

AGREGATION INTERNE DE GENIE ELECTRIQUE

OPTION B

ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Etude d'un système industriel (durée 8 heures)

OPERA THEATRE DE NANCY

ECLAIRAGE ET FORCE MOTRICE

RECOMMANDATIONS AUX CANDIDATS

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur des feuilles séparées et clairement repérées. Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre, les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

ORGANISATION DU SUJET

SUJET : Parties 1 à 4 (17 pages).

DOCUMENTS REPONSE : Documents Réponse RP1 à RP3 (3 pages).

Note aux candidats:

Les parties 1, 2, 3 et 4 sont indépendantes.

Présentation des applications numériques.

Lors du passage d'une forme littérale à son application numérique il est demandé aux candidats de procéder comme suit :

Après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Introduction.

La distribution électrique de l'Opéra Théâtre de Nancy a été modifiée à la faveur de la rénovation récente de cet établissement. Une nouvelle étude de l'installation est devenue nécessaire à cause notamment de l'augmentation du nombre de projecteurs de la scène. Mais surtout, l'emploi généralisé de gradateurs de lumière électroniques aurait pu conduire à la surcharge du transformateur d'alimentation et du conducteur neutre. Le but de ce projet est de mettre en évidence les principaux écueils rencontrés par les techniciens d'étude de l'installation.

Première partie

I. Etude en courant monophasé d'un projecteur alimenté par un gradateur de tension.

On décide d'étudier la puissance absorbée par un projecteur. On commande le gradateur par une tension variant de 0 à 10 volts pour obtenir un angle de retard à la conduction α de 180° à 0° . Cette commande se nomme « par angle de phase ». Le gradateur est composé de deux thyristors supposés parfaits. La tension $v(t)$ est sinusoïdale et a pour expression $v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$. La fréquence f du réseau est de 50 hertz. On admettra que la lampe halogène a les propriétés d'une résistance pure indépendante de la température.

I.A. La charge est une résistance pure.

- Tension d'alimentation $V = 230 \text{ V}$; 50 Hz
- Lampe halogène OSRAM CP 29 ; tension 230 V ; puissance 5 kW.

I.A.1. Valeur efficace du courant et puissance électrique.

Le montage est représenté sur la figure I.1.

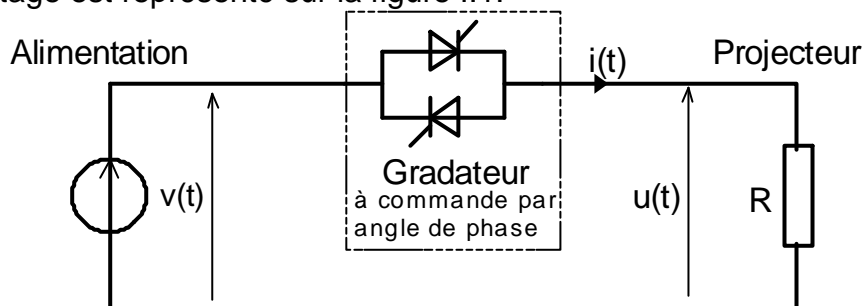


Figure I.1.

I.A.1.1. Donner les formes d'ondes des grandeurs électriques $i(t)$ et $u(t)$ pour $\alpha = 60^\circ$.

I.A.1.2. Exprimer le courant efficace I_{EFF} en fonction de la valeur maximale V_{MAX} de la tension $v(t)$, de R et de l'angle d'allumage α .

I.A.1.3. Calculer la valeur efficace du courant traversant la lampe halogène et la puissance électrique absorbée par la lampe halogène pour $\alpha \in \{0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ\}$.

I.A.2. Décomposition en série de Fourier du signal $i(t)$. On désire présenter l'expression du courant instantané sous la forme :

$$i(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos n\alpha + B_n \cdot \sin n\alpha) \quad \text{avec} \quad \alpha = \omega t \quad \text{et} \quad \omega T = 2\pi$$

Le rang de l'harmonique considéré est noté n .

I.A.2.1. Donner les expressions des termes A_n et B_n en fonction de V_{MAX} , R , n et de l'angle d'allumage α_0 .

I.A.2.2. Calculer la valeur efficace des harmoniques du courant $i(t)$ du fondamental jusqu'au rang 11 pour $\alpha_0 = 90^\circ$.

I.A.2.3. Préciser dans quelle proportion chacun des harmoniques de courant participe à l'échange de puissance active P entre le réseau d'alimentation et le projecteur. Justifier les réponses.

I.A.2.4. Calculer la puissance réactive Q_A fournie par l'alimentation pour les valeurs $\alpha_0 \in \{0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ\}$.

Déterminer la valeur de α_0 pour laquelle la puissance réactive moyenne est maximale.

Définition de la puissance réactive instantanée : $q_A(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot i(t)$

I.A.3. Les chocs thermiques

Les contraintes thermiques, souvent importantes dans les projecteurs, peuvent être limitées en plaçant une résistance R_h en parallèle avec le gradateur pour préchauffer le projecteur comme sur la figure I.2.

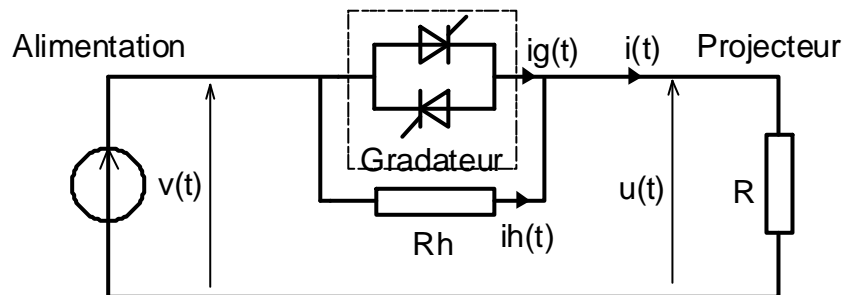


Figure I.2

R_h vaut 100Ω et l'on admet que la résistance de l'halogène ne varie pas avec la température.

I.A.3.1. Donner la forme de $u(t)$ et $i(t)$ pour $\alpha_0 = 90^\circ$. Calculer alors la puissance P_A fournie par la source.

I.A.3.2. Montrer que la puissance réactive moyenne Q_A a diminué en étudiant l'allure de la courbe de la puissance réactive instantanée $q_A(t)$ en fonction de α pour $\alpha_0 = 90^\circ$.

I.B. La charge est inductive.

En réalité, la lampe halogène apparaît au gradateur comme un récepteur inductif à cause de son câble d'alimentation (longueur 50 m). Sur la figure I.3 la lampe est symbolisée par une résistance R en série avec une inductance L . En régime sinusoïdal à 50 Hz, l'ensemble câble et lampe halogène a un facteur de puissance $\cos \varphi = \cos \frac{\pi}{12}$

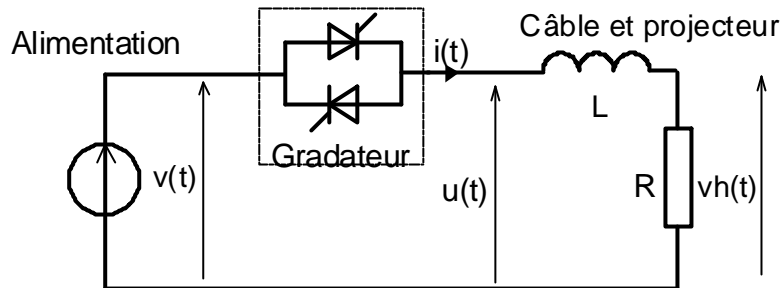


Figure I.3

I.B.1. On pose $\underline{Z} = R + jL\omega$ et $Q = \frac{L\omega}{R}$. Etablir l'expression du courant $i(\alpha)$ en fonction de V_{MAX} , Z , Q , α , ω , j et α (rappel : $\alpha = \omega t$).

I.B.2. Représenter et commenter les formes d'ondes des grandeurs électriques $i(\alpha)$ et $u(\alpha)$ selon que l'angle d'allumage α est supérieur, égal ou inférieur au déphasage j .

I.C. Protection des composants

Les composants de puissance subissent à leurs bornes des variations de tension. On les protège par un réseau R_p, C_p branché à leurs bornes (figure I.4).

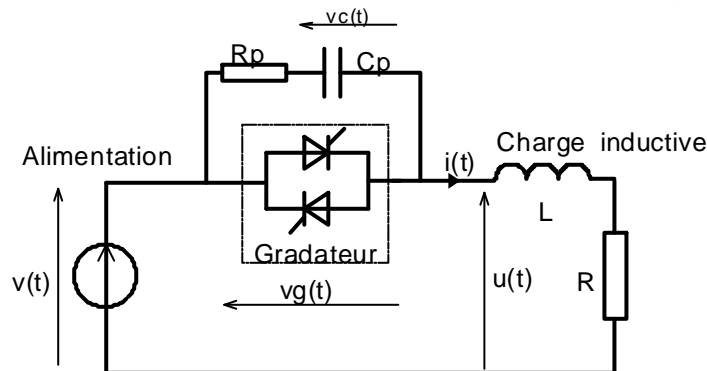


Figure I.4

On dit qu'il s'agit d'une « protection contre les $\frac{dv}{dt}$ ».

Extrait de la notice de calcul d'un fabricant de semi-conducteurs :

« Le circuit de protection est constitué par un réseau R_p, C_p . Le condensateur, en se chargeant, limite la vitesse de croissance de la tension aux bornes du triac ou du thyristor. La résistance R_p amorti le circuit oscillant constitué par l'inductance de la charge et le condensateur C_p . Le courant choisi sera celui qui circulerait dans le triac, celui-ci ayant un angle de passage de 360° ($\alpha = 0$). Les valeurs R_p, C_p sont calculées dans le cas le plus

défavorable où la charge est très inductive soit pour $Q = \frac{L\omega}{R} \gg 1$ ($\varphi \approx \frac{\pi}{2}$) et pour un angle d'allumage α_0 qui tend vers $\frac{\pi}{2}$ à l'aide des formules suivantes :

$$C_p(\mu\text{F}) = \frac{0,15 \cdot I_{\text{EFF}}}{\left[\frac{dv_g}{dt} \right]_{\text{MAX}}^2 (\text{V} / \mu\text{s})} \text{ et } R_p(\Omega) = \frac{1000}{\sqrt{C_p(\mu\text{F}) \cdot I_{\text{EFF}}}} \text{ . . .}$$

I.C.1. Montrer que dans les conditions précisées par le fabricant :

- le courant dans la charge vaut $I_{\text{EFF}} = \frac{V_{\text{EFF}}}{L\omega}$.
- la tension d'alimentation $v(t)$ vaut V_{MAX} au moment de la coupure du courant pendant l'alternance positive du réseau.

$$\text{On pose } \omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C_p} \text{ et } Q_0 = \frac{L\omega_0}{R_p} \text{ .}$$

$$\text{Le facteur d'amortissement du circuit est : } m = \frac{1}{2Q_0}$$

I.C.2. Etudier l'évolution de la tension $v_c(t)$ aux bornes du condensateur C_p après la coupure du courant $i(t)$ pendant l'alternance positive du réseau en fonction de ω_0 , m , V_{MAX} et du temps. Comme la pulsation propre ω_0 du circuit oscillant est très supérieure à la pulsation ω du réseau, on peut considérer que la tension $v(t)$ est constante pendant le régime transitoire soit : $v(t) = V_{\text{MAX}} = \text{constante}$.

I.C.3. Démontrer que $C_p = \frac{V_{\text{MAX}}^2}{L \left[\left(\frac{dv_g}{dt} \right)_{\text{MAX}} \right]^2}$ dans l'hypothèse où le circuit résonant est

très faiblement amorti ($R_p=0$, donc $v_c(t) = v_g(t)$).

I.C.4. En conservant la valeur C_p précédente, on veut maintenant régler l'amortissement du circuit R_p, L, C_p de façon à limiter la valeur de crête de la tension

$v_g(t)$ à la valeur $V_{g_{\text{MAX}}}$. Montrer que $R_p \approx 1,465 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_p}} \log_{10} \frac{V_{\text{MAX}}}{V_{g_{\text{MAX}}} - V_{\text{MAX}}}$ en

confondant la pulsation propre ω_p du système amorti avec la pulsation propre ω_0 du système non amorti.

I.C.5. On choisit un dépassement de 15 % soit : $\frac{V_{g_{\text{MAX}}} - V_{\text{MAX}}}{V_{\text{MAX}}} = \frac{15}{100}$. Vérifier les

formules de calcul de R_p et C_p indiquées dans la notice du constructeur présentée plus haut.

Déterminer C_p et R_p en adoptant pour $\frac{dv_g(t)}{dt}$ la valeur maximale de $5 \cdot 10^6$ V/s,

$$I_{\text{EFF}} = 20 \text{ A et } V_{\text{MAX}} = 230 \cdot \sqrt{2} \text{ .}$$

Notations pour la partie 1	
w, f, T	Pulsation, fréquence, période du réseau (f=50 Hz)
v(t)	Tension d'alimentation instantanée de l'ensemble gradateur et projecteur
V_{MAX}	Amplitude de v(t)
i(t), i(a)	Intensité du courant instantané dans le projecteur
V	Tension d'alimentation efficace de l'ensemble gradateur et projecteur
I_{EFF}	Valeur efficace du courant i(t)
I_{Hn}	Valeur efficace de l'harmonique de rang n du courant i(t)
A_n, B_n	Amplitude des composantes des harmoniques de i(α)
a	Angle électrique $\alpha = \omega.t$
a_o	Angle de retard à la conduction des thyristors
a₁	Angle d'extinction du courant dans le projecteur
u(t)	Tension instantanée aux bornes du projecteur
U_{Hn}	Valeur efficace de l'harmonique de tension de rang n
P	Puissance active dissipée dans le projecteur
P_A	Puissance active fournie par l'alimentation
P_{H1}	Puissance active du premier harmonique fournie par l'alimentation
q_{A(t)}	Puissance réactive instantanée fournie par l'alimentation
Q_A	Puissance réactive fournie par l'alimentation
Q	Facteur de qualité du récepteur à 50 Hz
Q_o	Facteur de qualité du circuit oscillant
w_o, w_p	Pulsation propre du circuit non amorti et pulsation propre du circuit amorti
R_h	Résistance de préchauffage
R, L	Résistance et inductance du projecteur muni de son câble d'alimentation
cos j	Facteur de puissance du récepteur R, L en régime sinusoïdal
R_p, C_p	Réseau de protection contre les $\frac{dv}{dt}$
vc(t), vg(t)	Tensions instantanées aux bornes du condensateur C _p et du gradateur
V_{Hn}	Harmonique de tension de rang n apparaissant sur la tension d'alimentation
R_s, L_s	Eléments du modèle de l'impédance de l'alimentation de projecteur
L_f, C_f	Eléments du filtre de l'harmonique de rang 3

Deuxième partie

II. Etude du transformateur de distribution.

La configuration du réseau de distribution du théâtre est conforme à la figure II.1. page 14.

II.A. Système équilibré linéaire.

Hypothèses : l'angle d'allumage des convertisseurs est nul ($\alpha=0$, les courants sont sinusoïdaux, absence d'harmoniques de courants). **Tous les récepteurs inventoriés sur la figure II.1 sont sous tension réalisant une charge triphasée équilibrée.**

Important : les caractéristiques des récepteurs reliés au jeu de barres indiquées sur la figure II.1 ont été relevées sur les plaques signalétiques de ces récepteurs . Les puissances indiquées correspondent à une tension nominale de 230 V.

II.A.1. Modélisation de la distribution ramenée au jeu de barres

II.A.1.1. *Quel est le modèle de Kapp (modèle série) du transformateur Tc pris séparément ?*

II.A.1.2. *Calculer l'impédance du réseau E.D.F ramené au secondaire de Tc. L'utilisation d'un régulateur de tension permettra de négliger cette impédance dans la suite du problème.*

II.A.1.3. *L'impédance des conducteurs situés entre le transformateur Tc et le jeu de barres est de 2,37 m Ω par phase. On admettra que ces conducteurs sont essentiellement résistifs. Modéliser la distribution au niveau du jeu de barres. Calculer la puissance de court-circuit au niveau du jeu de barres.*

II.A.1.4. *Calculer la chute de tension au niveau du jeu de barres lorsque tous les récepteurs sont alimentés.*

II.A.1.5. *Calculer le rendement du transformateur lorsque tous les récepteurs sont alimentés.*

II.B. Système équilibré non linéaire. Filtrage des harmoniques.

L'angle d'allumage α et le courant sont les mêmes sur les trois phases. On désire éliminer une partie des harmoniques de rang 3. Pour la suite on prendra : $R_b = 5,50 \text{ m}\Omega$ et $L_b = 30 \mu\text{H}$.

II.B.1. Le filtre est un filtre passif {Lf,Cf} avec une résistance nulle .

Le modèle équivalent pour une phase est donné par la figure II.2

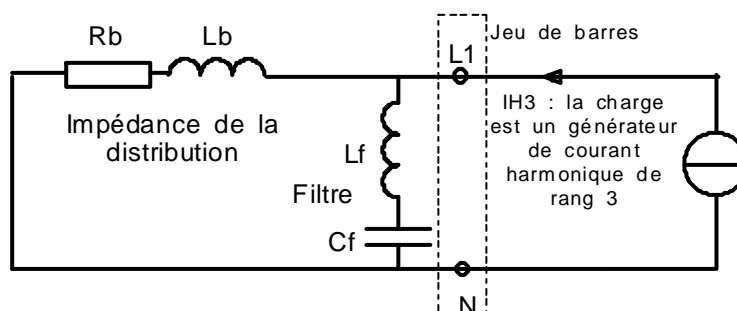


Figure II.2

II.B.1.1. Calculer la valeur de L_f sachant que $C_f = 100 \text{ mF}$. Exprimer l'impédance amont du jeu de barres \underline{Z} vue entre la phase L1 et le neutre N (impédance du générateur de Thévenin) en fonction de la pulsation du courant ω .

II.B.1.2. Calculer la valeur approchée de la fréquence de résonance parallèle (appelée aussi fréquence d'antirésonance) pour laquelle le module de \underline{Z} , noté Z , présente une valeur maximale. Comparer les valeurs de l'impédance Z pour la fréquence d'antirésonance et pour la fréquence du réseau (50 Hz). Expliquer pourquoi ce phénomène d'antirésonance peut perturber l'installation et comment il est possible de le diminuer ou de l'éviter.

II.B.1.3. Expliquer le comportement d'un transformateur d'alimentation de couplage Yz_n , vis à vis des harmoniques de courants de rang $3k$ (multiple de trois) produits au secondaire par une charge triphasée équilibrée. Limiter l'étude à un transformateur parfait.

II.B.1.4. Le filtre est imparfait (figure II-3).

Le but est de calculer l'efficacité du filtre à la fréquence de résonance de 150 Hz.

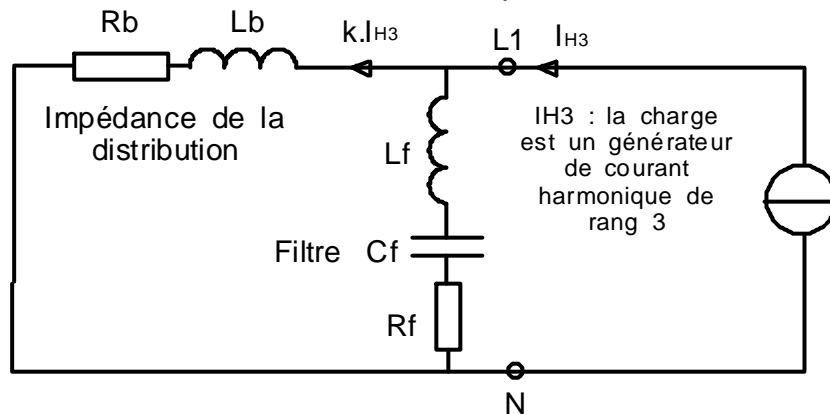


Figure II.3

On tient compte de la résistance R_b du filtre telle que $R_f = R_b = 5,50 \text{ m}\Omega$; $L_b = 30 \text{ }\mu\text{H}$; $C_f = 100 \text{ }\mu\text{F}$. La valeur de L_f est celle établie précédemment.

II.B.1.5. Calculer le rapport k entre la valeur efficace du courant harmonique 3 dans le transformateur et la valeur efficace du courant harmonique 3 généré par la charge.

II.C. Etude du courant dans le neutre et choix du disjoncteur.

II.C.1. Etude en triphasé (figure II-4) **d'un système de gradateurs à courants identiques** (ou équilibré). L'angle d'allumage est mesuré à partir du passage à zéro de la tension simple. Il est de 90° pour chacun des gradateurs.

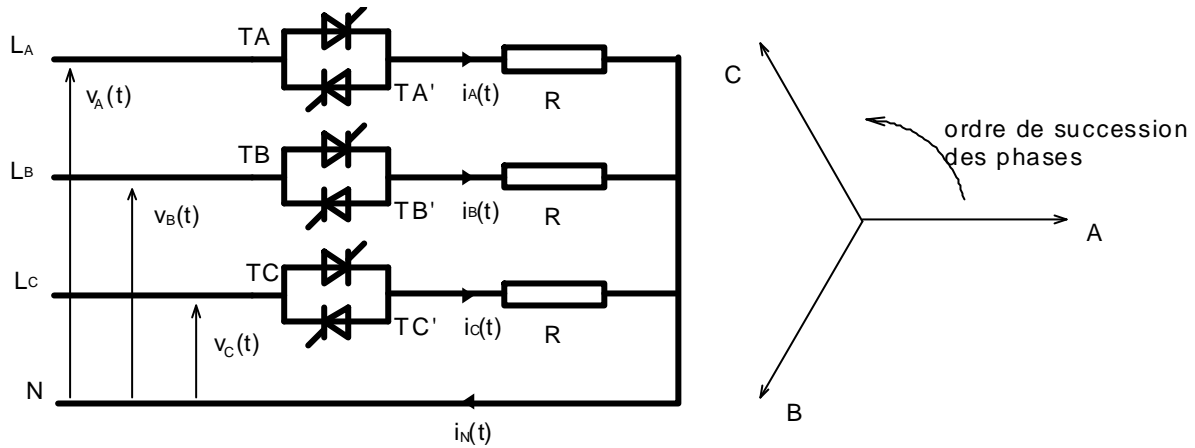


Figure II.4.

II.C.1.1. Représenter sur le document réponse RP1 les courants instantanés dans les conducteurs de ligne $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ et le courant instantané dans le neutre $i_N(t)$ pour $\alpha_0 = 90^\circ$.

II.C.1.2. Exprimer la valeur efficace du courant dans le neutre en fonction de la valeur efficace de la tension simple V_{EFF} et de R pour $\alpha_0 = 90^\circ$. Comparer les valeurs efficaces du courant en ligne et du courant dans le neutre.

II.C.2. Système déséquilibré, non linéaire.

Dans le montage de la figure II.4, les angles d'allumage sont les suivants.

Phase A : $\alpha_0 = 90^\circ$; Phase B : $\alpha_0 = 0^\circ$; Phase C : $\alpha_0 = 180^\circ$; Cette situation correspond au maximum de courant dans le neutre.

II.C.2.1. Représenter sur le document réponse RP1 les courants instantanés dans les conducteurs de ligne $i_A(t)$, $i_B(t)$ et le courant instantané dans le neutre $i_N(t)$

II.C.2.2. Exprimer la valeur efficace du courant dans le neutre en fonction de la valeur efficace de la tension simple V_{EFF} et de R .

II.C.2.3. Que peut-on en déduire sur la section utile du fil neutre reliant le T.G.B.T. et le transformateur, et sur le choix du disjoncteur ?

II.D. Etude des courants de Foucault dans un matériaux magnétique

Le but de l'étude est de justifier les pertes par courants de Foucault.

On considère sur la figure II.6, une tôle plane d'épaisseur d suivant l'axe $z'z$, et de dimensions suffisamment grandes dans les autres directions pour que seule intervienne la coordonnée z . L'origine de l'axe z est pris dans le plan médiateur du segment AB correspondant à l'épaisseur d de la tôle.

On rappelle que la densité de courant $\underline{\delta}$ vérifie la relation $\Delta \underline{\delta} + \underline{k}^2 \underline{\delta} = 0$

avec $\underline{k} = (1 - j) \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}{2}}$. D'autre part $\underline{\gamma} \cdot \underline{E} = \underline{\delta}$ et $\underline{H} = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \mu} \cdot \text{rot } \underline{E}$

Les conditions limites sont :

$H_x = 0$; $H_z = 0$; et dans l'axe yy' : $H_{z=-\frac{d}{2}} = H_{z=\frac{d}{2}} = H_0$;

Notation.

$\Delta \underline{\delta}$: laplacien de la densité de courant complexe,

μ : perméabilité de la tôle,

$\gamma = 1/\rho$: conductivité de la tôle, ρ : résistivité,

H : valeur efficace de l'excitation magnétique,

B : valeur efficace du champ magnétique,

E : valeur efficace du champ électrique,

Φ : valeur efficace du flux magnétique suivant $y'y$

δ : valeur efficace de la densité de courant ou distribution de courant,

$\underline{\delta}$, \underline{H} , \underline{B} , \underline{E} , $\underline{\Phi}$: valeurs complexes.

d_0 : profondeur de pénétration.

On pose $d_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$

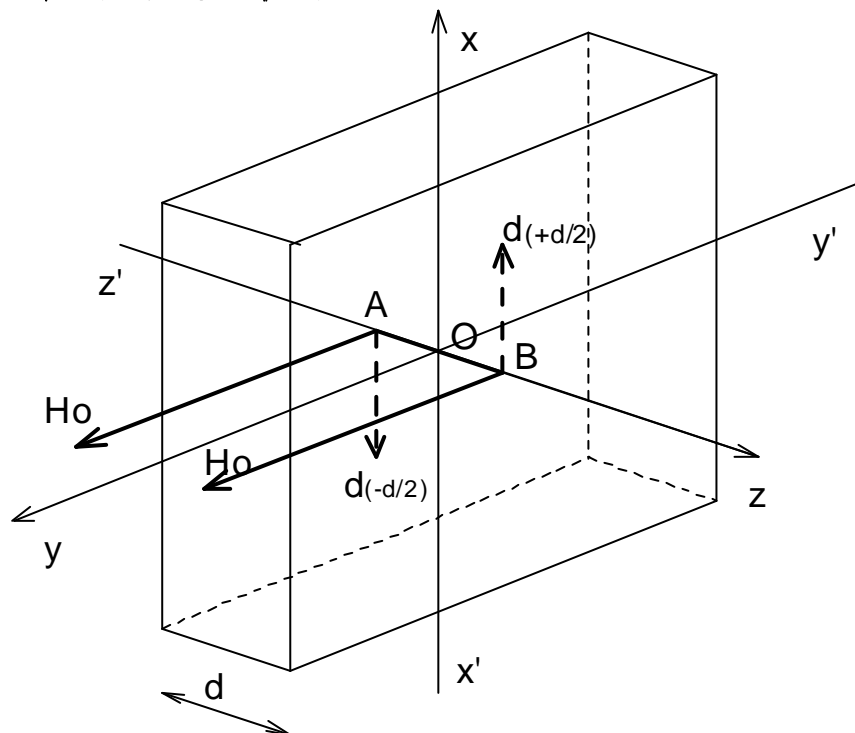


Figure II.6

II.D.1. Distributions du courant et des champs dans la tôle magnétique.

II.D.1.1. Exprimer la distribution du courant \underline{d} en fonction de z , c'est à dire établir la relation $\underline{d} = f(\mathbf{b}, \underline{C}_1, \underline{C}_2, z)$. Les termes \underline{C}_1 et \underline{C}_2 représentent les constantes d'intégration de l'équation différentielle à résoudre.

II.D.1.2. Exprimer l'excitation magnétique \underline{H} dans l'épaisseur de la tôle en fonction de z , c'est à dire la fonction $\underline{H} = f(\mathbf{b}, \mathbf{m}, \mathbf{g}, \mathbf{w}, \underline{C}_1, \underline{C}_2, z)$.

II.D.1.3. Donner l'expression des valeurs efficaces de \underline{d} et de \underline{H} soit $d = f(H_0, \mathbf{b}, d, z)$ et $H = f(H_0, \mathbf{b}, d, z)$

II.D.2. Calcul du flux magnétique \underline{F} qui traverse la tôle par unité de longueur suivant l'axe $y'y$.

II.D.2.1. Exprimer $\underline{F} = f(H_0, \mathbf{b}, \mathbf{m}, d)$

II.D.2.2. Calcul du champ magnétique moyen B dans la tôle.
Exprimer $B = f(H_0, \mathbf{b}, \mathbf{m}, d)$

II.D.3. Calcul des pertes par effet Joule dans le fer, c'est à dire par courants de Foucault.

On rappelle que les pertes moyennes par unité de volume sont :

$$\overline{pf} = \frac{1}{\gamma \cdot d} \cdot \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \delta^2 \cdot dz$$

II.D.3.1. Exprimer les pertes par courants de Foucault $\overline{pf} = f(\beta, \gamma, \omega, d, B)$

II.D.3.2. Démontrer que

- pour $d/d_0 < 1$ les pertes \overline{pf} varient sensiblement comme $(\gamma \cdot \omega^2 \cdot d^2 \cdot B^2)$
- pour $d/d_0 > 4$ les pertes \overline{pf} varient sensiblement comme $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \cdot \omega^{\frac{3}{2}} \cdot d \cdot B^2$.
- En déduire le choix de l'épaisseur de la tôle pour la fréquence 50 Hz en prenant la conductivité du fer $\mathbf{g} = 2 \cdot 10^6 \text{ S}$ et la perméabilité relative $\mathbf{m} = 10000$. Qu'advient-il pour les pertes dues aux harmoniques ?.

Notations pour la partie 2	
i_A, i_B, i_C	Courants instantanés dans les conducteurs de phases
i_N	Courant instantané dans le neutre
I_A, I_B, I_C	Courants efficaces dans les conducteurs de phases
I_N	Courant efficace dans le neutre
α	Angle de retard à la conduction des thyristors
R_b, L_b	Résistance, inductance amont de la distribution
L_f, C_f, R_f	Eléments du filtre des harmoniques
I_{H3}	Intensité efficace de l'harmonique 3
m	Perméabilité de la tôle
g	$G=1/\rho$: conductivité de la tôle, ρ : résistivité
H	Valeur efficace de l'excitation magnétique
B	Valeur efficace du champ magnétique
E	Valeur efficace du champ électrique
F	Valeur efficace du flux magnétique suivant y'y
d	Valeur efficace de la densité de courant ou distribution de courant
$\underline{d}, \underline{H}, \underline{B}, \underline{E}, \underline{F}$	Valeurs complexes
$\Delta\delta$	Laplacien de la densité de courant complexe
d_o	Profondeur de pénétration
d	Epaisseur de la tôle
d_{o50}	Profondeur de pénétrations pour la fréquence de 50 Hz
\overline{pf}	Pertes par courants de Foucault par unité de volume
V	Tension simple efficace

Schéma de principe de la distribution électrique

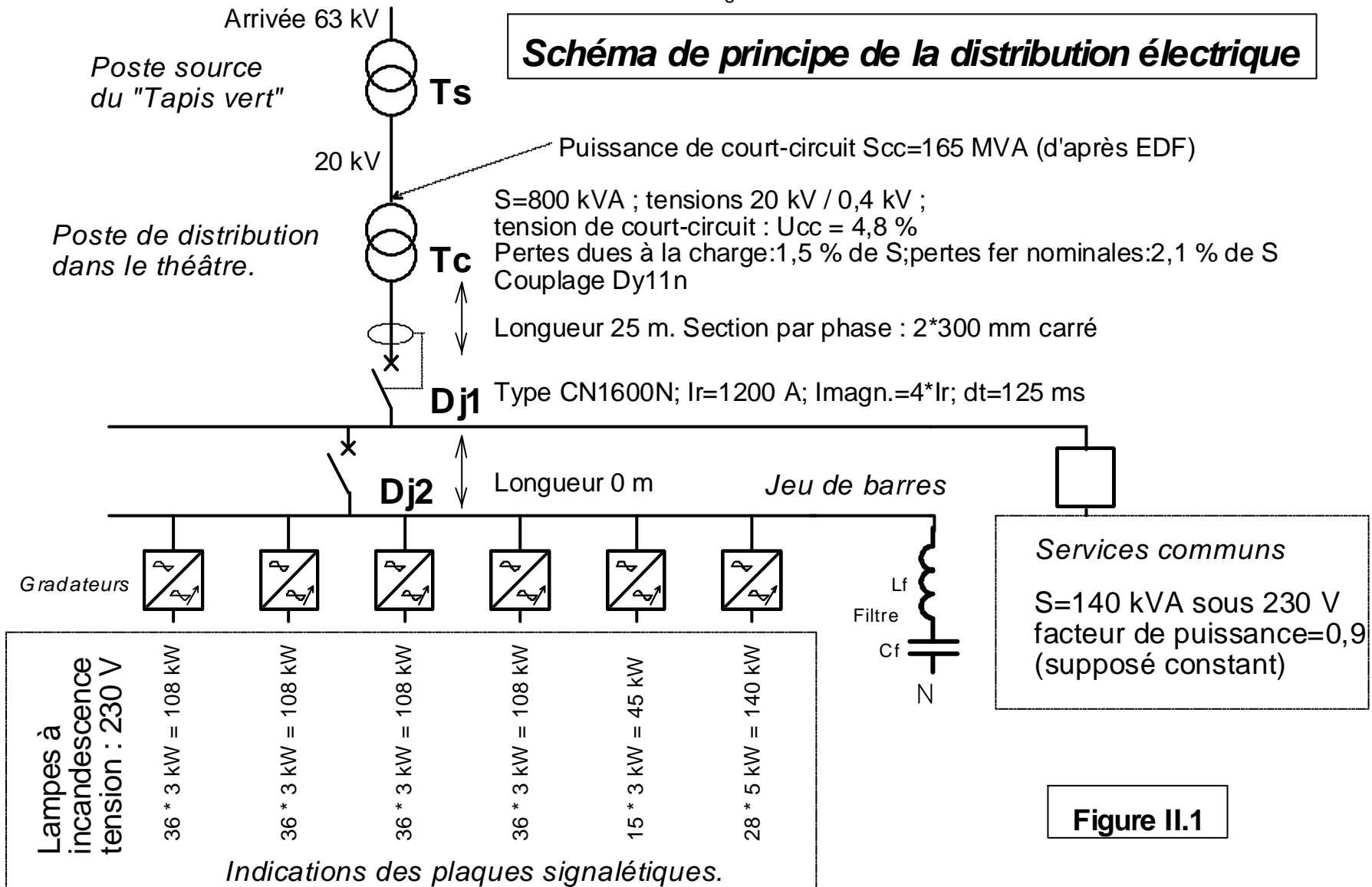


Figure II.1

Troisième partie

III. Etude de la ventilation

La direction du théâtre décide en accord avec l'agence de la maîtrise de l'énergie de rénover la ventilation de la salle de spectacle du théâtre. Dans un appel d'offre elle demande le remplacement des moteurs et des modulateurs de puissance dans l'hypothèse d'un gain d'énergie. Les moteurs de l'ancienne installation sont couplés directement sur le réseau. Le choix des modulateurs se porte sur un procédé par gradateurs triphasés. Les moteurs de type asynchrone triphasé à rotor en court-circuit seront couplés en étoile. On demande dans cette partie de justifier les choix technologiques.

On admettra dans toute la troisième partie que le modèle d'un moteur asynchrone triphasé par phase est celui de la figure III.1 et que les pertes mécaniques et dans le fer sont nulles.

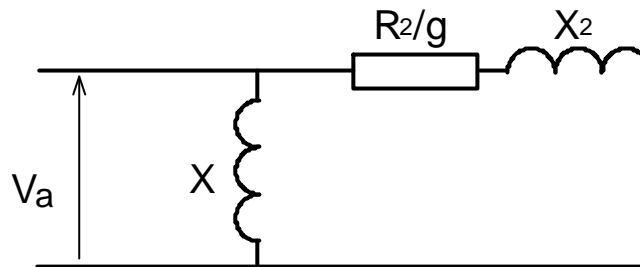


Figure III.1

III.A. Etude d'un moteur de ventilation en régime sinusoïdal

Notation	
V_a	Tension d'alimentation du moteur, réglable
V_R	Tension fixe du réseau ; $V_R=230$ V
ω_s, f	Pulsation et fréquence du réseau ; $f=50$ Hz
X	Réactance de l'inductance magnétisante
l_2	Inductance de fuite due au rotor et ramenée au stator
$X_2=l_2 \cdot \omega_s$	Réactance de fuite due au rotor et ramenée au stator
R_2	Résistance du rotor ramenée au stator
g, g_{MAX}	Glissement, glissement pour le couple maximum
p	Nombre de pôles du moteur
T, T_{MAX}	Couple moteur, couple moteur maximum sous la tension V_R
T_r	Couple résistant du ventilateur ramené sur le moteur
n	Fréquence de rotation du moteur en tr/min
ω_s	Vitesse angulaire du champ tournant du moteur
P_{JR}	Pertes par effet Joule rotoriques du moteur

III.A.1. Exprimer le couple électromagnétique du moteur T en fonction des grandeurs caractéristiques du moteur $V_a, \omega_s, R_2, X_2, p$ et g .

III.A.2. On étudie la fonction $T = f(g)$. Exprimer la valeur du glissement (notée g_{MAX}) du moteur correspondant au couple maximal en fonction de R_2 et de X_2 .

III.A.3. Donner l'expression de $\frac{T}{T_{MAX}} = f\left(\frac{V_{\alpha}}{V_R}, u\right)$ en posant $u = \frac{g}{g_{MAX}}$

T_{MAX} est la valeur du couple maximal lorsque le moteur est alimenté sous la pleine tension V_R du réseau.

III.A.4. Tracer les courbes $\frac{T}{T_{MAX}} = f\left(\frac{g}{g_{MAX}}\right)$ pour V_{α} égal à V_R et pour V_{α} égal à $V_R/2$ sur le document réponse RP2.

III.B. Etude de la vitesse de ventilation avec un moteur alimenté par un gradateur triphasé.

Caractéristiques du moteur .

Puissance : 11 kW ; fréquence de rotation 1445 tr/min ; $\frac{T_{MAX}}{T_{NOMINAL}} = 1,6$

Caractéristique mécanique du ventilateur.

Le couple résistant est donné par l'équation suivante.

$$T_r = 4,6 \times 10^{-5} \times n^2 + 2,16 \quad \text{où } T_r \text{ s'exprime en Nm et } n \text{ en tr/min}$$

Caractéristiques du variateur de vitesse.

Les constructeurs fournissent un réseau de courbes relatives au gradateur lié au moteur, représentées sur le document réponse RP3. Sur ce graphique chacune des courbes correspond à un angle de commande des semi-conducteurs.

III.B.1. On admettra que le modèle électrique du moteur est celui défini au paragraphe III.A. Calculer les valeurs numériques de T_{MAX} et de g_{MAX} .

III.B.2. Tracer la courbe du rapport T_r/T_{MAX} relative au couple résistant du ventilateur sur le réseau de courbes du constructeur en complétant la figure a) du document réponse RP3. Compléter la figure b) du document réponse RP3

III.B.3. Calculer la puissance absorbée par le moteur pour les fréquences de rotation de 1400 et de 700 tr/min.

III.C. Echauffement du rotor, déclassement du moteur pour des fonctionnements à puissance réduite.

III.C.1. Exprimer les pertes Joule rotoriques en fonction du glissement $P_{JR} = f(g)$ lorsque le moteur entraîne le ventilateur.

III.C.2. En déduire le glissement pour lequel les pertes par effet Joule dans le rotor sont maximales. Comparer la valeur maximale de ces pertes avec celle des pertes Joule nominales dans le rotor. Conclure.

Quatrième partie = Travail pédagogique

IV. Choix des composants d'une chaîne d'entraînement

L'objectif de l'étude est d'apprendre à des élèves de BTS ou DUT à choisir les composants d'une chaîne d'entraînement d'une charge mécanique à savoir : le moteur électrique et son alimentation, le réducteur et la commande.

IV.A. Principes généraux.

IV.A.1. Le cahier des charges. *Résumer et commenter succinctement les principales contraintes à satisfaire.*

IV.A.2. Choix de l'actionneur électrique et de son alimentation. *Etablir un document sous la forme d'un tableau, destiné à donner une vue d'ensemble des moteurs électriques utilisés actuellement.* Exemple de présentation :

Machine	Alimentation	Applications types (préciser notamment : petite, moyenne ou grande puissance)
Moteurs à courant continu		
aimants permanents	hacheur ou redresseur commandé ou non	Asservissement de vitesse et de position, ...
bobiné		traction,...
Moteurs asynchrones		
Moteurs ...		

IV.A.3. Le modulateur d'énergie raccordé à un moteur brushless a besoin des informations d'un capteur de position. *Donner des exemples de codeurs de position utilisés couramment.*

IV.A.4. *Quelle est la différence entre un moteur brushless muni d'un capteur de position et un moteur asynchrone à commande vectorielle de flux ?*

IV.A.5. *Enoncer les principes essentiels qui président au choix d'un réducteur de vitesse mécanique placé entre le moteur et sa charge.*

IV.B. Travail pédagogique.

Proposer une séquence de 5 heures, en étude de système dans la section de BTS électrotechnique, ayant pour objectif le choix des composants d'une chaîne d'entraînement.

On demande de fournir les dossiers suivants :

IV.B.1. *Un dossier technique qui devra au moins comporter :*

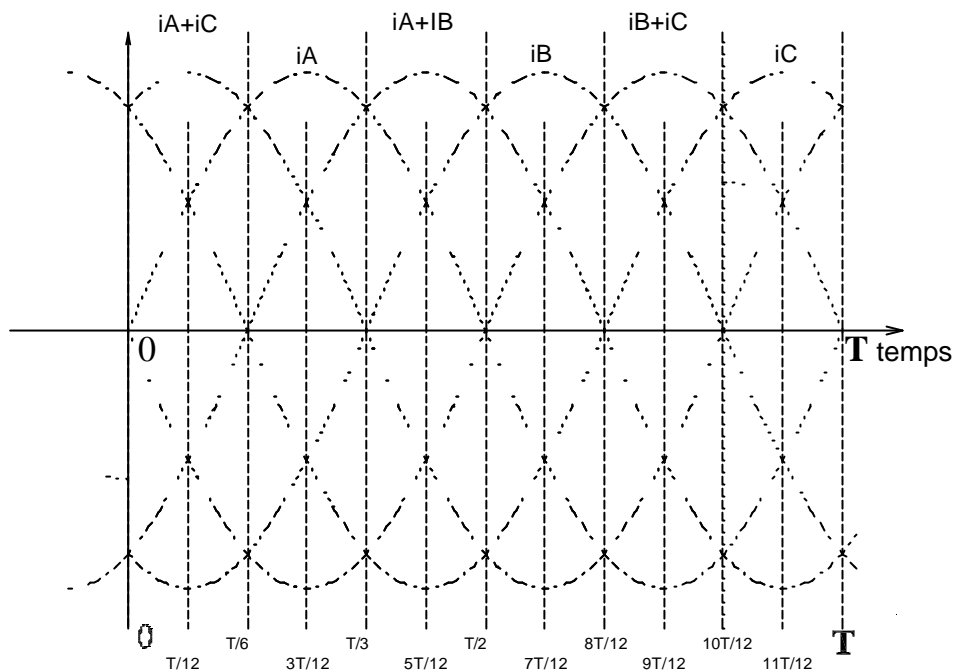
- *le schéma de la maquette pédagogique utilisée ,*
- *la justification des choix technologiques ,*
- *la liste du matériel à utiliser ,*
- *la liste des document techniques à fournir ;*

IV.B.2. *Un dossier pédagogique qui devra comporter :*

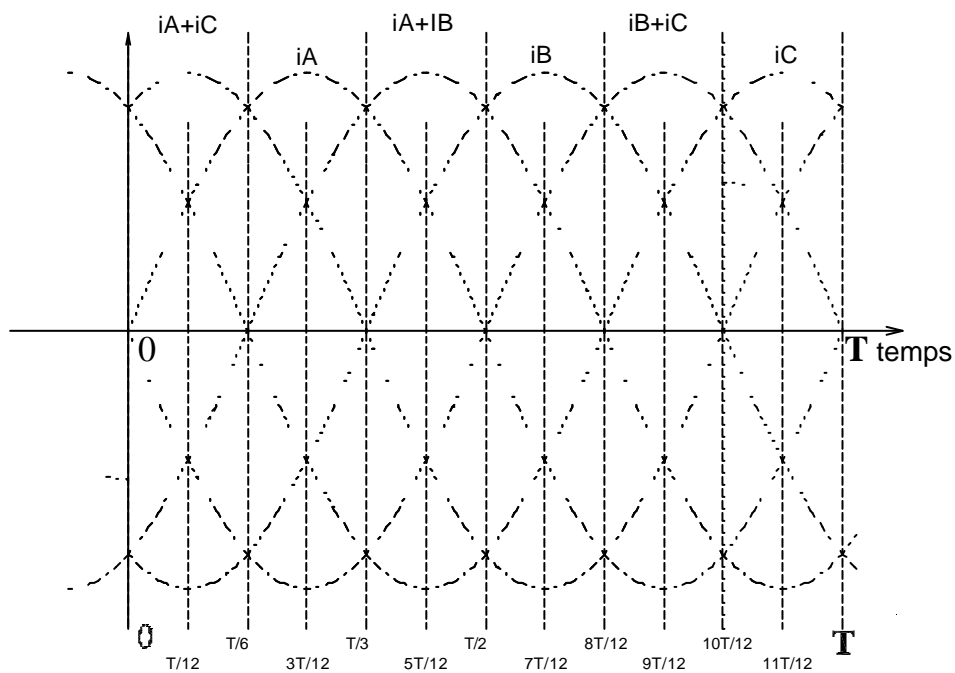
- *les objectifs de l'évaluation formative et sa situation dans une progression ,*
- *les prérequis en électronique de puissance et dans les enseignements associés ,*
- *les textes de l'évaluation accompagnés des réponses attendues pour chaque question ,*
- *les feuilles réponses comportant l'allure des signaux à relever ,*
- *les capacités à évaluer.*

Document Réponse RP1

Question II.C.1.1

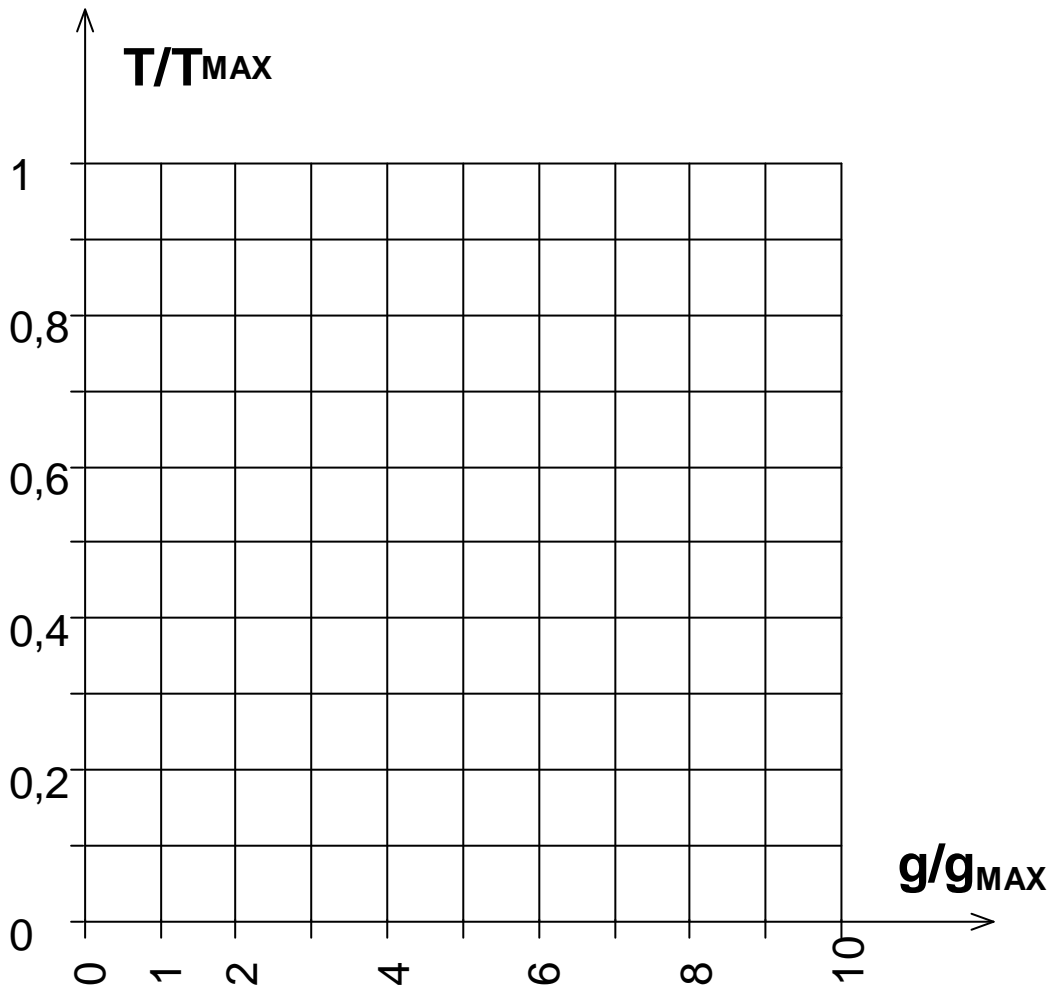


Question II.C.2.1



Document Réponse RP2

Question III.A.4



Document Réponse RP3

Question III.B.2.

Figure a)

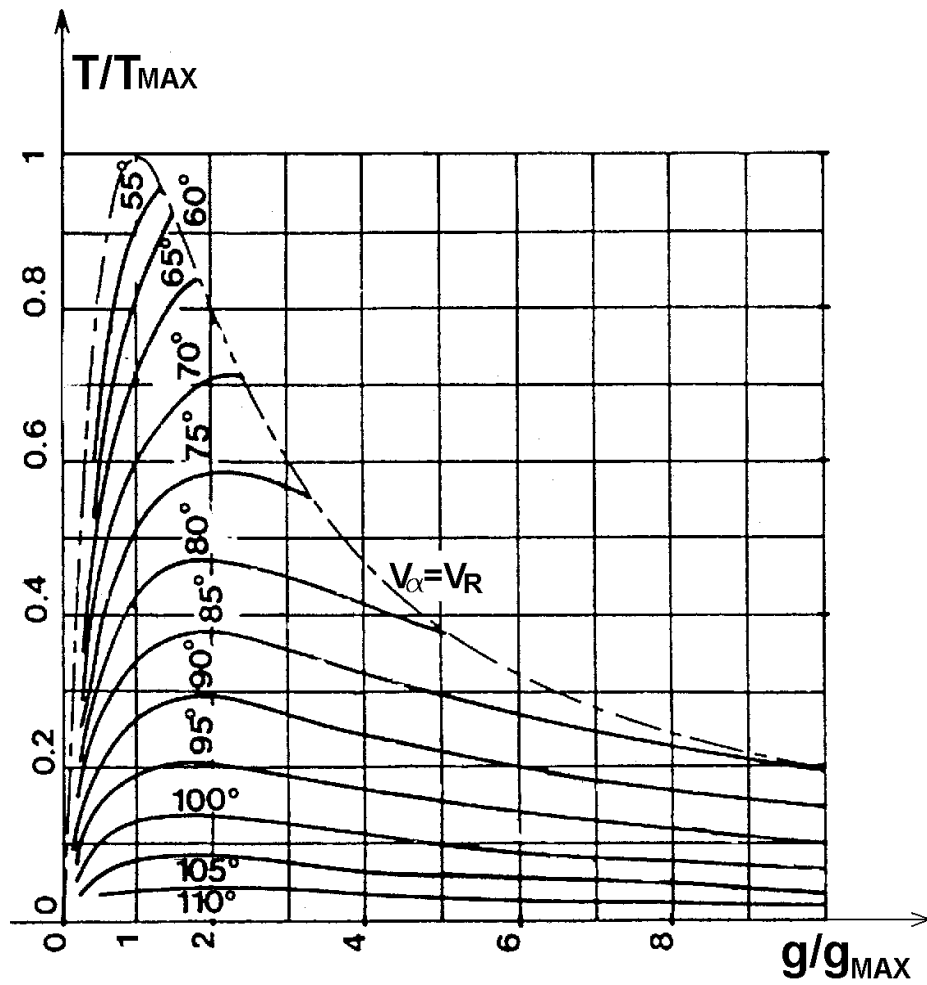


Figure b)

