

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Influence du Déséquilibre
sur la Température
d'une Machine **ASYNCHRONE**
à Rotor Bobine

Proposé par :
R. IBTIOUEN

Etudié par :
B. BOUALEM
M. ZITOUFI

Dirigé par :
R. IBTIOUEN

PROMOTION : JANVIER 1988

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

S U J E T

INFLUENCE DU DESEQUILIBRE SUR LA
TEMPERATURE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE
A ROTOR BOBINE.

Proposé par :
R. IBTIOUEN

Etudié par :
B. BOUALEM
M. ZITOUFI

Dirigé par :
R. IBTIOUEN

II) DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

- A mes parents
- A mes frères et soeurs
- A mes amis.

B. BOUALEM.

Je dédie ce modeste travail :

- A la mémoire de mon père
- A ma mère
- A mes frères et soeurs
- A ma famille
- A mes amis.

M. ZITOUFI.

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

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur Rachid IBTIOUEN pour l'aide scientifique, morale et matérielle qu'il n'a cessé de nous prodiguer depuis le début de nos travaux.

ZITOUFI Mustapha

et

BOUALEM Boualem.

S O M M A I R E





- I. INTRODUCTION.
- II. ETUDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A ROTOR BOBINE.
 - II. 1 - GENERALITES
 - II. 2 - MODELE DE LA MACHINE
 - II. 3 - EQUATIONS GENERALES DE LA MACHINE
 - II. 3.1. Equations des flux
 - II. 3.2. Equations des tensions
 - II. 3.3. Circuit équivalent par phase
 - II. 3.4. Expression du couple
- III. ETUDE DE LA MACHINE ALIMENTEE PAR UN SYSTEME DE TENSIONS DESEQUILIBREES.
 - III.1 - METHODE UTILISEE
 - III. 1.1. Hypothèses
 - III. 1.2. Composantes symétriques
 - III. 1.3. Couple résultant en régime déséquilibré
- IV. INFLUENCE DU DESEQUILIBRE DES TENSIONS STATORIQUES SUR LA TEMPERATURE DE LA MACHINE.
 - IV. 1 - GENERALITES
 - IV. 2.- CAUSES DU SURECHAUFFEMENT EN REGIME DESEQUILIBRE
 - IV. 3 - INFLUENCE DU TAUX DE DESEQUILIBRE SUR LE COUPLE RESULTANT
- V. ETUDE EXPERIMENTALE.
 - V. 1 - IDENTIFICATION DE LA MACHINE UTILISEE
 - V. 2 - ENREGISTREMENT DE L'ECHAUFFEMENT EN FONCTION DU TEMPS

V. 3 - ESSAIS ET RELEVES EFFECTUES - INTERPRETATION

VI. CONCLUSION.

BIBLIOGRAPHIE.

SYMBOLES UTILISES.
 =====

| | | |
|--|---|---|
| R_1 | : résistance par phase statorique | () |
| R_2 | : résistance par phase rotorique ramenée au stator | () |
| L'_1 | : inductance propre par phase statorique | (H) |
| L'_2 | : inductance propre par phase rotorique ramenée au stator | (H) |
| M_0 | : mutuelle inductance stator - rotor (rotor - stator) pour $\theta = 0$ | (H) |
| M_1 | : mutuelle inductance stator - stator | (H) |
| M_2 | : mutuelle inductance rotor - rotor vue du stator | (H) |
| L_1 | : inductance propre cyclique (stator) | (H) |
| L_2 | : inductance propre cyclique (rotor) | (H) |
| M | : inductance mutuelle cyclique (stator - rotor) | (H) |
| g | : glissement | |
| w | : pulsation des grandeurs statoriques | (rd/s) |
| (1) | : indice pour les grandeurs statoriques | |
| (2) | : indice pour les grandeurs rotoriques | |
| () | : vitesse angulaire en (rad/s) | (rd/s) |
| E_{Th} | : f.e.m équivalente (THEVENIN) | (V) |
| Z_{Th} | : impédance équivalente (THEVENIN) | () |

- τ : taux de déséquilibre $(\frac{V_i}{V_d} \times 100)$
- d : indice pour les grandeurs relatives à la séquence directe
- i : indice pour les grandeurs relatives à la séquence inverse
- G : masse d'un corps homogène (Kg)
- C : capacité calorifique (J/Kg °C)
- θ : Température en °C
- λ : coefficient de transfert de la chaleur $(\frac{J}{m^2 \cdot ^\circ C \cdot s})$
- θ_f : température finale (régime établi) (°C)
- T : constante de temps de l'échauffement (s)
- θ_0 : température à l'instant initial (°C)
- a : rapport de transformation $(a = \frac{U_1}{U_2})$
- σ : coefficient de dispersion
- tf : temps final pour avoir la température en régime établi.

(A)

I. INTRODUCTION.

Parmi les moteurs les plus utilisés dans le monde, le moteur asynchrone est classé largement en tête. Sa conception peu onéreuse par rapport aux autres types de moteurs favorise son choix.

Cependant, comme toute machine électrique triphasée, il peut être soumis à un déséquilibre.

- Le déséquilibre le plus fréquent pour cette machine peut provenir d'un défaut d'alimentation donc localisé au stator. Nous nous proposons dans le cadre de notre projet d'étudier le cas où un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné est soumis à un système d'alimentation en tensions déséquilibrées.

Nous étudierons l'influence du taux de déséquilibre sur la surélévation de température. Certes, le problème de l'échauffement d'une machine électrique est lié aux pertes de celle-ci et sa détermination est importante du point de vue technologique afin de prévenir les contraintes thermiques auxquelles sont soumis les matériaux composant la machine.

Nous divisons notre travail en quatre parties :

- Dans la première, nous effectuerons un bref rappel sur l'étude de la machine asynchrone.
- Dans un deuxième chapitre, nous étudierons le cas où cette machine est alimentée par un système de tensions déséquilibrées.
- Dans les deux derniers chapitres, nous présentons l'influence du taux de déséquilibre sur la surélévation de la température et les performances du moteur asynchrone que nous compléterons par une étude expérimentale.

C H A P I T R E II
=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=

II. ETUDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A ROTOR BOBINE.

II. 1 - Généralités :

La machine asynchrone à rotor bobiné est l'une des machines d'induction la plus simple à modéliser du point de vue mathématique. En effet, cette modélisation est facilitée par la symétrie que cette machine présente et également par le fait que l'effet pelliculaire et la saturation ne soient pas très importants pour être pris en considération. Nous savons également que ce sont ces deux derniers points qui font que l'on peut prédéterminer les caractéristiques de la machine asynchrone en utilisant le diagramme du cercle dont l'hypothèse principale est le flux constant à tension et fréquence données.

Bien que notre travail soit axé sur l'étude du moteur asynchrone en régime déséquilibré, nous avons opté pour étudier cette machine du point de vue classique, une fois le schéma équivalent obtenu, nous appliquerons les composantes symétriques pour l'étude en régime déséquilibré. Cette méthode est basée sur l'application du principe de superposition qui est d'autant plus valable car notre modèle est, comme cité ci-dessus, linéaire.

II. 2 - Modèle de la machine :

La machine porte deux enroulements triphasés symétriques, l'un au stator (fixe) et l'autre au rotor (mobile). Ces deux enroulements ne sont reliés qu'inductivement.

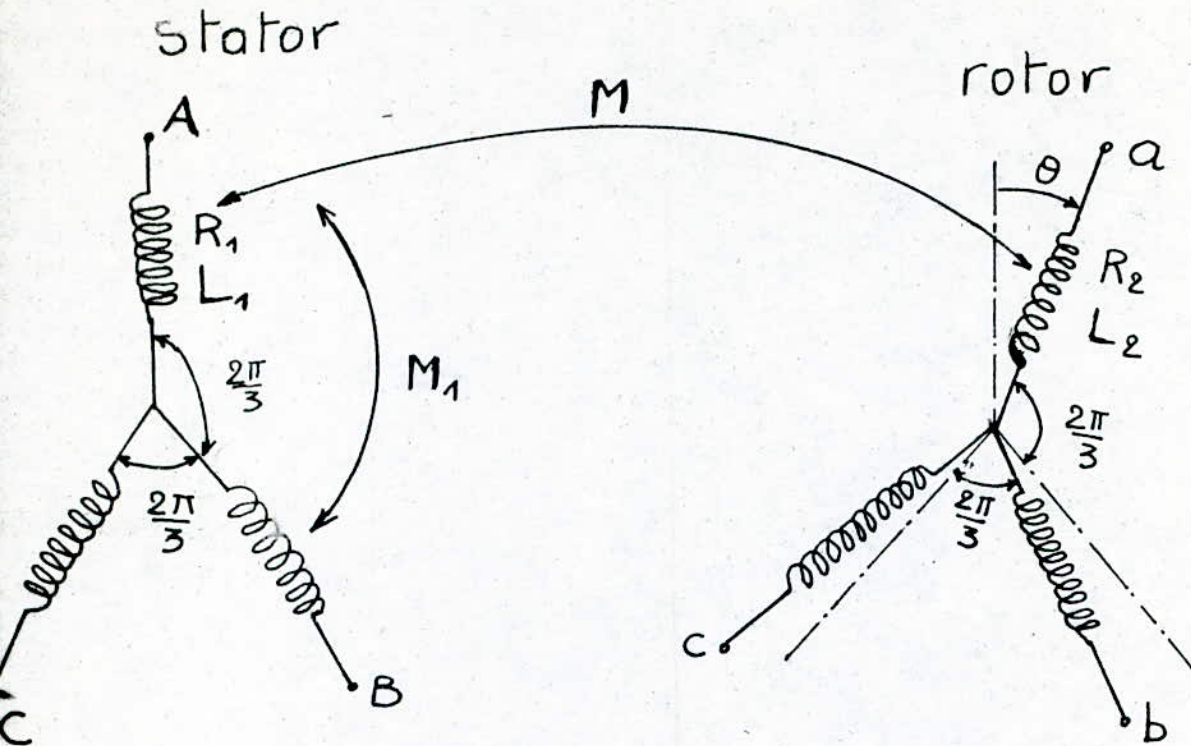


Fig.II. 1
"Modèle de la machine asynchrone"

II.3 - Equations générales de la machine :

II. 3.1. Equations des flux.

La machine est alimentée par un système triphasé de courants sinusoïdaux équilibrés. La fréquence au stator est ω , au rotor du fait de sa rotation à une vitesse asynchrone nous avons les grandeurs électriques et magnétiques dont la fréquence est $g \omega$.

- A partir de $(\phi) = (\mathcal{L})(i)$ (II. 1)
et du modèle de la fig. II. 1, nous avons avec toutes les symétries :

$$\begin{pmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L'_1 & M_1 & M_1 & M_0 \cos \phi & M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ M_1 & L'_1 & M_1 & M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos \phi & M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ M_1 & M_1 & L'_1 & M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos \phi \\ M_0 \cos \phi & M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) & L'_2 & M_2 & M_2 \\ M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos \phi & M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_2 & L'_2 & M_2 \\ M_0 \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos (\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_0 \cos \phi & M_2 & M_2 & L'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

(II. 2)

Avec :

$$\begin{aligned}
 i_A &= I_{1\max} \cos (wt - \varphi_1) \\
 i_B &= I_{1\max} \cos (wt + \frac{2\pi}{3} - \varphi_1) \\
 i_C &= I_{1\max} \cos (wt - \frac{2\pi}{3} - \varphi_1) \\
 &= \\
 i_a &= I_{2\max} \cos (gwt - \varphi_2) \\
 i_b &= I_{2\max} \cos (gwt + \frac{2\pi}{3} - \varphi_2) \\
 i_c &= I_{2\max} \cos (gwt - \frac{2\pi}{3} - \varphi_2)
 \end{aligned}$$

(II. 3)

Suivant les expressions (II. 2) et (II.3), nous constatons une permutation circulaire, ainsi nous ne développerons nos calculs que pour les flux totaux par phase au stator et au rotor.

a/ - Flux total de la phase (A) du stator.

$$\Phi_A = L'_1 i_A + M_1 (i_B + i_C) + M_0 [i_a \cos \phi + i_b \cos (\phi - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos (\phi + \frac{2\pi}{3})]$$

en utilisant l'expression (II. 3) et avec :

$$\phi = \phi_0 + (1 - g)wt \quad \text{(II. 4)}$$

$$\begin{aligned} \Phi_A = & (L'_1 - M_1)I_{1\max} \cos (wt - \varphi_1) + M_0 I_{2\max} \left[\cos (gwt - \varphi_2) \right. \\ & \left. \cos \phi_0 + (1 - g)wt \right] + \cos (gwt - \varphi_2 + \frac{2\pi}{3}) \cos \left[\phi_0 + (1-g)wt - \frac{2\pi}{3} \right] \\ & + \cos (gwt - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}) \cos \left(\phi_0 + (1 - g)wt + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Tous calculs faits, nous aboutissons à :

$$\Phi_A = (L'_1 - M_1)I_{1\max} \cos (wt - \varphi_1) + \frac{3}{2} M_0 I_{2\max} \cos (\phi_0 + wt - \varphi_2) \quad \text{(II. 5)}$$

b/ - Flux total de la phase (a) du rotor.

Avec un calcul analogue, nous avons :

$$\Phi_a = \frac{3}{2} M_0 I_{1\max} \cdot \cos (gwt - \phi_0 - \varphi_1) + (L'_2 - M_2)I_{2\max} \cos (gwt - \varphi_2) \quad \text{(II. 6)}$$

- Une permutation circulaire permettra d'écrire les expressions sinusoïdales des flux totaux des autres phases rotoriques et statoriques.
- Pour une éventuelle exploitation des flux totaux par phase, il est plus commode de les exprimer sous forme complexe sachant que ce sont des grandeurs sinusoïdales.

- Pour exprimer ϕ_A et ϕ_a sous forme complexe faisons les changements de variables suivants :

$$I_{1\max} \cos (wt - \varphi_1) \longrightarrow \bar{I}_1 \quad (\text{II. 7})$$

$$I_{2\max} \cos (gwt - \varphi_2) \longrightarrow \bar{I}'_2 \quad (\text{II. 8})$$

Les expressions (II. 5) et (II. 6) deviennent :

$$\bar{\phi}_A = (L'_1 - M_1) \bar{I}_1 + \frac{3}{2} M_0 \bar{I}'_2 e^{j \phi_0}$$

$$\bar{\phi}_a = \frac{3}{2} M_0 \bar{I}_1 e^{-j \phi_0} + (L'_2 - M_2) \bar{I}'_2$$

Posons encore :

$$I'_2 e^{j \phi_0} = \bar{I}_2 \quad (\text{II. 9})$$

$$\bar{\phi}_A = \bar{\phi}_1 \quad (\text{II. 10})$$

$$\bar{\phi}_a e^{j \phi_0} = \bar{\phi}_2 \quad (\text{II. 11})$$

Nous obtenons avec :

$$L'_1 - M_1 = L_1 \quad (\text{II. 12})$$

$$L'_2 - M_2 = L_2 \quad (\text{II. 13})$$

$$\frac{3}{2} M_0 = M \quad (\text{II. 14})$$

$$\bar{\phi}_1 = L_1 \bar{I}_1 + M \bar{I}_2 \quad (\text{II. 15})$$

$$\bar{\phi}_2 = M \bar{I}_1 + L_2 \bar{I}_2 \quad (\text{II. 16})$$

Dans les expressions (II.15) et (II.16), les pulsations n'apparaissent pas.

Toutefois dans l'équation (II. 15) la pulsation est w , par suite dans l'équation (II. 16) c'est gw .

II. 3.2. Equations des tensions.

a/ Stator :

La machine est supposée être alimentée par un système de tension triphasée équilibrée au stator d'amplitude $V_{1\max}$ par phase.

Au stator, la f.e.m. s'écrit sous forme complexe.

$$\bar{E}_1 = - \frac{d\bar{\Phi}_1}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Avec l'opérateur $\frac{d}{dt} = jw$ et l'équation (II.15) nous avons :

$$\bar{E}_1 = - jw (L_1 \bar{I}_1 + M \bar{I}_2) \quad (\text{II.18})$$

Soit :

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j L_1 w) \bar{I}_1 + j M w \bar{I}_2 \quad (\text{II.19})$$

b/ Rotor :

Le rotor, en fonctionnement normal est en court-circuit, la tension par phase est nulle, la f.e.m. induite par phase est :

$$\bar{E}_2 = - \frac{d\bar{\Phi}_2}{dt}$$

$$\bar{E}_2 = - j w g (L_2 \bar{I}_2 + M \bar{I}_1) \quad (\text{II.20})$$

$$0 = j g M w \bar{I}_1 + (R_2 + j g L_2 w) \bar{I}_2 \quad (\text{II.21})$$

Les expressions (II.19) et (II.21) permettant l'analyse du point de vue électrique de la machine.

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + j L_1 \omega & j M \omega \\ j M \omega & R_2 + j L_2 \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.22})$$

II. 3.3. Circuit équivalent par phase.

Pour pouvoir donner le circuit équivalent par phase de la machine, divisons par g l'expression (II.21)

$$0 = j M \omega \bar{I}_1 + \left(\frac{R_2}{g} + j L_2 \omega \right) \bar{I}_2 \quad (\text{II.23})$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 + j X_1 & j X_m \\ j X_m & \frac{R_2}{g} + j X_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Le schéma équivalent par phase décrit par le système d'équation (II.24) ramené au stator où tous les courants sont de pulsation ω est :

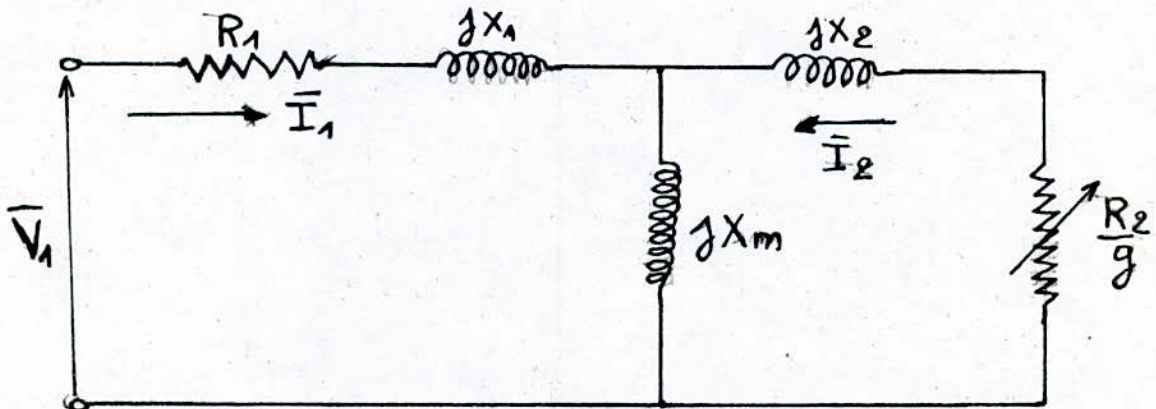


Fig. II. 2
"Circuit équivalent par phase de la machine
ramené au stator"

Le courant I_2 est représenté sur la fig. II. 2 de sens contraire car il y a transfert de puissance.

X_2 et R_2 sont ramenés au stator.

Nous avons opté pour un circuit électrique équivalent à la machine où les paramètres qui interviennent sont plus accessibles aux mesures.

x_1 : inductance de fuite par phase statorique

x_2 : inductance de fuite par phase rotorique ramenée au stator

x_m : inductance de magnétisation

R_1 : résistance par phase statorique

R_2 : résistance par phase rotorique ramenée au stator.

II. 3.4. Expression du couple.

La puissance électromagnétique (fig. II. 2)

est :

$$P_e \text{ (par phase)} = \left(\frac{R_2}{g}\right) I_2^2 \quad (\text{II.25})$$

$$\Gamma_e = \frac{P_e}{\omega}$$

$$\Gamma_e = 3 \frac{R_2 I_2^2}{g \omega} \text{ (N . m)} \quad (\text{II.26})$$

Reprenons le schéma équivalent de la fig. II.2 et remplaçons-le par le schéma équivalent de Thevenin

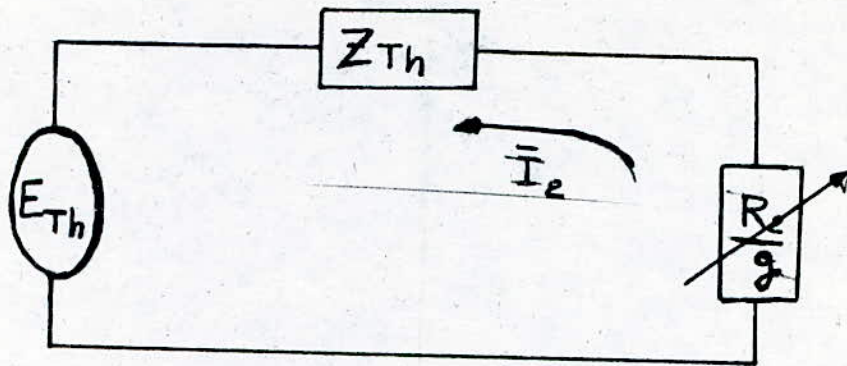


Fig. II. 3
 "Schéma de Thevenin équivalent au circuit
 de la Fig. II. 3"

$$E_{Th} = \frac{V_1 (j x_m)}{R_1 + j (x_1 + x_m)}$$

$$Z_{Th} = (j x_2) + (j x_m) \text{ parallèle à } (R_1 + j x_1)$$

$$Z_{Th} = j x_2 + \frac{(j x_m) [R_1 + j (x_1)]}{R_1 + j (x_1 + x_m)}$$

$$\bar{I}_2 = \left(\frac{E_{Th}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{g}} \right) \text{ courant du rotor ramené au stator}$$

$$P_{el} = 3 \left(\frac{E_{Th}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{g}} \right)^2 \cdot \frac{R_2}{g} \quad (II.27)$$

C H A P I T R E I I I
=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=

III. ETUDE DE LA MACHINE ALIMENTEE PAR UN SYSTEME DE TENSIONS DESEQUILIBREES.

III. 1 - Méthode utilisée :

III. 1.1. Hypothèses.

- a) La machine est symétrique.
- b) La saturation et l'effet de peau sont négligés.
- c) Les harmoniques de rang supérieurs sont négligés.

La seconde hypothèse nous permet d'appliquer le principe de superposition.

III. 1.2. Composantes symétriques.

Le système des tensions déséquilibrées sera décomposé en trois systèmes équilibrés par application des composantes symétriques | FORTESCUE | :

- système direct $[V_d, I_d]$
- système inverse $[V_i, I_i]$
- système homopolaire $[V_o, I_o]$

Dans notre étude, le troisième système (composante homopolaire) n'existe pas.

Nous n'aurons donc que le système des composantes directes et le système des composantes inverses.

a/ Taux de déséquilibre :

Le taux de déséquilibre (τ) caractérise le degré de déséquilibre de la machine.

Il est défini par le rapport :

$$\tau = \frac{V_i}{V_d} \quad (\text{III. 1})$$

Pour une alimentation en tensions déséquilibrées il est nul

$$(V_i = 0)$$

La méthode la plus simple permettant de déterminer le taux de déséquilibre est graphique. Elle est dite méthode du triangle équilatéral et est basée sur le principe suivant : La machine de constitution symétrique est alimentée par un système triphasé trois fils tel que :

$$\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = 0 \quad (\text{III. 2})$$

$$\vec{U}_{AB} = \vec{V}_B - \vec{V}_A$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{V}_C - \vec{V}_B$$

$$\vec{U}_{CA} = \vec{V}_A - \vec{V}_C$$

(III. 3)

Nous savons que :

$$\vec{V}_A = (\vec{V}_o + \vec{V}_d + \vec{V}_i)$$

$$\vec{V}_B = (\vec{V}_o + a^2 \vec{V}_d + a \vec{V}_i)$$

$$\vec{V}_C = (\vec{V}_o + a \vec{V}_d + a^2 \vec{V}_i)$$

(III. 4)

Nous cherchons à déterminer \vec{V}_d et \vec{V}_i

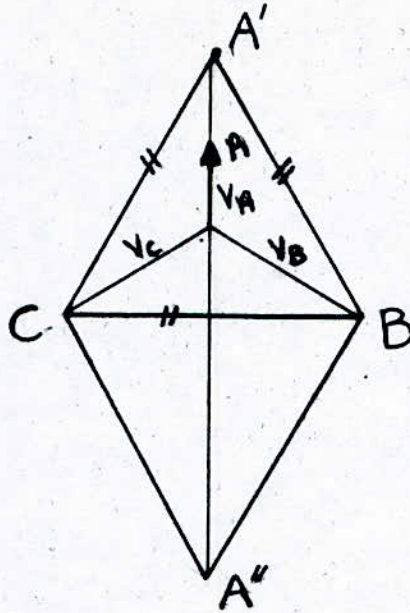
$$\vec{V}_d = \frac{1}{3} (\vec{V}_A + a \vec{V}_B + a^2 \vec{V}_C)$$

$$\vec{V}_i = \frac{1}{3} (\vec{V}_A + a^2 \vec{V}_B + a \vec{V}_C)$$

(III. 5)

Nous partons du fait que l'on connaît les tensions composées (mesurées) et nous déterminerons V_d et V_i . Pour cela, nous appliquons le théorème suivant :

"Le centre de gravité du triangle représenté par la somme des tensions composées représente le neutre pour le système triphasé si la composante homopolaire est nulle".



En appliquant les relations (III. 5), nous obtenons :

$$V_d = \frac{1}{3} A''A \quad \text{(III. 6)}$$

$$V_i = \frac{1}{3} A'A$$

Ce sont les modules des V_d et V_i , nous devons avoir également graphiquement leurs phases.

III. 1.3. Détermination du couple résultant en régime déséquilibré.

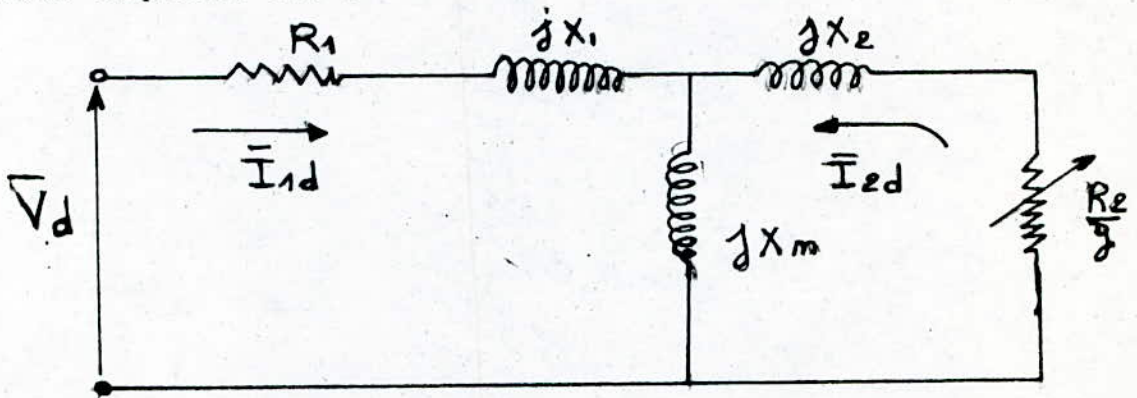
Pour déterminer le couple résultant en régime déséquilibré, nous appliquons comme signal le princi-

pe de superposition. Nous déterminons les couples dûs à la séquence directe et à la séquence inverse qui sont des couples de freinage donc opposés aux premiers et enfin le couple résultant qui est la différence algébrique du couple direct et du couple inverse. Le couple électromagnétique est indépendant de la phase (grandeur scalaire)

a/ Couple dû à la séquence directe :

La séquence directe est représentée par les grandeurs suivantes : V_d , I_d , Z_d , g et Γ_d .

Le circuit électrique équivalent par phase ramené au stator à cette séquence est :



Suivant l'expression (II.27)

$$\Gamma_d = 3 \left[\frac{E_{Th_d}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{g}} \right]^2 \cdot \frac{R_2}{g} \quad (III. 7)$$

b/ Couple dû à la séquence inverse :

La séquence inverse est caractérisée par : V_i , I_i , Z_i et Γ_i .

La pulsation des grandeurs rotoriques pour la séquence inverse est :

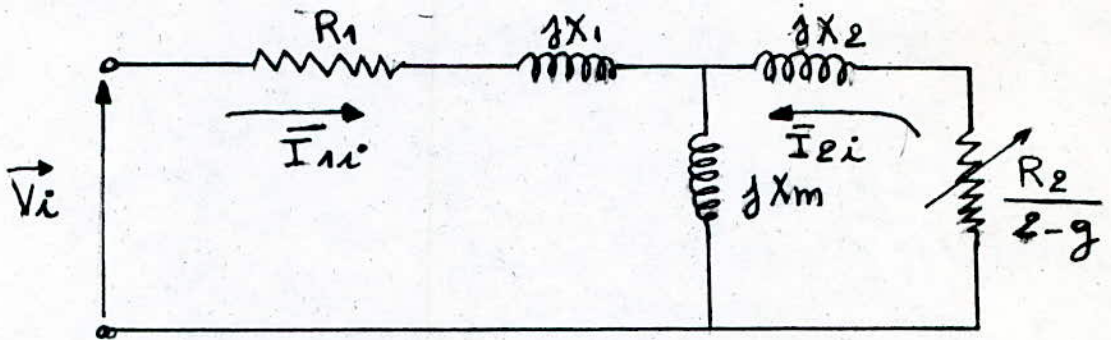
$$w_i = w + w_p$$

$$= w + (1 - g)w$$

(III. 8)

$$w_i = (2 - g)w$$

Le circuit équivalent par phase ramené au stator pour cette séquence est :



toujours pour l'expression (II.28) :

$$P_i = 3 \left[\frac{E_{Th_i}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{2-g}} \right]^2 \cdot \frac{R_2}{(2-g)}$$

(III. 9)

c/ Couple résultant :

$$P = |P_d| - |P_i|$$

(III.10)

C H A P I T R E IV
=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O=O

IV. INFLUENCE DU DESEQUILIBRE DES TENSIONS STATORIQUES SUR LA TEMPERATURE DE LA MACHINE.

IV. 1 - Généralités :

L'étude de l'échauffement d'une machine électrique en général est assez complexe car il est très délicat d'obtenir un modèle thermique adéquat même pour un régime équilibré et encore plus délicat pour un régime déséquilibré. Toutefois, une étude thermique pour une machine électrique est nécessaire à toute conception. L'échauffement maximal admis pour les matériaux constituant une machine est fixé à la construction (classe).

En électrotechnique, les classes normalisées sont suivant leur teneur en chaleur.

| Classe | Y | A | E | B | F | H | C |
|----------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| θ_{\max} (°C) | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | 180 |

Nous savons par l'intermédiaire de la loi de MONTSINGER qu'une surélévation de température d'une machine d'environ 8°C diminue la durée de vie de celle-ci de moitié.

Lors de la conception des machines électriques on doit tenir compte de l'endroit où elles seront utilisées (chaleur ambiante moyenne, latitude, service continu ou discontinu etc ...).

La machine électrique comporte plusieurs parties qui diffèrent par leurs propriétés physiques.

En général, pour analyser l'échauffement on prend pour élément de base un corps homogène où la chaleur se propagera d'une façon uniforme.

Soit (Q) la quantité de chaleur dégagée dans ce corps par unité de temps.

La température augmente de $d\theta$ degrés pendant dt . Dans ce cas la quantité d'énergie absorbée par ce corps sera :

$$G \cdot C \cdot d\theta = E \quad (\text{IV. 1})$$

La quantité d'énergie dissipée par ce corps dans l'espace environnant est :

$$H = S \cdot \lambda \cdot \theta \cdot dt \quad (\text{IV. 2})$$

S : surface du corps (m^2)

Nous pouvons écrire ainsi :

$$Q dt - S \lambda \theta dt = G \cdot C \cdot d\theta \quad (\text{IV. 3})$$

La quantité d'énergie thermique dissipée à la surface du corps augmente jusqu'à atteindre $Q dt$ qui correspond à la température θ_f (régime permanent).

La relation (IV. 3) devient :

$$Q dt - S \lambda \theta_f dt = 0$$

$$\text{Soit : } \theta_f = \frac{Q}{S \lambda} \quad (\text{IV. 4})$$

L'expression (IV. 3) divisée par $S \lambda$ devient :

$$\frac{Q}{S \lambda} dt - \theta dt = \frac{G C d\theta}{S \lambda}$$

$$\text{Soit : } (\theta_f - \theta) dt = T d\theta \quad (\text{IV. 5})$$

$$\text{Avec } T = \frac{G C}{S \lambda} \quad (\text{IV. 6})$$

$$\text{Soit : } \frac{t}{T} = - \ln (\theta_f - \theta) + C$$

$$\text{à } t = 0 ; \theta = \theta_0$$

$$\text{Donc } C = \ln (\theta_f - \theta_0) \quad (\text{IV. 7})$$

$$\theta = \theta_f (1 - e^{-t/T}) + \theta_0 e^{-t/T} \quad (\text{IV. 8})$$

Nous avons donc la température en fonction du temps pour un corps solide homogène qui est une fonction exponentielle où T représente le temps à partir duquel celui-ci commence à se stabiliser.

IV. 2 - Causes au suréchauffement en régime déséquilibré

Notre étude concerne le moteur asynchrone à rotor bobiné alimenté par un système de tensions déséquilibrées. Ce déséquilibre peut provenir de mauvais contacts ou carrément d'une rupture sur une ligne (fusible ayant fondu par exemple). Dans ce cas, les courants sur les deux autres lignes augmentent tandis que celui de la ligne de déséquilibre diminue ou s'annule (monophasé) ce qui a pour conséquence de surcharger la machine, donc d'élever sa température par rapport au cas du régime équilibré à couple résistant donné.

Pour pouvoir répondre à un couple résultant donné, le moteur se trouve plus freiné (le glissement augmente).

Cette explication pour la surélévation de la température est fort sommaire car en réalité l'explication est plus complexe, la machine est électromagnétique donc il faudrait analyser également le côté comportement du champ électromagnétique.

IV. 3 - Influence du taux de déséquilibre sur le couple résultant :

Reprenons les expressions (III. 7), (III. 9) et III. 10)

$$\Gamma_d = 3 \left[\frac{E_{Thd}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{g}} \right]^2 \cdot \frac{R_2}{g \cdot \omega}$$

$$\Gamma_i = 3 \left(\frac{E_{Th_i}}{Z_{Th} + \frac{R_2}{2-g}} \right)^2 \cdot \frac{R_2}{(2-g)}$$

$$\Gamma = |\Gamma_d| - |\Gamma_i|$$

$$\zeta = \frac{v_i}{v_d}$$

Pour une augmentation du taux de déséquilibre assez importante, le couple moteur ne sera plus suffisant pour équilibrer le couple résistant.

Si le déséquilibre a été obtenu avant la mise en fonctionnement du moteur celui-ci risque de ne pas démarrer.

$$|\Gamma_d| \leq |\Gamma_i|$$

Le moteur asynchrone déséquilibré est plus freiné ce qui diminue la ventilation donc l'échauffement sera plus accentué.

Au cours du chapitre suivant nous ferons une étude expérimentale d'un moteur asynchrone alimenté par un système de tensions déséquilibrées.

C H A P I T R E V
=O=

V. ETUDE EXPERIMENTALE.

La machine asynchrone que nous avons utilisée est une machine du Laboratoire d'Electrotechnique du Département. Nous ne pouvons donc nous permettre sa détérioration aussi fallait-il prendre certaines précautions.

Lors du déséquilibre des systèmes de tensions appliquées au stator du moteur le couple résistant est choisi de sorte à ce que l'augmentation du courant dans les phases statiques du moteur ne soit pas trop excessive par rapport au courant admissible.

V. 1 - Identification de la machine utilisée :

- Moteur asynchrone à rotor bobiné LEROY

n° 33255 Série N A 13251

5 ch - 1.425 tr/mn - 50 Hz - 220/380 V 13,7/7,3 A

- L'identification de la machine a permis de déterminer les paramètres du circuit électrique équivalent par phase de la fig. II. 2.

- Nous avons effectué les essais à vide en court-circuit et en transformateur ; ce qui nous a donné les résultats suivants avec la mesure des résistances :

$$R_1 = 0,97 \Omega$$

$$R'_2 = 0,122 \Omega \text{ soit } R_2 = 1,37 \Omega$$

$$a = \frac{U_1}{U_2} \neq 3,7$$

$$\sigma = 1 - \frac{U_1}{U'_1} \cdot \frac{U'_2}{U_2}$$

$$\sigma = 1 - \frac{380}{368} \frac{102}{102}$$

$$\sigma = 0,03$$

Soit le schéma équivalent par phase ramené au stator avec les paramètres suivants :

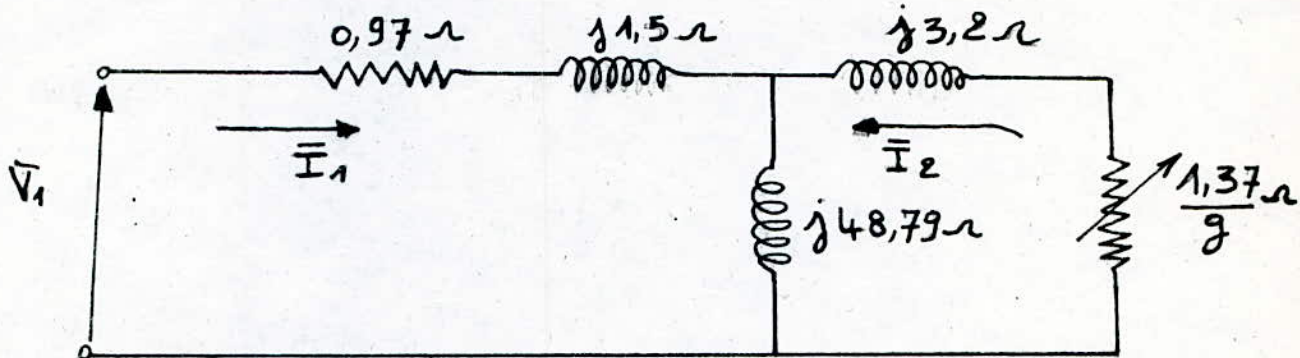


Fig. V. 1

"Schéma électrique équivalent par phase ramené au stator de la machine étudiée".

V. 2 - Enregistrement de l'échauffement en fonction du temps :

Notre enregistrement pour la température en fonction du temps sera limité au niveau du stator car le rotor étant mobile, il est donc difficile de capter la température à son niveau et nous ne disposons pas d'un système adéquat.

Pour prélever la température au niveau de l'enroulement statorique, nous avons utilisé un thermocouple ($N_i C_r$) nous donnant directement la température en °C sur un dispositif digital.

Pour enregistrer la température en fonction du temps, nous avons utilisé une table traçante.

- Banc d'essai.

Pour déséquilibrer notre moteur, nous avons mis en série sur une ligne une résistance provoquant ainsi une chute de tension (fig. V. 2). La chute de tension maximale est obtenue par une coupure complète sur une phase.

- Montage utilisé. (voir fig. V. 2)

V. 3. - Essais et relevés effectués :

Afin d'analyser le comportement thermique du moteur asynchrone en régime déséquilibré, nous avons effectué les essais et relevés suivants :

V. 3.1. Caractéristiques mécanique et électromécanique en régime équilibré.

Il est impossible de tracer expérimentalement la caractéristique mécanique $\Gamma(g)$ sous tension nominale sur toute la gamme de fonctionnement car mise à part la partie instable de cette caractéristique, le courant pour un glissement supérieur au glissement nominal sera inadmissible pour la machine.

Nous avons donc déterminé les caractéristiques mécanique et électromécanique à l'aide du schéma équivalent (chapitre II, expressions II. 28). Ces caractéristiques sont représentées : fig. V. 1 et fig. V. 2.

V. 3.2. Caractéristiques mécanique et électromécanique en régime déséquilibré. ($\tau \neq 0$)

Pour ($\tau = \frac{V_i}{V_d}$) égale à 0,1 nous

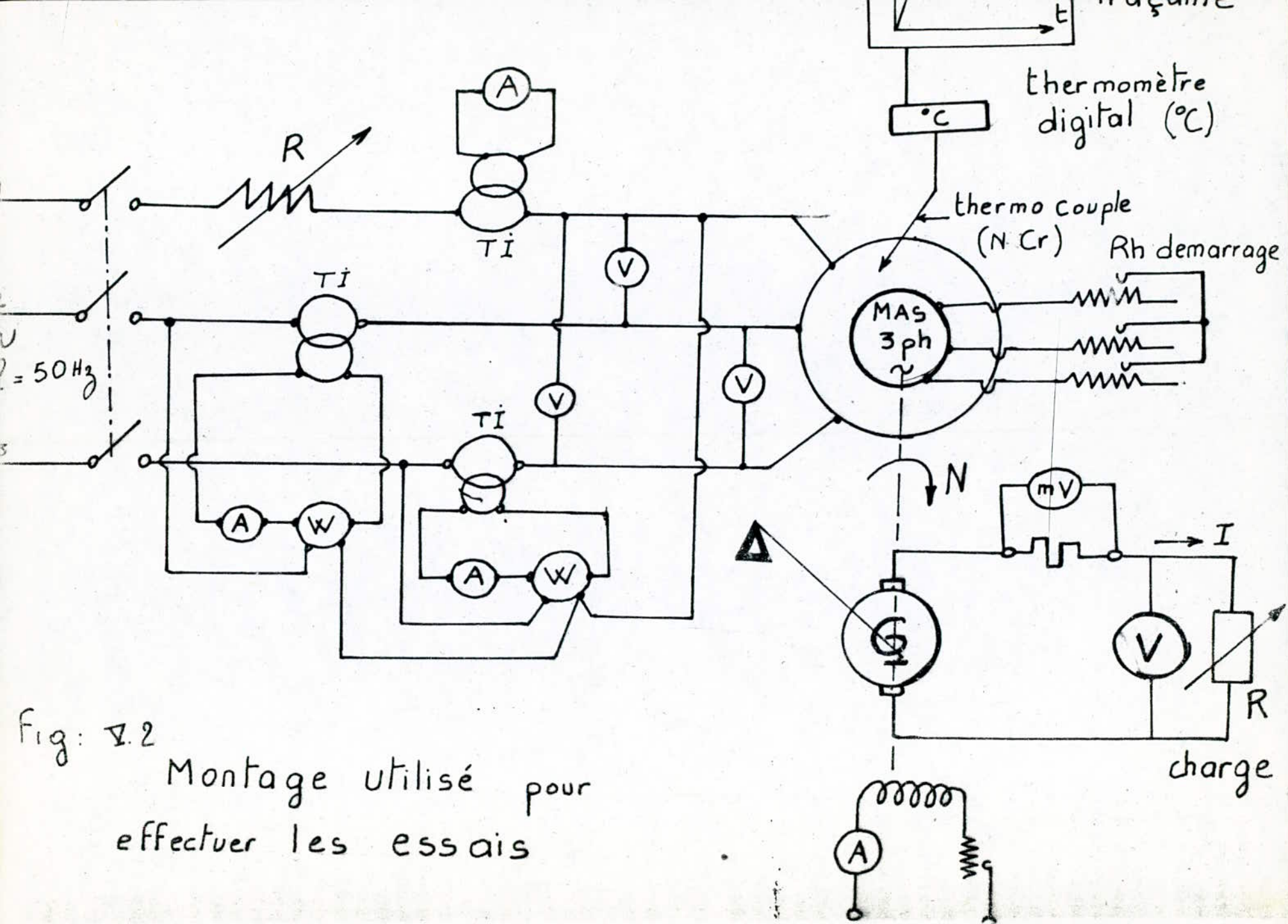


Fig: 2.2
 Montage utilisé pour
 effectuer les essais

avons relevé les caractéristiques mécanique et électromécanique (fig. V. 3) et (fig. V. 4).

Le courant de ligne où le déséquilibre en tension est obtenu diminue tandis que sur les deux autres il augmente.

Sur la caractéristique électromécanique de la fig. V. 4, nous avons représenté le courant en régime équilibré et le courant dans l'une des phases non déséquilibrées en fonction du glissement. Le courant dans cette dernière est plus important, donc l'échauffement sera plus important.

A glissement donné, le couple en régime déséquilibré a diminué (fig. V. 3) mais le courant sur deux phases a augmenté (fig. V. 4) la chaleur ayant augmenté, le rendement du moteur diminue.

V. 3.3. Enregistrement de la surélévation de la température en fonction du temps.

Que ce soit en régime équilibré ou déséquilibré sous différents taux de déséquilibre, nous avons enregistré sur table traçante : $\theta = f(t)$.

Ces enregistrements sont représentés par les figures : V. 5 ; V. 6 ; V. 7 ; V. 8 et V. 9.

Tous ces enregistrements sont effectués à couple constant. Nous avons choisi un couple inférieur au couple nominal car pour ce dernier un léger taux de déséquilibre provoquerait une augmentation de courant inadmissible, pour la machine comme nous l'avons annoncé.

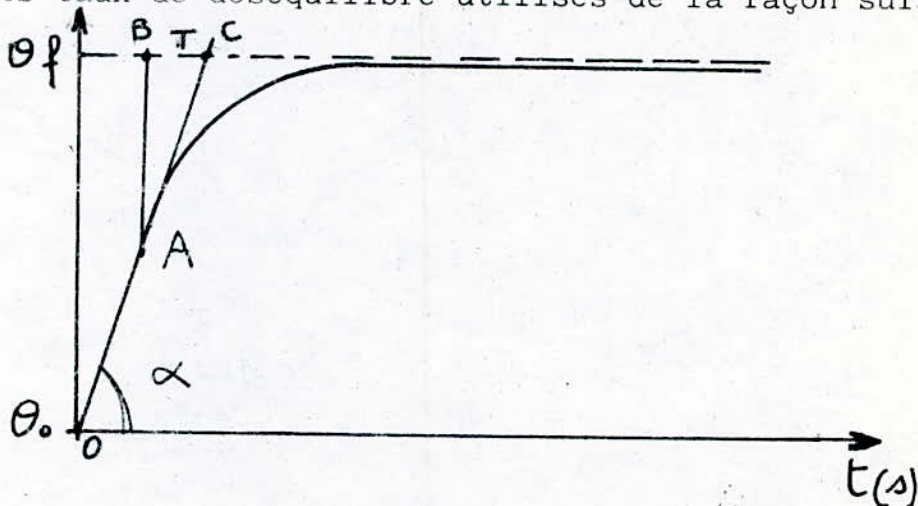
A couple fixé, le courant augmente avec le taux de déséquilibre.

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}, f = 50 \text{ Hz}$$

| τ | 0 | 0,036 | 0,04 | 0,06 | 0,1 |
|--|----|-------|-------|------|-----|
| I_1 ligne (phase déséquilibrée) (A) (fig. V.2) | 12 | 9 | 3,2 | 4,8 | 0 |
| I_2 (ligne) (A) (fig. V.2) | 12 | 13,6 | 16,64 | 20 | 20 |
| I_3 (ligne) (A) (fig. V.2) | 12 | 12,6 | 17,36 | 20 | 20 |

- Détermination de la constante de temps T.

A partir des enregistrements effectués sur table traçante de l'échauffement en fonction du temps, nous avons déterminé les constantes de temps (expression IV. 8) pour les différents taux de déséquilibre utilisés de la façon suivante :



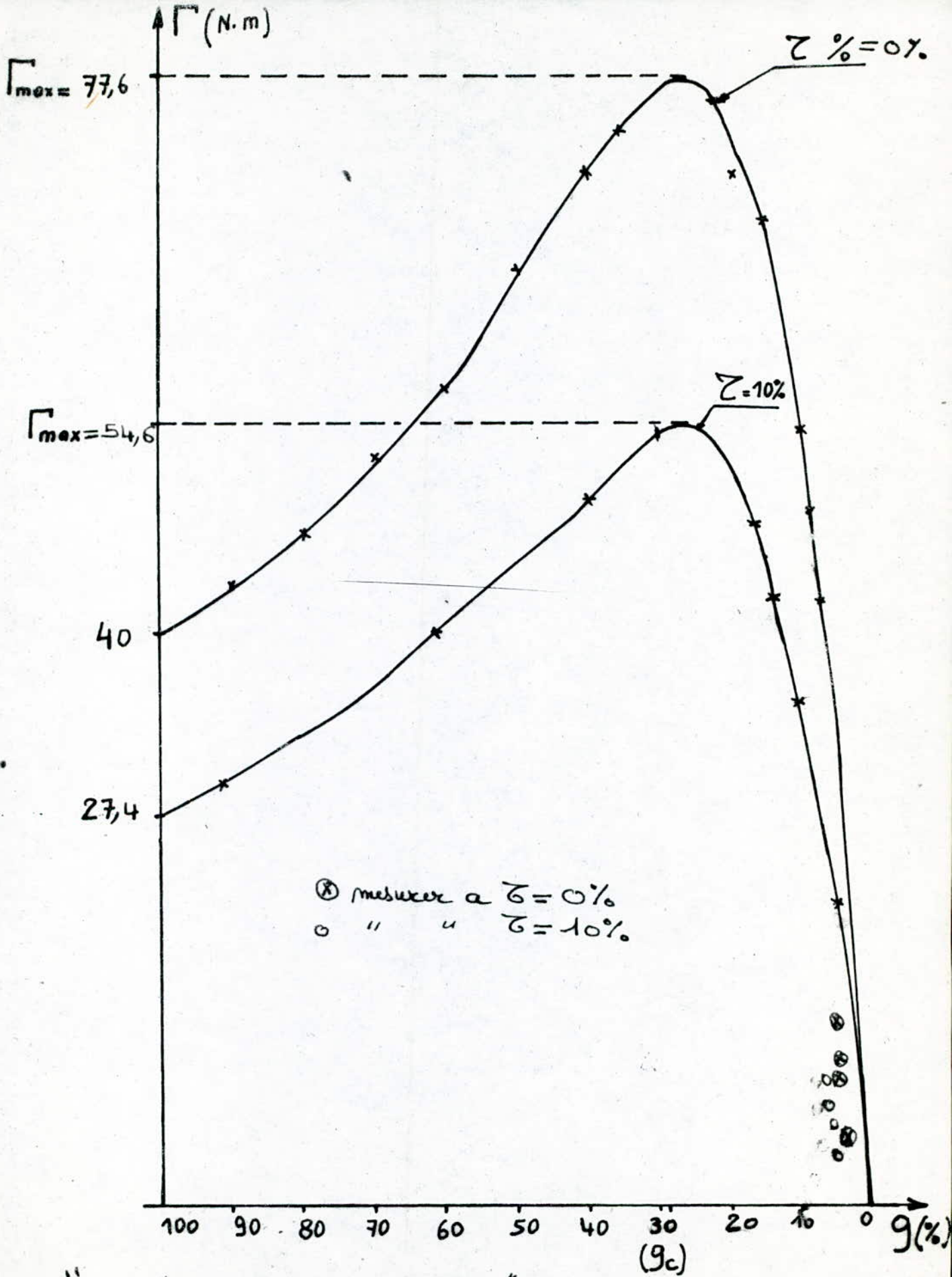
Nous traçons la tangente en A à $\theta = f(t)$ à τ donné, celle-ci coupe l'asymptote à $\theta = f(t)$ en C.

Ainsi $T \neq B C$ (s)

Sur les figures ~~V. 5 ; V. 6 ; V. 7~~ ; V. 8 et V. 9, nous remarquons qu'à couple donné, la surélévation de température est d'autant plus importante que le taux de déséquilibre est élevé.

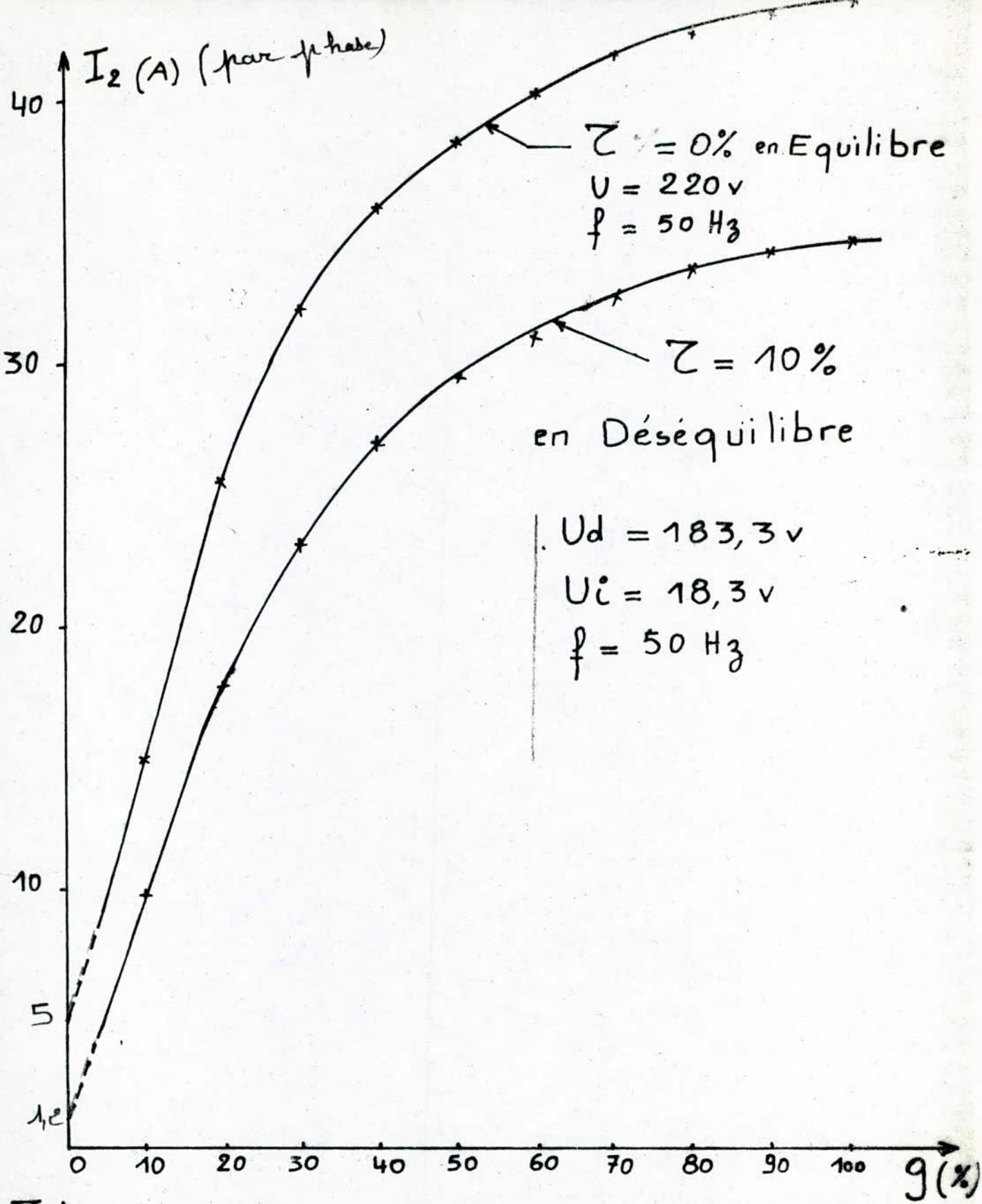
La température finale (régime établi) est atteinte plus rapidement quand le taux de déséquilibre (τ) augmente. Pour les mesures que nous avons effectuées, nous montrons cela fig. V. 10.

Il est très important de noter qu'également nous avons constaté que pour les mêmes conditions de fonctionnement, la surélévation de la température d'une machine asynchrone en fonction du temps est reproductible (nous avons obtenu le même enregistrement de $\theta = f(t)$ à plusieurs reprises).



"caractéristiques mécaniques"

Fig V. 3



3: V 4

"Caracteristiques electromecaniques"

monophasé

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}$$

$$\tau = 10\%$$

$$t_p = 51,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

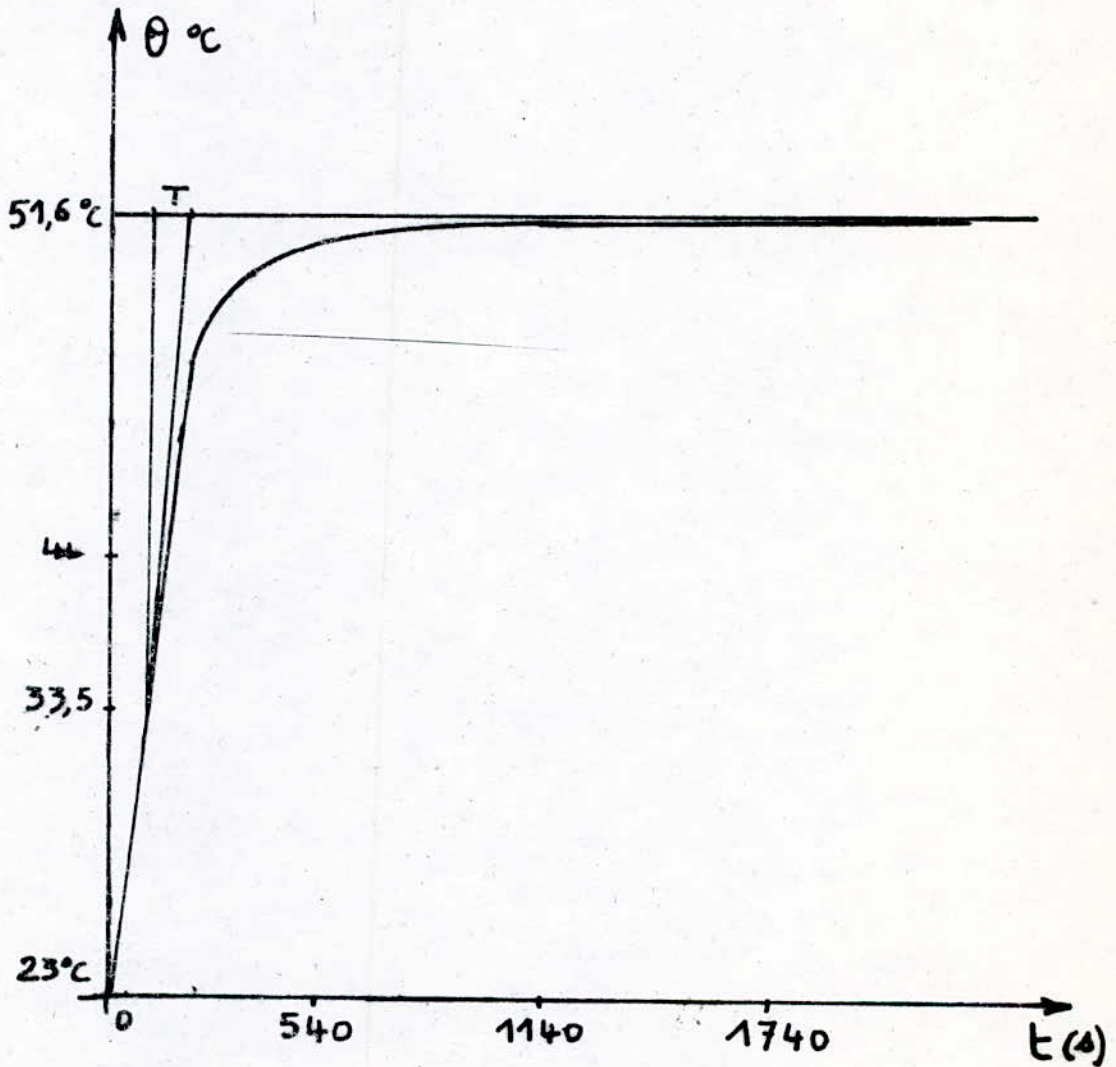


fig: V.5

"temperature en fonction du temps"

$$\Gamma = 11,82$$

$$\tau = 6\%$$

$$\theta_f = 44^\circ\text{C}$$

$$\theta_0 = 23^\circ\text{C}$$

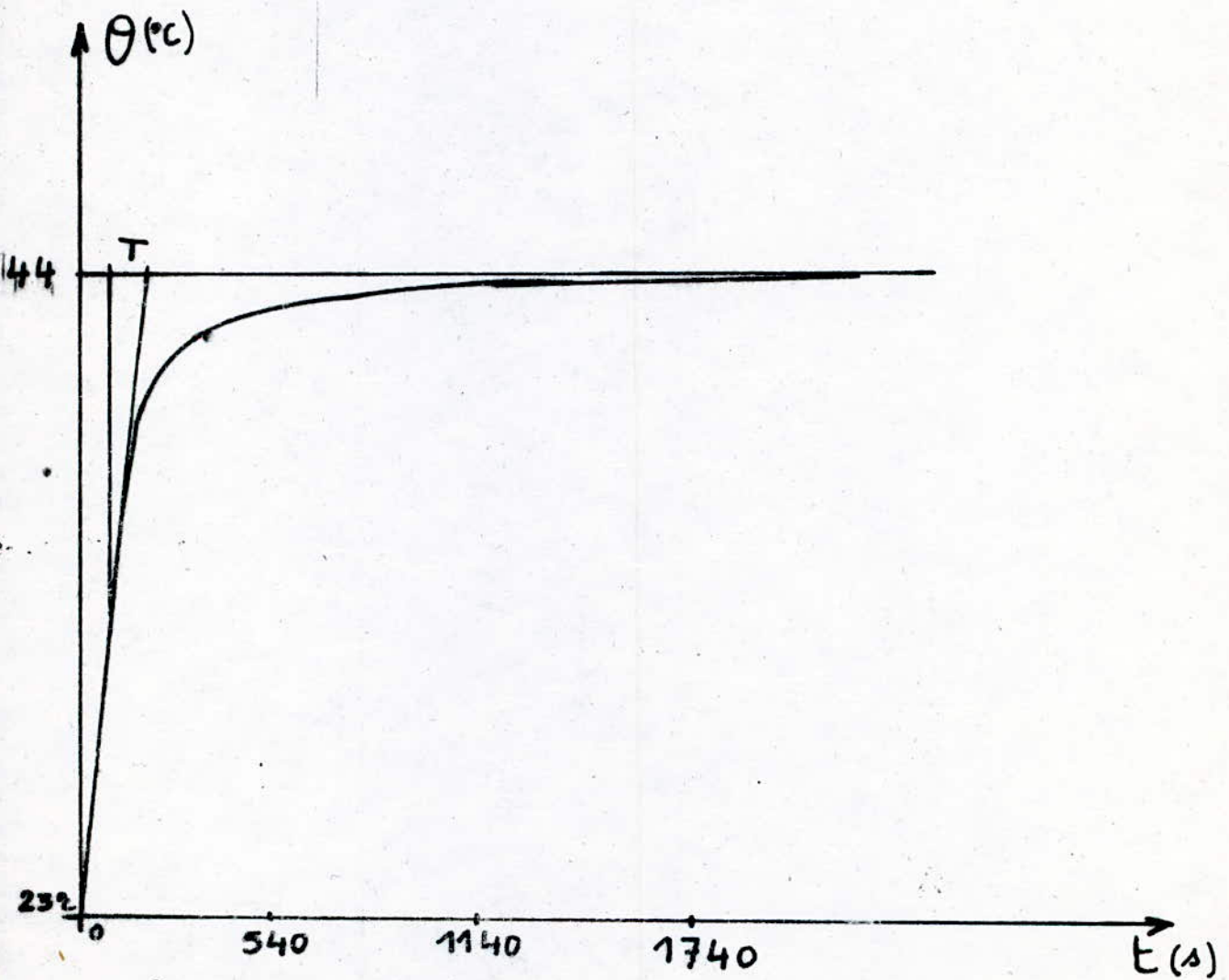


fig : V.6 "temperature en fonction du temps"

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}$$

$$\zeta = 4\%$$

$$\theta_f = 40^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = 23^\circ\text{C}$$

$$t = 2000 \text{ s}$$

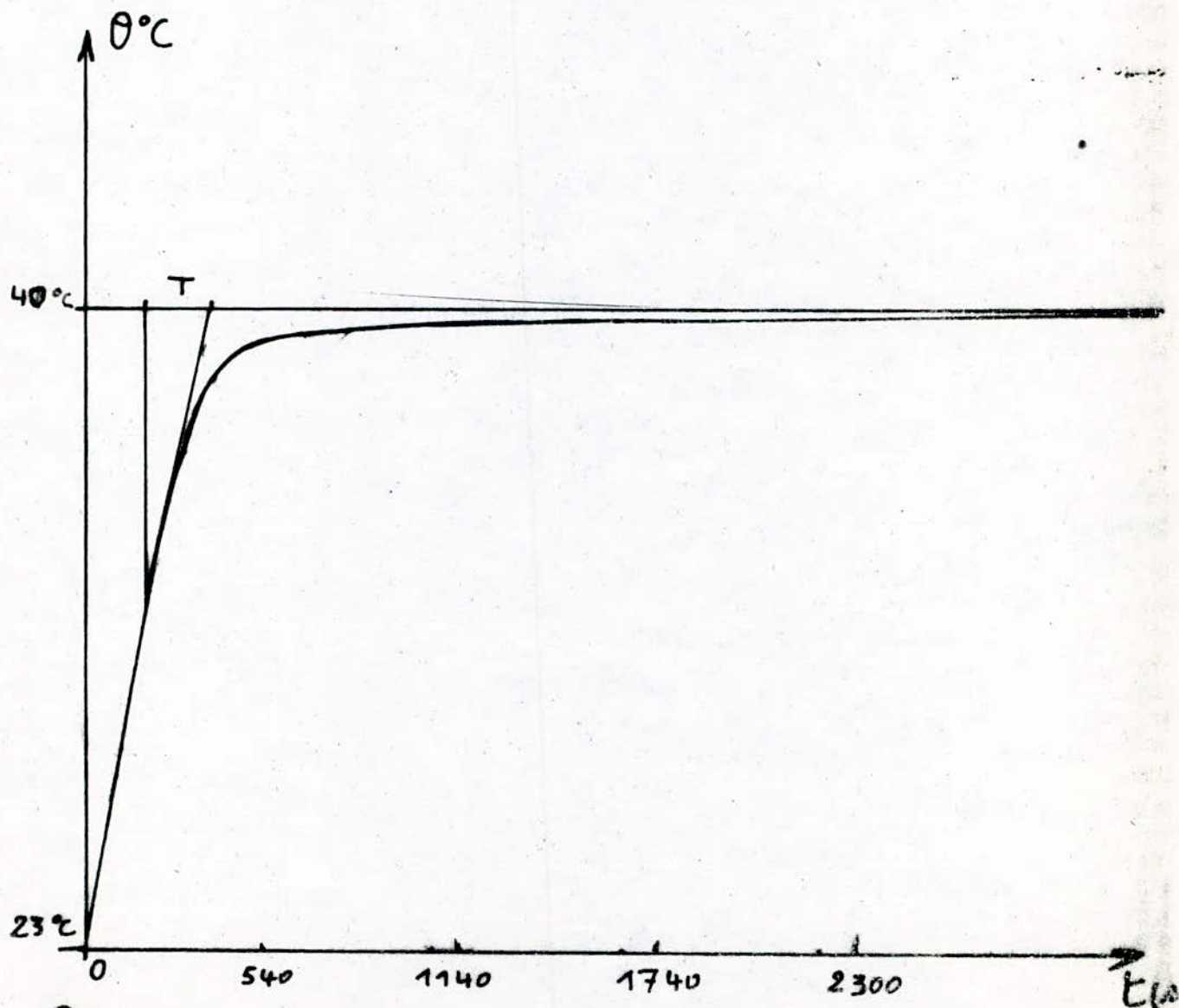


fig V.7

"température en fonction
du temps"

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}$$

$$\zeta = 3,7\%$$

$$\theta_i = 23^\circ\text{C}$$

$$\theta_f = 36^\circ\text{C}$$

$$t = 2100 \text{ s}$$

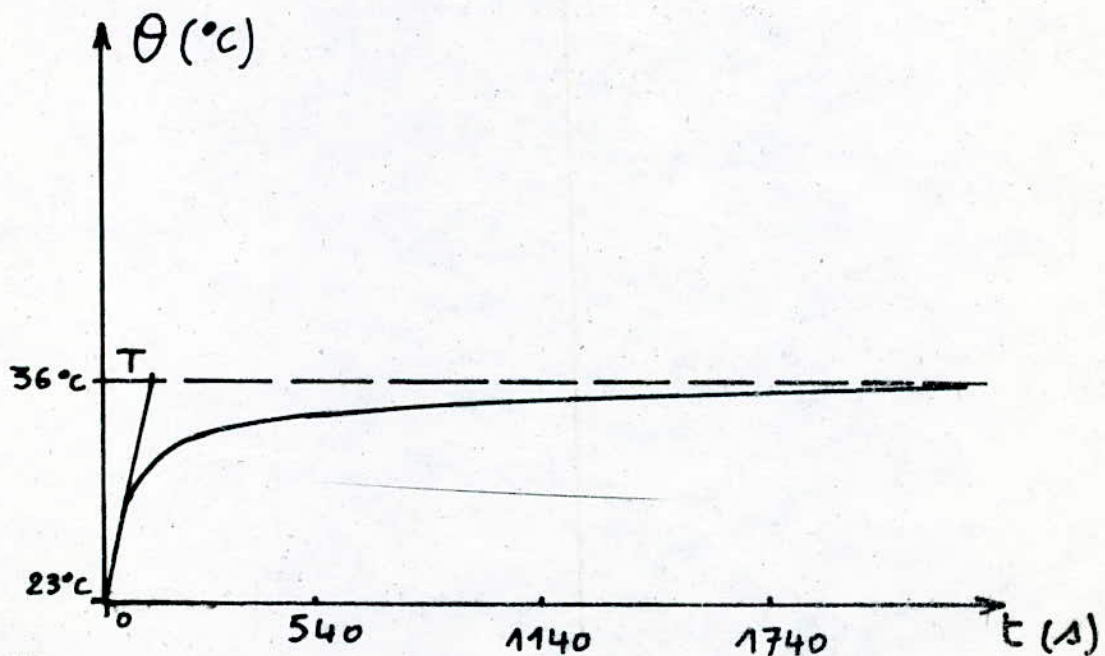


fig: V.8

" Temperature en fonction
du temps "

en Equilibre

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}$$

$$U = 230 \text{ V}$$

$$I = 12 \text{ A}$$

$$N_2 = 1400 \text{ tr/min}$$

$$\theta_0 = 23^\circ\text{C}$$

$$\theta^{\circ}f = 33,4^\circ\text{C}$$

$$\tau = 0\%$$

$$t_p = 2600 \text{ s}$$

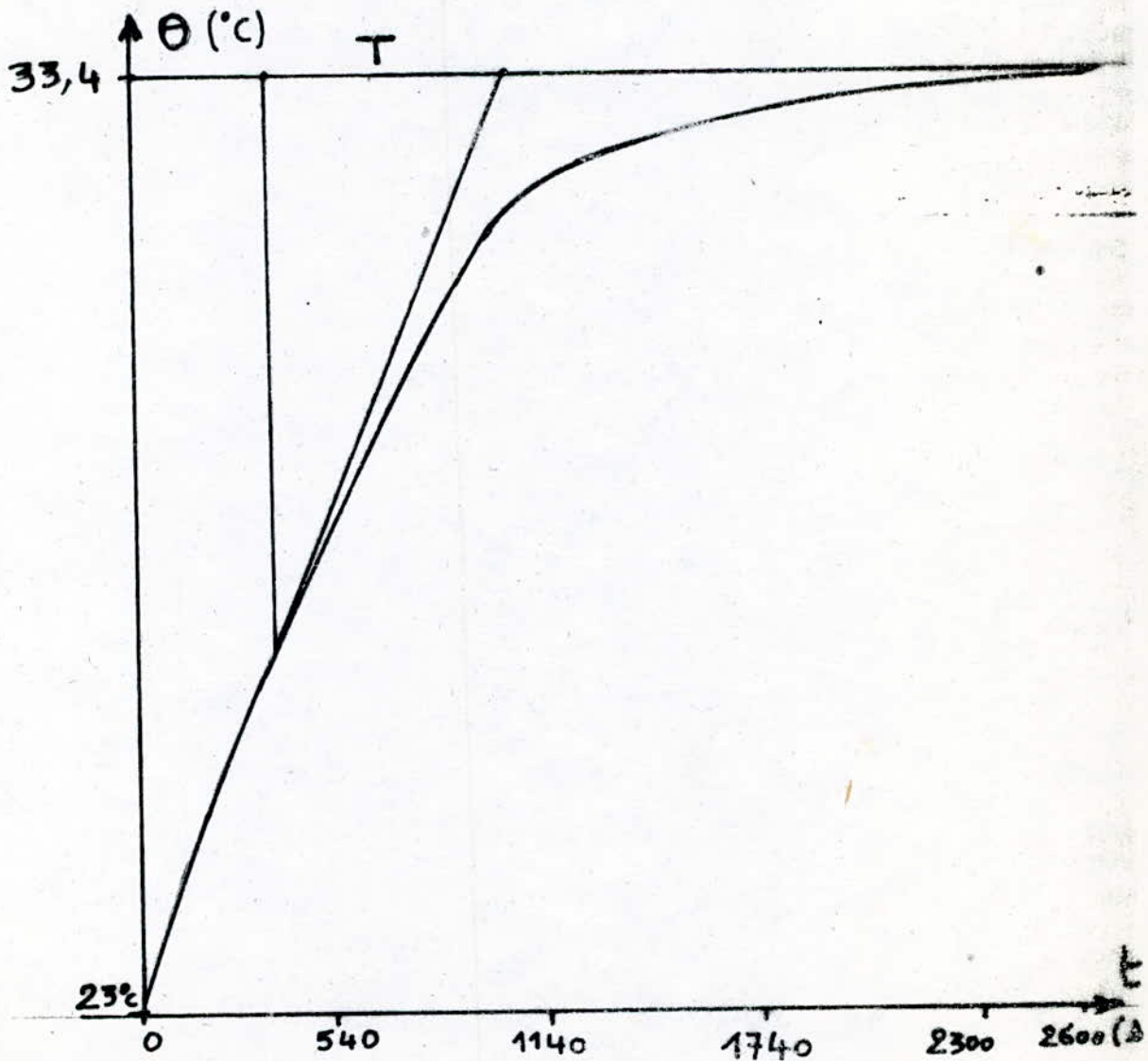
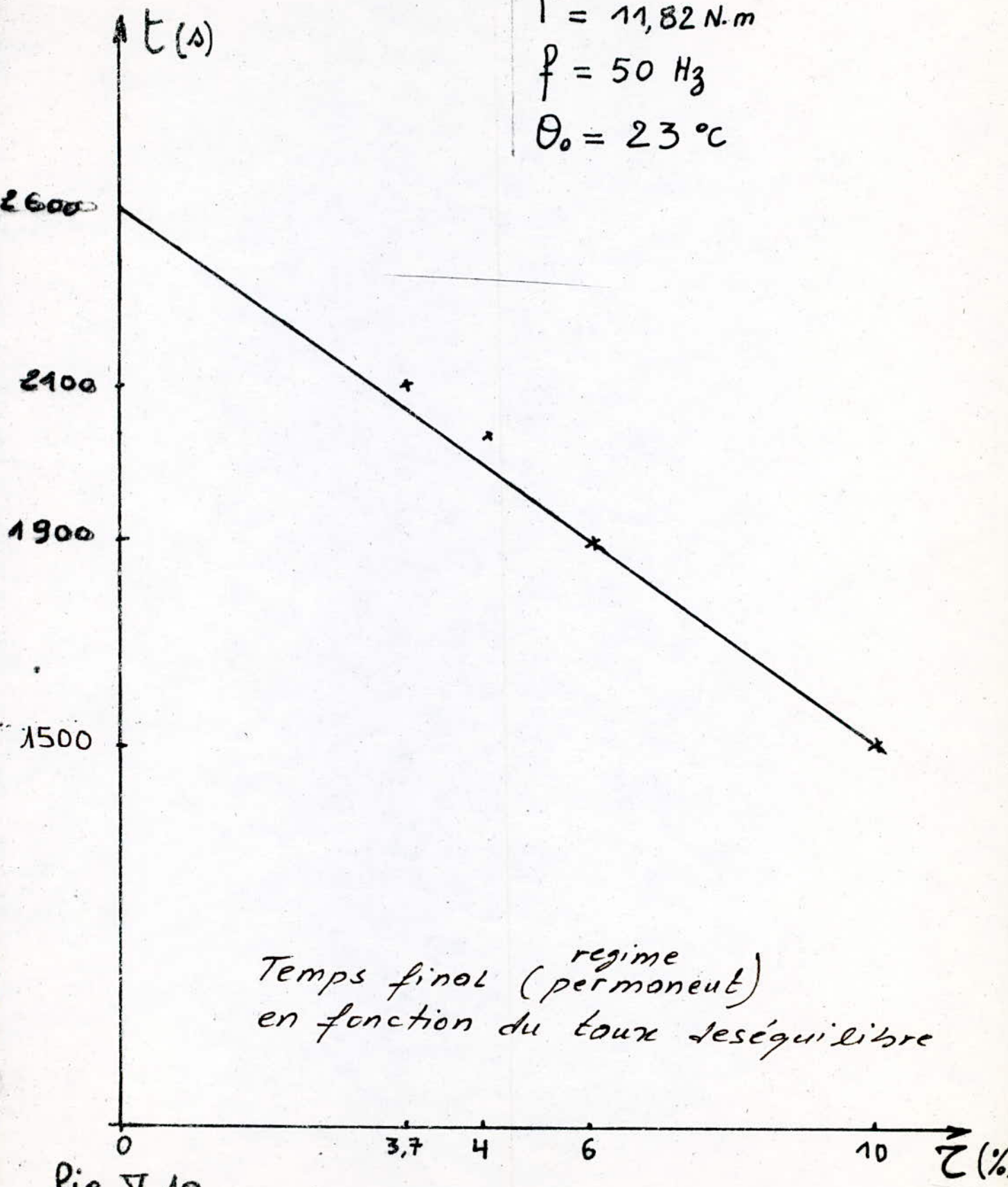


fig: 9

"Temperature en fonction
du temps"

$$\Gamma = 11,82 \text{ N.m}$$
$$f = 50 \text{ Hz}$$
$$\theta_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$



Temps final ^{regime} (permanente)
en fonction du taux d'esquilibrium

fig V 10

VI. CONCLUSION.

D'un point de vue général, il en ressort de notre étude qu'une alimentation déséquilibrée pour un moteur asynchrone est néfaste car elle entraîne une surélévation de température d'autant plus élevée que le taux de déséquilibre est important.

Avec l'augmentation du taux de déséquilibre, le moteur s'échauffe plus rapidement donc il faut prévoir un dispositif de protection (déclencheurs thermiques par exemple) pour les machines de grandes puissances travaillant d'une façon continue sans surveillance.

Pour un moteur asynchrone entraînant une charge en fournissant un couple environ égal au couple nominal, un léger déséquilibre provoquerait une surélévation de température qui à la longue diminuerait la durée de vie de la machine.

Le fait que l'échauffement d'une machine asynchrone suit une loi exponentielle en fonction du temps comme pour un corps solide homogène même en régime déséquilibré aidera à déterminer un modèle thermique pour cette machine.

Notre travail pourrait être approfondi par des projets antérieurs en étudiant plus en détails l'effet du déséquilibre sur l'échauffement (côté champ magnétique déséquilibré).

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

- 1/ - M. KOSTENKO et L. PIOTROVSI.
Machines électriques - Tomes I et II
Editions MIR (1969)

- 2/ - G. SEGUIER et F. NOTELET.
Electrotechnique Industrielle
Edition Technique et Documentation (1979)

- 3/ - F. NOTELET - G. SEGUIER et J. LESSNNE.
Introduction à l'Electrotechnique Approfondie
Edition Technique et Documentation (1981)

- 4/ - B. JONES.
The Unified Theory of Electrical Machins
(LON) (15248) - (1967)

- 5/ - A. MAAZI.
Thèse de Magister
ENP - 1982