valeur en regime établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal total dû au courant d'induit transversal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.

Son expression est tirée de la valeur de  $X_q''$  lorsqu'on néglige les effets de l'amortisseur transversal ( $L_d \rightarrow \infty$ ):

$$X_q = \omega \cdot L_q.$$

6/  $X_i$  : Reactance inverse

C'est la reactance apparente de la machine alimentée par un systeme inverse de tensions.

Sa valeur est donnée par la moyenne harmonique:

$$X_i = \frac{2 X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''}$$

Lorsque  $X_d'' \simeq X_q''$ , on adopte la valeur moyenne:

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2}$$

7/  $X_o$  : Reactance homopolaire

C'est la reactance apparente de la machine alimentée par un systeme de tensions homopolaire. Elle est due aux seuls flux de fuite et n'a de valeur finie que si l'induit est connecté en étoile avec fil neutre.

d) Relations entre reactances et constantes de temps:

On demontre facilement d'après les expressions littérales des différentes reactances et constantes de temps intervenant en regime transitoire les relations suivantes qu'on pourra utiliser pour estimer un parametre à partir d'autres parametres déjà mesurés.

$$\frac{X_d}{X_d'} = \frac{T_{d'0}}{T_d'}$$
$$\frac{X_d'}{X_d''} = \frac{T_{d''0}}{T_d''}$$
$$\frac{X_d}{X_d''} = \frac{T_{d'0} \cdot T_{d''0}}{T_d' \cdot T_d''}$$
$$\frac{X_q''}{X_q} = \frac{T_q''}{T_{q'0}}$$

VI- REGIME PERMANENT A LA VITESSE DE SYNCHRONISME:

Le regime établi à la vitesse synchrone correspond à l'étude classique de la machine synchrone. Dans ce présent paragraphe, on montrera que la resolution graphique des equations de Park conduit à la meme figure que le diagramme à deux reactances. On verra en outre que cette étude permet une obtention rapide des conditions initiales necessaires à l'étude des regimes transitoires.

Pour cela, on considerera le fonctionnement de la machine à vide et en charge et l'étude se fera en se plaçant dans le cas de la marche en alternateur où les équations qui seront utilisées seront celles déjà établies précédemment pour la marche en moteur en inversant seulement le sens des tensions statoriques  $V_d$  et  $V_q$ .

En regime permanent,  $w = w_s$  et  $\theta = wt + \theta_0$ .

En outre,  $V_d, V_q, I_d, I_q$ , sont des constantes et les courants  $I_q$  et  $I_D$  et sont nuls ainsi que  $V_o$  et  $I_o$ .

Les équations (2) deviennent:

$$\begin{cases} -V_d = R_s I_d - X_q I_q \\ -V_q = X_d I_d + R_s I_q + M_f \cdot \omega \cdot I_f \\ V_f = R_f \cdot I_f \end{cases} \quad (8)$$

Les équations des tensions et courants réels sont:

$$\begin{aligned} V_a &= V\sqrt{2} \sin \omega t & I_a &= I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ V_b &= V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & I_b &= I\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ V_c &= V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) & I_c &= I\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \end{aligned}$$

$\varphi$  est le déphasage entre  $V$  et  $I$ .

En leur appliquant la transformation de Park et en designant par  $\delta$  l'angle que fait l'axe polaire avec l'axe de la phase a, il vient:

$$\begin{aligned} V_d &= -\sqrt{3} V \sin \delta \\ V_q &= -\sqrt{3} V \cos \delta \\ I_d &= -\sqrt{3} I \sin(\delta + \varphi) \\ I_q &= -\sqrt{3} I \cos(\delta + \varphi) \end{aligned}$$

En remplaçant  $V_d, V_q, I_d, I_q$  par leurs expressions dans les équations(8)

$$\begin{cases} \sqrt{3} V \sin \delta = -R_s \sqrt{3} I \sin(\delta + \varphi) + X_q \sqrt{3} I \cos(\delta + \varphi) \\ \sqrt{3} V \cos \delta = -R_s \sqrt{3} I \cos(\delta + \varphi) - X_d \sqrt{3} I \sin(\delta + \varphi) + M_f \cdot \omega \cdot I_f \end{cases} \quad (9)$$

a) Fonctionnement à vide :

Pour ce régime,  $I$  est nul ainsi que l'angle  $\delta$ . Il vient :

$$M_f \cdot \omega \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot V$$

$V$  sera le f.e.m induite à vide  $E$  :

b) Fonctionnement en charge :

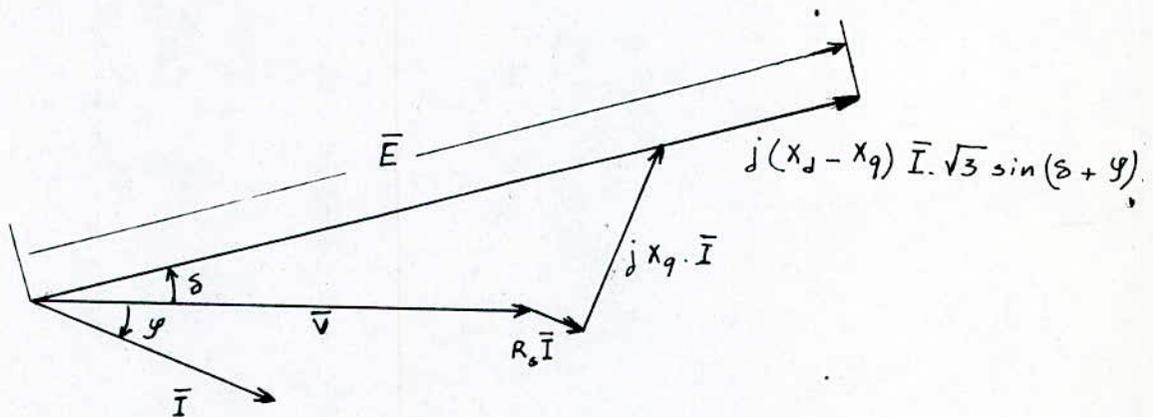
Les equations (9) deviennent alors :

$$V \cos \delta = E - R_s I \cos(\delta + \varphi) - X_d \cdot I \sin(\delta + \varphi)$$

$$V \sin \delta = -R_s I \sin(\delta + \varphi) + X_q I \cos(\delta + \varphi)$$

(9')

En construisant le diagramme vectoriel à partir de ces dernières equations on aboutit au schéma suivant :



On a ainsi obtenu le diagramme à deux reactances

c) Expression du couple électromagnétique :

On peut exprimer le couple d'après son expression (4) en fonction des reactances et des conditions extérieures  $\omega$ ,  $V$ ,  $E$  et l'angle interne  $\delta$ .

En négligeant la résistance d'induit  $R_s$ , les equations (9) deviennent :

$$E - V \cos \delta = -X_d I \sin(\delta + \varphi) = \frac{X_d I_d}{\sqrt{3}}$$

$$V \sin \delta = X_q I \cos(\delta + \varphi) = \frac{-X_q \cdot I_q}{\sqrt{3}}$$

D'après les équations(3) on a :

$$\begin{cases} V_d = - V \sqrt{3} \sin \delta = - w \cdot \Psi_q \\ V_q = + V \sqrt{3} \cos \delta = w \cdot \Psi_d \end{cases} \quad (10)$$

d'où l'expression du couple d'après (4):

$$C_e = \frac{3 V E \sin \delta}{w X_d} + \frac{3 V^2 \sin 2 \delta}{2 w} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (11)$$

#### VII- REGIMES TRANSITOIRES:

Lorsque la machine est soumise à une perturbation quelconque (à coup de couple, courts circuits etc...) il y'a regime transitoire, et le passage de l'ancien regime permanent au nouveau suite à cette perturbation est considéré s'effectuer à une vitesse constante (  $w = \text{constante}$  ).

On se limitera ici à deux études simples et dont on effectuera l'essai pratique pour la détermination de quelques paramètres:

##### 1/ Court circuit triphasé à vide:

Le court circuit à vide consiste à réunir brusquement les trois phases du stator donc à annuler les tensions  $V_a, V_b, V_c$  ( donc  $V_d$  et  $V_q$  ) en gardant constante la tension  $V_f$  de l'inducteur.

Pour l'étude du court circuit , on considère le regime transitoire comme la superposition du regime permanent antérieur et du regime transitoire né de l'application à l'induit de tensions de valeurs égales et opposées à leurs valeurs antérieures.

Ceci peut être représenté schématiquement par la mise en opposition de deux générateurs de signes contraires.

Avant le court circuit, on avait seulement d'après le système (2) :

$$V_f = R_f \cdot i_f.$$

$$V_g = M_f \cdot \omega \cdot i_f = E \sqrt{3} / p.$$

Après le court circuit, à  $t = 0$ , il correspond l'application de:

$$V_d = 0 \quad ; \quad V_g = -E \sqrt{3}$$

$$V_o = 0 \quad ; \quad V_f = 0.$$

On portera alors dans le système (7) les trois dernières équations.

$$[V(p)] = [Z(p)] \times [I(p)].$$

a- Expression du courant dans l'induit:

Pour obtenir les courants de court circuit, on doit inverser la matrice qui s'écrira:

$$[Z(p)]^{-1} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} R_s + p \mathcal{L}_g(p) & \omega \mathcal{L}_g(p) \\ -\omega \mathcal{L}_d(p) & R_s + p \mathcal{L}_d(p) \end{bmatrix}$$

$\Delta(p)$  étant le déterminant de la matrice  $[Z(p)]$

$$\Delta(p) = \mathcal{L}_d(p) \cdot \mathcal{L}_g(p) \left[ p^2 + p \left( \frac{R_s}{\mathcal{L}_d(p)} + \frac{R_s}{\mathcal{L}_g(p)} \right) + \omega^2 + \frac{R_s^2}{\mathcal{L}_d(p) \cdot \mathcal{L}_g(p)} \right]$$

On peut approximer ces formules en supposant que les résistances sont faibles devant les réactances en régime nominal.

En faisant apparaître les réactances subtransitoires il vient:

$$[Z(p)]^{-1} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} \left( p + \frac{\omega R_s}{X_g''} \right) \mathcal{L}_g(p) & \omega \mathcal{L}_g(p) \\ -\omega \mathcal{L}_d(p) & \left( p + \frac{\omega R_s}{X_d''} \right) \mathcal{L}_d(p) \end{bmatrix}$$

$$\Delta(p) = \mathcal{L}_d(p) \cdot \mathcal{L}_q(p) \left[ p^2 + \frac{2wR_s p}{X_2} + w^2 \right] = \mathcal{L}_d(p) \cdot \mathcal{L}_q(p) \cdot [(p-p_1) \cdot (p-p_2)]$$

avec :

$$X_2 = \frac{2X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''}$$

$$p_{1,2} = -\frac{wR_s}{X_2} \pm jw \quad (\text{en n\u00e9gligeant } \left(\frac{wR_s}{X_2}\right)^2 \text{ devant } w^2).$$

On cherchera les courants en posant :

$$[I] = [Z]^{-1} \times [V]$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -E\sqrt{3}/p \end{bmatrix} \times [Z]^{-1}$$

Ou en developpant :

$$I_d = -\frac{E\sqrt{3}}{L_d \cdot p} \cdot \frac{(1 + T_{d0}' p) \cdot (1 + T_{d0}'' p)}{(1 + T_d' p) \cdot (1 + T_d'' p) \cdot (p + \frac{wR_s}{X_2} + jw) \cdot (p + \frac{wR_s}{X_2} - jw)}$$

$$I_q = -\frac{E\sqrt{3}}{L_q \cdot p} \cdot \frac{(1 + T_{q0}' p) \cdot (p + wR_s/X_2)}{(1 + T_q'' p) \cdot (p + \frac{wR_s}{X_2} + jw) \cdot (p + \frac{wR_s}{X_2} - jw)}$$

En n\u00e9gligeant les constances de temps  $T_d''$  et  $T_{d0}''$  respectivement devant  $T_d'$  et  $T_{d0}'$  ainsi que les constances de temps  $T_q''$  et  $T_{q0}''$  devant  $1/w$ , les courants  $I_d$  et  $I_q$  auront pour leurs originaux les expressions :

$$I_d(t) = -E\sqrt{3} \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-t/T_d'} + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-t/T_d''} - \frac{1}{X_d} \cdot \cos wt \cdot e^{-t/T_a} \right]$$

avec  $T_a = X_2 / w \cdot R_s$

$T_a$  est la constante de temps en court circuit de l'induit.

$$I_q(t) = - \frac{E\sqrt{3}}{X_q''} \cdot \sin \omega t \cdot e^{-t/T_a}$$

En revenant à l'équation de Park modifiée, le courant réel  $I_a$  a pour expression:

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (I_d \cdot \cos \theta - I_q \cdot \sin \theta)$$

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

$$I_a(t) = - E\sqrt{2} \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-t/T_d'} + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-t/T_d''} \right] \cos(\omega t + \theta_0)$$

$$+ E\sqrt{2} e^{-t/T_a} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \theta_0 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cos(2\omega t + \theta_0) \right]$$

Les expressions des courants  $I_b$  et  $I_c$  se deduisent de celle de  $I_a$  en remplaçant  $\theta_0$  par  $(\theta_0 + \frac{2\pi}{3})$  et  $(\theta_0 + \frac{4\pi}{3})$ .

On voit ainsi apparaitre trois composantes dans l'expression de  $I_a(t)$ :

- Composante alternative fondamentale ou symetrique, de pulsation  $\omega$  regroupant:

\* Un terme permanent d'amplitude  $E\sqrt{2}/X_d$  non amortie.

\* Un terme transitoire d'amplitude initiale  $E\sqrt{2} (1/X_d' - 1/X_d)$  s'amortissant avec  $T_d'$

\* Un terme subtransitoire d'amplitude initiale  $E\sqrt{2} (1/X_d'' - 1/X_d')$  s'amortissant avec  $T_d''$

- Composante asymetrique de valeur initiale  $E\sqrt{2} \cdot X_2 \cdot \cos \theta_0$  amortie avec  $T_a$ .

- Composante du second harmonique d'amplitude initiale  $E\sqrt{2} (1/X_d'' - 1/X_q'')/2$  amortie avec  $T_a$ .

#### b- Expression du courant inducteur:

Le courant d'excitation  $I_f$  est la somme du courant  $I_{f_0}$  d'avant le court circuit égal à  $V_f/R_f$  et celui dû à l'application à la machine du systeme de tensions

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = - \frac{E\sqrt{3}}{P} \\ V_f = 0 \end{cases}$$

Pour calculer  $I_f'$ , on utilise la deuxième équation du système (6) :

$$[D][I_1] + [F][I_2] = [Y_2]$$

En introduisant la condition  $V_f = 0$  et en identifiant l'expression de  $I_f'$ , on aura :

$$I_f' = - \frac{(L_D M_f - M_{fD} M_D) P^2 + M_f R_D \cdot P}{(R_f + L_f \cdot P)(R_D + L_D \cdot P) - M_{fD}^2 P^2} \cdot I_D$$

En faisant apparaître les constantes de temps ainsi que l'expression de  $I_D$  :

$$I_f' = \frac{M_f^2 I_{f_0} \cdot \omega^2}{R_f \cdot L_D} \cdot \frac{(1 + T_D \cdot P)}{(1 + T_d' \cdot P)(1 + T_d'' \cdot P)(P + \frac{\omega R_s}{X_2} + j\omega)(P + \frac{\omega R_s}{X_2} - j\omega)}$$

Où on a remplacé  $E\sqrt{3}$  par  $M_f \cdot \omega \cdot I_{f_0}$ .

On remarquera que  $M_f^2 / R_f L_D = T_d' (X_d - X_d') / X_d'$ .

D'où l'expression de  $I_f'$  :

$$I_f' = I_{f_0} \cdot \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cdot T_d' \cdot \frac{T_D}{T_d' \cdot T_d''} \cdot \omega^2 \cdot \frac{P + 1/T_D}{(P + 1/T_d')(P + 1/T_d'')(P + 1/T_d' + j\omega)(P + 1/T_d' - j\omega)}$$

En effectuant les mêmes approximations que pour le courant d'induit, on aboutira à l'original et bien entendu en ajoutant le courant  $I_{f_0}$  :

$$I_f = I_{f_0} \left\{ 1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \left[ e^{-t/T_d'} - \left(1 - \frac{T_D}{T_d''}\right) e^{-t/T_d''} - \frac{T_D}{T_d''} e^{-t/T_d} \cdot \cos \omega t \right] \right\}$$

On voit que  $I_f$  est la somme de quatre termes :

- Le courant initial  $I_{f_0}$  qui subsistera à la fin du regime transitoire.
- Le courant aperiodique s'amortissant très vite avec  $T_d''$ .
- Le courant aperiodique s'amortissant assez lentement avec  $T_d'$ .
- Le courant de pulsation  $\omega$  s'amortissant rapidement avec  $T_a$ .

## 2/ Retablissement de tension lors du declenchement d'un court-circuit triphasé permanent.

La machine synchrone étant supposée en court circuit triphasé permanent on ouvre brusquement la connexion du courant circuit et on étudie l'évolution du regime transitoire des tensions aux bornes des phases de l'induit.

Pour cela , on superpose un regime initial de ces tensions qui sont nulles celui obtenue en appliquant à la machine pour  $t = 0$  les courants  $-I_{q_0}$  et  $-I_{d_0}$ .

Les courants  $I_{q_0}$  et  $I_{d_0}$  étant ceux du regime d'avant l'ouverture du court-circuit.

En revenant aux équations (2) et en appliquant les conditions en regime établi, à savoir :  $V_d = 0$  ;  $V_q = 0$  ;  $I_f = I_{f_0}$  ;  $I_D = I_q = 0$  et  $p = 0$  :

$$\begin{cases} 0 = R_s I_{d_0} - L_q \cdot \omega \cdot I_{q_0} \\ 0 = R_s I_{q_0} + L_d \cdot \omega \cdot I_{d_0} + M_f \omega \cdot I_{f_0} \\ V_f = R_f \cdot I_{f_0} \end{cases}$$

Il vient en negligiant  $R_s$  devant les reactances  $X_d$  et  $X_q$  que

$$I_{q_0} = 0$$

$$I_{d_0} = -M_f \omega \cdot I_{f_0} / X_d = -\sqrt{3} E / X_d$$

Donc le regime transitoire correspondra à l'application à la machine d'un courant

$$I'_{d_0} = -I_{d_0} = \sqrt{3} E / X_d \cdot p$$

avec :  $I'_q = 0$  ;  $V'_q = 0$  ;  $I'_f = 0$ .

Les équations (7) donneront alors :

$$V_d = \mathcal{L}_d(p) \cdot p \cdot I_d = \mathcal{L}_d(p) \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot E}{X_d}$$

$$V_q = \mathcal{L}_d(p) \cdot w \cdot I_d = \mathcal{L}_d(p) \cdot \frac{w}{p} \cdot \frac{\sqrt{3} E}{X_d}$$

En remplaçant  $\mathcal{L}_d(p)$  par son expression en fonction des différentes constantes de temps, il vient :

$$V_d = \frac{\sqrt{3} E}{X_d} L_d \cdot \frac{(1 + T_d' p)(1 + T_d'' p)}{(1 + T_{d0}' p)(1 + T_{d0}'' p)}$$

$$V_q = \frac{\sqrt{3} E w}{X_d} L_d \cdot \frac{(1 + T_d' p)(1 + T_d'' p)}{p(1 + T_{d0}' p)(1 + T_{d0}'' p)}$$

Pour calculer les expressions  $V_d(t)$  et  $V_q(t)$ , on fait l'hypothèse que  $T_d''$  est négligeable devant  $T_d'$  et  $T_{d0}''$  devant  $T_{d0}'$ .

Les expressions temporelles seront donc :

$$V_d(t) = E \sqrt{3} \left[ \frac{1}{w T_{d0}'} \left( 1 - \frac{X_d'}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}'} + \frac{1}{w \cdot T_{d0}''} \left( \frac{X_d'}{X_d} - \frac{X_d''}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}''} \right]$$

$$V_q(t) = E \sqrt{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{X_d'}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}'} - \left( \frac{X_d'}{X_d} - \frac{X_d''}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}''} \right]$$

L'expression de la tension de la phase a se déduit de celle de  $V_d$  et  $V_q$  en appliquant la transformation modifiée de Park :

$$V_a(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_d \cos \theta - V_q \sin \theta)$$

avec  $\theta = \omega t + \theta_0$ .

$$V_a(t) = E\sqrt{2} \left\{ \left[ \frac{1}{\omega T_{d0}'} \left( 1 - \frac{X_d'}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}'} + \frac{1}{\omega T_{d0}''} \left( \frac{X_d'}{X_d} - \frac{X_d''}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}''} \right] \cos(\omega t + \theta_0) \right. \\ \left. - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{X_d'}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}'} - \left( \frac{X_d'}{X_d} - \frac{X_d''}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}''} \right] \sin(\omega t + \theta_0) \right\}$$

Au fréquences normales , on neglige  $1/\omega \cdot T_{d0}'$  devant l'unité ainsi que

$$\left( \frac{1}{\omega \cdot T_{d0}''} \right) \left( \frac{X_d' - X_d''}{X_d} \right)$$

Ce qui revient donc à negliger les effets de la composante  $V_d$  .

$$V_a(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_0) \left[ -1 + \left( 1 - \frac{X_d'}{X_d} \right) e^{-t/T_{d0}'} + \frac{X_d' - X_d''}{X_d} e^{-t/T_{d0}''} \right]$$

Donc ,  $V_a(t)$  possède :

- Un terme sinusoidal non amorti.
- Un terme sinusoidal amorti avec  $T_{d0}'$  .
- Un terme sinusoidal amorti avec  $T_{d0}''$  .

L'amplitude initiale de  $V_a$  est  $E\sqrt{2} \cdot X_d''/X_d$  .

En negligeant les premières periodes , l'amplitude sera :  $E\sqrt{2} X_d'/X_d$  .

La representation graphique de la tension de retablissement se trouve sur la (fig. II.2)

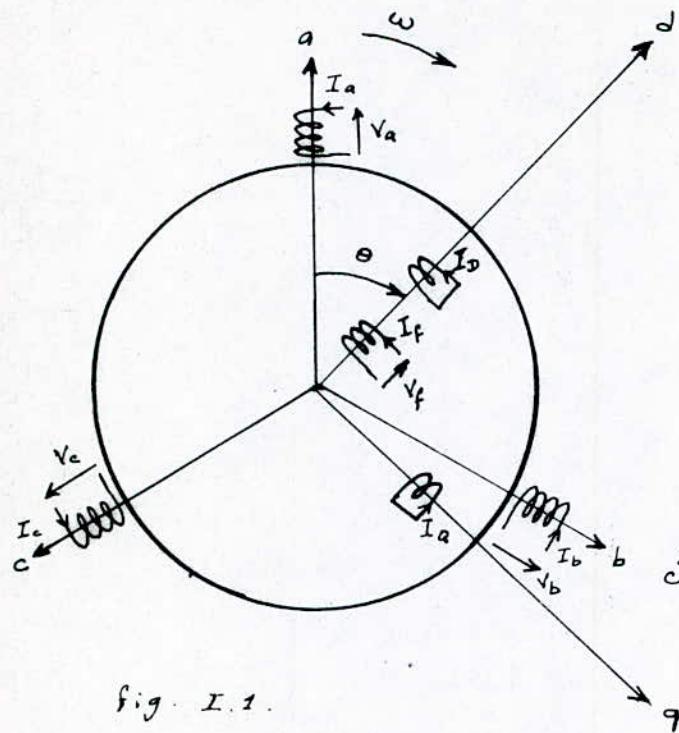


fig. I.1.

Modèle simplifié de la machine  
synchrone triphasée.

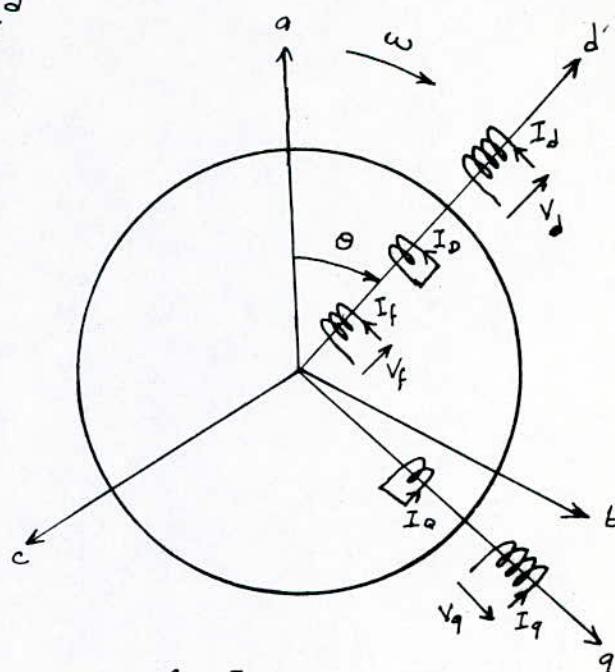


fig I.2.

Interpretation physique de  
la transformation de Park.

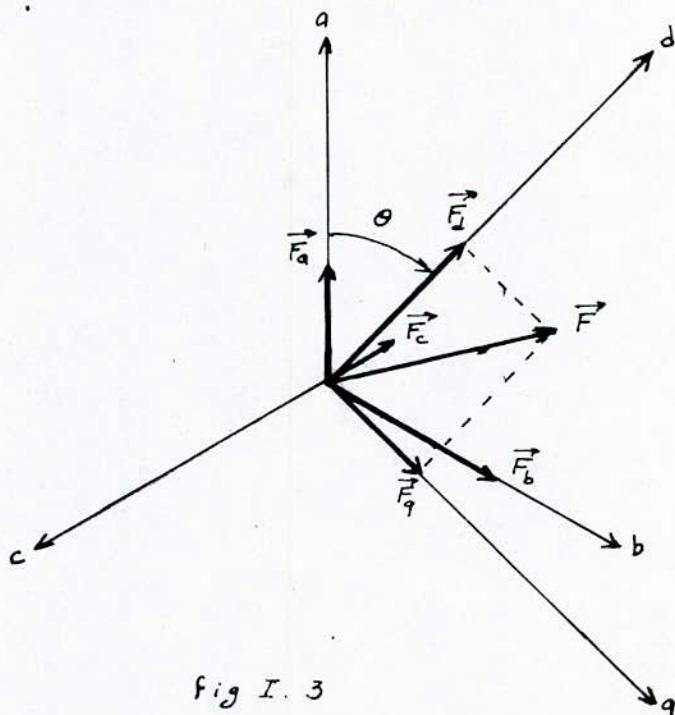


fig I.3

Decomposition selon les axes d et q  
de la f.e.m. triphasée.

C H A P I T R E II

---

- METHODES DE DETERMINATION DES PARAMETRES DE LA MACHINE SYNCHROME -

METHODES DE DETERMINATION  
DES PARAMETRES DE LA MACHINE SYNCHRONE

Les resistances , reactances et constantes de temps sont des parametres essentiels qui interviennent dans l'étude des differents regimes de fonctionnement des machines synchrones.

Les definitions de la plupart de ces grandeurs et de leurs methodes de determination experimentales reposent sur la theorie largement acceptée des deux axes comportant la representation approximative de tous les circuits s'ajoutant à l'enroulement d'excitation et aux circuits fixes qui s'y rapportent au moyen de deux circuits equivalents l'un le long de l'axe longitudinal , et l'autre le long de l'axe transversal.

Certains parametres ne sont pas directement mesurables , tels ceux relatifs aux amortisseurs , les resistances et reactances de ces enroulements ne peuvent être determinés , elles seront évaluées donc sous forme de constantes de temps ou de coefficients de couplage.

I- GRANDEURS INTERVENANT DANS LES REGIMES PERMANENTS: ( $R_s, R_f, X_d, X_q, X_o, X_i$ )

Il convient de distinguer en regime permanent équilibré les resistances  $R_s$  et  $R_f$  relatives à l'induit et l'inducteur ainsi que la reactance synchrone longitudinale  $X_d$  , cause d'une f.e.m de reaction d'induit longitudinale et la reactance transversale  $X_q$  cause d'une f.e.m de reaction transversale.

A ces deux reactances s'ajoutent les reactances inversé  $X_i$  et homopolaire  $X_o$  lorsque l'alternateur debite des courants sinusoidaux mais desequilibrés.

1 - Mesure des resistances :

La resistance à chaud est mesurée en alimentant l'enroulement considéré par une source continue , et en relevant la tension ainsi que le courant correspondant , on applique alors la loi d'Ohm :  $R = \frac{U}{I}$  .

L'alternateur est au préalable entraîné et , débitant à pleine charge.

2 - Mesure de la reactance synchrone  $X_d$  par l'essai à vide et l'essai en court circuit triphasé permanent :

Pour l'essai à vide le courant d'excitation J est augmenté et diminué d'une façon progressive , la caractéristique obtenue traduit la relation entre la tension aux bornes de l'induit ouvert et le courant j et ce à la vitesse assignée.

L'essai de court circuit triphasé est effectué en faisant varier J , la caractéristique de court circuit traduit la relation entre J et le courant d'induit en court-circuit.

A partir d'une même valeur de J , on détermine sur la partie linéaire de la caractéristique à vide ou sur son prolongement la f.e.m à vide E , et sur la caractéristique en C-C le courant de court-circuit correspondant.

Les équations des tensions en régime permanent , en négligeant  $R_s$  devant la reactance synchrone  $X_d$  et les effets d'amortisseurs, donnent:

$$\begin{aligned}V_d &= -L_q \omega I_q = -X_q I_q \\V_q &= L_d \omega I_d + M_{af} \omega I_f = X_d \cdot I_d + E\end{aligned}$$

En court circuit :  $V=0$  donc  $V_d = V_q = 0$ , d'où  $I_q = 0$  et  $I_d = I_{cc}$

En module  $X_d = \frac{E}{I_{cc}}$  avec  $E = M_{af} \cdot \omega \cdot I_f$

### 3 - Détermination des coefficients $\alpha$ et $\lambda$ de potier :

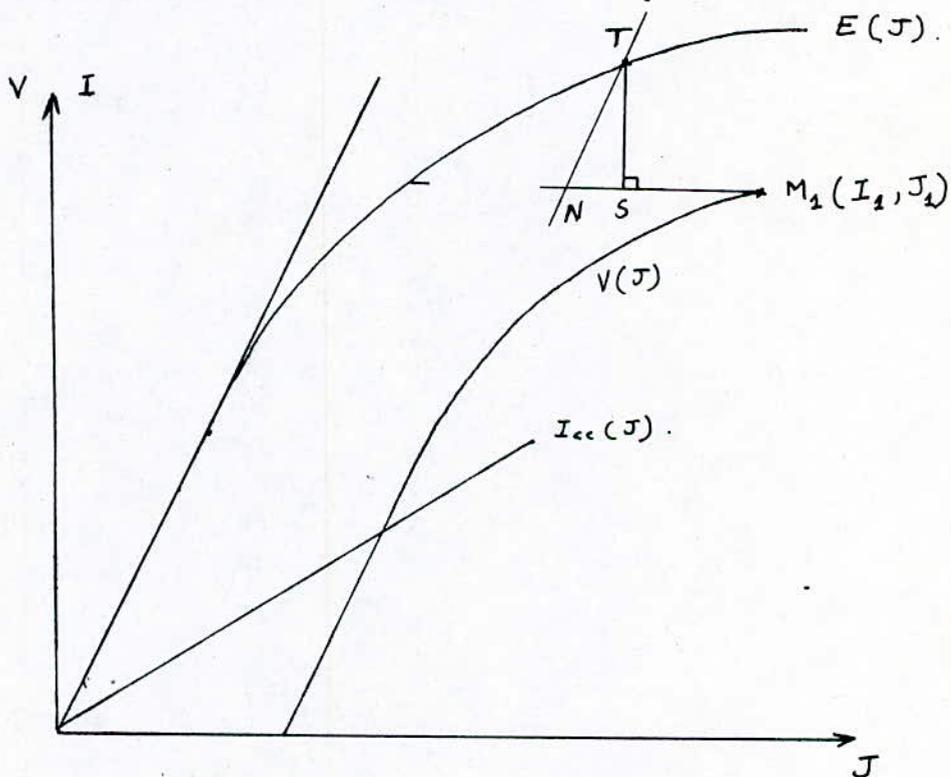
Ces coefficients sont déterminés à partir de l'essai à vide, l'essai en court circuit, et un essai en dewatté qui n'est autre qu'un essai en charge à  $\cos \varphi = \frac{\pi}{2}$  (à la fréquence nominale), la caractéristique relevée pour ce dernier essai étant celle traduisant la relation entre la tension  $V$  et le courant d'excitation  $J$ .

En partant d'un point  $M_1(I_1, J_1)$  de la caractéristique  $V(J)$  et en déterminant le courant d'excitation donnant  $I_1$  en court circuit, on trace la parallèle à la partie linéaire de la caractéristique à vide.

De là, on détermine le point  $T$ . La projection de  $T$  sur  $M_1N$  donne le point  $S$  tel que :

$$\begin{aligned} ST &= \lambda \cdot I_1 & \lambda &= \frac{ST}{I_1} \\ M_1S &= \alpha \cdot I_1 & \alpha &= \frac{M_1S}{I_1} \end{aligned}$$

$M_1N$  correspond au courant d'excitation donnant  $I_1$  en court circuit.



#### 4 - Mesure de $X_d$ et $X_q$ par la methode de faible glissement:

L'induit de la machine synchrone est alimenté par une tension triphasée symétrique inférieure à la normale ( $0,01 \div 0,2$  fois  $U_n$ ), de telle sorte que la machine ne risque pas de s'accrocher.

L'inducteur ouvert, ce qui permet l'élimination de l'effet synchronisant de l'amortisseur, et le rotor entraîné de manière à tourner avec un glissement inférieur à 1%. On relève à l'oscilloscope la tension  $V$  et le courant  $I$  statoriques ainsi que la tension d'inducteur  $V_f$ . (Figure II 4).

On reconnaît la position longitudinale au minimum du courant statorique et la position transversale au maximum de ce dernier, cela vient du fait que  $X_d$  est supérieur à  $X_q$ .

Le minimum du courant correspond au maximum de la tension statorique,  $V_f$  étant nulle.

Le maximum du courant correspond au minimum de la tension statorique,  $V_f$  maximale.

En négligeant la résistance d'induit  $R_s$  et les effets d'amortisseurs on a d'après le système d'équation (10)

$$V_d = -V \sin \delta = -X_q \cdot I_q$$

$$V_q = V \cos \delta = X_d \cdot I_d \quad \text{avec } I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

$$\text{Donc } \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{X_d^2 \sin^2 \delta + X_q^2 \cos^2 \delta}{X_d^2 \sin^2 \delta + X_q^2 \cos^2 \delta}}$$

Position longitudinale  $\delta = 0$  ou  $\pi$

Position transversale  $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$

$$X_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}}$$

$$X_q = \frac{V_{\min}}{I_{\max}}$$

5 - Determination de  $X_q$  par la methode de l'excitation negative :

Cette methode necessite un couplage à vide de la machine synchrone sur une source triphasée de valeur reduite (  $0,6 \div 0,7$  fois  $U_n$  ).

Le courant d'excitation  $J$  est reduit progressivement jusqu'à zero , sa polarite est inversee et il est ensuite augmenté jusqu'au moment où la machine glisse d'une pôle.

Les valeurs de la tension , du courant d'induit et du courant d'excitation sont mesurées au moment où la machine glisse.

Le coefficient du couple synchronisant est deduit de la relation ( 11 ) donnant le couple electromagnetique de la machine :

$$C_S = \frac{d C_e}{d \delta} = \frac{3V \cdot E}{w \cdot X_d} \cos \delta + \frac{3 V^2}{w} \cos 2 \delta \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

Qui pour un fonctionnement stable est positif .Au moment où la machine glisse d'un pôle avec la puissance active nulle (  $\delta = 0$  ) on a :

$$C_S = 0 \Rightarrow \frac{E}{V} = 1 - X_d / X_q$$

6 - Determination de  $X_o$  par l'essai d'alimentation en monophasé des trois phases:

L'essai d'application d'une tension monophasée aux bornes des trois phases montées en serie ou en parallele est executé sur la machine entraînée à la vitesse assignée ou au voisinage de celle-ci.

Pendant l'essai , l'enroulement d'excitation etant soit en court-circuit soit ouvert , on mesure la tension  $U_o$  et le courant  $I_o$  et aussi la puissance absorbée : ( figure III 19. ) .

Un systeme de courants homopolaire crée une f.m.m resultante nulle dans l'entrefer , le courant  $I_o$  n'est donc limité que par l'impedance homopolaire soit:  $Z_o = \frac{U_o}{3 I_o}$  ,  $R_o = \frac{P}{3 I_o}$  d'où  $X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2}$

$X_o$  n'étant dû qu'au flux de fuites d'induit.

7 - Determination de  $X_0$  par l'essai en court circuit permanent entre deux phases et le neutre :

L'enroulement d'induit étant connecté en étoile on fait un court-circuit entre deux phases et le neutre puis on entraîne la machine à sa vitesse assignée et on l'excite. ( figure III 20)

Les grandeurs mesurées sont la tension ( $U_0$ ) entre la borne à circuit ouvert et le point neutre ainsi que le courant  $I_0$  dans la connexion qui relie les bornes court-circuitées au point neutre.

Pour un tel court circuit et en utilisant les composantes symétriques on déduit:

$$I_0 = \frac{3 E_d \cdot X_i}{X_0 X_d + X_i X_0 + X_d X_i}$$

$$U_0 = \frac{3 E_d \cdot X_0 X_i}{X_0 X_d + X_0 X_i + X_d X_i}$$

De là :  $U_0 = X_0 I_0 \Rightarrow X_0 \equiv \frac{U_0}{I_0}$

La formule ci dessus n'est valable qu'au cas où les harmoniques de tension et de courant sont négligeables.

En présence d'harmoniques importants on utilisera la relation :

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{Q^2 + P^2}$$

La résistance homopolaire est déterminée par la relation:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2}$$

Les valeurs du courant dans le neutre et la durée de l'essai sont limitées par l'échauffement ou par les vibrations.

8 - Determination de  $X_i$  par l'essai de court-circuit permanent entre deux phases:

On est amené pour cet essai à court-circuiter deux phases avec la machine entraînée à sa vitesse de synchronisme.

On relève la tension  $U$  entre la borne à circuit ouvert et les deux phases mises en court-circuit ainsi que le courant  $I$  circulant dans le circuit.

La puissance active  $P$  absorbée est aussi relevée et si les harmoniques sont importants on relève de plus la puissance réactive  $Q$  absorbée

Dans cet essai et d'après le schéma du montage, on peut déterminer le déphasage entre la tension et le courant qui sera  $(\frac{\pi}{2} - \varphi_i)$  avec  $\varphi_i = \arctg \frac{X_i}{R_i}$  et cela en absence d'harmoniques.

Le wattmètre branché indique donc  $P = U \cdot I \cdot \sin \varphi_i = Z_i \cdot 3 I \cdot I \cdot \frac{X_i}{Z_i} = 3 X_i I^2$

$$\text{D'où } X_i = \frac{P}{3 I^2} \quad (\Omega)$$

En présence d'harmoniques on aura:

$$X_i = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\Omega)$$

$$R_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \quad (\Omega)$$

9 - Determination de  $X_i$  par l'essai de rotation inverse :

Une tension symétrique réduite ( $0,02 \div 0,2 U_n$ ) est appliquée à la machine entraînée à sa vitesse assignée, cette tension ayant un ordre de succession de phases inverse à celui de notre machine synchrone.

L'enroulement inducteur mis en court-circuit, on mesure la tension et le courant des trois phases ainsi que la puissance fournie, on aura:

$$X_i = \sqrt{Z_i^2 - R_i^2} \quad \text{AVEC} \quad Z_i = \frac{U}{\sqrt{3} I} \quad (\Omega)$$

$$R_i = \frac{P}{\sqrt{3} I^2} \quad (\Omega)$$

$P$  = Puissance fournie  
 $U$  = Tension moyenne mesurée  
 $I$  = Courant moyen mesuré

## II - GRANDEURS INTERVENANT DANS LES REGIMES SUBTRANSITOIRES ET TRANSITOIRES:

$$\underline{X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, T'_{d0}, T'_{q0}, T'_d, T'_q, T''_{d0}, T''_{q0}, T'''_d \text{ et } T'''_q}$$

Lors d'un regime transitoire qui suit une perturbation brusque, l'induit de la machine se comporte comme un circuit d'impedance variable:

Cela est dû au fait que le flux dans un enroulement fermé ne peut varier brusquement mais selon une loi, d'allure exponentielle, qui depend de sa resistance ainsi que de celles des circuits qui lui sont couplés magnetiquement.

Au tout debut d'une perturbation, le flux dans les circuits amortisseurs conserve sa valeur initiales et le circuit d'induit reagit pour le reseau comme une impedance dont la valeur est liée aux fuites (induit - amortisseur) c'est la reactance subtransitoire  $X''$ .

Un peu plus tard, le flux ayant varié dans l'amortisseur dont la resistance est relativement élevée en raison de sa faible masse de cuivre (faible valeur de la constante de temps subtransitoire  $T''$ ), ce sont les fuites induit-inducteur, dans lequel le flux n'a pas encore varié, qui determinent la valeur de l'impedance. C'est la reactance  $X'$ .

Enfin, le flux ayant varié dans l'inducteur dont la masse de cuivre est plus importante que celle des amortisseurs (Valeur plus importante de la constante de temps transitoire  $T'$ ) l'induit agit par son impedance totale comprenant ses fuites et la reaction d'induit. C'est la reactance synchrone  $X$ .

### 1 - Essai de retablisement de la tension:

L'essai de retablisement de la tension apres suppression d'un court circuit triphasé est réalisé sur la machine tournant à sa vitesse nominale.

On ouvre brusquement la connexion de court circuit et on enregistre le signal de la tension d'induit (figure II.2)

- Determination de  $X'_d, X''_d, T'_{d0}, T''_{d0}$  par l'essai de retablisement :

La determination des quatre parametres cités se fait graphiquement, la methode consiste à tracer les enveloppes superieures et inferieures de la tension de retablisement, ensuite et sur un papier semi-logarithmique on reporte la difference entre la tension en regime établi  $U_{mp}$  et la tension déterminée par

l'enveloppe supérieure ou inférieure  $U_m$  en fonction du temps.

L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire de la tension ( $\bar{U}_m'(0)$ )

La différence entre la tension déterminé par la courbe et la composante transitoire  $U_m'$  donne la valeur de la composante subtransitoire  $U_m''$  au même instant.

La valeur initiale de cette composante  $U_m''(0)$  est déterminée par l'intersection de la courbe  $U_m''(t)$  avec l'axe des ordonnées.

$$\text{On dedaira alors: } X_d' = \frac{U_{mp} - U_m'(0)}{\sqrt{3} I_{ccm}} \quad X_d'' = \frac{U_{mp} - (\bar{U}_m'(0) + U_m''(0))}{\sqrt{3} I_{ccm}}$$

$T_{d0}'$ : est la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert, elle est prise comme étant le temps nécessaire pour que  $U_m'(t)$  passe  $U_m'(0)$  à  $\frac{U_m'(0)}{e}$

$T_{d0}''$ : Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert, c'est le temps nécessaire pour que  $U_m''(t)$  passe de  $U_m''(0)$  à  $\frac{U_m''(0)}{e}$

$U_{mp}$ : est la tension en régime établi.

$U_m'(0)$ : Composante transitoire de la tension à  $t=0$

$U_m''(0)$ : Composante subtransitoire de la tension à  $t=0$

$I_{ccm}$ : Courant dans l'induit mesuré immédiatement avant la suppression du court-circuit.

$e$ : Base des logarithmes neperiens,  $e = 2,71828$

## 2 - Essai de court-circuit triphasé brusque :

La machine fonctionnant à vide et à sa vitesse nominale, on relève la tension aux bornes de la machine ensuite on court circuite l'enroulement d'induit et on enregistre les courants statoriques ainsi que le courant d'inducteur. L'allure de ces courants est donnée par la figure II.3)

- Détermination de  $X_d^I$ ,  $X_d^{II}$ ,  $T_d^I$  et  $T_d^{II}$  par l'essai de court circuit triphasé brusque :

L'exploitation des courbes obtenues se fait graphiquement la demi-somme algébrique des enveloppes supérieure et inférieure du courant donne l'amplitude de la composante périodique du courant dans chacune des phases.

Pour obtenir les composantes transitoire  $I_m^I$  et subtransitoire  $I_m^{II}$  on retranche de cette courbe l'amplitude du courant en régime établi  $I_m$ , la différence qui représente la somme de  $I_m^I$  et  $I_m^{II}$  est reporté sur du papier semi-logarithmique en fonction du temps.

Du fait que  $T_d^{II}$  est généralement petit devant  $T_d^I$  on voit que  $(I_m^{II} + I_m^I)(t)$  tend vers une droite représentant le régime transitoire et dont l'extrapolation à  $t = 0$  donnera l'amplitude initiale de la composante transitoire  $I_m^I(0)$ .

La composante subtransitoire du courant de court circuit est définie comme étant la différence entre la courbe  $(I_m^I + I_m^{II})(t)$  et la droite, à  $t = 0$ , cette courbe donnera  $I_m^{II}(0)$  composante subtransitoire initiale.

De ce qui précède on peut déduire  $X_d^I$ ,  $X_d^{II}$ ,  $T_d^I$ ,  $T_d^{II}$

$$X_d^I = \frac{E \sqrt{2}}{\sqrt{3} (I_m + I_m^I(0))} \quad , \quad X_d^{II} = \frac{E \sqrt{2}}{\sqrt{3} (I_m + I_m^I(0) + I_m^{II}(0))}$$

$T_d^I$  : Est la constante de temps transitoire longitudinale en court circuit, c'est le temps mis par  $I_m^I(t)$  pour passer de  $I_m^I(0)$  à  $\frac{I_m^I(0)}{e}$

$T_d^{II}$  : Constante de temps subtransitoire longitudinale en court circuit, c'est le temps mis par  $I_m^{II}(t)$  pour passer de  $I_m^{II}(0)$  à  $\frac{I_m^{II}(0)}{e}$ .

$E$  : Valeur de la tension avant le court-circuit.

$I_m$  : Amplitude du courant de court-circuit en régime établi.

$I_m^I(0)$  : Amplitude initiale de la composante subtransitoire du courant.

$e = 2,71828$

3 - Essai de décroissance du courant d'excitation avec enroulement d'induit à circuit ouvert.

La machine entraînée à sa vitesse assignée par un moteur approprié et excitée à sa tension nominale, l'enroulement d'excitation est mis brusquement en court-circuit.

On enregistre à l'oscillographe la tension aux bornes de l'induit et le courant dans l'enroulement d'excitation. La différence entre la tension relevée à l'oscilloscope et la tension résiduelle est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmique. (fig. II.4)

De la courbe ainsi tracée on peut déterminer la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert  $T_{d0}^i$  comme étant le temps nécessaire pour que la différence de tension mentionnée ci dessus décroisse jusqu'à  $\frac{1}{e}$  ( 0,368 ) fois sa valeur initiale.

4 - Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court circuit :

La machine entraînée à sa vitesse nominale et excitée de façon que l'induit court-circuité soit parcouru par le courant assigné.

L'enroulement d'excitation est alors mis brusquement en court circuit, on enregistre alors à l'oscilloscope une des valeurs du courant en ligne ainsi que le courant ou la tension d'excitation. (fig. II.5)

La différence entre le courant transitoire de l'induit lu sur l'oscilloscope et le courant dû à la tension résiduelle est reporté en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmique.

De la courbe ainsi tracée on peut déterminer la constante de temps transitoire longitudinale en court circuit  $T_d^i$  comme étant le temps nécessaire pour que la différence du courant décroisse jusqu'à  $\frac{1}{e} \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

5 - Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert :

La machine tournant à sa vitesse assignée avec son enroulement d'excitation initialement à circuit ouvert, est mis brusquement sous tension : (figure II.6)

La valeur de l'excitation en régime établi doit correspondre à la partie rectiligne de la courbe à vide, on enregistre après application de la tension, la tension d'induit.

La différence entre la tension d'induit en régime établi et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension d'induit croissante est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique.

L'extrapolation de la partie rectiligne de cette courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire  $U'(0)$ .

La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert ( $T'_{d0}$ ) étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire de tension  $U'(t)$  passe de  $U'(0)$  à  $\frac{U'(0)}{e}$

$$e = 2,72$$

6 - Essai d'application brusque de l'excitation avec enroulement d'induit en court circuit :

L'essai est effectué sur la machine tournant à sa vitesse nominale avec l'enroulement d'excitation initialement à circuit ouvert.

La tension de l'excitation est réglée à une valeur correspondant à un courant de court circuit égal au courant assigné de la machine.

L'enroulement d'excitation est brusquement alimenté, on relève à l'oscilloscope le courant dans l'induit (figure II.7).

La différence entre le courant d'induit en régime établi et l'enveloppe de courant d'induit croissant est reportée en coordonnées semi-logarithmique, l'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire  $I'(0)$ .

La constante de temps transitoire longitudinale en court circuit étant le temps de passage de  $I'(0)$  à  $\frac{I'(0)}{e}$  ;  $e = 2,72$

### III - ESSAIS STATIQUES :

#### 1 / Essai d'application d'une tension en position longitudinale puis transversale.

L'inducteur fermé sur un ampèremètre, on applique une tension de fréquence nominale et de valeur réduite  $U$  entre deux phases en série, en amenant le rotor dans la position longitudinale, position pour laquelle le courant dans l'inducteur est maximum, on mesure la tension appliquée  $U$ , le courant  $I$  absorbé et la puissance correspondante. De là, on déduit la réactance subtransitoire longitudinale  $X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2}$  avec  $Z_d'' = \frac{U}{2I}$  et  $R_d'' = \frac{P}{2I^2}$

On répétant la même procédure pour la position transversale, position pour laquelle le courant dans l'inducteur est pratiquement nul.

La réactance subtransitoire transversale est :

$$X_q'' = \sqrt{Z_q''^2 - R_q''^2} \quad \text{avec} \quad Z_q'' = \frac{U}{2I} \quad \text{et} \quad R_q'' = \frac{P}{2I^2}$$

#### 2 / Essai d'application d'une tension dans une position quelconque du rotor:

Une tension alternative appliquée successivement à chacune des paires de bornes de lignes de l'enroulement d'induit de la machine à l'arrêt.

L'enroulement d'excitation en court circuit, il est nécessaire que la position reste identique pour les trois applications successives de la tension d'essai. La tension appliquée, le courant et la puissance absorbée par l'enroulement d'induit ainsi que le courant d'excitation sont mesurées pour chaque application de la tension à l'une des paires de bornes.

La réactance subtransitoire longitudinale est déterminée à partir de l'essai de la manière suivante:

Les réactances de chaque paire de bornes de l'enroulement d'induit  $X_{12}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{13}$  sont déterminées par les formules en utilisant les indices correspondant:  $X'' = \sqrt{Z''^2 - R''^2}$  avec  $Z'' = \frac{U}{2I}$  et  $R'' = \frac{P}{2I^2}$

$$X_d'' = X_{\text{moy}} \pm \Delta X$$

et

$$X_{\text{moy}} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{13}}{3}$$

$$\Delta X = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{x_{12} (x_{12} - x_{23}) + x_{23} (x_{23} - x_{13}) + x_{13} (x_{13} - x_{12})}$$

Le signe précédant  $\Delta X$  est déterminé d'après la règle suivante:

- (+) si le plus grand des trois courants dans l'enroulement d'excitation correspondant à la plus grande reactance mesurée.
- (-) si le plus grand courant des trois mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus petite des reactances mesurées.

La reactance subtransitoire transversale est déterminé à partir des memes formules ci dessus.

Le signe (+) précédant  $\Delta X$  si le plus petit des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus grande des reactances.

Le signe (-) précédant  $\Delta X$  si le plus petit des trois courants correspond à la plus petite reactance mesurée de l'induit.

IV - DETERMINATION DES PARAMETRES A PARTIR D'ESSAIS FREQUENTIELS:

1/ Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt : ( $X_d, X_q, X_d'', X_q'', T_q'', T_{q0}'', T_d'', T_{d0}''$ )

L'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit est exécuté à l'arrêt. Une tension continue est appliquée à l'enroulement d'induit ( entre deux bornes avec la troisième libre, ou deux phases en parallèle entre elles en série avec la troisième). (Figure II. 8 )

En fermant le contacteur K , l'enroulement est mis en court circuit et le courant qui y circulait décroît. Le processus entier de décroissance est enregistré.

L'essai est effectué avec le rotor orienté d'abord selon l'axe longitudinal et l'enroulement d'excitation en court-circuit , puis avec le rotor orienté suivant l'axe transversal et l'enroulement d'excitation à circuit ouvert.

Les valeurs initiales transitoires et subtransitoires et leurs constantes de temps sont obtenues à partir d'un diagramme en coordonnées semi logarithmique des courants décroissants. ( Les valeurs de ces courants sont considérées comme étant le rapport du courant à un instant quelconque  $I(t)$  au courant initial  $I(0)$ ; pour ce faire, on trace et on prolonge vers l'origine une droite joignant deux points de la courbe dans sa partie rectiligne. L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées donne l'amplitude initiale de la première exponentielle  $I_{10}$ .

Sa constante de temps  $T_1$  est la plus élevée et sa valeur est égale au temps nécessaire pour que  $I_1(t)$  décroisse jusqu'à  $\frac{1}{e} = 0,368$  fois sa valeur initiale.

La différence entre la courbe initiale et la première exponentielle est reportée de nouveau en échelle semi-logarithmique, ce qui permet de déterminer  $I_{20}$  et  $T_2$ .

L'analyse de la courbe se poursuit de cette manière jusqu'au moment où aucune courbe , n'est plus décelable.

L'expression en fonction du temps des courants décroissants sera :

$$I(t) = \sum_{k=1}^m I_{k0} \cdot e^{-t/T_k}$$

-Determination des parametres :

$$X_s = 2 \pi f \cdot R'_s \sum_{k=1}^m I_{ok} T_k \quad (T_k [s])$$

$$X_s'' = \frac{2 \pi f \cdot R'_s}{\sum_{k=1}^m \frac{I_{ok}}{T_k}}$$

$$\sum_{k=1}^m \frac{I_{ok} \cdot T_k}{(T_s'' - T_k)} = 0$$

$$\sum_{k=1}^m \frac{I_{ok}}{(T_{so}'' - T_k)} = 0$$

L'indice s represente , soit l'indice d correspondant à l'axe direct ,  
soit l'indice q de l'axe transversal.

\*  $R'_s = R_s + k \Delta R$

\* k = coefficient dependant du mode de couplage de l'induit.

\* k = 1/2  $\longrightarrow$  si la tension est appliquée à deux bornes avec la troisieme libre.

\* k = 2/3  $\longrightarrow$  si deux phases sont montées en parallele entre elles et en serie avec la troisieme.

\*  $R_s$  = resistance en courant continu de l'induit.

\*  $\Delta R$  = resistance additionnelle exterieure de l'induit.

\* m = nombre d'exponentielles decelables.

## 2/ Essais indiciels :

Dans ces essais on soumet les différents bobinages de la machine à des échelons de tension et à partir des relevés des réponses indicielles de ces bobinages, on détermine l'ensemble de leurs paramètres.

Pour cela quatre relevés sont nécessaires, les trois premiers sont effectués en faisant correspondre l'axe de l'inducteur à celui de la phase A du stator (Fig. III 26a)

Pour le quatrième, on met ces axes en quadrature (Figure: III 26.b)

L'exploitation de ces différentes courbes relevées à l'oscilloscope peut se faire soit numériquement, soit graphiquement.

Les réponses indicielles à un échelon de tension des quatre essais sont de la forme : (fig II. 9).

$$\gamma(t) = \gamma_0 - \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

$$\text{ou : } \gamma_0 - \gamma(t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

\* Méthode graphique: On tracera la courbe  $[\gamma_0 - \gamma(t)]$  sur une échelle logarithmique en fonction du temps. La détermination des coefficients  $\gamma_i$  et  $\tau_i$  s'effectue de la même façon que pour l'essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt, et dans ce cas,  $\gamma_i$  représente une valeur réelle du courant.

Essai n° 1 : Le circuit inducteur ouvert, on applique une tension continue E à la phase A, et on enregistre le courant qu'elle absorbe. (fig II.9.a)  
Les équations opérationnelles régissant le système sont alors :

$$\frac{E}{p} = (R_s + L_{ad} p) I_s + M_{ad} \cdot p \cdot I_D$$

$$0 = M_{ad} \cdot p \cdot I_s + (R_D + L_D \cdot p) I_D$$

$$\longrightarrow I_s = k \frac{1}{p} \frac{p + A}{(p + B)(p + C)}$$

On aura :  $Y_0 = k \frac{A}{B \cdot C}$  ;  $Y_1 = k \frac{A-B}{B(C-B)}$  ;  $Y_2 = k \frac{A-C}{C(B-C)}$

$T_1 = \frac{1}{B}$  ;  $T_2 = \frac{1}{C}$

de là :  $i_s(t) = Y_0 - Y_1 e^{-t/T_1} - Y_2 e^{-t/T_2}$

Après identification, on détermine les paramètres suivants:

$$R'_s = E / Y_0$$

$$L_{ad} = R'_s \cdot T_1 \cdot \frac{1 + (Y_2/Y_1)(T_2/T_1)}{1 + Y_2/Y_1} = R'_s \cdot T_{ad0}$$

$$T_{D0} = \frac{L_D}{R_D} = T_1 \cdot \frac{Y_2/Y_1 + T_2/T_1}{1 + Y_2/Y_1}$$

$$K_{ad}^2 = \frac{M_{ad}^2}{L_{ad} \cdot L_D} = \frac{(Y_2/Y_1)(1 - T_2/T_1)^2}{(Y_2/Y_1 + T_2/T_1)(1 + (Y_2/Y_1)(T_2/T_1))}$$

Essai n°2 : L'induit ouvert, on applique maintenant une tension  $E'$  à l'inducteur et on enregistre le courant de celui-ci qui est de la forme : (fig II.9.6)

$$i_f(t) = Y'_0 - Y'_1 e^{-t/T'_1} - Y'_2 e^{-t/T'_2}$$

$$Y'_0 = E' / R_f$$

Après identification, on écrit :

$$L_f = R_f \cdot T'_1 \cdot \frac{1 + (Y'_2/Y'_1)(T'_2/T'_1)}{1 + Y'_2/Y'_1} = R_f \cdot T_{f0}$$

$$T_{D0} = \frac{L_D}{R_D} = T'_1 \cdot \frac{Y'_2/Y'_1 + T'_2/T'_1}{1 + Y'_2/Y'_1}$$

$$K_{f,D}^2 = \frac{M_{f,D}^2}{L_f \cdot L_D} = \frac{(Y'_2/Y'_1)(1 - T'_2/T'_1)^2}{(Y'_2/Y'_1 + T'_2/T'_1)(1 + (Y'_2/Y'_1)(T'_2/T'_1))}$$

Essai n° 3 : L'inducteur en court circuit , on applique une tension  $E''$  à la phase A.  
Le courant s'établissant dans celle-ci est de la forme: (fig II.9 c)

$$i_s(t) = \gamma_0'' + \gamma_1'' \cdot e^{-t/T} + \gamma_2'' e^{-t/T'} + \gamma_3'' e^{-t/T''}$$

Connaissant les  $\gamma_i''$  et les  $T^k$  on écrit que :

$$K_{af}^2 = \frac{M_{af}^2}{L_{ad} \cdot L_f} = \frac{T_{D0}}{T_{f0}} (1 - K_{ad}^2) + \frac{T_{D0}}{T_{ad0}} (1 - K_{fd}^2) - \frac{TT' + TT'' + T'T''}{T_{f0} T_{ad0}} + 1.$$

$$K_{fd}^2 = \frac{M_{fd}^2}{L_f \cdot L_D} = \frac{R_s' \gamma_1''}{E''} \cdot \frac{(T - T')(T - T'')}{T_{f0} T_{D0}} + \left( \frac{T}{T_{f0}} - 1 \right) \left( \frac{T}{T_{D0}} - 1 \right)$$

$$T + T' + T'' = T_{ad0} + T_{f0} + T_{D0}.$$

Essai n°4 : Le rotor mis dans la 2è position , on applique à la phase A un échelon de tension continue  $E'''$  et on enregistre le courant qu'elle absorbe.

Ce courant se présente sous forme: (fig II.9.d)

$$i_s(t) = \gamma_0''' - \gamma_1''' e^{-t/T_1'''} - \gamma_2''' e^{-t/T_2'''}$$

On peut écrire les relations suivantes et cela après détermination des  $\gamma_i'''$  et les  $T_i'''$ .

$$R_s' = E''' / \gamma_0'''$$

$$L_{a0} = R_s' \cdot T_1''' \cdot \frac{1 + (\gamma_2''' / \gamma_1''') (T_2''' / T_1''')}{1 + \gamma_2''' / \gamma_1'''} = R_s' \cdot T_{090}$$

$$T_{00} = \frac{L_{00}}{R_{00}} = T_1''' \cdot \frac{\gamma_2''' / \gamma_1''' + T_2''' / T_1'''}{1 + \gamma_2''' / \gamma_1'''}$$

$$K_{a,0}^2 = \frac{M_{a0}^2}{L_{a0} \cdot L_{00}} = \frac{(\gamma_2''' / \gamma_1''') (1 + T_2''' / T_1''')^2}{(\gamma_2''' / \gamma_1''' + T_2''' / T_1''') (1 + (\gamma_2''' / \gamma_1''') (T_2''' / T_1'''))}$$

- détermination des paramètres de la machine à partir des essais indiciels:

A partir des relations ci-dessous, on tire les différents paramètres de la machine:  $X_d = L_d w = (L_{a0} - M_{a0} + \frac{3}{2} L_{a2}) w \neq \frac{3}{2} (L_{a0} + L_{a2}) w = \frac{3}{2} w L_{ad}$ .

$$X_q = L_q w = (L_{a0} - M_{a0} - \frac{3}{2} L_{a2}) w \neq \frac{3}{2} (L_{a0} - L_{a2}) w = \frac{3}{2} w L_{aq}$$

$$X'_d = L_d w \left( 1 - \frac{M_f^2}{L_d L_f} \right) = \frac{3}{2} w L_{ad} (1 - K_{af}^2)$$

$$X''_d = \frac{3}{2} w L_{ad} \left( 1 - \frac{K_{af}^2 + K_{ad}^2 - 2 K_{af} K_{ad} K_{fd}}{1 - K_{fd}^2} \right)$$

$$X''_q = \frac{3}{2} w L_{aq} (1 - K_{a0}^2)$$

$$T'_{d0} = \frac{L_f}{R_f} = T_{f0}$$

$$T''_{d0} = \frac{L_d}{R_d} \left( 1 - \frac{M_{fd}^2}{L_f L_d} \right) = T_{d0} (1 - K_{fd}^2)$$

$$T'_d = \frac{L_f}{R_f} \left( 1 - \frac{M_f^2}{L_d L_f} \right) = T_{f0} (1 - K_{af}^2)$$

$$T''_d = T_{d0} \left( 1 - \frac{K_{fd}^2 + K_{ad}^2 - 2 K_{af} K_{fd} K_{ad}}{1 - K_{af}^2} \right)$$

$$T''_{q0} = \frac{L_q}{R_q} = T_{q0}$$

$$T''_q = \frac{L_q}{R_q} \left( 1 - \frac{M_q^2}{L_q L_q} \right) = T_{q0} (1 - K_{a0}^2)$$

$$T_D = \frac{L_D}{R_D} \left( 1 - \frac{M_{fd} M_D}{M_f L_D} \right) = T_{D0} \left( 1 - \frac{K_{fd} K_{ad}}{K_{af}} \right)$$

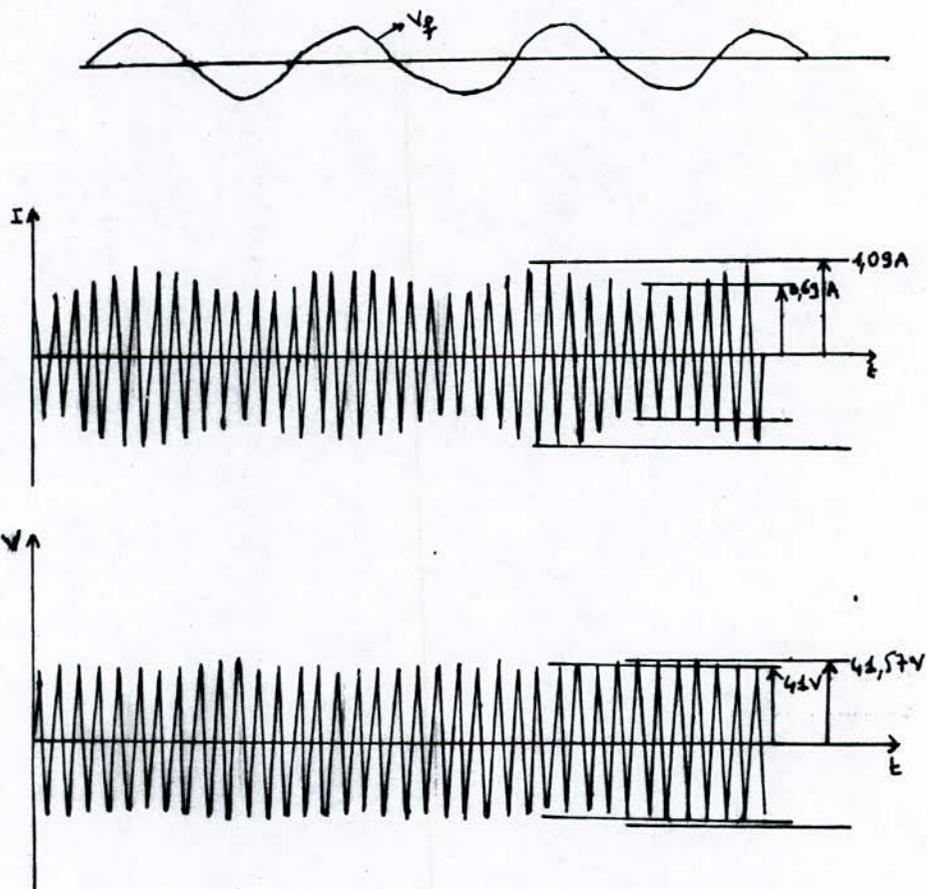


fig. II.1 Relevé de courant et tension d'induit  
et de la tension d'inducteur lors  
de l'essai à faible glissement.

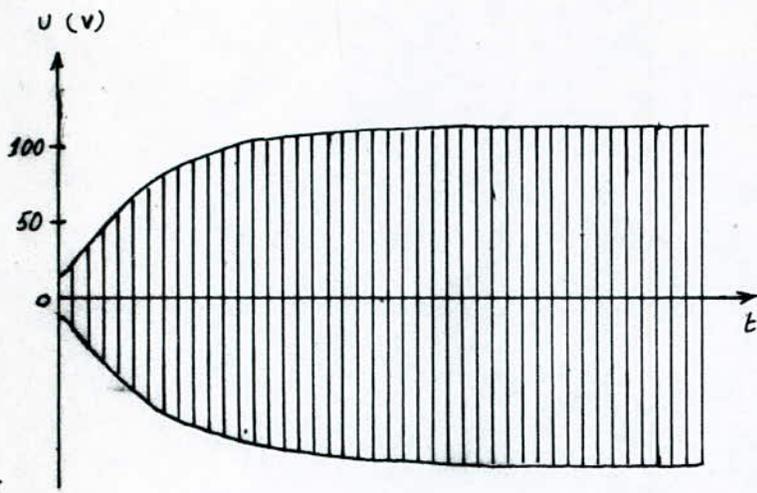


fig. II. 2. Relevé de la tension d'induit lors de l'essai de retablisement.

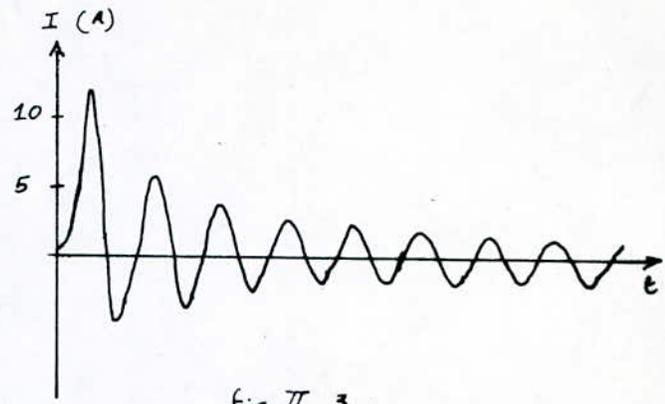


fig II. 3.  
Relevé du courant d'induit lors de l'essai de C/C triphasé brusque.

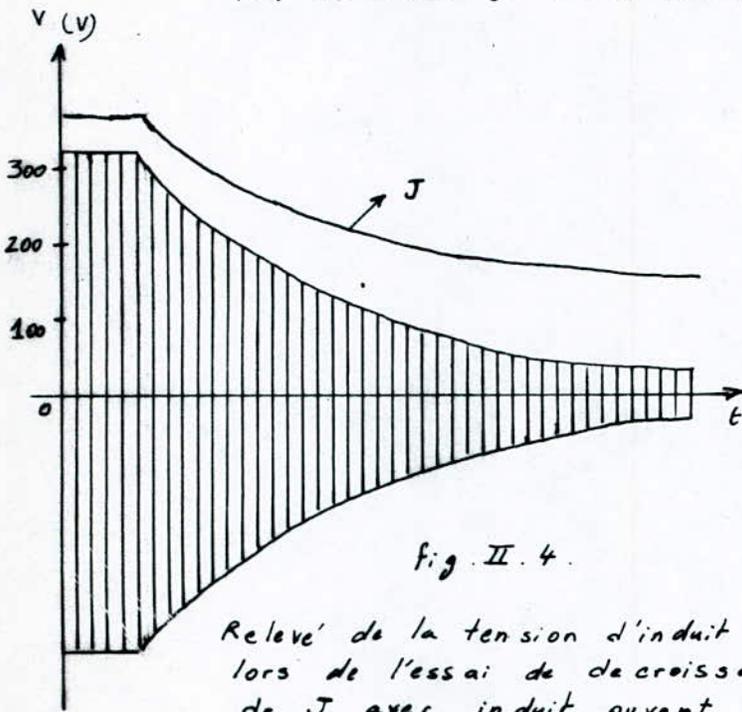


fig. II. 4.

Relevé de la tension d'induit lors de l'essai de décroissance de J avec induit ouvert

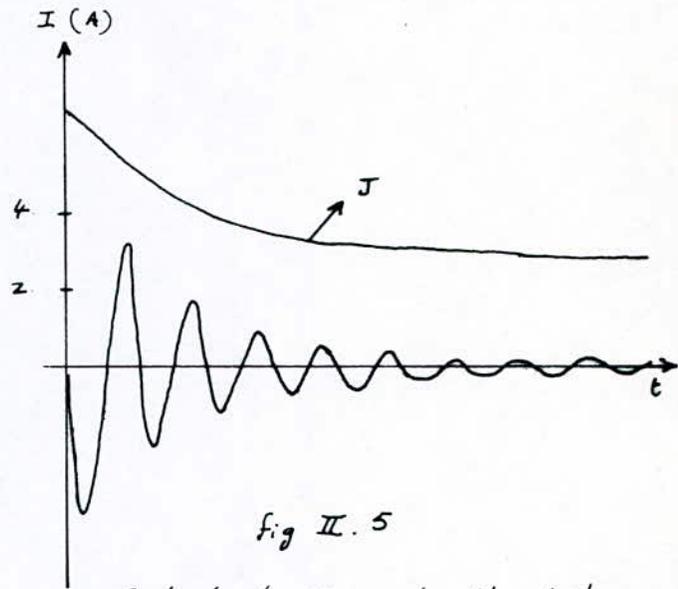


fig II. 5

Relevé du courant d'induit lors de l'essai de décroissance de J avec induit en C/C.

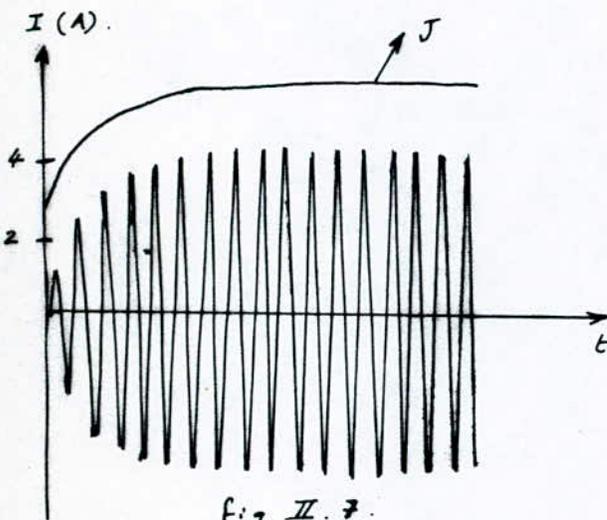


fig II. 7.

Relevé du courant lors de l'essai d'application brusque de J avec induit en C/C.

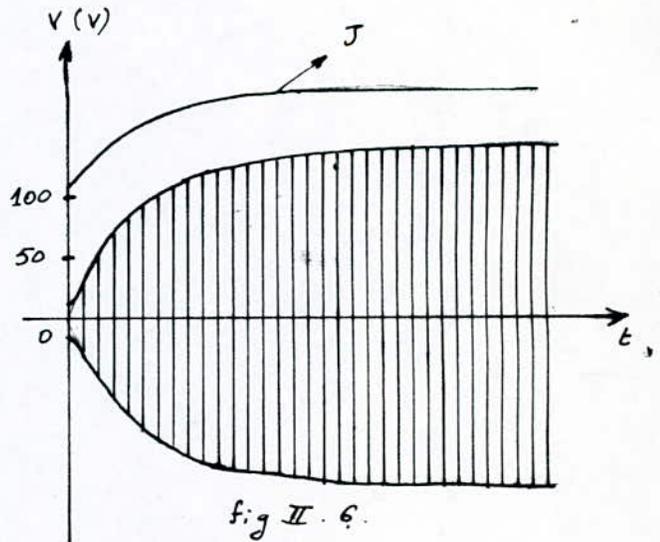


fig II. 6.

Relevé de la tension d'induit lors de l'essai d'application brusque de J avec induit ouvert.

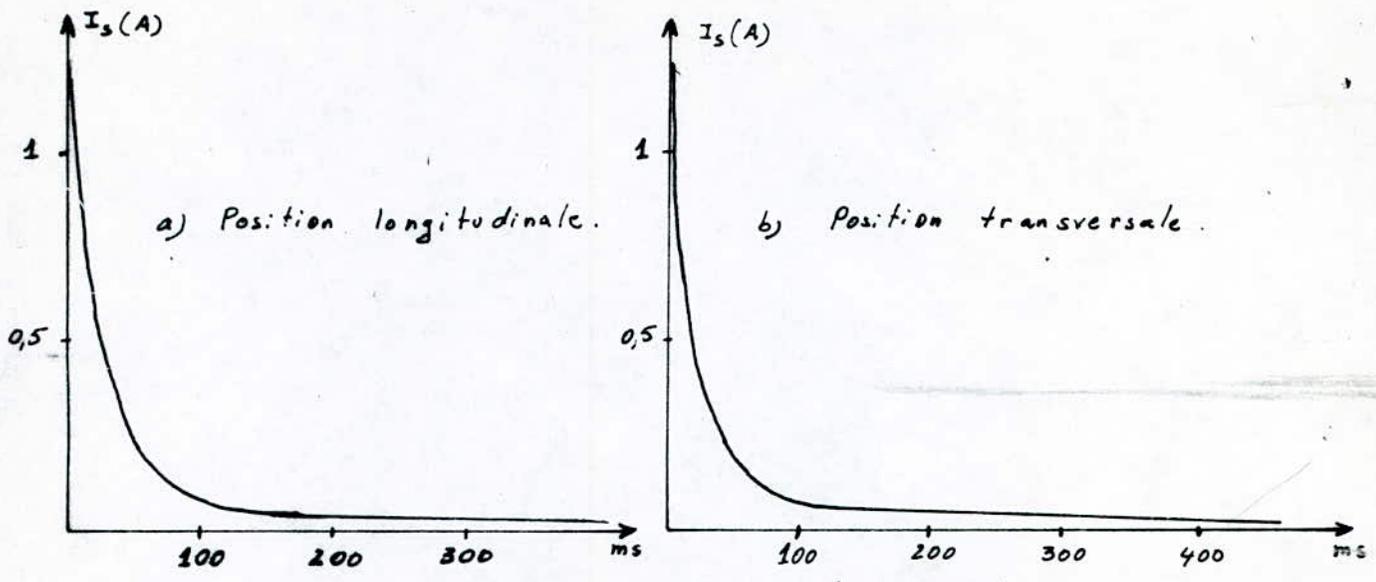
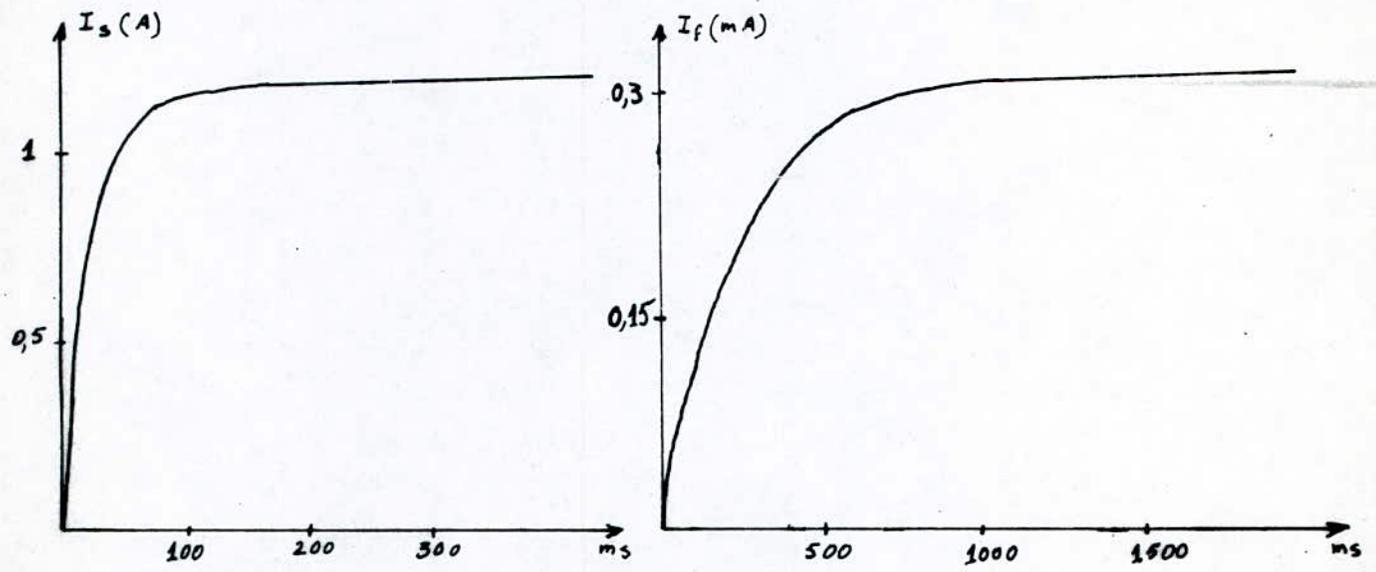
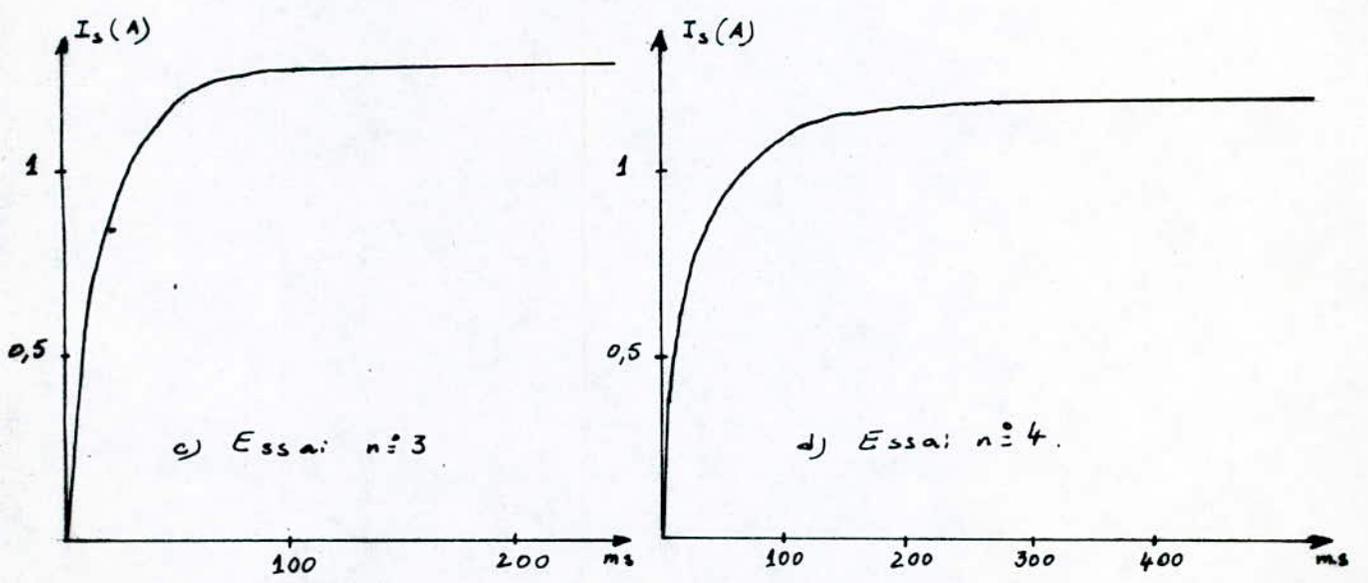


Fig. II 8. Relevés du courant d'induit lors de l'essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt.



a) Essai n°1                      b) Essai n°2.



c) Essai n°3                      d) Essai n°4.

Fig II 9. Relevés des courants lors des essais individuels.

C H A P I T R E      I I I

---

E T U D E      P R A T I Q U E

---

ETUDE PRATIQUE :

Pour illustrer les différentes méthodes d'essais de détermination des paramètres, on a effectué quelques essais sur une machine synchrone à pôles saillants dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$P_1 = 2 \text{ ( nombre de paires de pôles )}.$$

$$S_n = 2,4 \text{ kW}$$

$$U_n = 380 \text{ V montage étoile , } I_n = 3,6 \text{ A.}$$

$$U_n = 220 \text{ V montage triangle , } I_n = 6,25 \text{ A.}$$

$$\cos \varphi_n = 0,8.$$

$$J_n = 0,6 \text{ A.}$$

$$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$$

Pour pouvoir étudier l'évolution des paramètres de la machine synchrone en fonction de la vitesse, certains essais effectués à la vitesse nominale ont été repris à des vitesses inférieures ( 1207, 862 et 517 trs/mn ) et l'exploitation de ces derniers sera la même qu'en régime nominal.

I - MESURE DES PARAMETRES A PARTIR D'ESSAIS EFFECTUES EN REGIME PERMANENT :

1/ Détermination de  $X_d$  et  $K_c$  à partir de l'essai à vide et de l'essai en court circuit :

a) Essai à vide : (Chap. III. I.2)

$N(\text{tr/mn})$	$J(\text{A})$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8
1500	$E_s(\text{V})$	0	60,7	121	174	217	244	260	272	-	282
1207	$E_s(\text{V})$	0	51,7	103	140	165	186	200	210	214	-
867	$E_s(\text{V})$	0	35,5	71,5	96	116	133	144	152	155	-
517	$E_s(\text{V})$	0	19	37,5	53	68	78	84,5	89	-	95

b) Essai en court circuit :

$J$ (A)	0	0,15	0,3	0,345
$I_{cc}$ (A)	0	1,56	3,13	3,60

La caractéristique  $I_{cc} = f(j)$  est invariante lorsque la vitesse varie.

c) Détermination du rapport de court circuit :

$$K_c = \frac{j_0}{j_{cc}}$$

$j_0$  = Courant d'excitation correspondant à une tension à vide d'induit assignée.

$j_{cc}$  = Courant d'excitation correspondant à une tension d'induit assignée en c/c.

$$K_{cc} = \frac{1,41}{0,349} = 1,19$$

d) Détermination de  $X_d$  :

$N$ (tr/mn)	1500	1207	867	517
$X_d$ ( $\Omega$ )	58,17	49,57	34,20	18,00

2/ DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE POTIER A PARTIR DES ESSAIS A VIDE , EN COURT CIRCUIT ET EN DEWATTE :

a) Essai en dewatté: (chap. II . I . 3) .

Pour  $I = 2A$

J (A)	0,22	0,24	0,26	0,28	0,35
V (v)	30,5	41	54	69,8	110

0,42	0,55	0,71
144	198	235

b) Determination de  $\alpha$  et  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{\lambda I}{I} = \frac{20,5}{2} = 10,25 \Omega$$

$$\alpha = \frac{\alpha I}{I} = \frac{0,158}{2} = 0,079$$

$$\lambda = 10,25 \Omega ; \alpha = 0,079$$

3/ ESSAI A FAIBLE GLISSEMENT : (chap. II . I . 4)

$$I_{\max} = 1,09 A \quad V_{\max} = 41,57 v$$

$$I_{\min} = 0,69 A \quad V_{\min} = 41 v$$

- Determination de  $X_q$  et  $X_d$  :

$$X_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}} = \frac{41,57}{0,69} = 60,25 \Omega$$

$$X_q = \frac{V_{\min}}{I_{\max}} = \frac{41}{1,09} = 37,61 \Omega$$

$$X_d = 60,25 \Omega \quad X_q = 37,61 \Omega$$

4/ ESSAI D'EXCITATION NEGATIVE : (Chap. II. I. 5)

$$j = 0,087 \text{ A}$$

$$V = 113,6 \text{ v}$$

-Determination de  $X_q$  :

$$X_q = X_d \cdot \frac{V}{V+E}$$

Pour  $j = 0,087 \text{ A}$  , la f.e.m correspondante tirée à partir de la courbe de l'essai à vide donne :  $E_s = 53,5 \text{ v}$ .

$$X_q = \frac{58,17 \cdot 113,6}{113,6 + 53,5} = 39,55 \ \Omega$$

$$X_q = 39,55 \ \Omega$$

5/ ESSAI D'ALIMENTATION EN MONOPHASE DES 3 PHASES : (chap. II. I. 6)

Le relevé a donné :

I (A)	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	Val. moy.
V (v)	47,0	50,3	52,7	56,0	58,0	
P (w)	108,1	123,8	135,0	151,9	165,6	
$Z_o$ ( $\Omega$ )	4,90	4,93	4,88	4,91	4,83	4,89
$R_o$ ( $\Omega$ )	3,52	3,57	3,47	3,51	3,45	3,50
$X_o$ ( $\Omega$ )	3,41	3,40	3,43	3,43	3,38	3,41

6/ ESSAI DE COURT CIRCUIT PERMANENT ENTRE DEUX CONDUCTEURS DE PHASE ET LE POINT NEUTRE. (Chap. II. I.7)

Le relevé a donné les résultats suivants :

I (A)	2,5	3,0	4,0	5,1	Val. Moy.
U (V)	10,7	12,8	17,1	21,7	
P (w)	14,37	22,90	41,50	66,90	
Q (Var)	12,58	16,70	28,31	47,20	
$R_o$ ( $\Omega$ )	4,51	4,67	4,81	4,70	4,67
$X_{o1}$ ( $\Omega$ )	4,28	4,27	4,28	4,25	4,27
$X_o$ ( $\Omega$ )	3,95	3,41	3,28	3,32	3,49

$X_{o1}$  = Reactance homopolaire en ne tenant pas compte des harmoniques.

$X_o$  = Reactance homopolaire en tenant compte des harmoniques.

Comparativement à l'essai précédent, les valeurs de  $X_o$  sont approximativement égales.

Remarquons cependant qu'en ne tenant pas compte des harmoniques, on commet une erreur de 11% (différence entre  $X_{o1}$  et  $X_o$ ).

7/ ESSAI DE ROTATION INVERSE : (Chap. II. I. 9)

Le relevé a donné :

I (A)	1,25	1,65	2,05	2,5	3,25	Val. moy.
V (V)	15	20	25	30	40	
P (w)	14,5	28	45	66	113	
$Z_i$ ( $\Omega$ )	12,30	12,00	12,20	12,12	12,00	12,12
$R_i$ ( $\Omega$ )	3,50	3,52	3,57	3,43	3,09	3,42
$X_i$ ( $\Omega$ )	11,79	11,45	11,65	11,62	11,59	11,62

II - MESURE DES PARAMETRES A PARTIR D'ESSAIS EFFECTUES EN REGIME TRANSITOIRES ET SUBTRANSITOIRES :

1/ ESSAI DE COURT CIRCUIT TRIPHASE BRUSQUE : (chap. II. II. 2)

\* N = 1 500 tr/mn.

Pour  $V_0 = 54,85$  v et  $I_m = 1,51$  A<sub>max</sub> le relevé donne:

t (ms)	5	15	25	35	45
$I'_m + I''_m$ (A)	8,20	5,45	3,35	2,42	1,92

55	65
1,50	1,19

De la figure(III.1), on releve :

$$I_m^I(o) = 5,5 \text{ A} \quad I_m^{II}(o) = 4,5 \text{ A}$$

$$*N = 1\ 207 \text{ tr/mn.}$$

$$\text{- Pour } V_O = 33\text{v} \quad \text{et} \quad I_m = 1,13 \text{ A}_{\text{max.}}$$

$t \text{ (ms)}$	0	6,2	12,4	20	37,25
$I_m^I + I_m^{II} \text{ (A)}$	7,1	5,39	4	3,04	1,91

62	86,8
1,07	0,59

De la figure(III.2), on releve :

$$I_m^I(o) = 4,55 \text{ A} \quad I_m^{II}(o) = 2,55 \text{ A}$$

$$*N = 867 \text{ tr/mn.}$$

$$\text{Pour } V_O = 24\text{v} \quad \text{et} \quad I_m = 1,13 \text{ A}$$

$t \text{ (ms)}$	0	8,7	17,4	26,1	34,8	60,9
$I_m^I + I_m^{II} \text{ (A)}$	6,6	4,83	3,6	2,8	2,05	1,06

De la figure(III.3), on releve :

$$I_m^I(o) = 5 \text{ A} \quad I_m^{II}(o) = 1,6 \text{ A}$$

- Détermination des paramètres  $X_d^I$ ,  $X_d^{II}$ ,  $T_d^I$  et  $T_d^{II}$  :

D'après les relations déjà établies, on aura :

$N$ (tr/mn)	1500	1207	867
$X_d^I$ ( $\Omega$ )	11,07	8,21	5,54
$X_d^{II}$ ( $\Omega$ )	6,74	5,67	4,39
$T_d^I$ (ms)	42,5	42,5	38,5
$T_d^{II}$ (ms)	12,5	9,25	13,5

2/ ESSAIS DE RETABLISSEMENT DE LA TENSION : (chap. II. II. 1)

D'après le tracé de la figure II. 2, on établit les tableaux suivants:

\*  $N = 1\ 500$  tr/mn.

$U_{mp} = 168$  v.

$I_{ccm} = 1,81$  A.

$t$ (ms)	0	10	20	30	40	50
$U_{mp} - U_m$ (v)	149	138	127	122,5	116	110,5

90	130	170	210	250	290
98	86	75	65	57	51

• De la figure (III.4) on relève :

$$U_m^I (0) = 132 \text{ v.}$$

$$U_m^{II} (0) = 17 \text{ v.}$$

\*N = 1 207 tr/mm.

$U_{mp} = 117,5 \text{ v}$

$I_{ccm} = 2,07 \text{ A}$

$t \text{ (ms)}$	0	6,2	12,4	18,6	43,4
$U_{mp} - U_m \text{ (v)}$	100	93	88	84	75

68,2	117,8	167,4	211	266,6
69,9	58	50	42,5	36

De la figure(III.5), on releve :

$$U_m^I(o) = 86,5 \text{ v}$$

$$U_m^{II}(o) = 13,5 \text{ v}$$

\*N = 867 tr/mm.

$U_{mp} = 81 \text{ v}$

$I_{ccm} = 1,52 \text{ A}$

$t \text{ (ms)}$	0	8,7	17,4	52,2
$U_{mp} - U_m \text{ (v)}$	70	65	61	53

87	156,6	226,2	295,8
46	37,8	30	24

De la figure(III.6), on releve :

$$U_m^I(o) = 62 \text{ v.}$$

$$U_m^{II}(o) = 8 \text{ v.}$$

$$*N = 517 \text{ tr/mn.}$$

$$U_{mp} = 48 \text{ v}$$

$$I_{ccm} = 1,45 \text{ A.}$$

$t \text{ (ms)}$	0	14,5	29	87	145
$U_{mp} - U_m \text{ (V)}$	40	36	33	26,5	22

203	261	319	377
18	14,5	12	9,6

De la figure (III. 7) , on releve :

$$U_m' = 36 \text{ v.}$$

$$U_m'' = 4 \text{ v.}$$

-Determination des parametres  $X_d'$  ,  $X_d''$  ,  $T_{do}'$  ,  $T_{do}''$  :

D'après les relations déjà établies :

$N \text{ (tr/mn)}$	1500	1207	867	517
$X_d' \text{ (-r)}$	11,48	8,64	7,18	4,62
$X_d'' \text{ (-r)}$	6,06	4,88	4,16	3,08
$T_{do}' \text{ (ms)}$	300	302	306	294
$T_{do}'' \text{ (ms)}$	18	16	15,5	20

3/ ESSAI DE DECROISSANCE DU COURANT D'EXCITATION AVEC L'ENROULEMENT D'INDUIT A CIRCUIT OUVERT : (Chap. II. II. 3)

D'après le tracé de la figure II 4 on releve les tableaux suivants :

\* N = 1 500 tr/mn.

$t$ (ms)	0	20	40	60	80	100
$U_m - U_{res}$ (V)	282,7	265,2	250	227,7	215,2	197,7

120	140	160	180	200	220
187,7	172,7	162,7	147,7	140	127,7

240	260	280	300
122,7	112,7	106,5	97,7

\* N = 1 207 tr /mn.

$t$ (ms)	0	6,2	31,1	56	80,9	105,8
$U_m - U_{res}$ (V)	230,6	225,6	208,1	188,1	173,1	158,1

130,7	155,6	180	205,4	230,3	255,2
145,6	140,6	133,1	108,1	100,6	93,1

280,1	305
85,6	78,1

\* N = 867 tr/mn.

t (ms)	0	17,4	52,2	87	121,8	156,6
$U_m - U_{res}$ (V)	161,1	156,1	138,6	128,6	107,4	93,6

191,4	226,2	261	295,8
83,6	73,6	66,1	58,6

\* N = 517 tr/mn.

t (ms)	0	14,5	72,5	130,5	188,5
$U_m - U_{res}$ (V)	98,18	93,2	75,2	62,2	50,2

246,5	304,5
42,2	33,9

- Determination de la constante de temps  $T'_{do}$ : Fig. (III 8):

N (tr/mn)	1500	1207	867	517
$T'_{do}$ (ms)	285	285	292	293

4/ ESSAI DE DECROISSANCE DU COURANT D'EXCITATION AVEC L'ENROULEMENT D'INDUIT EN COURT CIRCUIT : (Chap. II. II. 4)

D'après le relevé de la figure **II.5**, on relève les tableaux suivants :

\* N = 1 500 tr/mn.

$I_{mp} = 5,4$  A

t (ms)	5	25	45	65	85
$I_{mp} - I_{res}$ (A)	4,880	2,786	1,586	0,986	0,586

\* N = 1 207 tr/mn.

$I_{mp} = 5,1$  A

t (ms)	6,225	31,1	45,6	80,9	105,8
$I_{mp} - I_{res}$ (A)	4,32	2,172	1,07	0,522	0,272

\* N = 867 tr/mn.

$I_{mp} = 4,6$  A

t (ms)	8,7	43,5	78,3	113,1	147,9
$I_{mp} - I_{res}$ (A)	3,9	1,5	0,6	0,3	0,1

\* N = 517 tr/mn.

$$I_{mp} = 4,2 \text{ A}$$

$t$ (ms)	14	40	68	96
$I_{mp} - I_{res}$ (A)	3,47	1,472	0,772	0,372

- Determination de la constante de temps  $T_d'$  :

Des graphes de la figure (III 9), on relève  $T_d'$  comme étant les temps nécessaires pour que la valeur maximale  $I - I_{res.}$  décroisse de  $1/e$  :

$N$ (tr/mn)	1500	1207	867	517
$T_d'$ (ms)	38	35,8	38,7	39,15

5/ ESSAIS D'APPLICATION BRUSQUE DE L'EXCITATION AVEC L'ENROULEMENT D'INDUIT A CIRCUIT OUVERT : (Chap. II. II. 5)

D'après les relevé de la figure II.6 on construit les tableaux suivants:

\* N = 1 500 tr/mn.

$$V_{mp} = 108,7 V_{max}$$

$t$ (ms)	5	25	45	85	125
$V_{mp} - V$ (V)	106,5	99,1	93	82,4	71,3

165	205	245	285
62,3	55,7	47,9	42,3

\* N = 1 207 tr/mm.

$$V_{mp} = 81,5 V_{max.}$$

t (ms)	10	34,9	59,8	109,6	159,4
V <sub>mp</sub> -V (V)	79,2	72,8	66,5	55,9	46,9

209,2	259	308,8
41	33,5	27,5

\* N = 867 tr/mm.

$$V_{mp} = 58,7 V$$

t (ms)	0	8,7	43,5	78,3	147,9
V <sub>mp</sub> -V (V)	58,7	56,1	50,4	44,3	35,8

217,4	287,1
28	21,8

\* N = 517 tr/mm.

$$V_{mp} = 40,5 V_{max.}$$

t (ms)	14,5	72,5	130,5	188,5	246,5	304,5
V <sub>mp</sub> -V (V)	39	32,1	26,3	21,6	17,6	14,4

- Détermination de la constante de temps  $T'_{d0}$  :

Des graphes de la figure (III 10), on a relevé  $T'_{d0}$ , temps nécessaire pour que la valeur maximale de  $(V_{mp} - V)$  décroisse de  $1/e$ .

N (tr/mn)	1500	1207	867	517
$T'_{d0}$ (ms)	304	290	300	297

6/ ESSAIS D'APPLICATION BRUSQUE DE L'EXCITATION AVEC L'ENROULEMENT D'INDUIT EN COURT CIRCUIT : (Chap. II. II. 6)

D'après le relevé représenté sur la figure II.7, on construit les tableaux suivants à différentes vitesses :

\* N = 1 500 tr/mn.

$$I_{mp} = 3,83 A_{max.}$$

t (ms)	0	10	30	50	70
$I_{mp} - I$ (A)	3,83	3,10	1,75	1,03	0,63

\* N = 1 207 tr/mn.

$$I_{mp} = 3,4 A_{max.}$$

t (ms)	0	7,5	32,4	57,3	82,2
$I_{mp} - I$ (A)	3,4	2,75	1,5	0,72	0,39

\* N = 867 tr/mn.

$$I_{mp} = 2,93 A_{max.}$$

$t$ (ms)	0	30	64,8	99,6	134,4
$I_{mp} - I$ (A)	2,93	1,4	0,59	0,20	0,10

\* N = 517 tr/mn.

$$I_{mp} = 1,77 A_{max.}$$

$t$ (ms)	0	5	63	121
$I_{mp} - I$ (A)	1,77	1,54	0,36	0,08

- Determination de la constante de temps  $T'_d$  :

Des graphes de la figure (III 11) , on a relevé  $T'_d$  , temps necessaire pour que la valeur maximale ( $I_{mp} - I$ ) decroisse jusqu'à 1/e de sa valeur.

N (tr/mn)	1500	1207	867	517
$T'_d$ (ms)	39	37,5	40	38,25

III - MESURE DE PARAMETRES A PARTIR D'ESSAIS STATIQUES :

1/ MESURE DES RESISTANCES A CHAUD : (Chap. II. I. 1)

a) Resistance d'induit :

	phase a			phase b			phase c		
I (A)	1,77	2,34	3,98	1,83	2,05	4,00	1,85	2,05	4,08
U (V)	5,7	7,33	13,08	6	6,64	13,04	6,02	6,62	14,69
$R_s$ ( $\Omega$ )	3,22	3,13	3,28	3,27	3,24	3,26	3,25	3,23	3,22
$R_{moy}$ ( $\Omega$ )	$R_a = 3,21$			$R_b = 3,25$			$R_c = 3,23$		

On adoptera comme resistance d'induit la valeur moyenne des trois resistances:

$$R_s = \frac{R_a + R_b + R_c}{3} = \frac{3,21 + 3,25 + 3,23}{3}$$

$$R_s = 3,23 \Omega$$

b) Resistance d'inducteur :

I (A)	0,26	0,42	0,58	Val. moy.
U (V)	56	93	131	
$R_f$ ( $\Omega$ )	215,4	221,4	225,9	220,9

2/ ESSAIS D'APPLICATION DE LA TENSION :

a) Mesure en position longitudinale : (Chap. II . III . 1)

U (V)	19,5	33,5	47	Val. moy.
I (A)	1,27	2,19	3,04	
P (W)	13	36,25	76,25	
$R_d''$ ( $\Omega$ )	4,03	3,78	4,13	3,98
$Z_d''$ ( $\Omega$ )	7,68	7,65	7,73	7,69
$X_d''$ ( $\Omega$ )	6,53	6,65	6,53	6,57

$$X_d'' \text{ moy.} = \frac{6,53 + 6,65 + 6,53}{3} = 6,57 \Omega$$

$$X_d'' = 6,57 \Omega .$$

b) Mesure en position transversale :

U (V)	64	67	157	Val. moy
I (A)	1,01	1,09	2,57	
P (W)	12,5	15	75	
$R_q''$ ( $\Omega$ )	6,13	6,31	5,91	6,12
$Z_q''$ ( $\Omega$ )	31,68	30,73	31,15	31,19
$X_q''$ ( $\Omega$ )	31,08	30,08	30,58	30,58

$$X_q'' \text{ moy.} = \frac{31,08 + 30,08 + 30,58}{3} = 30,58 \Omega \quad X_q'' = 30,58 \Omega$$

c) Mesure en position quelconque du rotor : (chap. II. III. 2)

$i ; j$	1 ; 2	2 ; 3	1 ; 3
$U$ (V)	90	46	64
$I$ (A)	2,57	0,76	2,51
$P$ (w)	70	7,5	57,5
$J$ (A)	1,2	0,02	0,14
$Z_d''$ ( $\Omega$ )	17,51	30,26	12,75
$R_d''$ ( $\Omega$ )	5,29	6,49	4,56
$X_{ij}$ ( $\Omega$ )	16,69	29,55	11,90

$$X_{\text{moy}}' = \frac{X_{12} + X_{23} + X_{13}}{3} = \frac{16,69 + 29,55 + 11,9}{3} = 19,38 \Omega$$

$$X = \frac{2}{3} \sqrt{X_{12} (X_{12} - X_{23}) + X_{23} (X_{23} - X_{31}) + X_{13} (X_{13} - X_{12})}$$

$$= 11,82 \Omega$$

$$X_d'' = X_{\text{moy}}' - \Delta X = 19,38 - 11,82 = 7,56 \Omega$$

$$X_q'' = X_{\text{moy}}' + \Delta X = 19,38 + 11,82 = 31,20 \Omega$$

$$X_d'' = 7,56 \Omega$$

$$X_q'' = 31,20 \Omega$$

IV - MESURE DES PARAMETRES A PARTIR D'ESSAIS FREQUENTIELS.

1/ Essais indiciels : (Chap. II. IV. 2)

a) Essai n° 1 :

$$E = 6,66 \text{ v}$$

$$I_s = 1,48 \text{ A}$$

La resistance du circuit est :

$$R'_S = \frac{E}{I_s} = \frac{6,66}{1,48} = 4,5 \text{ } \Omega$$

Cette resistance est la somme de la resistance d'induit et celle interne de la source appliquée ainsi que les resistances additionnelles du circuit. On releve le tableau de valeurs suivant:

$t$ (ms)	0	2,5	5	7,5	10
$I_s$ (A)	0	0,643	0,943	1,085	1,145

20	30	50	70	90
1,225	1,245	1,276	1,304	1,327

L'exploitation du tracé figure ( III 12 ) :

$$Y_0 = 1,48 \text{ A}$$

$$T_1 = 139 \text{ ms.}$$

$$Y_1 = 0,29 \text{ A}$$

$$T_2 = 3,25 \text{ ms.}$$

$$Y_2 = 1,19 \text{ A}$$

$$T_{Ad 0} = 29,85 \text{ ms.}$$

$$L_{Ad} = 0,134 \text{ H.}$$

$$T_{D 0} = 112,4 \text{ ms.}$$

$$K_{AD}^2 = 0,865 \text{ .}$$

b ) Essai n° 2 :

$$E = 85,25 \text{ v}$$

$$I_f = 387,5 \text{ mA.}$$

On relève le tableau suivant :

$t \text{ (ms)}$	0	10	20	30	40
$I_f \text{ (mA)}$	0	66,7	102,6	123,7	137,4

60	80	100	120	140
155,8	169,8	182,2	193,7	204,5

160	180	200
214,7	224,3	233,4

L'exploitation du tracé figure ( III 13) donne :

$$Y_0 = 387,5 \text{ mA}$$

$$T_1 = 348,5 \text{ ms.}$$

$$Y_1 = 273,5 \text{ mA}$$

$$T_2 = 13,75 \text{ ms.}$$

$$Y_2 = 114 \text{ mA.}$$

$$T_{FO} = 250 \text{ ms.}$$

$$T_{DO} = 112,25 \text{ ms.}$$

$$K_{F,D}^2 = 0,829$$

c ) Essai n° 4 :

$$E = 8,775 \text{ v}$$

$$I_s = 1,95 \text{ A}$$

$$\longrightarrow \bar{R}'_S = 4,5 \Omega$$

On relève le tableau suivant :

$t \text{ (ms)}$	0	2,5	5	7,5	10
$I_s \text{ (A)}$	0	0,332	0,579	0,768	0,918

20	30	40	50	60
1,298	1,514	1,653	1,748	1,812.

La figure ( III 14 ) donne :

$$Y_0 = 1,95 \text{ A} \quad T_1 = 26,25 \text{ ms.}$$

$$Y_1 = 1,36 \text{ A} \quad T_2 = 5,75 \text{ ms.}$$

$$Y_2 = 0,59 \text{ A}$$

$$T_{Aq0} = 20,06 \text{ ms.} \quad T_{Q0} = 11,95 \text{ ms.}$$

$$L_{Aq} = 90,3 \text{ mH.} \quad K_{A,Q}^2 = 0,370$$

d ) Essai n° 3 :

L'exploitation graphique de l'essai n°3 est tres difficile du fait que l'on doit tirer à partir du graphe, tracé sur le papier semi-logarithmique, trois droites ce qui fausse beaucoup la precision.

Cependant , pour calculer le coefficient  $K_{AF}^2$  on profitera de la connaissance de  $X_d'$  (parametre qui a été mesuré plusieurs fois anterieurement) pour le determiner grace à la relation :

$$\begin{aligned} X_d' &= 3/2 L_{Ad} \omega (1 - K_{AF}^2) \\ &= X_d (1 - K_{AF}^2) \end{aligned}$$

Connaissant  $X_d$  à partir de l'essai n°1 , on calcule  $K_{AF}^2$  :

$$K_{AF}^2 = 1 - \frac{X_d'}{X_d}$$

\* Exploitation des résultats :

$T_{DO}$  est donnée par l'essai n°1 et l'essai n°2. On prendra la valeur moyenne :

$$T_{DO} = 112,33 \text{ ms.}$$

La valeur moyenne de la réactance  $X_d^1$  est :

$$X_d^1 = 11,28 \ \Omega$$

$$X_d = \frac{3}{2} \omega L_{Ad} R_S^1 = 63,15 \ \Omega \quad \longrightarrow \quad K_{AF}^2 = 0,821$$

En appliquant les différentes relations déjà établies (Chap. II) :

$X_d \ (\Omega)$	63,15
$X_q \ (\Omega)$	42,55
$X_d' \ (\Omega)$	11,28
$X_d'' \ (\Omega)$	7,23
$X_q'' \ (\Omega)$	26,81

$T_{d0}' \ (\text{ms})$	250
$T_{d0}'' \ (\text{ms})$	19,21
$T_d' \ (\text{ms})$	44,75
$T_d'' \ (\text{ms})$	12,28
$T_{q0}'' \ (\text{ms})$	11,95
$T_q'' \ (\text{ms})$	7,53
$T_D \ (\text{ms})$	7,35

2/ Essai de décroissance du courant continu à l'arrêt : (Chap. II. IV. 1)

a) Position longitudinale :

$$U = 7,96 \text{ v}$$

$$I = 1,55 \text{ A}$$

$$R_S = 3,22 \ \Omega$$

$$k = 2/3$$

Le relevé a donné le tableau suivant :

$$I_0 = 1,55 \text{ A}$$

$t$ (ms)	0	8	16	24	32	40	48
$I/I_0$	1	0,620	0,517	0,426	0,354	0,295	0,252

56	64	72	80	88	96	104
0,211	0,185	0,157	0,134	0,115	0,101	0,087

112	120	128	136	144	152	160
0,078	0,068	0,062	0,056	0,0501	0,0443	0,0420

168	176	184	192	200	208	216
0,0385	0,0350	0,0320	0,0295	0,0265	0,0245	0,0236

224	232	240
0,0230	0,0220	0,0215

de la figure ( III 15) on déduit:

$$I_{10} = 0,05$$

$$I_{20} = 0,7$$

$$I_{30} = 0,25$$

$$T_1 = 285 \text{ ms}$$

$$T_2 = 40 \text{ ms}$$

$$T_3 = 2 \text{ ms}$$

b) Position transversale :

$$U = 8,68 \text{ v}$$

$$I = 1,93 \text{ A}$$

$$R = 3,22 \text{ } \Omega$$

$$k = 2/3$$

Le relevé à donné le tableau :

$$I_0 = 1,93 \text{ A}$$

$t \text{ (ms)}$	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6
$I / I_0$	1	0,97	0,95	0,93	0,9	0,88	0,85

4,2	4,8	5,4	6	6,6	7,2	7,8
0,83	0,81	0,8	0,77	0,75	0,73	0,72

8,4	9	9,6	10,2	10,8	11,4	12
0,71	0,69	0,67	0,66	0,645	0,63	0,62

16,8	21,6	26,4	31,2
0,52	0,46	0,39	0,34

de la figure (III 16) on deduit :

$$I_{10} = 0,85$$

$$T_1 = 34,14 \text{ ms}$$

$$I_{20} = 0,15$$

$$T_2 = 6,25 \text{ ms}$$

c ) Determination des parametres :

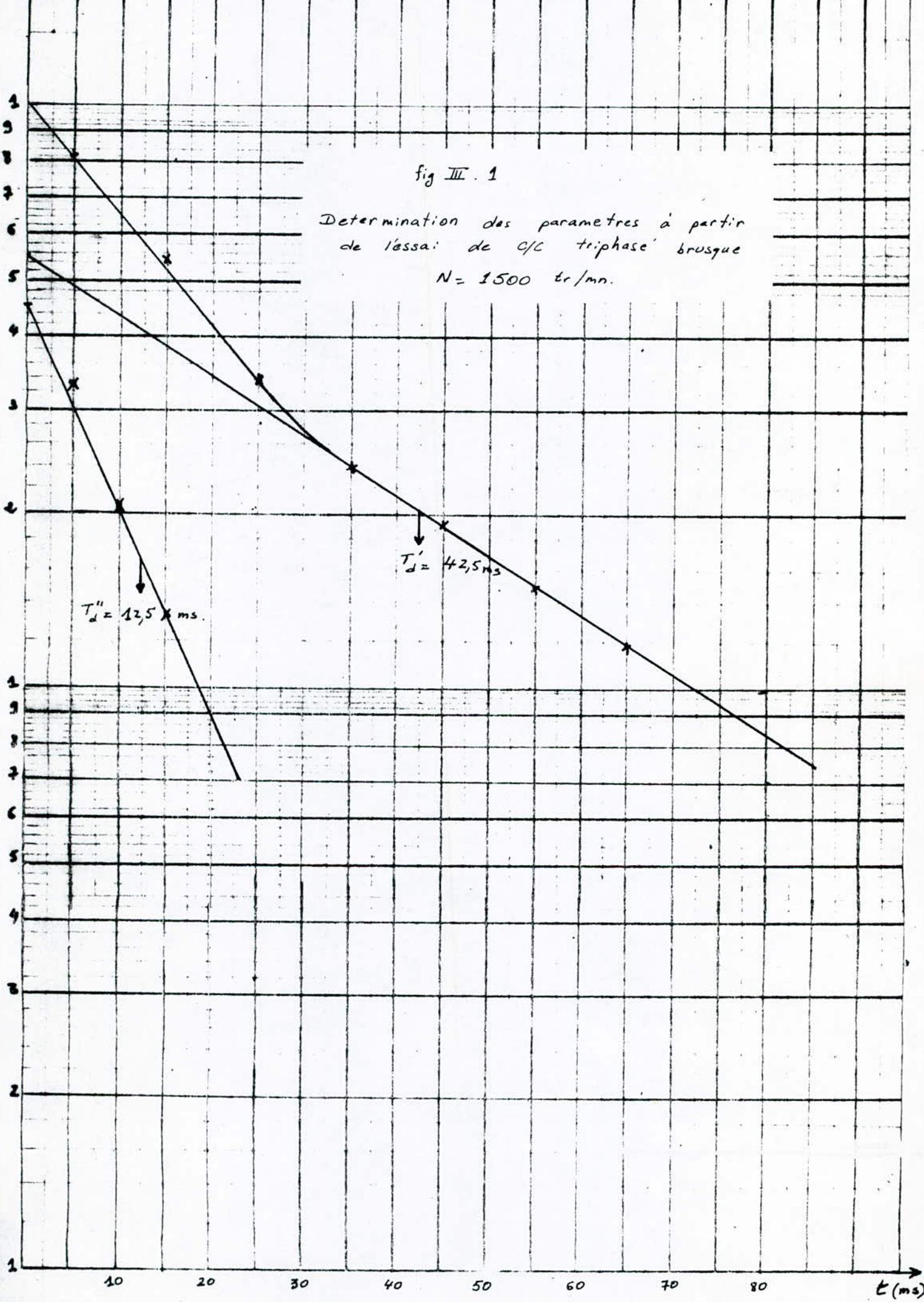
$X_d (\Omega)$	60,43
$X_d'' (\Omega)$	9,9
$T_{d0}'' (ms)$	12,1
$T_d'' (ms)$	2,62

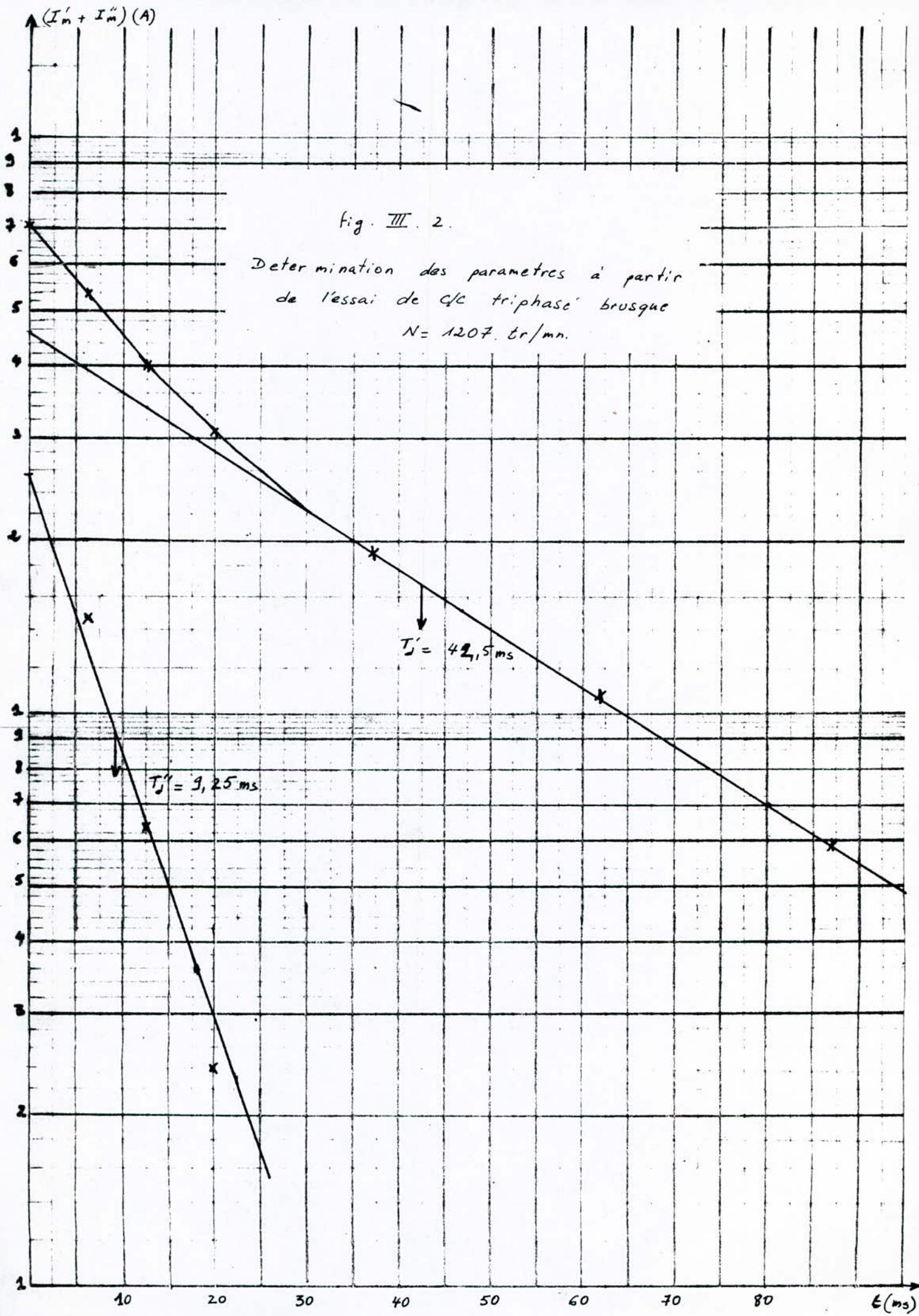
$X_q (\Omega)$	42,35
$X_q'' (\Omega)$	28,90
$T_{q0}'' (ms)$	10,43
$T_q'' (ms)$	7,1

$\Delta (I'_m + I''_m) (A)$

fig III. 1

Determination des parametres à partir  
de l'essai de C/C triphase brusque  
 $N = 1500$  tr/mn.





$(I_m' + I_m'') (A)$

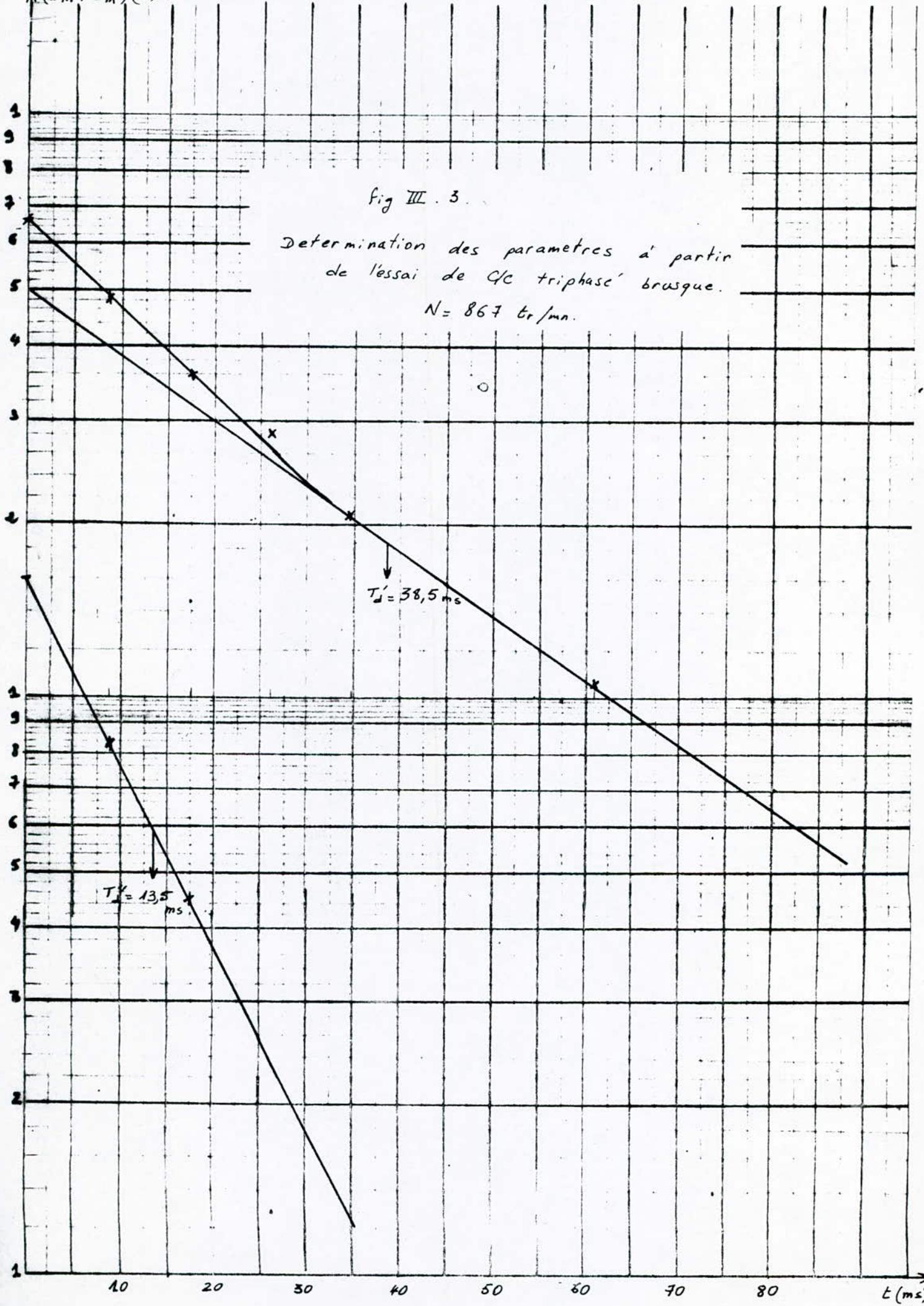


fig III. 3.

Determination des parametres a partir  
de l'essai de Cc triphase brusque.

$N = 867 \text{ tr/mn.}$

$T_d' = 38,5 ms$

$T_d'' = 13,5 ms$

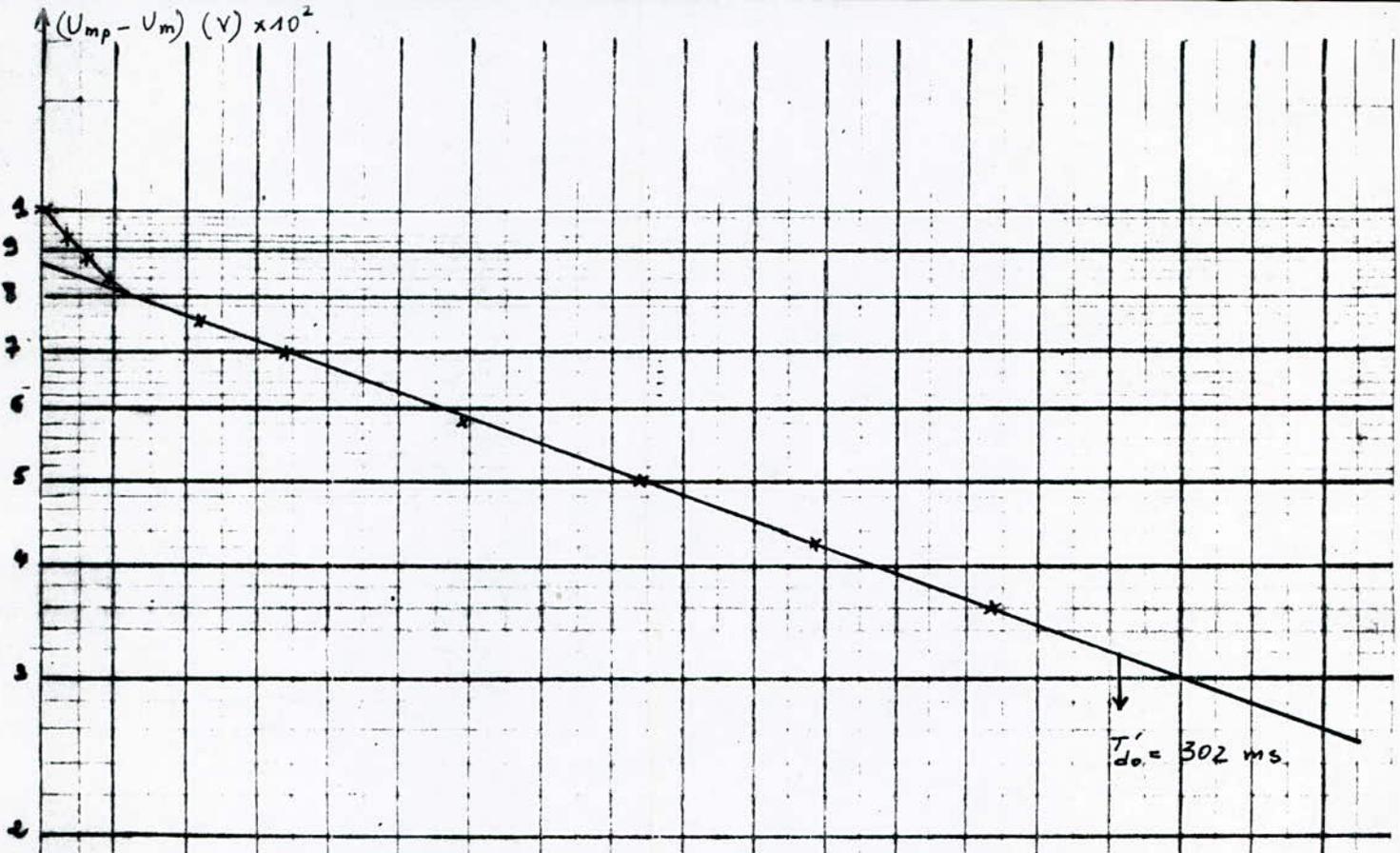
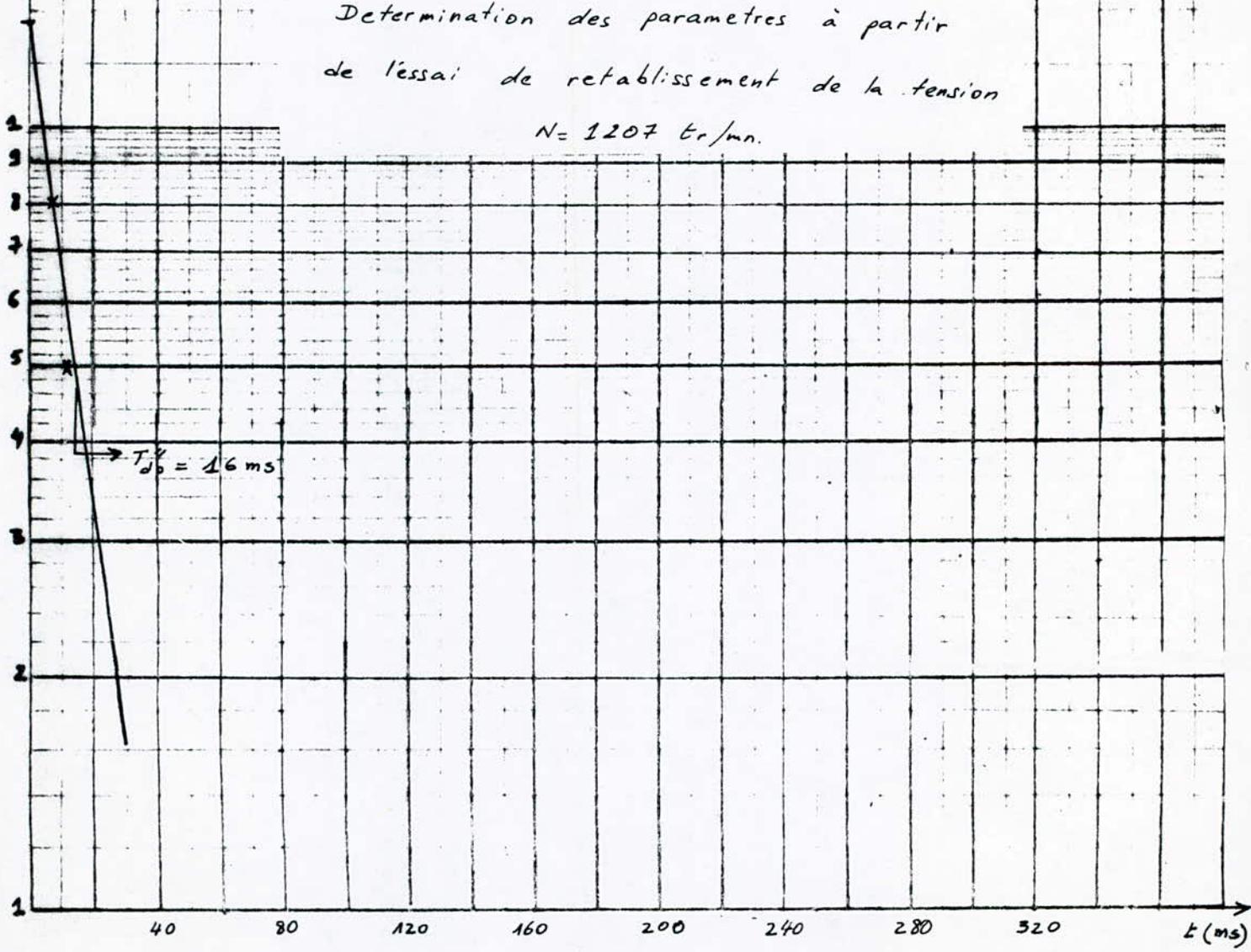


Fig. III 5.

Determination des paramètres à partir  
de l'essai de rétablissement de la tension

$N = 1207$  tr/mn.



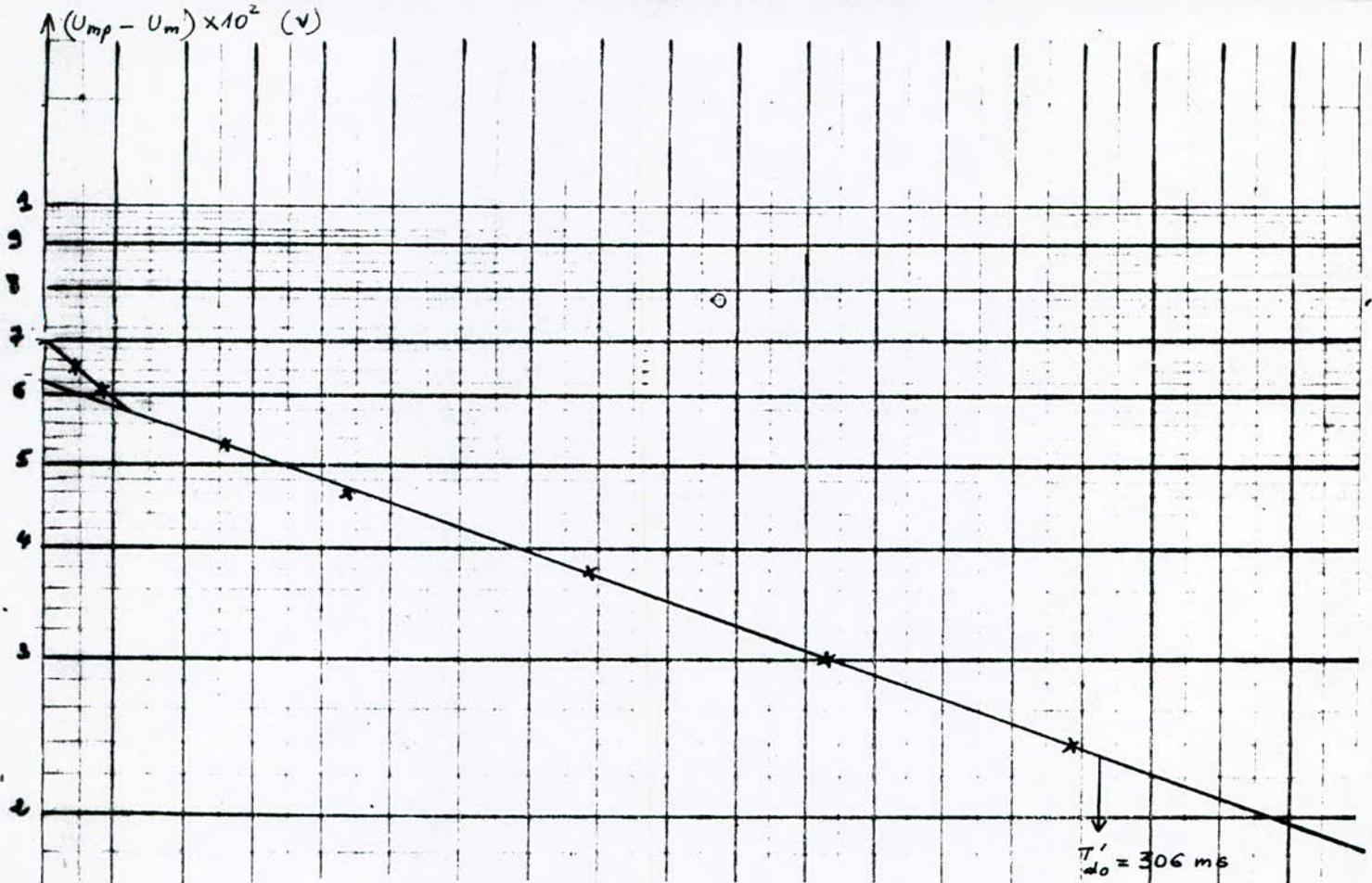
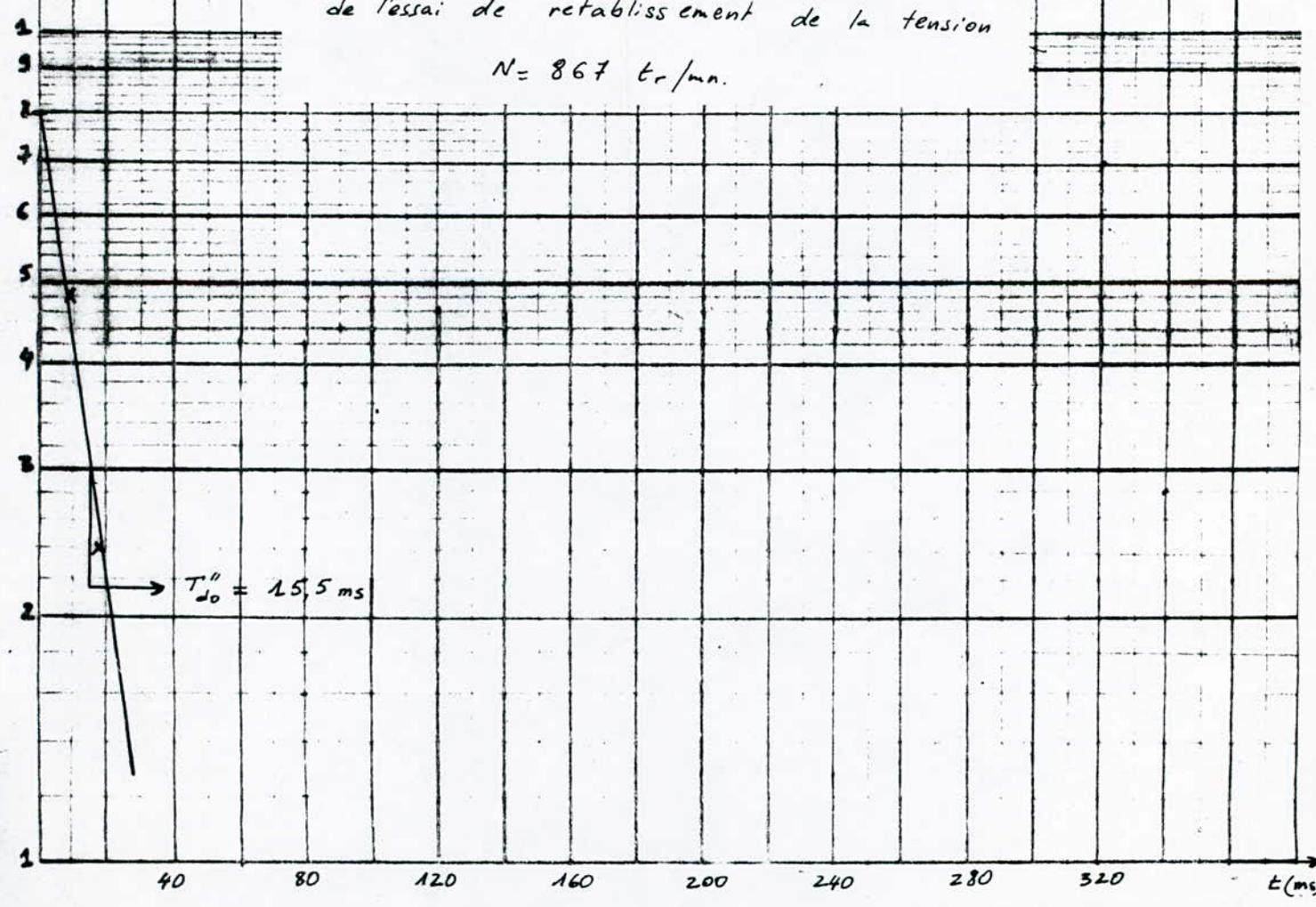
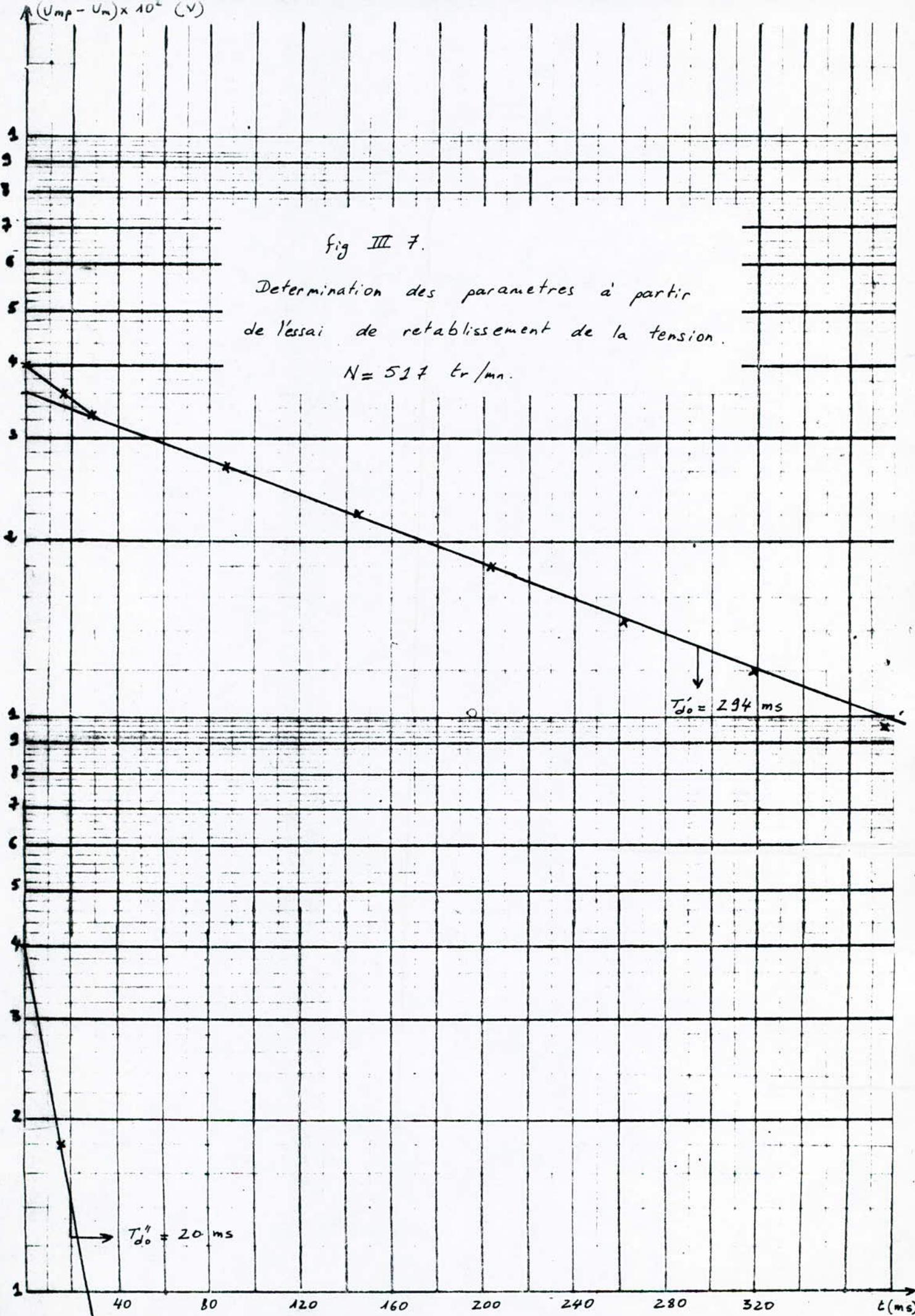


Fig III. 6.

Determination des parametres a partir de l'essai de retablissement de la tension

$N = 867 \text{ tr/mn.}$

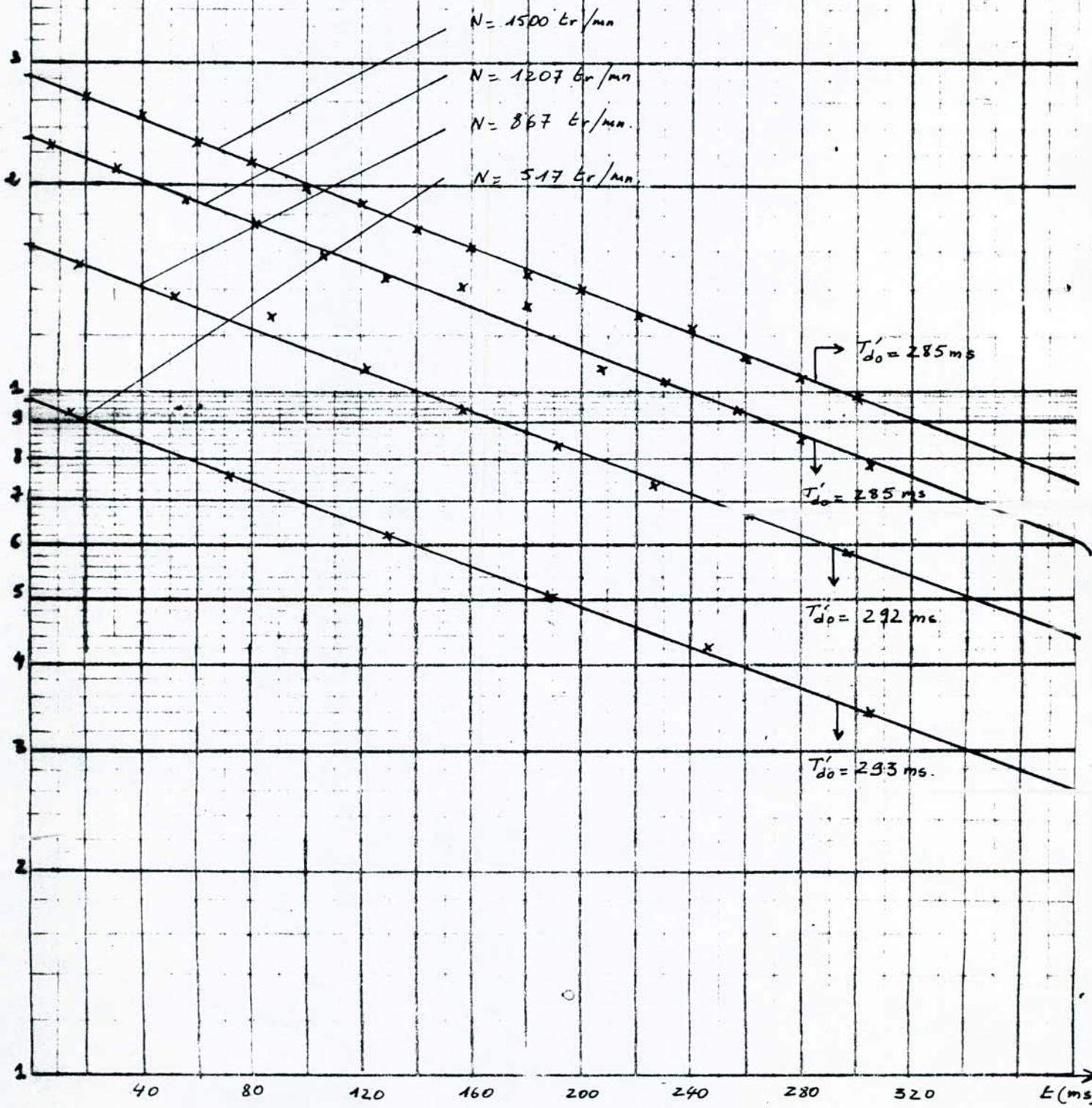




$(U_m - U_{res}) \times 10^4$  (V)

fig III. 8.

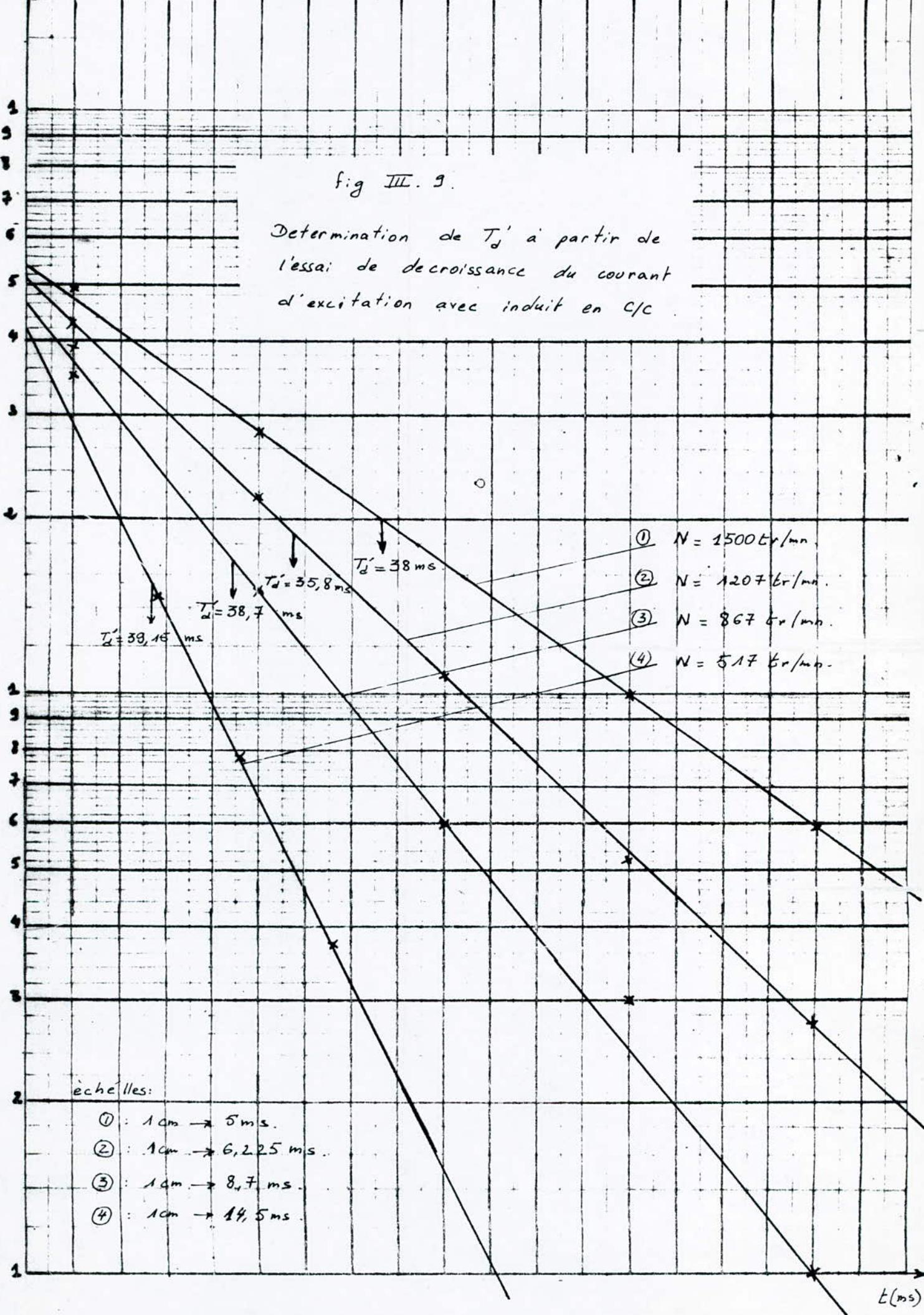
Determination de  $T'_{d0}$  à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec induit ouvert.



$(I_{mp} - I_{res}) (A)$

fig III. 9.

Determination de  $T_d'$  à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec induit en c/c



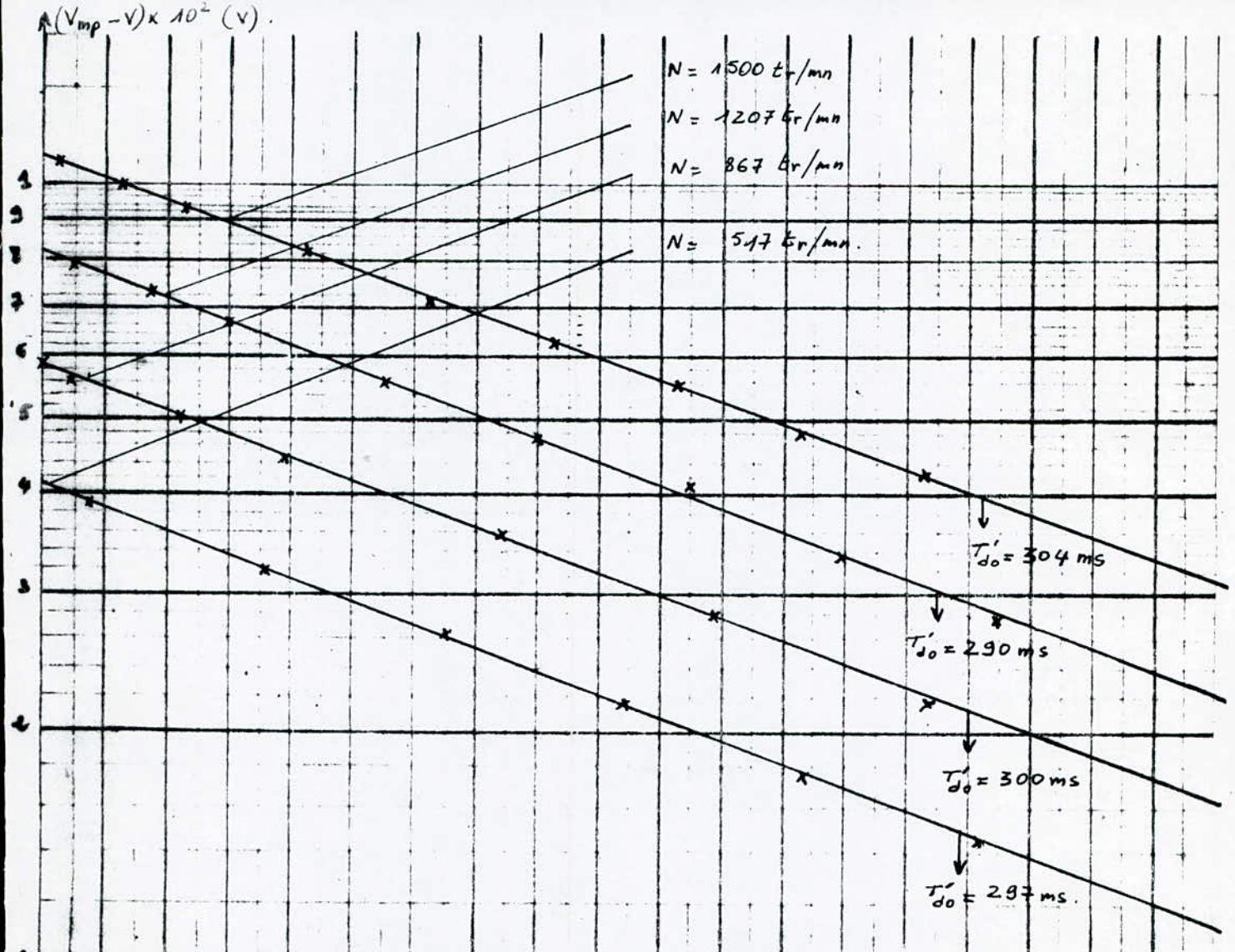


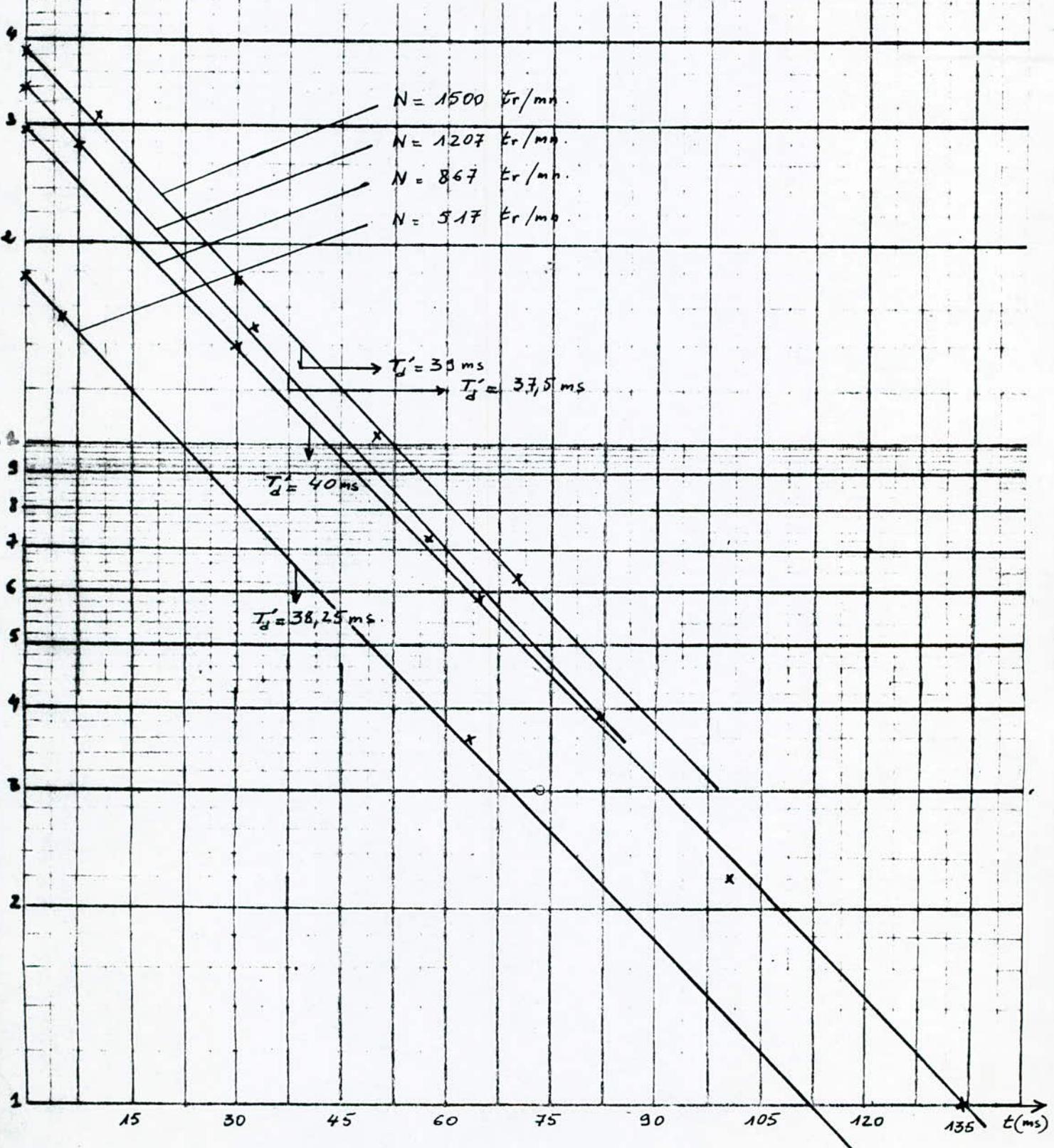
fig III. 10

Determination de  $T'_{d0}$  à partir de  
 l'essai d'application brusque de  
 l'excitation avec induit ouvert.

$(I_{mp} - I_m) (A)$

fig III.11

Determination de  $T_d'$  a partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec induit en c/c.



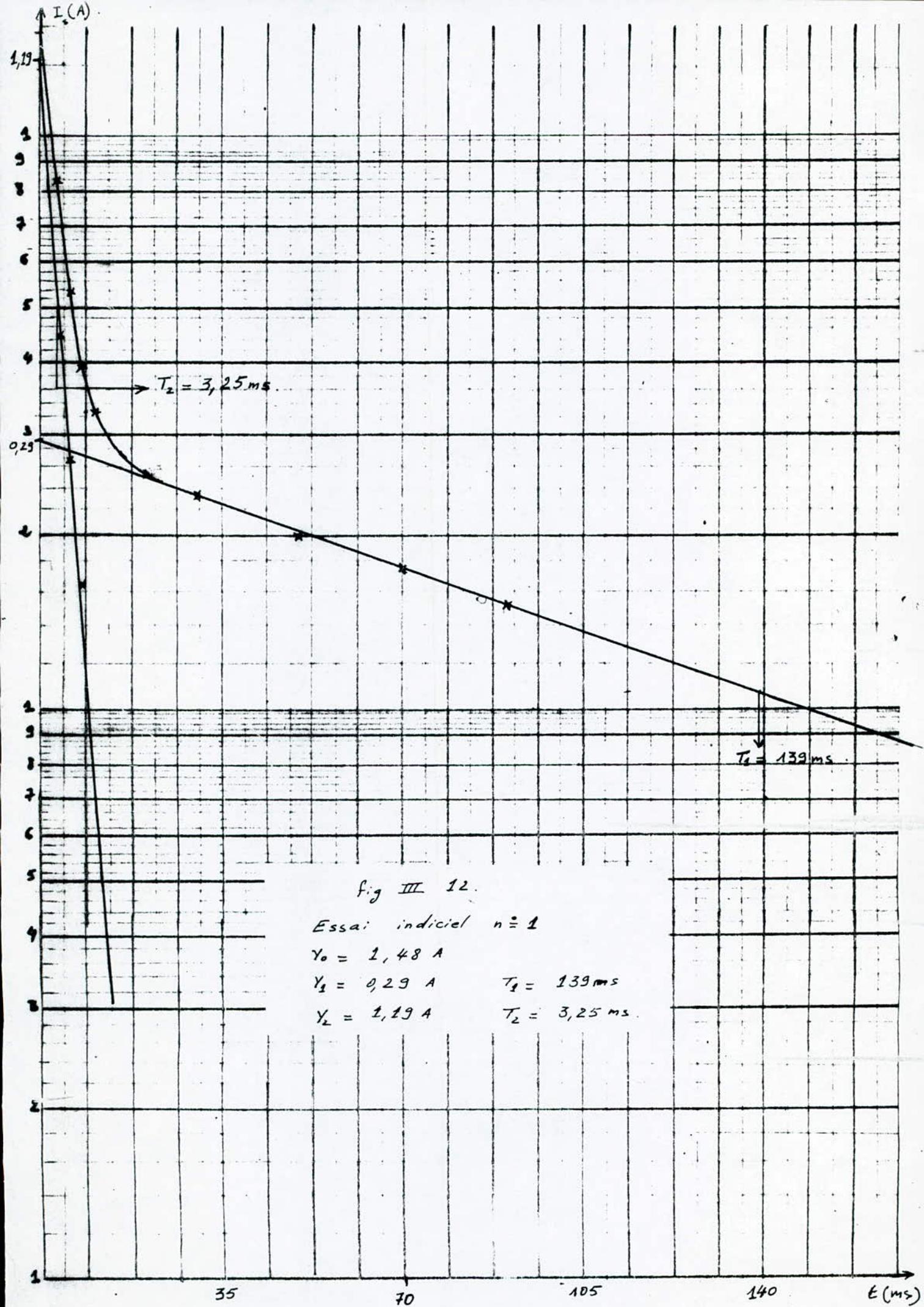


fig III 12.

Essai indiciel  $n = 1$

$Y_0 = 1,48 \text{ A}$

$Y_1 = 0,29 \text{ A}$

$Y_2 = 1,19 \text{ A}$

$T_1 = 139 \text{ ms}$

$T_2 = 3,25 \text{ ms}$

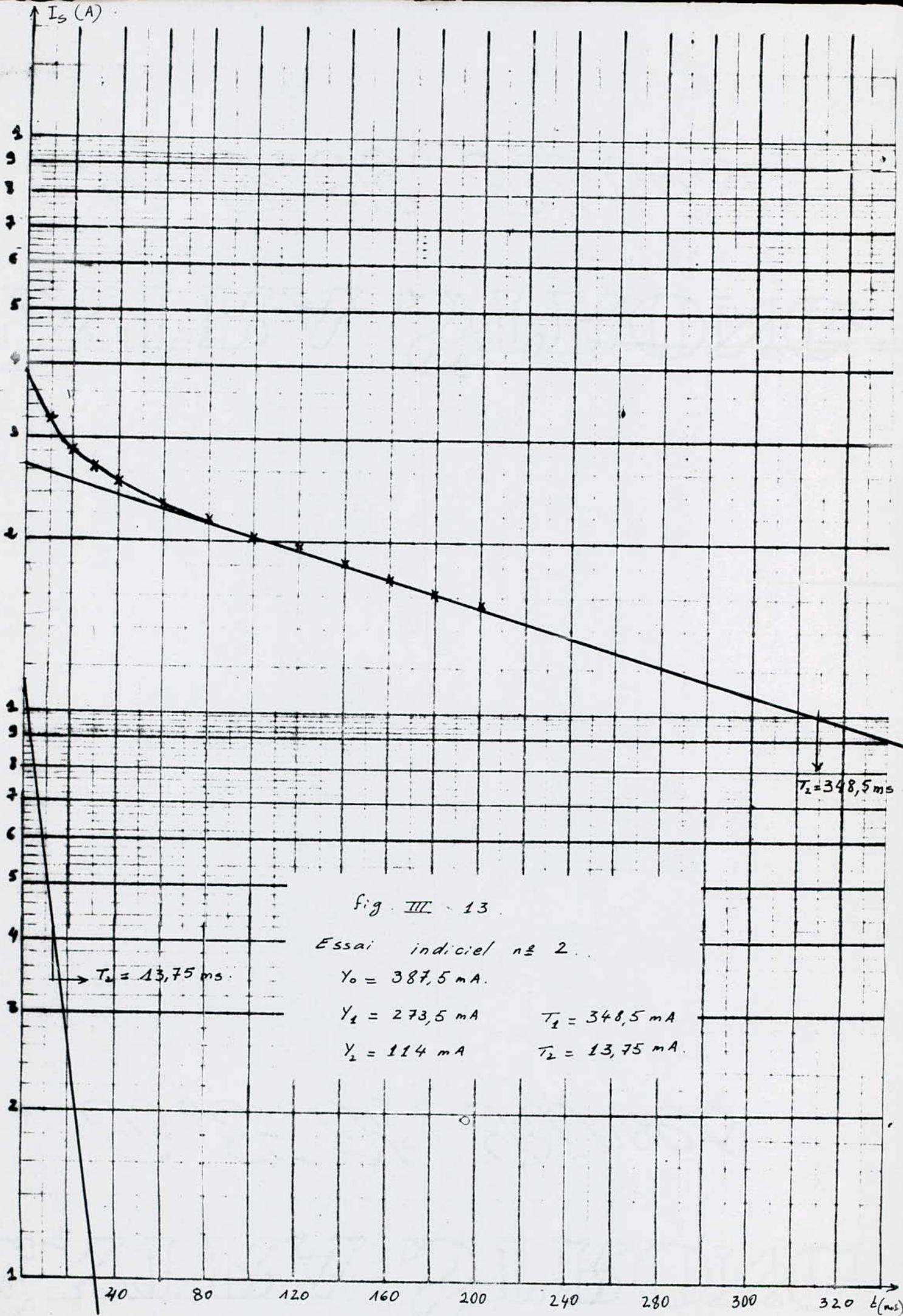


Fig. III - 13

Essai indiciel n° 2

$Y_0 = 387,5 \text{ mA}$

$Y_1 = 273,5 \text{ mA}$

$Y_2 = 114 \text{ mA}$

$T_1 = 348,5 \text{ ms}$

$T_2 = 13,75 \text{ ms}$

$T_2 = 13,75 \text{ ms}$

$T_1 = 348,5 \text{ ms}$

fig. III. 14.

Essai indiciel n° 4

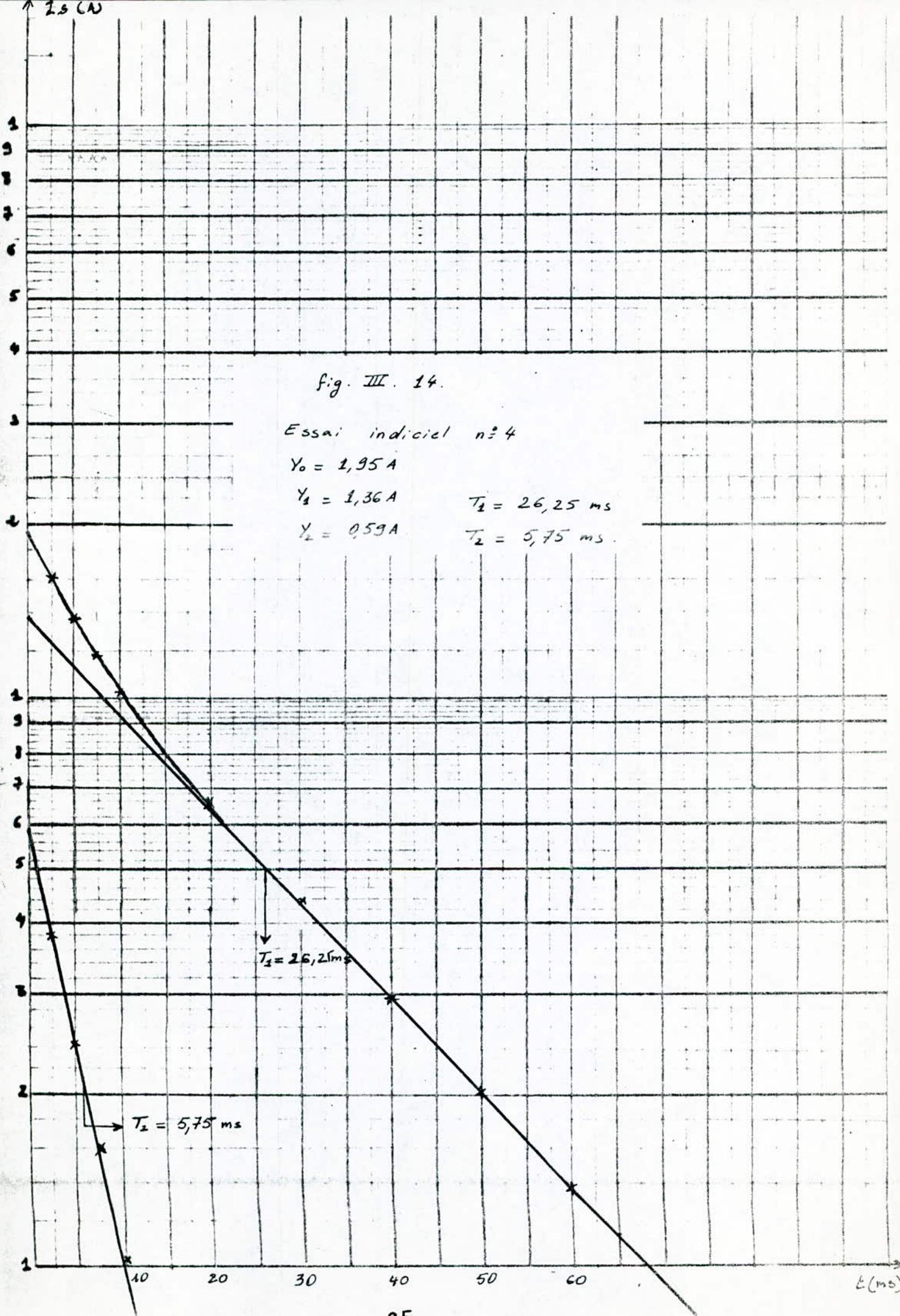
$$Y_0 = 1,95 A$$

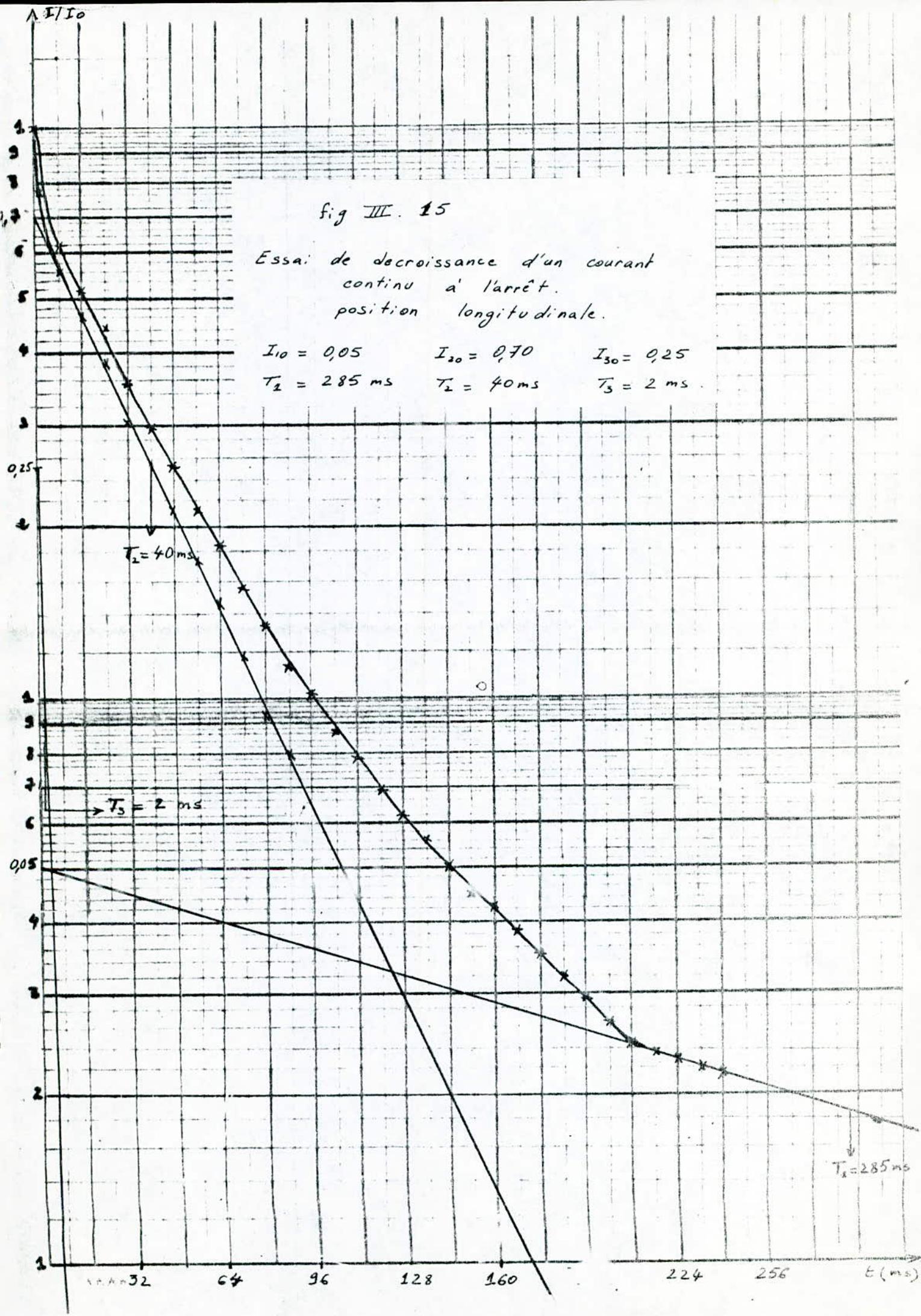
$$Y_1 = 1,36 A$$

$$Y_2 = 0,59 A$$

$$T_1 = 26,25 \text{ ms}$$

$$T_2 = 5,75 \text{ ms}$$





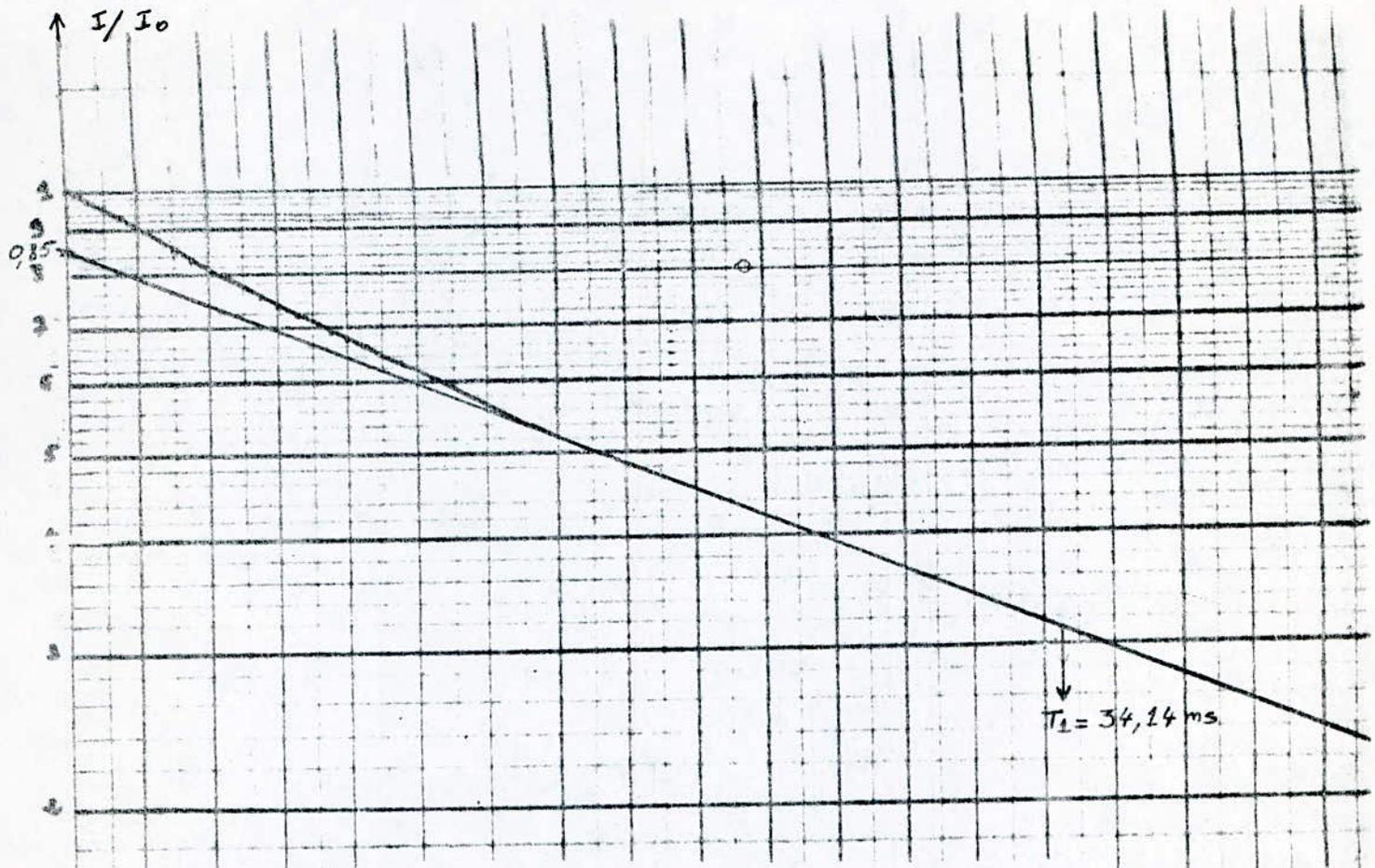


fig. III. 16.

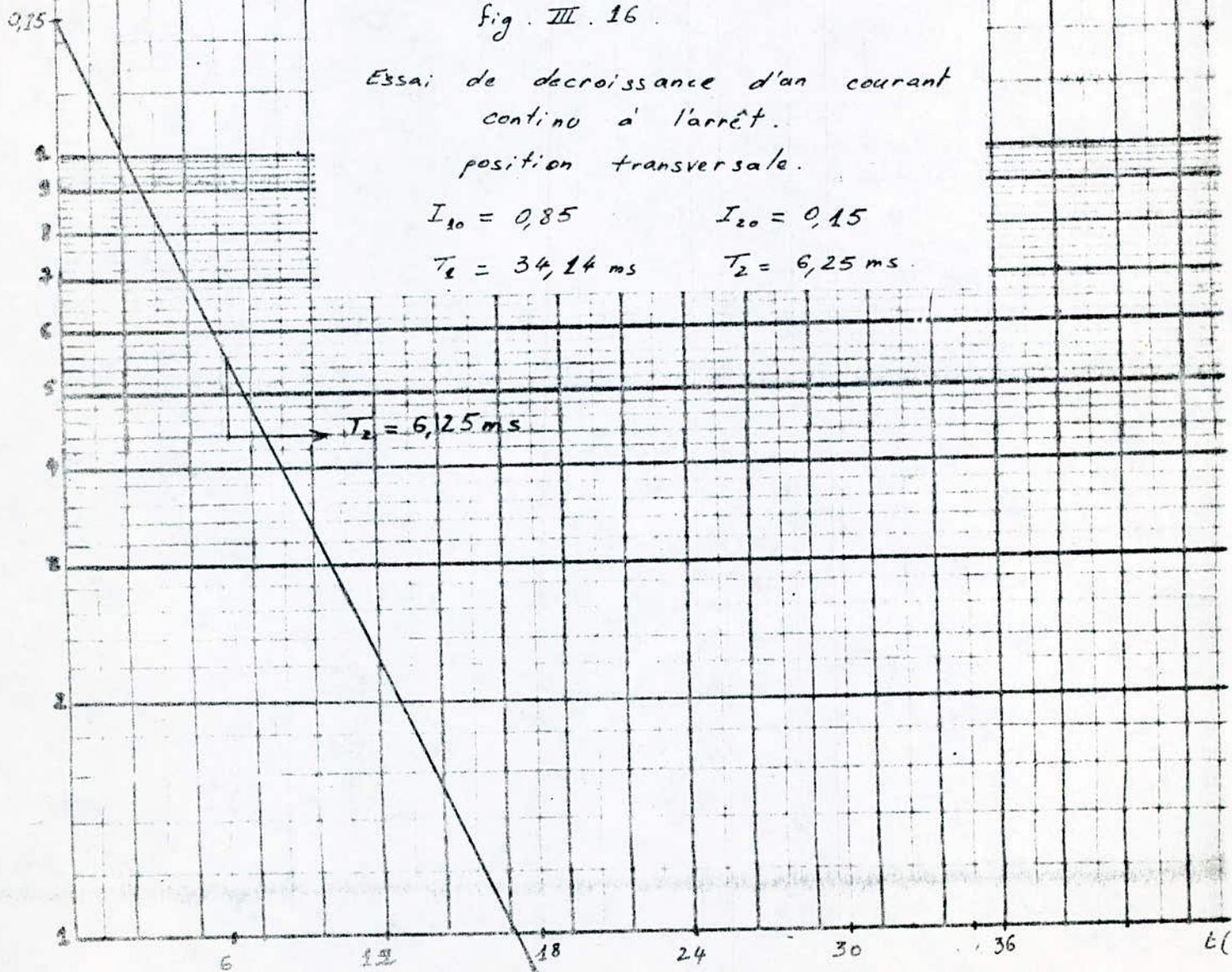
Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt.  
position transversale.

$$I_{10} = 0,85$$

$$I_{20} = 0,15$$

$$T_1 = 34,14 \text{ ms}$$

$$T_2 = 6,25 \text{ ms}$$



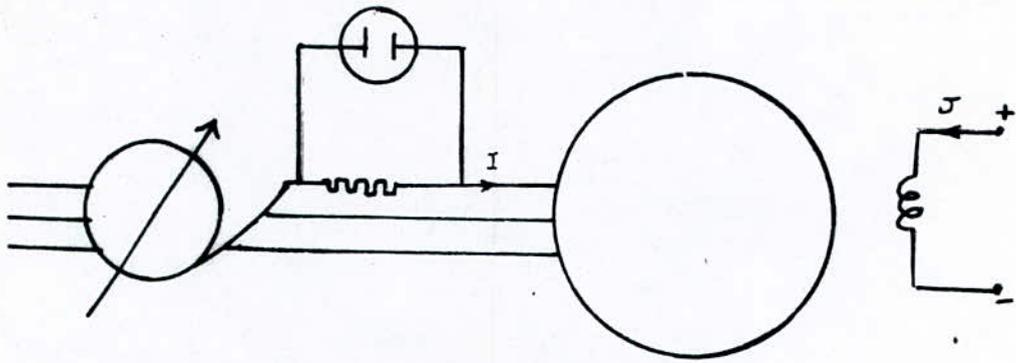


fig. III 17 . Essai à faible glissement.

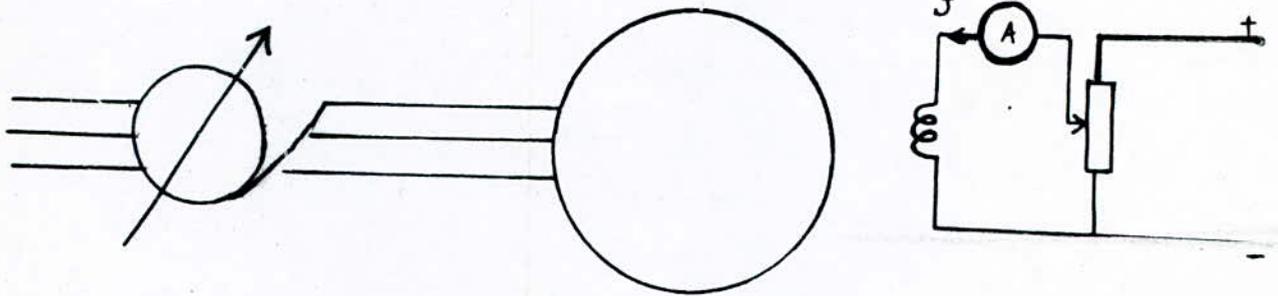


fig. III 18 . Essai d'excitation négative.

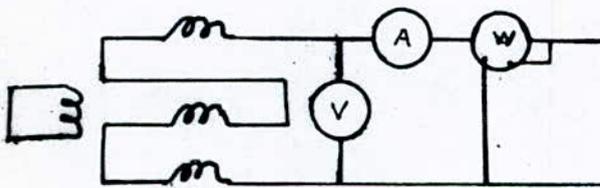


fig III 19 . Essai d'alimentation en monophasé des 3 phases.

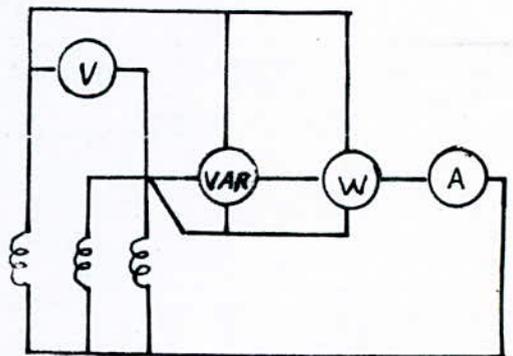


fig III 20 Essai de c/c permanent entre 2 conducteurs de phase et le point neutre.

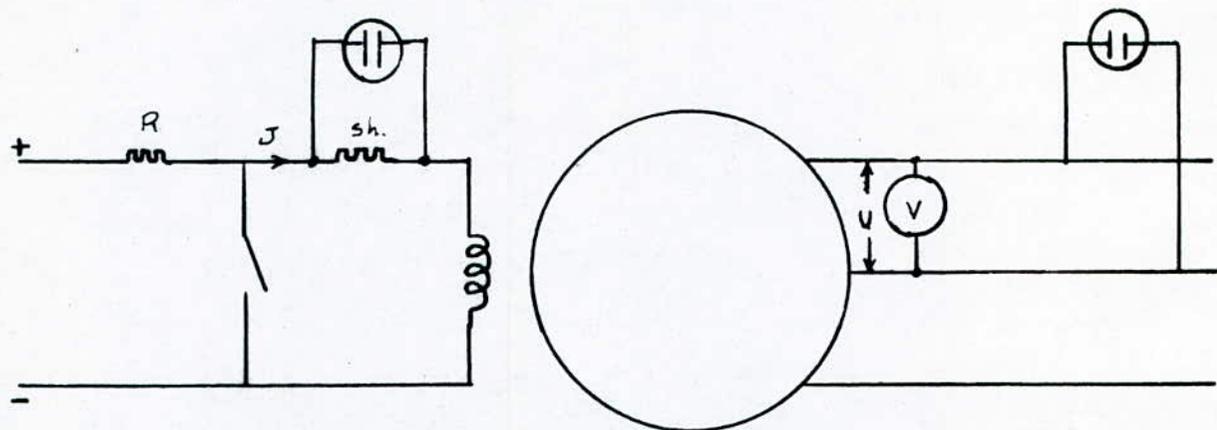


Fig III. 21. Essai de de croissance du courant d'excitation avec l'induit à circuit ouvert.

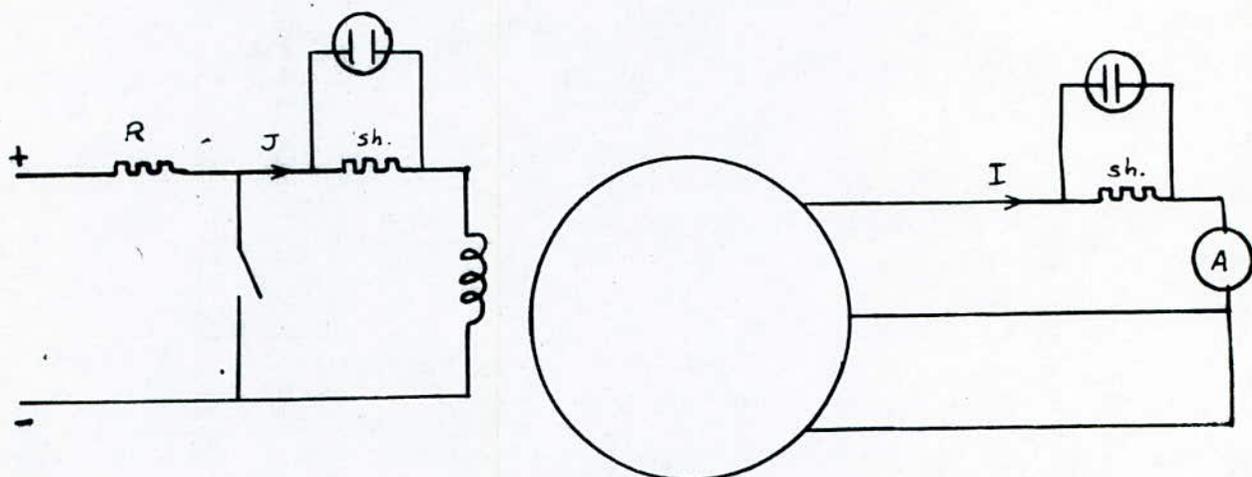


Fig III. 22. Essai de de croissance du courant d'excitation avec l'induit en C/C.

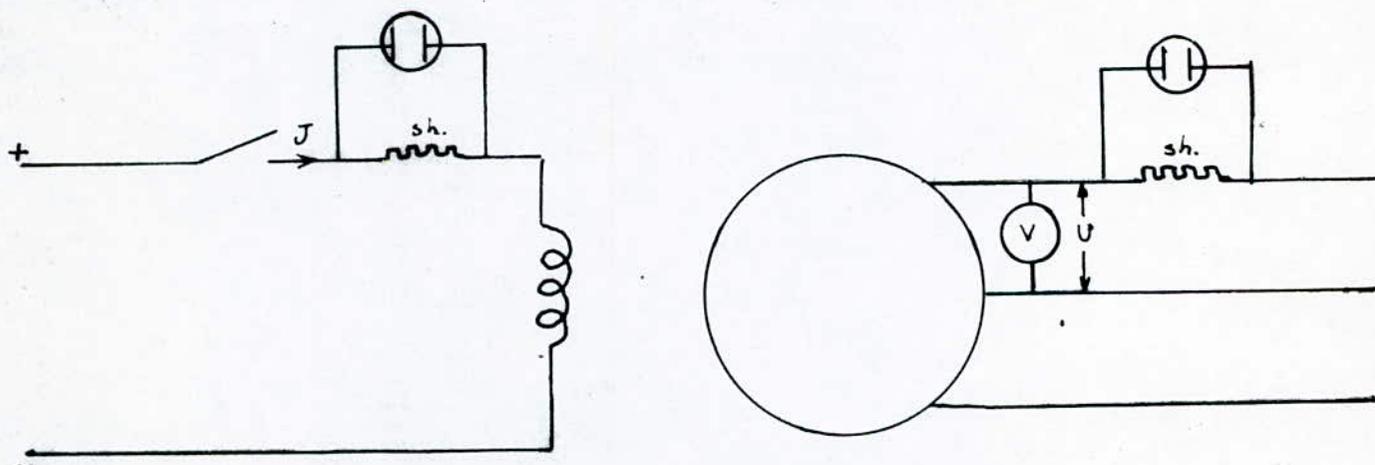


Fig III. 23. Essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit à circuit ouvert.

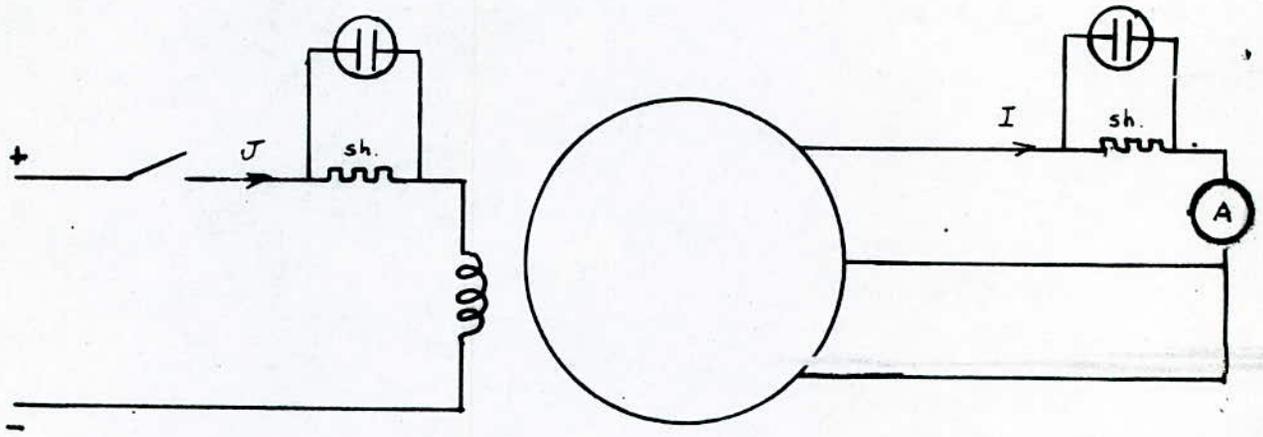


fig III. 24 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit en C/C.

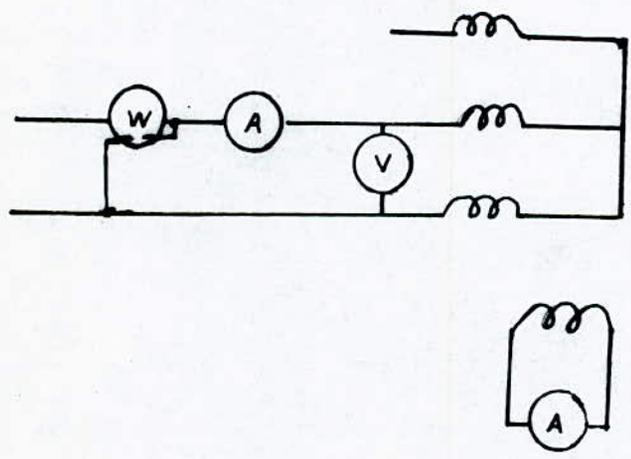
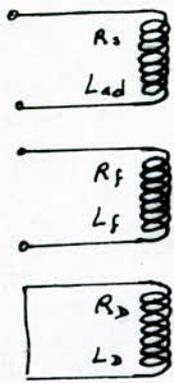
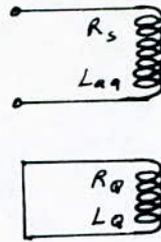


fig III. 25 Essai d'application de la tension.

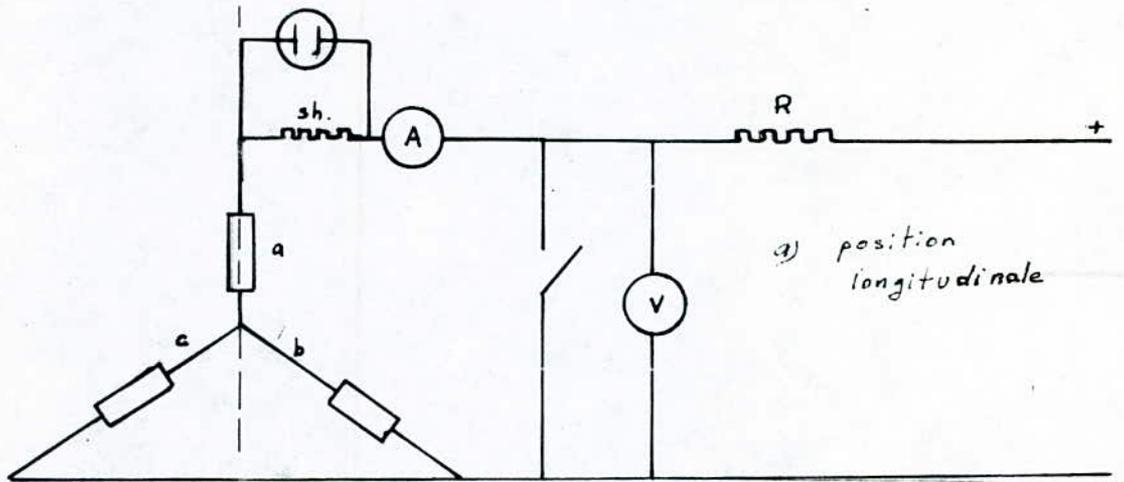
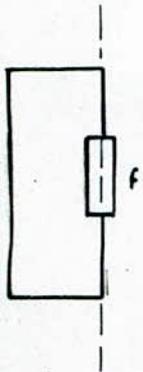
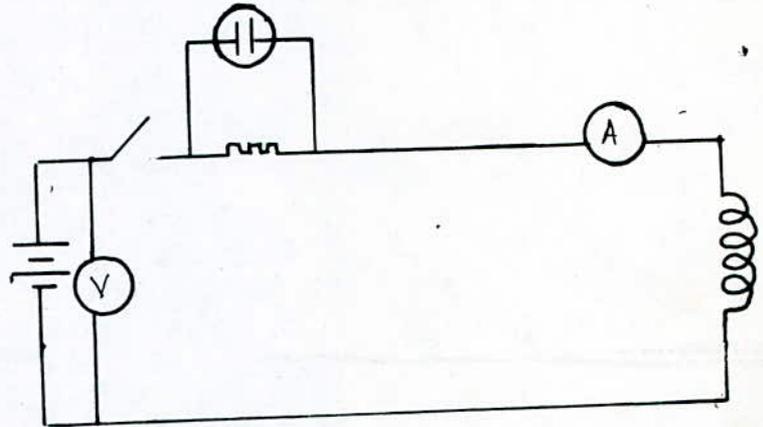


a) position longitudinale.

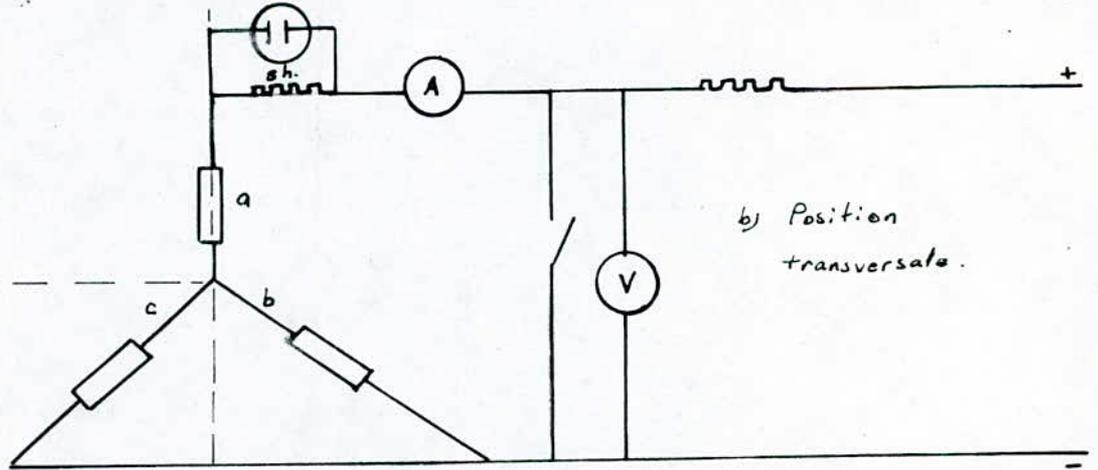
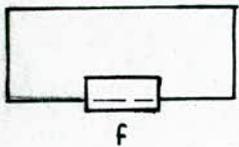


b) position transversale.

fig III. 26 Essais inductifs.



a) position longitudinale



b) Position transversale.

fig III. 27 Essais de de croissance d'un courant continu dans l'induit à l'arrêt.

C H A P I T R E IV

ETUDE COMPARATIVE .

CHAPITRE IV :

ETUDE COMPARATIVE :

Dans ce present chapitre , nous nous proposons de donner pour chacun des parametres mesurés , les valeurs obtenues par les différents essais effectués.

Tableaux de comparaison /

1 - Valeur de  $X_d(\Omega)$  :

N ( tr /mn )	1 500	12C7	867	517
Ess. à vide et en C/C	58,17	49,57	34,20	18
Ess. à faible glissement	60,25	-	-	-
Ess.indiciels	63,15	-	-	-
Ess.de decroissance du courant	60,43	-	-	-
Valeur retenue	60,50	49,57	34,20	18

Les quatre methodes donnent des valeurs rapprochées et nous prendrons par conséquent la valeur moyenne.

- Valeur de  $X_q (\Omega)$ :

Ess. à faible gliss.	37,61
Ess. d'excit. négative	39,55
Ess. indiciels	42,55
Ess. de décroissance du courant.	42,35
Valeur retenue	40,52

La valeur retenue est la moyenne des quatre reactances.

- Valeur de  $X_0 (\Omega)$ :

Ess. d'alimentation en monophasé des trois phases.	Ess. de C/C entre deux phases et le neutre.	Valeur retenue
3 , 4 1	3 , 4 9	3 , 4 5

La valeur retenue est la valeur moyenne.

- Valeur de  $X_1(\Omega)$  :

Ess. de rotation inverse.	Valeur retenue
11,62	11,62

- Valeur de  $X_d^1(\Omega)$  :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	517
Ess. de C/C triphasé brusque.	11,07	8,21	5,54	-
Ess. de retabliss.	11,48	8,64	7,18	4,62
Ess. indiciels	11,28	-	-	-
Valeur retenue	11,28	8,43	6,36	4,62

les valeurs retenues sont les moyennes des grandeurs.

- Valeur de  $X_d''(\Omega)$  :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	517
Ess. de C/C triphasé brusque	6,74	5,67	4,39	-
Ess. de retabliss.	6,06	4,88	4,16	3,08
Ess. d'application dans la position longitudinale	6,57	-	-	-
Ess. d'application d'une tension dans une position quelco.	7,56	-	-	-
Ess. indiciels	7,23	-	-	-
Ess. de décroissan. du courant	9,90	-	-	-
Valeur retenue	7,34	5,28	4,28	3,08

Les valeurs retenues sont les valeurs moyennes.

- Valeur de  $X_q''$  ( $\Omega$ ) :

Ess. d'application d'une tension en position transversale	30,58
Ess. d'application d'une tension en une position quelconque du rotor.	31,20
Ess. indiciels	26,81
Ess. de décroissance du courant	28,90
Valeur retenue	29,37

Pour vérifier la valeur de  $X_i$  on applique la relation  $X_i = \frac{2 X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''} = 11,74 \Omega$ .

Cette valeur n'est pas très loin que celle retenue précédemment.

- Valeur de  $T_d''$  (ms) :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	
Ess. de C/C triphasé brusque.	12,5	9,25	13,5	
Ess. indiciels	12,28	-	-	
Ess. de décroissance du courant	2,62	-	-	
Valeur retenue	12,39	9,25	13,5	

Dans cet essai on n'a retenu que la moyenne des deux premières valeurs de  $T'_d$  à la vitesse assignée car la valeur donnée par l'essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt est très loin des deux autres.

- Valeur  $T'_d$  (ms) :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	517
Ess. de C/C triphasé brusque	42,5	42,5	38,5	-
Ess. de décroissance du courant d'excit. (Induit en C/C )	38	35,8	38,7	39,15
Ess. indiciels	44,75	-	-	-
Ess. d'application brusque de l'excitat. (Induit en C/C )	39	37,5	40	38,25
Valeur retenue	41,06	38,60	39,07	38,70

C'est la valeur moyenne des quatre essais qui a été retenue.

- Valeur de  $T'_{d0}$  (ms) :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	517
Ess.de retablissement de tension	300	302	306	294
Ess.de décroissance du courant d'excitat. (induit ouvert)	285	285	292	293
Ess.d'application brusque de l'excitat. ( Induit ouvert )	304	290	300	297
Ess. indiciels	250	-	-	-
VALEUR RETENUE	284,8	292,3	299,3	294,7

- Valeur de  $T''_{d0}$  (ms) :

N ( tr / mn )	1500	1207	867	517
Ess. de retablissement de tension	18	16	15,5	20
Ess. indiciels	19,21	-	-	-
Ess. de décroissance du courant	12,1	-	-	-
Valeur retenue	16,44	16	15,5	20

- Valeur de  $T_q''$  (ms) :

Ess. indiciels	Ess. de décroissance du courant	Valeur retenue
7,53	7,10	7,32

- Valeur de  $T_{q0}'''$  (ms) :

Essais indiciels	Ess. de décroissance du courant	Valeur retenue
11,95	10,43	11,19

- Valeur de  $T_D$  (ms) :

Essais indiciels	Valeur retenue
7,35	7,35

- Valeur de  $T_a$  (ms) :

Cette constante de temps est tirée à partir de la relation la liant avec la reactance inverse:

$$T_a = \frac{X_i}{2 \pi f_0 R_S}$$

$$T_a = 11,55 \text{ ms.}$$

- Interpretation des resultats :

\* La figure ( **IV** ) montre que les reactances sont proportionnelles à la vitesse . Ceci est dû à l'hypothèse de non saturation du circuit magnetique.

On remarque aussi d'après les tableaux que les differentes constantes de temps restent inchangées.

\*Chaque parametre peut etre mesuré par plusieurs methodes et il est difficile de definir celle qui est la plus precise. C'est pour celà que les valeurs adoptées sont les valeurs moyennes.

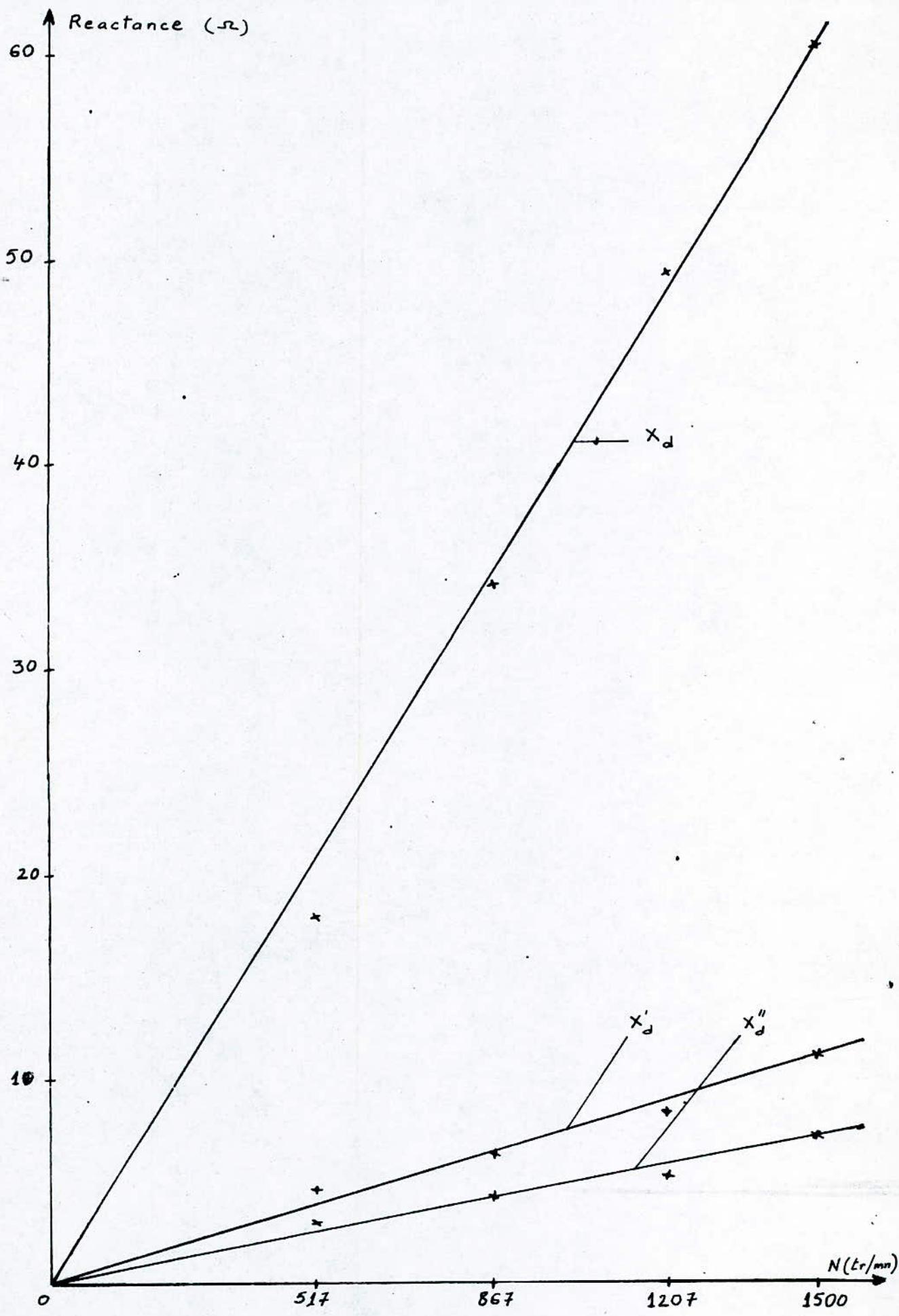


fig. IV. Variation des reactances en fonction de la vitesse.

C O N C L U S I O N .

## CONCLUSION :

La machine synchrone trouve une plage d'utilisation très grande dans l'industrie moderne , ce qui a donné lieu à de nombreuses études sur cette machine et notamment l'identification de ses paramètres.

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le comportement de la machine synchrone lors de certains régimes de fonctionnement, la connaissance de ses paramètres permettant d'évaluer son aptitude à supporter certains régimes sévères et aussi d'estimer ses fonctions de transfert en vue d'optimiser la commande et la protection qui lui sont associées.

Pour cela , nous avons exposé quelques méthodes de détermination de l'ensemble des paramètres usuels , mais on a omis certains essais qui demandaient un matériel plus adapté et qui n'existe pas au niveau du laboratoire , par exemple un capteur de mesure de l'angle interne de la machine ou encore un variateur de fréquence.

On a aussi vérifié expérimentalement la linéarité des réactances en fonction de la vitesse ainsi que l'invariance des constantes de temps. Au cours des divers essais effectués sur banc d'essai, nous avons fait les constatations suivantes :

- L'imprécision dans certains relevés peut être imputée à la classe des appareils de mesure utilisés.
- Les essais qu'on a appelés fréquentiels permettent l'obtention de tous les paramètres , néanmoins pour améliorer la précision , un outil informatique capable d'estimer une fonction non-linéaire est indispensable.

On espère par cet exposé avoir contribué à l'élaboration d'un outil de travail qui on l'espère , pourra profiter à ceux qui voudraient l'utiliser avec un matériel plus adéquat.

## BIBLIOGRAPHIE /

- (1) - C . E . I .  
Commission Electrotechnique Internationale.  
Publication 34-4-1985
- (2) - J . LESFNE , F . NOTELET , G . SEGUIER  
Introduction à l'Electrotechnique Approfondie  
Technique et Documentation 1981 .
- (3) - G . SEGUIER , F . NOTELET  
Electrotechnique Industrielle  
Technique et Documentation 1980 .
- (4) - P . BARRET  
Regimes Transitoires des Machines Tournantes  
Electriques  
Eyrolles , Paris 1982 .
- (5) - A . FOUILLE  
Electrotechnique à l'Usage des Ingénieurs  
( Tome II )  
Machines Electriques à Courants Alternatifs  
Dunod 1980
- (6) - Article  
Mesure de courants continus pour le calcul des grandeurs  
caracteristiques de la machine synchrone  
Von.M. CANAY .