

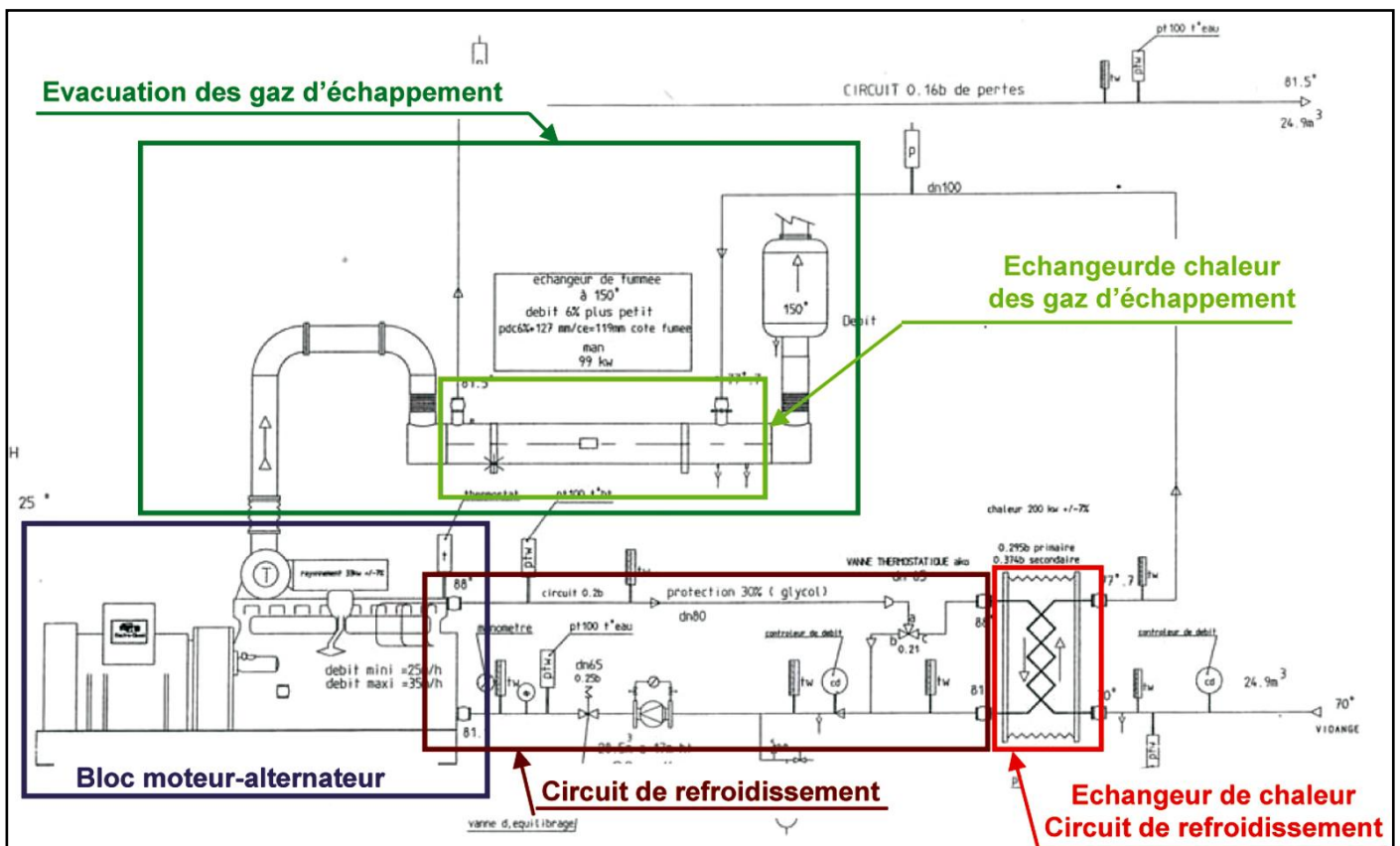
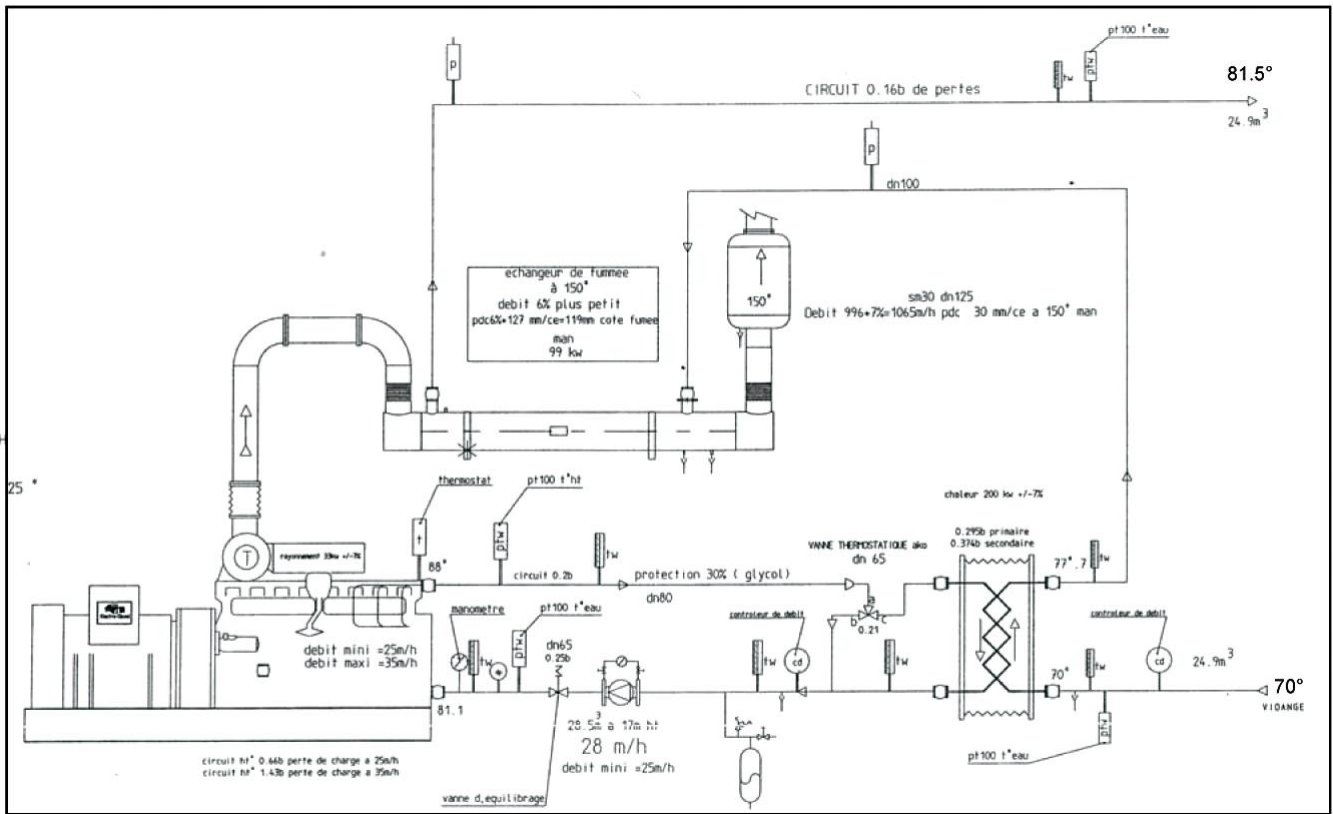
ETUDE D'UNE COGENERATION MOTEUR A GAZ (180 kW)

1) - Mise en évidence de l'amélioration du rendement par récupération de chaleur

L'objectif est de montrer l'intérêt d'un module de cogénération pour produire l'énergie nécessaire à un processus industriel.

1-a) **Repérages**, à l'aide des numéros, sur le schéma du module de cogénération

- le bloc moteur-alternateur (1) - le circuit de refroidissement du moteur (2) - l'échangeur de chaleur sur ce circuit (3)
- l'évacuation des gaz d'échappement (4) - la récupération de chaleur sur les gaz (5)



1-b) Calcul de la puissance apparente de l'alternateur.

$S = P / \cos\phi$ donc $S = 170000 / 0,93 = 182 \text{ kVA}$

1-c) Dédution de son rendement.

D'après les caractéristiques : $\eta = 94,8\%$ environ

1-d) Calcul de la puissance mécanique (notée P_m) à fournir par le moteur.

$P_m = P_e / \eta$ donc $P_m = 179 \text{ kW}$

1-e) Pour les calculs suivants, la puissance mécanique sera $P_m = 180 \text{ kW}$. Pour la suite on utilisera la méthode d'extrapolation (tableau d'extrapolation page 5 : formule $y = ax + b$)

1-e)a Calcul du pourcentage de charge du moteur (voir page 5)

$P_m = a(x - 75) + b$ avec x charge du moteur

$a = (208 - 156) / (100 - 75) = 2,08$ et $b = 156$

Donc $x = (179 - 156 + 2,08 \cdot 75) / 2,08 = 86,2$

La charge du moteur est de 86,2%

De même que précédemment, les calculs de la puissance thermique récupérée sur le circuit de refroidissement (notée P_{th1}) et celui de la puissance thermique récupérée sur les gaz d'échappement (notée P_{th2}), ont donnés : $P_{th1} = 181 \text{ kW}$ et $P_{th2} = 106 \text{ kW}$

Comment retrouver P_{th1} et P_{th2} : $P_{th1} = a(x - 75) + 164$ avec $a = (202 - 164) / (100 - 75) = 1,52$ Donc pour $x = 86,2$ $P_{th1} = 181 \text{ kW}$

De même $P_{th2} = a(x - 75) + 92$ avec $a = (125 - 92) / (100 - 75) = 1,32$ Donc pour $x = 86,2$ $P_{th2} = 106 \text{ kW}$

1-e)b Dédution de la puissance équivalente produite par la combustion du gaz (notée P_{gaz}).

$P_{gaz} = a(x - 75) + 473$ avec $a = (610 - 473) / (100 - 75) = 5,48$ Donc pour $x = 86,2$ $P_{gaz} = 534 \text{ kW}$

1-f) Calcul du rendement η_1 du groupe moteur alternateur sans récupération thermique.

$\eta_1 = P_{elec} / P_{gaz} = 170 / 534 = 31,8\%$

1-g) Calcul du rendement η_2 du groupe moteur alternateur avec récupération thermique

$\eta_2 = (P_{elec} + P_{th1} + P_{th2}) / P_{gaz} = 457 / 534 = 85,6\%$

1-h) Conclusion sur l'intérêt du module de cogénération

Pour une même consommation de gaz, l'énergie récupérée est plus grande, donc le rendement est augmenté.

La chaleur récupérée sur le moteur est utilisée pour chauffer un circuit d'eau fournissant des calories aux bassins et aux différentes sources de chauffage de l'air ambiant.

1-i) Pour quantifier l'échange de calories entre le circuit d'eau chaude et les récupérateurs d'énergie thermique montés sur le moteur, on peut calculer la variation de température notée, $\Delta\theta$ dans le circuit d'eau chaude sachant que le débit est de $24,9 \text{ m}^3/\text{h}$, si on considère $P_{th1} = 185 \text{ kW}$ et $P_{th2} = 110 \text{ kW}$.

N.B : Toute l'énergie thermique récupérée sera transmise sous forme de chaleur à l'eau.

Rappel du Synoptique de fonctionnement

1-i)a Dans le premier échangeur.

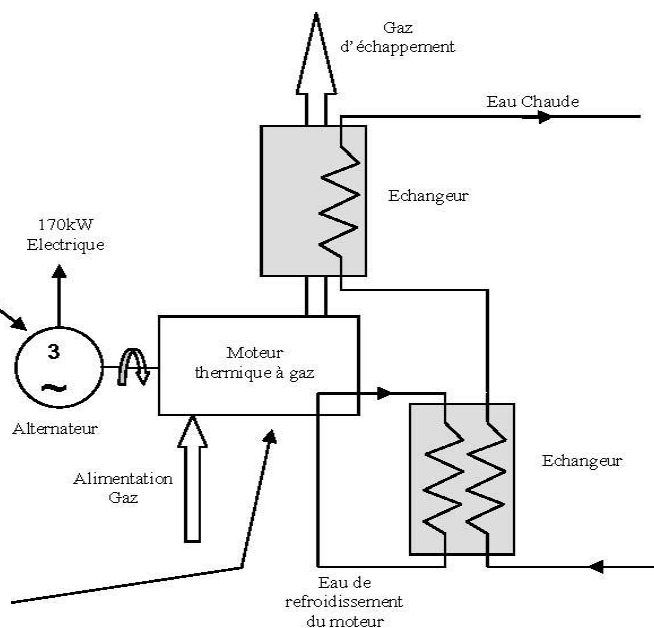
$P_e = \mu Q.c \Delta\theta$ donc $\Delta\theta = P_e / (\mu Q.c)$ donc $\Delta\theta_1 = 6,39^\circ\text{C}$

1-i)b Dans l'échangeur de fumée.

De même $\Delta\theta_2 = 3,8^\circ\text{C}$

1-i)c Vérification de la température de l'eau sortant du deuxième échangeur à 80°C environ lorsque l'eau entrant dans le premier est à 70°C .

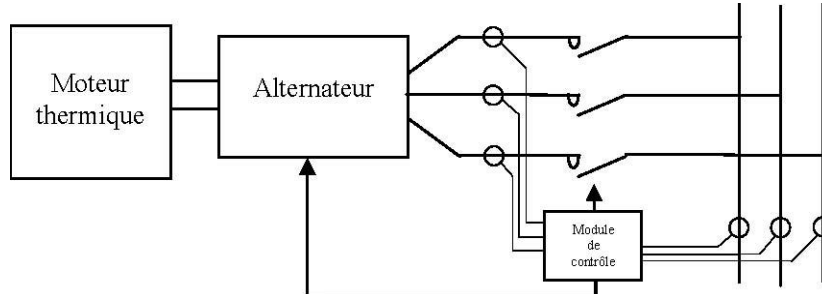
$\Delta\theta_{total} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = 10,19^\circ\text{C}$ donc si l'eau entre à 70°C elle sort à $80,2^\circ\text{C}$



2) - Etude de l'alternateur (voir pages 5,6,7)

Le groupe cogénération produit principalement de l'énergie thermique (eau chaude) et ensuite de l'électricité grâce à un alternateur. Ce groupe est connecté au réseau électrique.

La gestion du couplage de l'alternateur sur le réseau est faite par un module de contrôle qui compare la tension et la fréquence en sortie de l'alternateur par rapport au réseau EDF. Il agit directement sur l'excitation de l'alternateur pour réguler sa tension et sa fréquence. Quand la tension et la fréquence de l'alternateur et du réseau EDF sont synchronisées, le module de contrôle couple l'alternateur au réseau EDF en fermant le contacteur qui les relie.



EDF impose des % faibles de variations de la fréquence et de la tension de l'alternateur. Si ces limites ne sont pas respectées alors le module de contrôle découple l'alternateur du réseau EDF.

Données

Les caractéristiques de l'alternateur du groupe cogénération sont les suivantes : Tension $U = 400V$, Couplage étoile, $N_n = 1500\text{tr/mn}$, Résistance statorique (pour un enroulement) $= 0.0166\Omega$.

On a relevé :

- sa caractéristique à vide $E_o = f(I_e)$ à $N = Cste = N_n$
- sa caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(I_e)$ à $N = Cste = N_n$
- un point P de sa caractéristique en charge sur circuit purement inductif (essai en déwatté) de coordonnées $V=230V$, $I_e=3,5A$ à $I=264A$ et $N=N_n$.

Ces caractéristiques sont représentées sur ce document.

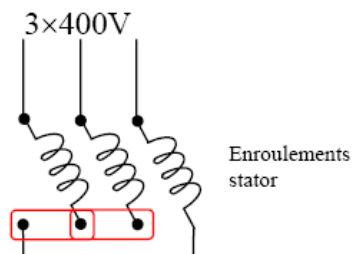
Un régulateur (MX320) maintient constante la tension fournie par l'alternateur (quelle que soit sa charge) en mesurant la tension aux bornes de celui-ci et en agissant sur le courant d'excitation I_e .

A tout moment le groupe cogénération fournit une puissance constante de $P = 170\text{kW}$ sous $\cos\phi = 0,93$. C'est son point de fonctionnement nominal.

2-a) Calcule du nombre de paires de pôles de cet alternateur

$$p = \frac{f}{N} = \frac{50 \times 60}{1500} = 2 \quad \text{paires de pôles}$$

2-b) Position dans la boîte à bornes des barrettes de couplage des enroulements du stator (induit).



2-c) Calcul du courant de l'alternateur au point de fonctionnement nominal

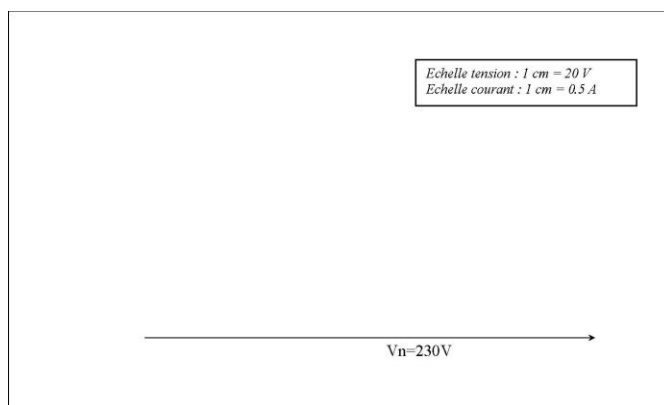
$$I = \frac{P}{U \times \sqrt{3} \times \cos\phi} = \frac{170000}{400 \times \sqrt{3} \times 0,93} = 264A$$

2-d) Détermination, en utilisant le diagramme de Potier (pages 6 et 7), du courant d'excitation I_e que devra fournir le régulateur à l'alternateur pour qu'il délivre sa tension nominale dans les conditions de fonctionnement précisées ci-dessus :

On détermine $\alpha.I$ et $L.\omega.I$ par construction graphique en abordant les points 1, 2, 3 et 4 de la page 7. Cette méthode nous donne les valeurs suivantes de $\alpha.I$ et $L.\omega.I$:

$\alpha.I = 1,25 \text{ A}$ et $L.\omega.I = 46 \text{ V}$

Détermination à l'aide du diagramme de Potier, le courant I_e correspondant à notre point de fonctionnement :



Comment retrouver $\alpha.I$ et $L.\omega.I$

- (Dévatté) Reporter sur la caractéristique $E_o = f(I_e)$, le point **P** (230V, 3.5A)

- (Court-circuit) $k = \frac{I_{cc}}{I_e} = \frac{250}{1.35} = 185.2$

Valeur de I_e correspondant à la valeur de I ($I_{\text{fonctionnement}}$) de l'essai en dévatté

$$I_e = \frac{I_{\text{dévatté}}}{k} = \frac{264}{185.2} = 1.42$$

le point **O** : la distance **OP** est égale à la valeur de I_e qu'on vient de calculer.

- Détermination du point **M**.

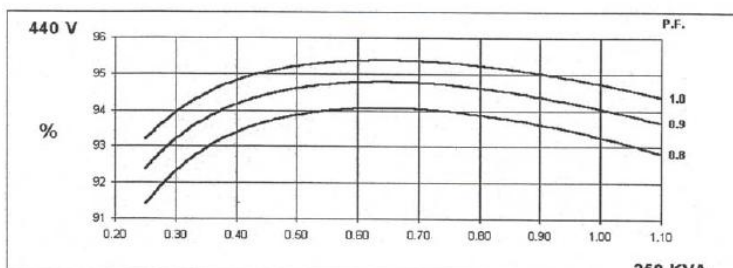
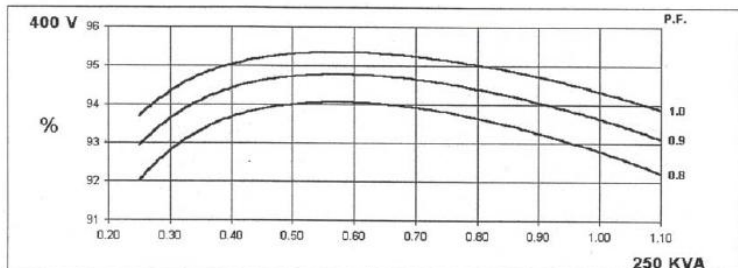
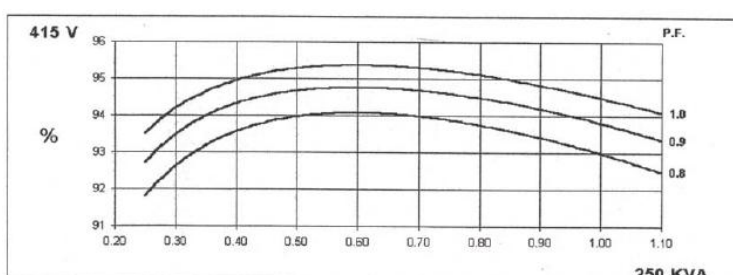
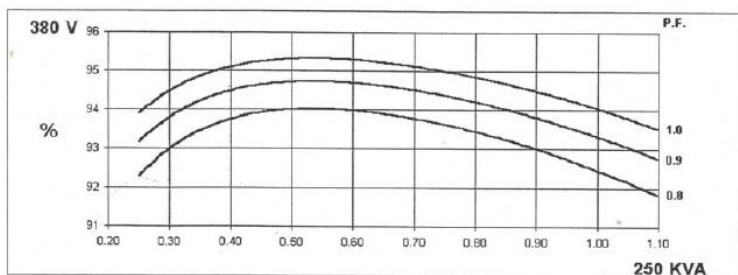
- Projection point **M** en **N**.

- On alors peut lire :

$NM = L.\omega. I = 46V.$

$NP = \alpha.I = 1.25A$

**Rendement en fonction de la charge électrique de l'alternateur
HCI 434C sous 50H (P.F. =facteur de puissance)**



Caractéristiques de l'ensemble moteur-récupérateurs

CARGE DU MOTEUR		100 %	75 %	50 %
Flux d'énergie				
Par combustion du gaz	kW	610	473	343
Puissance mécanique	kW	208	156	104
Récupération sur le circuit de refroidissement	kW	202	164	127
Récupération par refroidissement des gaz d'échappement à 120°C	kW	125	92	63

Relation liant la puissance calorifique et l'élévation de température

On rappelle que : $Q_e = m \cdot c \cdot \Delta\theta$ et $P_e = \Delta Q_e / \Delta t$ donc $P_e = \Delta m / \Delta t \cdot c \cdot \Delta\theta$. Car $Q_e = c \cdot m$

Or $m = \mu \cdot V$ et $Q = \Delta V / \Delta t$ donc

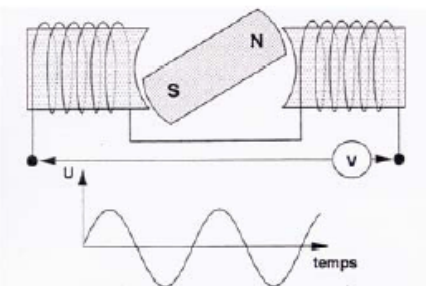
$$P_e = \mu \cdot Q \cdot c \cdot \Delta\theta$$

- Avec
- Q_e : Chaleur apportée à l'eau
 - P_e : Puissance apportée à l'eau
 - m : masse de l'eau
 - V : Volume d'eau
 - c : chaleur massique de l'eau : 4185 J/kg/°C
 - μ : masse volumique de l'eau : 1000 kg/m³
 - $\Delta\theta$: Ecart de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur
 - Q : Débit de l'eau en m³/s

L'ALTERNATEUR

Rappel sur le principe de l'alternateur

L'alternateur est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.



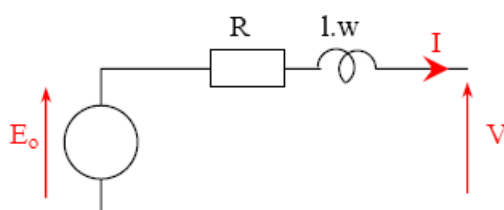
En visualisant la fem aux bornes d'un bobinage fixe (stator) et en faisant tourner à vitesse constante un aimant permanent (rotor) au centre de ce bobinage, on constate l'existence d'une force électromotrice de forme sinusoïdale.

Le remplacement de l'aimant permanent par un bobinage alimenté par une source à courant continu permet de régler l'amplitude de la fem.

La fréquence de la tension issue de l'alternateur dépend de la vitesse de rotation du rotor.

La stabilité et la précision de la fréquence dépendent de la qualité du régulateur de vitesse du moteur ; tandis que la stabilité et la précision de la tension dépendent des performances du régulateur de tension de l'alternateur.

Modèle monophasé électrique de l'alternateur



Détermination des caractéristiques de l'alternateur

Un essai à vide de l'alternateur a permis de relever $E_o=f(I_e)$ avec I_e courant d'excitation du rotor. Cette caractéristique n'est valable qu'à vide. En charge, la machine est magnétisée à la fois par I_e (courant continu) et par I (courant produit dans le stator). De ce fait la caractéristique $E_o=f(I_e)$ en est modifiée, on écrira alors la relation vectorielle :

$$\vec{I}_{er} = \alpha \vec{I} + \vec{I}_e$$

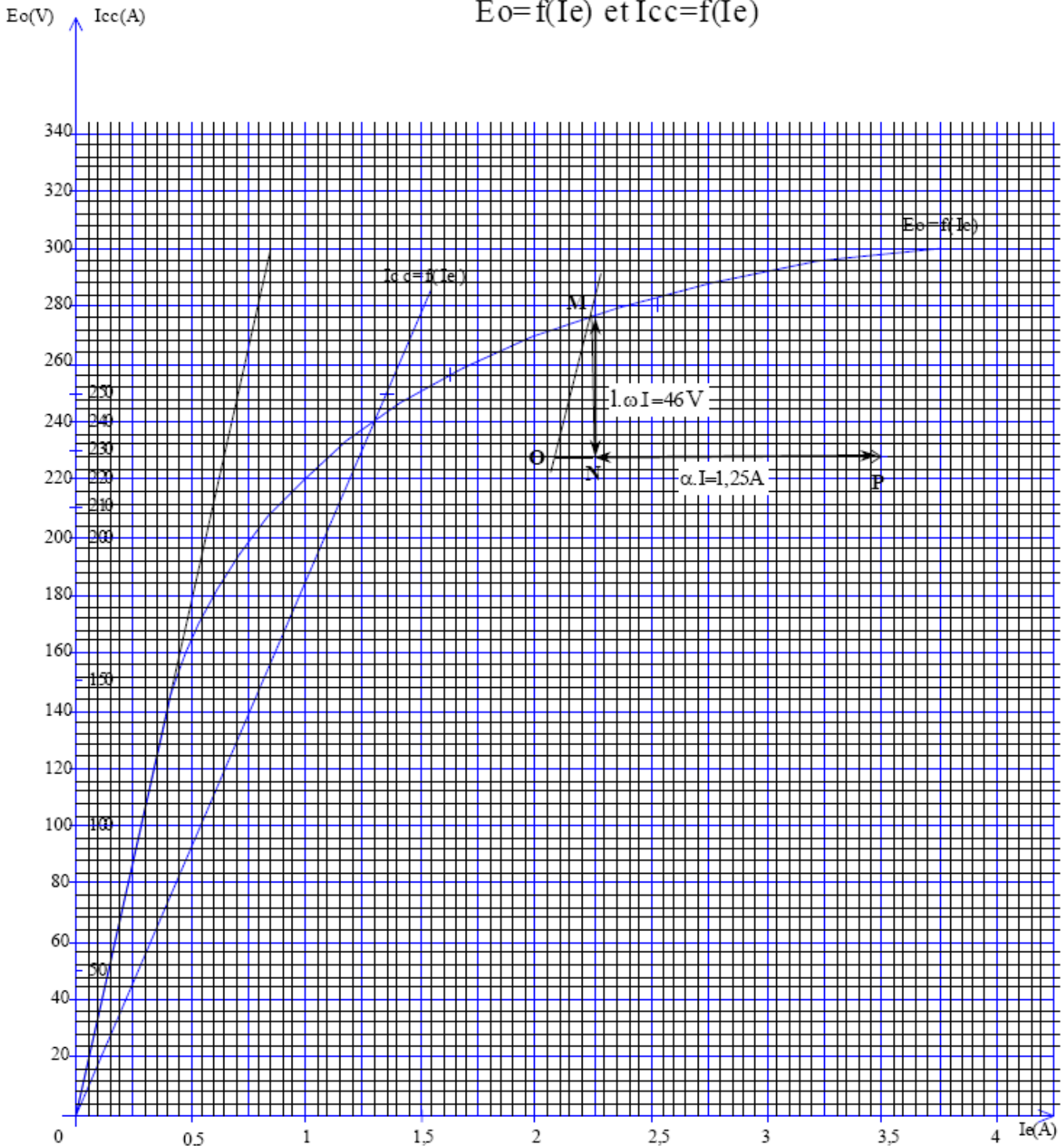
Courant d'excitation résultant qui tient compte de la réaction d'induit

Courant dû à la réaction d'induit (stator)

Pour déterminer ce courant I_{er} correspondant à notre point de fonctionnement, on utilise **le diagramme de Potier**.

CARACTERISTIQUES DE L'ALTERNATEUR

$$E_o=f(I_e) \text{ et } I_{cc}=f(I_e)$$



Méthode de détermination du courant I_{er} (diagramme de Potier)

Vous avez à votre disposition la caractéristique $E_o = f(I_e)$ (essai à vide) et $I_{cc} = I_e$ (essai en court-circuit).

• [1] Essai sur charge inductive (essai en déwatté à $I = I_{fonctionnement}$)

Reporter sur la caractéristique $E_o = f(I_e)$, le point P (V, I_e) donné lors de cet essai.

• [2] Essai en court-circuit

- A partir de la caractéristique $I_{cc} = I_e$, on détermine le rapport entre I_{cc} et I_e : $k = I_{cc} / I_e$ (pente de la droite)

- On calcule ensuite la valeur de I_e correspondant à la valeur de I ($I_{fonctionnement}$) de l'essai en déwatté $I_e = I_{déwatté} / k$

- on reporte sur la caractéristique $E_o = f(I_e)$, le point O sur la même droite horizontale que P. La distance OP est égale à la valeur de I_e qu'on vient de calculer.

• [3] On trace une droite passant par O et parallèle à la tangente à l'origine de $E_o = f(I_e)$. L'intersection de cette droite avec la caractéristique $E_o = f(I_e)$ donne le point M.

• [4] Le point N est la projection orthogonale de M sur le segment [OP].

On alors peut lire : $NM = L \cdot \omega \cdot I$ (en V) $NP = \alpha \cdot I$ (en A)

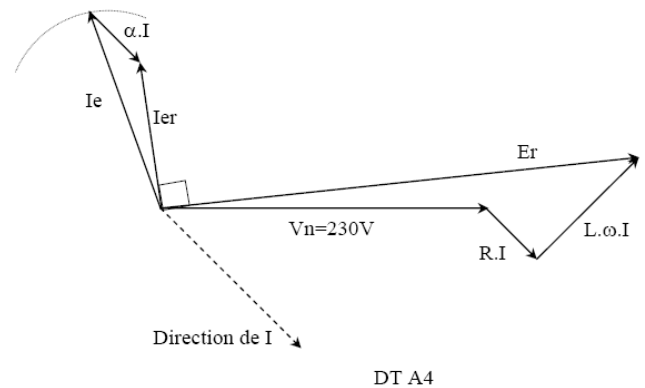
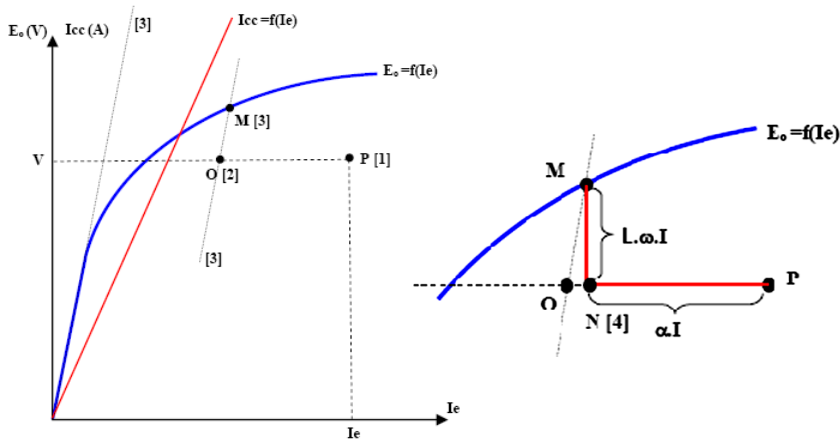
• [5] Construction du diagramme de POTIER pour déterminer I_e (courant continu d'excitation qui tient compte de la réaction d'induit).

• Connaissant $V_n, R \cdot I$ et $L \cdot \omega \cdot I$, on détermine graphiquement E_r (fem résultante)

• A partir de la valeur E_r mesurée et $E_o = f(I_e)$ (en prenant $E_r = E_o$), on détermine I_{er} .

• La nouvelle valeur I_{er} est orthogonale à E_r . Connaissant $I_{er}, \alpha \cdot I$ et la relation vectorielle

$$\vec{I}_{er} = \alpha \vec{I} + \vec{I}_e, \text{ on détermine graphiquement } I_e.$$



Déterminer le courant I_e correspondant à notre point de fonctionnement.

- A partir de $V_n, R \cdot I$ et $L \cdot \omega \cdot I$, on détermine graphiquement E_r (fem résultante) **$E_r = 256V$** .

- A partir de la valeur E_r mesurée et $E_o = f(I_e)$ (en prenant $E_r = E_o$), on détermine **$I_{er} = 1.625A$** .

- La nouvelle valeur I_{er} est orthogonale à E_r . Connaissant $I_{er}, \alpha \cdot I$ et la relation vectorielle

$$I_{er} = \alpha I + I_e \text{ on détermine graphiquement } I_e = 2.45A.$$

