

Sciences et Techniques Industrielles

Sciences et Techniques Industrielles

SESSION DE 2001

CA/PLP2

CONCOURS EXTERNE

Section: GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option: ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Durée : 6 heures

Aucun document n'est autorisé

Moyens de calcul autorisés:

Calculatrice électronique de poche autorisée conformément à la circulaire n° 86-228 du 28 juillet 1986.

Composition du dossier :

- Présentation de l'installation étudiée 9 pages format A4 numérotées de 1 à 9.
- Les annexes : 5 pages format A4.
- Les documents réponses : 20 pages format 25x37 numérotées de DR1 à DR20 .

L'épreuve comportera 4 parties indépendantes :

- Partie A / Etude de la ventilation d'air frais du tunnel.*
- Partie B / Etude d'un groupe électroventilateur.*
- Partie C / Etude des transformateurs..*
- Partie D / Etude de la distribution.*

Conseils aux candidats :

Les questions et les emplacements pour les réponses figurent sur un même document. Vous devez répondre aux questions uniquement dans l'espace prévu après chacune d'elle sauf consigne particulière.

L'épreuve se compose de plusieurs parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. Une lecture attentive de l'ensemble du sujet s'avère nécessaire avant de composer.

Présentation générale

Tunnel autoroutier Usines de ventilation mécanique et d'éclairage

Généralités.

Il est nécessaire de ventiler les tunnels routiers pour évacuer les éléments polluants dégagés par les différents véhicules . Ces éléments polluants sont principalement :

l'oxyde de carbone, dégagé par tous les véhicules et en particulier les véhicules à essence ,

l'opacité due principalement aux imbrûlés dégagés par les véhicules diesel.

L'oxyde de carbone doit être particulièrement surveillé, car il est toxique et peut être mortel pour l'homme ; l'opacité doit être également limitée afin que la visibilité en tunnel soit satisfaisante.

Description générale.

La ventilation mécanique du tunnel Sud est assurée par deux usines situées l'une côté Est (tête A) et l'autre côté Ouest (tête B) ; chacune desservant la moitié de l'ouvrage. Le système de ventilation mis en œuvre pour assurer la ventilation du tunnel est du type *transversal partiel*. Il consiste en l'insufflation d'air frais répartie uniformément le long de l'ouvrage, avec reprise éventuelle, mais en débit moindre, de l'air vicié. Pour chaque demi-tunnel, l'air circule dans trois galeries de ventilation béton situées en plafond du tunnel : *deux galeries latérales d'air frais et une galerie centrale d'air vicié*.

Le soufflage de l'air frais en partie bas de la section du tunnel est obtenu par l'effet du guidage du jet des bouches sur la surface curviligne des piédroits en utilisant l'effet des jets pariétaux .

L'extraction de l'air vicié s'effectue par des trappes placées dans une position intermédiaire, qui permet l'extraction uniforme le long du tunnel en temps normal. En cas d'incendie, elles sont positionnées en fermeture ou ouverture totale afin de concentrer l'extraction proche du sinistre.

La galerie d'air vicié est fermée au niveau de la sous-station intermédiaire par un registre motorisé destiné à permettre la mise en communication des galeries d'air vicié de la tête A et de la tête B.

Des capteurs et appareils de mesure sont installés dans le tunnel pour contrôler l'atmosphère et transmettre des signaux à la GTC qui assure la commande automatique de la ventilation, il y a :

- 6 détecteurs de mono-oxyde de carbone (CO),
- 6 opacimètres,
- 5 anémomètres bidirectionnels.

Pour contrôler le flux d'air dans les galeries d'air frais, un anémomètre est installé dans chaque galerie, et son signal est transmis à la GTC.

La galerie de sécurité, située entre les deux tunnels, permet l'évacuation des piétons en cas de sinistre. Cette galerie est mise en surpression par rapport aux galeries principales par l'intermédiaire d'un groupe motoventilateur indépendant.

Description de l'installation :

- De la ventilation des tunnels.

Dans chaque usine, l'installation se compose de *deux ventilateurs hélicoïdaux d'air frais* de 2 m de diamètre et d'un ventilateur hélicoïdal d'air vicié de 1.83 m de diamètre; raccordés aux galeries de ventilation béton du tunnel par des gaines métalliques.

A chaque ventilateur est associé un circuit dans lequel se trouve un registre d'isolement motorisé, situé entre la machine et la galerie d'air coté tunnel .

Les électroventilateurs fonctionnent en vitesse variable.

En cas de défaillance du variateur de vitesse du ventilateur d'air vicié, celui-ci peut être démarré en direct sur le réseau grâce à un by-pass électrique, commandable à distance par la GTC.

- De la galerie de sécurité.

L'installation se compose d'un ventilateur hélicoïdal à entraînement direct, raccordé à la galerie de sécurité par une gaine métallique. L'électroventilateur fonctionne à vitesse constante. La vitesse d'écoulement d'air doit être suffisante pour maintenir la galerie en surpression. La température ambiante est constante dans la galerie.

Principe de fonctionnement.

Régime de soufflage d'air frais

La vitesse minimale de rotation des ventilateurs est fixée à une consigne basse qui correspond à un débit de 30 m³/s au ventilateur.

A cette vitesse, la pression fournie au niveau de la roue du ventilateur doit être toujours supérieure à celle engendrée par le pistonnement des poids lourds à grande vitesse.

La vitesse maximale de rotation des ventilateurs est la vitesse nominale qui correspond à une consigne de 100% et à un débit de 160 m³/s par ventilateur pour une pression de 265 daPa.

Les ventilateurs d'une usine (associés à la même tête) fonctionnent à une vitesse identique.

Régime d'extraction d'air vicié

La plus grande partie de l'air vicié est évacuée naturellement par les têtes du tunnel. Les ventilateurs d'air vicié ne sont utilisés que pour limiter la vitesse d'air longitudinale du tunnel par sécurité ou pour évacuer les fumées en cas d'incendie.

La vitesse maximale de rotation du ventilateur est la vitesse nominale qui correspond à une consigne de 100%.

Pour une même consigne, le débit extrait au niveau du ventilateur est variable en fonction des trappes ouvertes (nombre, position d'ouverture et situation géographique).

Débit maximum de 95 m³/s pour une pression de 384 daPa.

Fonctionnement normal (extraction répartie) :

le registre central de communication des demi- tunnels est en position « fermé » et toutes les trappes sont ouvertes en position « intermédiaire », le ventilateur fonctionne à une vitesse intermédiaire.

Fonctionnement normal (désenfumage) :

le registre central est en position « fermé » et 4 trappes proches du sinistre sont ouvertes en totalité. Le ventilateur fonctionne à une vitesse intermédiaire.

Fonctionnement dégradé :

en cas de panne de ventilateur et/ ou du variateur :

- en extraction répartie :

le registre central sera ouvert et le ventilateur de la tête opposée passera à une vitesse supérieure par augmentation de sa consigne.

- en fonctionnement désenfumage :

le registre central sera ouvert et le ventilateur de la tête opposée passera en vitesse maximale par augmentation de sa consigne.

Si les conditions ne permettent pas une extraction suffisante à l'endroit souhaité et s'il s'agit d'une panne du variateur, l'alimentation du ventilateur sera basculée pour permettre un démarrage en direct sur le réseau .

Caractéristiques générales de l'usine tête B :*Elle est équipée principalement de :*

Au-dessus de chaque tunnel , de trois ventilateurs, des gaines de raccordement et d'un pont roulant permettant leur manipulation.

Latéralement à chacun des deux tunnels, d'un bâtiment d'exploitation comprenant :

- le poste de transformation qui assure l'alimentation normale en énergie électrique à partir du réseau EDF (commutation sur l'usine de la tête A si besoin, chaque usine étant raccordée à un réseau EDF distinct)

- le groupe de ventilation de la gaine de sécurité

- les armoires électriques de commande, automatisme, puissance, auxiliaire BT

- de la ventilation

- de l'éclairage des tunnels

- de l'éclairage du viaduc

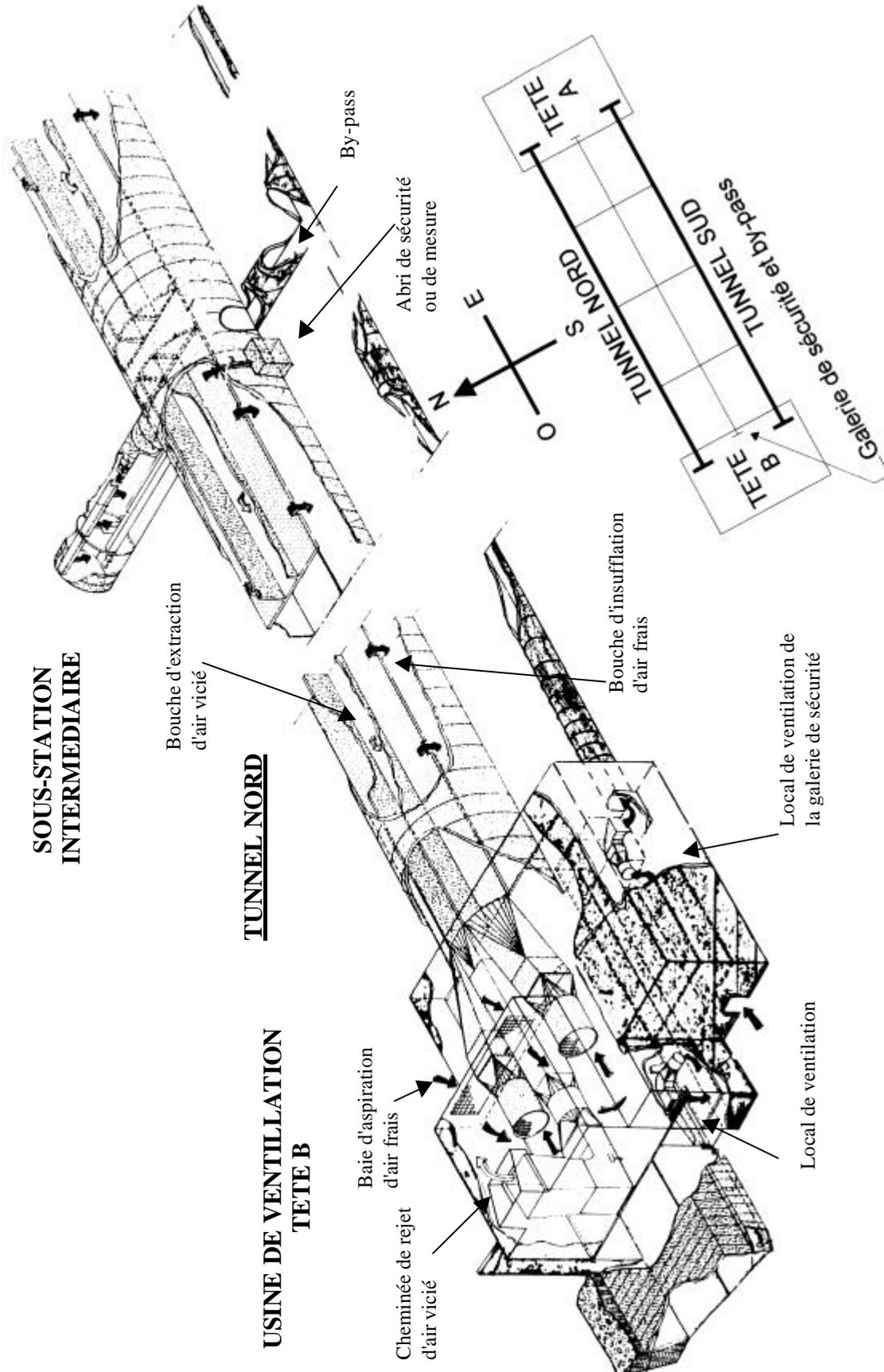
- de la signalisation

- un groupe électrogène qui assure l'alimentation partielle en énergie secours en cas de défaillance du secteur.

- de deux onduleurs alimentant en permanence les équipements de sécurité

- les équipements de télésurveillance raccordés au PC de commande situé à 10 km

Synoptique général de l'installation .



Vue en coupe d'un galerie du tunnel.

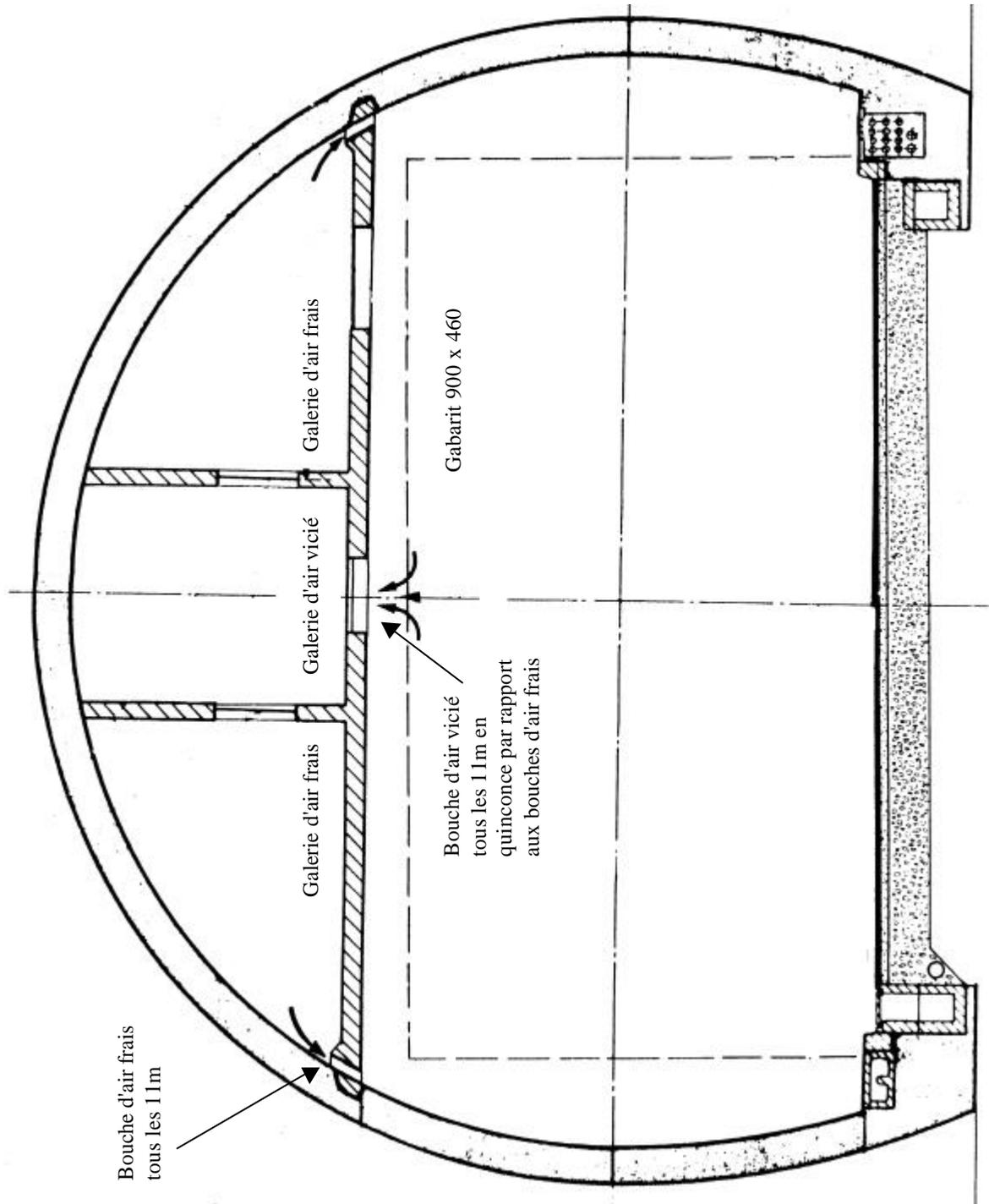


Schéma du TGBT force motrice ventilation : synoptique de distribution.

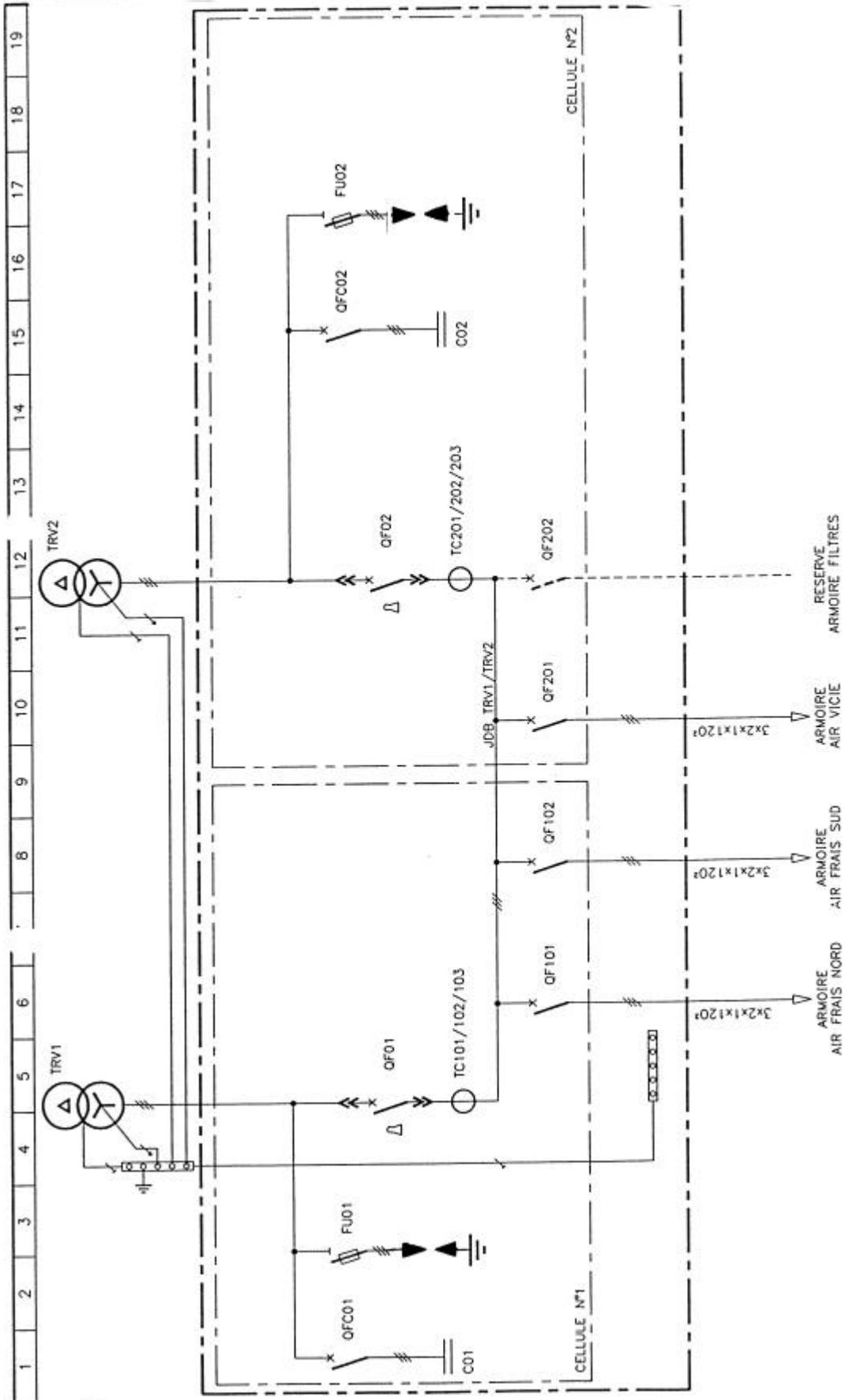
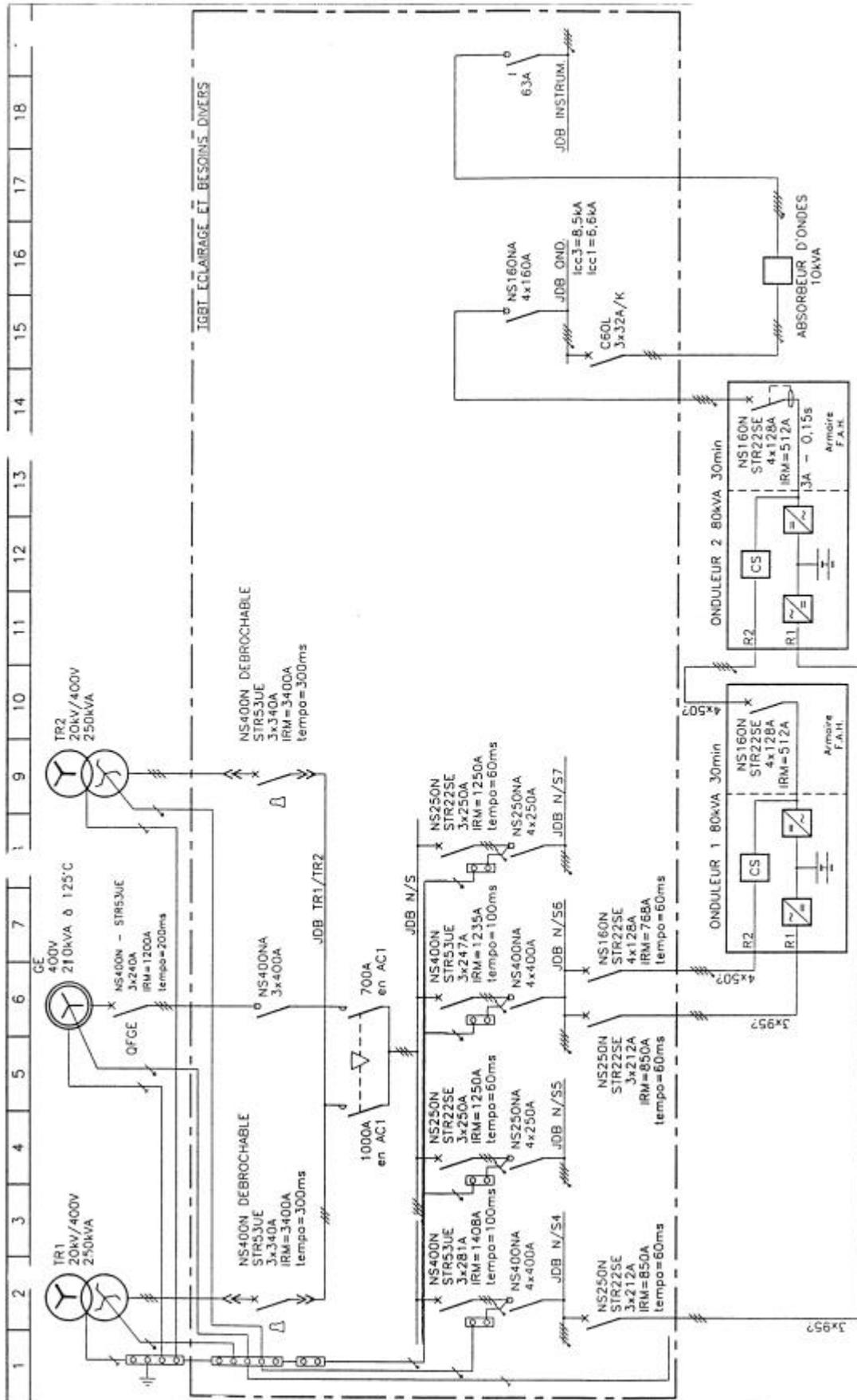


Schéma du TGBT éclairage et besoins divers : réglage des protections.



PARTIE A

DIMENSIONNEMENT DU VENTILATEUR D'AIR FRAIS

On s'intéresse dans cette partie au dimensionnement mécanique du groupe motoventilateur d'air frais. Le ventilateur est entraîné directement par un moteur asynchrone triphasé.

Données du problème :

Diamètre de la gaine d'air frais: 2 m

Vitesse de l'air dans la gaine : 51 m.s^{-1} pour une perte de charge totale de 265 daPa

Ventilateur :

Entraînement : motoventilateur de type axial à entraînement direct

Inertie : 92 Kg.m²

Moteur :

Diamètre du rotor : 0.6 m

Longueur du rotor : 1.3 m

$U = 380 / 660 \text{ V}$

$I_n = 857 / 495 \text{ A}$

$\cos \varphi = 0,88$

$h = 0,965$

$I_d / I_n = 5,56$

$T_{\max} / T_n = 3$

$T_d / T_n = 1,7$

Réseau :

660 V entre phases

f : 50 Hz

Etude des données constructeur (Voir annexe 1)

Hypothèses de calculs :

On suppose que la température est constante dans la gaine , que l'écoulement de l'air est homogène dans toute la gaine de ventilation (la pression est considérée comme constante)

Les frottements mécaniques du motoventilateur sont négligés.

Masse volumique moyenne du rotor : 708 Kg/m^3

On considère le couple moteur et le couple résistant constants

A.1 Déterminer le débit volumique

A.2 Déterminer et justifier la vitesse de rotation du ventilateur dans les conditions de fonctionnement nominales :

A.3 Déterminer la puissance absorbée par le ventilateur :

A.4 Donner la vitesse angulaire de synchronisme en rad.s^{-1} :

A.5 Calculer le couple de démarrage:

A.6 Calculer le moment d'inertie de l'ensemble motoventilateur.

A.7 Calculer l'accélération angulaire de l'ensemble motoventilateur.

A.8 Calculer la durée du temps de démarrage pour la vitesse nominale de ventilation

PARTIE B

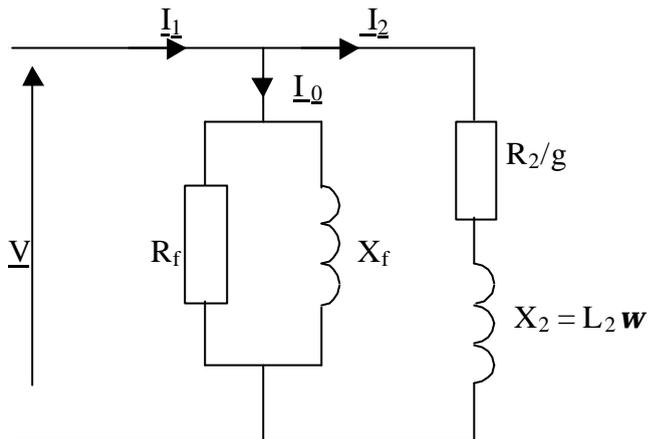
LE MOTEUR ASYNCHRONE ET SON VARIATEUR.

On s'intéresse dans cette partie à l'étude électrique du moteur du ventilateur d'air frais.

Moteur couplé directement au réseau.

B.2 Etude du schéma équivalent.

Le schéma équivalent pour une phase est donné ci-dessous :



A vide, le moteur consomme un courant de 142A avec un $\cos \varphi$ de 0,049.

La puissance consommée est de 8 kW et la vitesse de 1500 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$

On admettra que la fréquence de rotation est de 1450 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$

B.2.1 Donner la définition de R_f , X_f , R_2/g et X_2 :

B.2.2 Calculer R_f et X_f :

B.2.3 En régime nominal, calculer la valeur complexe de \underline{I}_2 en prenant \underline{V} comme origine :

B.2.4 En déduire les valeurs de R_2 et X_2 :

B.2.5 Calculer pour le point nominal, la puissance transmise au rotor et les pertes joule rotor :

B.2.6 Ecrire la relation liant le couple électromagnétique T_{em} au glissement g :

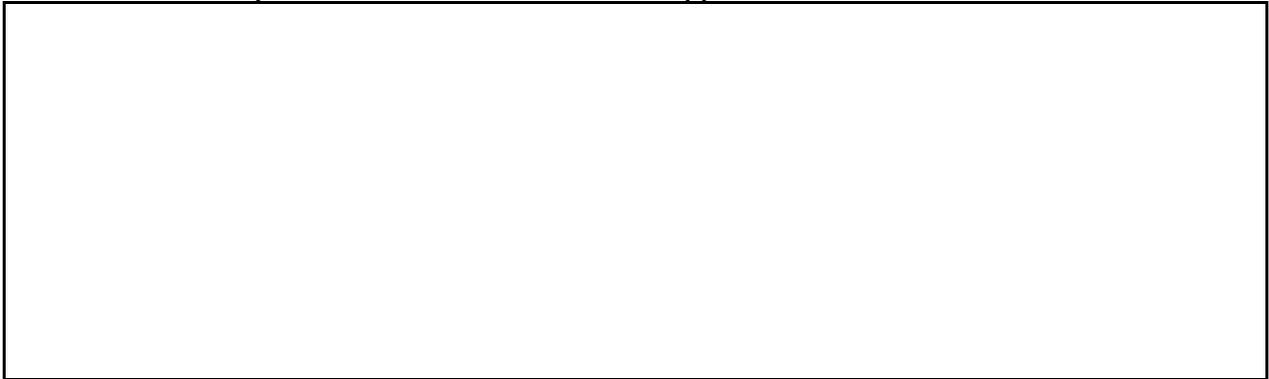
B.2.7 Montrer que le couple maximum $T_{em \max}$ est obtenu lorsque $R_2/g = X_2$:

B.2.8 Calculer la vitesse de rotation en tr.min^{-1} pour le couple maximum :

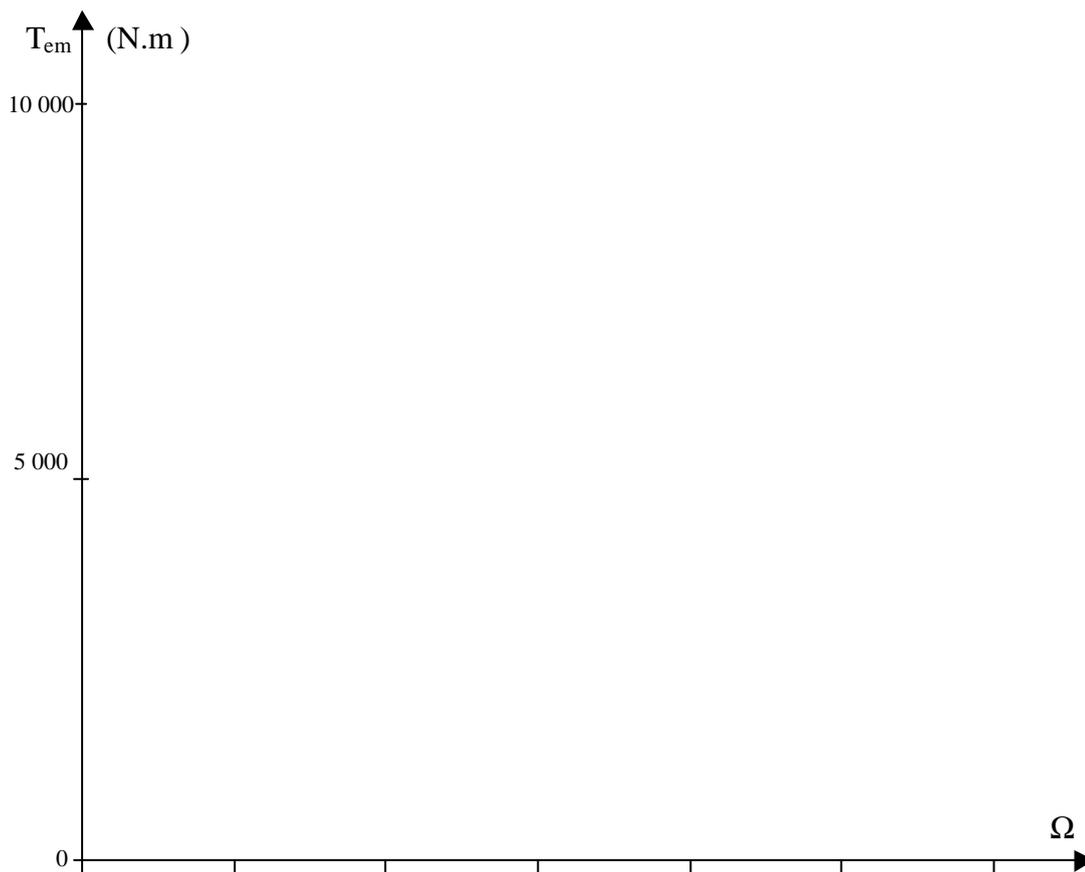
B . 3 étude du moteur asynchrone piloté par un variateur U/f

Caractéristiques moto-variateur.

B.3.1 Montrer que T_{em} max reste constant si le rapport U/f le reste aussi :



B.3.2 Pour $f = 20$, 50 et 60 Hz, en considérant que la tension maximale du moteur est la tension nominale, représenter l'allure des courbes $T_{em} (\Omega)$



B.3.3 Calculer pour chaque valeur de f , les valeurs de $T_{em,max}$ et la vitesse de rotation n_{max} en $tr.min^{-1}$ correspondante :

F	V	$T_{em,max}$	n
20			
50			
60			

B.3.4 Pour des vitesses proches de la vitesse de synchronisme, rechercher une relation linéaire entre T_{em} et Ω :

B.3.5 Montrer que la pente de cette droite reste constante si le rapport U/f le reste aussi :

B.3.6 En considérant que le couple de pertes de la machine asynchrone est constant et vaut $T_p = 60\text{Nm}$ et que le couple résistant a pour équation $T_r = 0,137 \Omega^2$, calculer le point de fonctionnement (T_r, Ω) pour $f = 40\text{ Hz}$:
(on utilisera la formule simplifiée de $T_{em}(\Omega)$)

PARTIE C

LES TRANSFORMATEURS

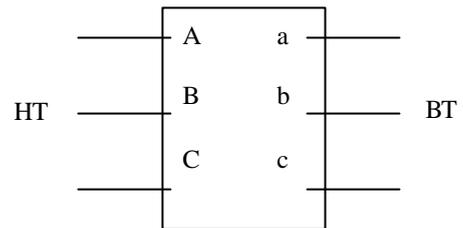
L'installation comporte plusieurs transformateurs triphasés de type *sec*, à *colonne*. On s'intéresse dans cette partie à l'étude d'un des transformateurs alimentant les motoventilateurs.

Transformateur de ventilation TRV1 :

C'est un transformateur triphasé Dyn11, alimenté au primaire sous 20 kV, 50Hz.

Le secondaire est relié, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un variateur, à trois moteurs asynchrones identiques de puissance utile 470 kW chacun, de rendement 0,924 et de facteur de puissance 0,97.

On adoptera la notation suivante :



C.1 Couplage :

Donner le diagramme vectoriel des tensions primaires et secondaires, et le schéma de branchement des enroulements correspondant au couplage Dyn11.

Essai à vide d'un transformateur TRV1

Pour réaliser l'essai à vide, ne disposant pas d'une alimentation de 20kV, on alimente le transformateur TRV1 du côté du secondaire sous 660 V entre phases.

On relève une tension entre phases côté sortie de 19 130 V, et une puissance de 2 840W (pour l'ensemble du transformateur).

Déduire de ces mesures :

C.2 Le rapport de transformation m_C pour une colonne :

C.3 Le nombre de spires d'un enroulement primaire sachant qu'un enroulement secondaire comporte 23 spires :

C.4 Les pertes fer globales dans le transformateur lors de cet essai (le courant secondaire de l'essai à vide est faible)

C.5 Quelles pertes fer aurait-on trouvées en alimentant le transformateur sous 20 kV au primaire ?

Fonctionnement en sinusoïdal :

Maintenant, le transformateur est branché normalement , primaire sous 20 kV, et alimente directement (variateur by-passé) les trois moteurs asynchrones fonctionnant à charge nominale.

- C.6 Calculer la chute de tension entre phases. Exprimer cette valeur en pourcentage de la tension secondaire à vide.

- C.7 Déterminer le rendement du transformateur, sachant que les résistances apparentes du primaire et du secondaire, mesurées entre phases, sont respectivement $R_{1a}=3,65 \Omega$ et $R_{2a}=1m\Omega$.

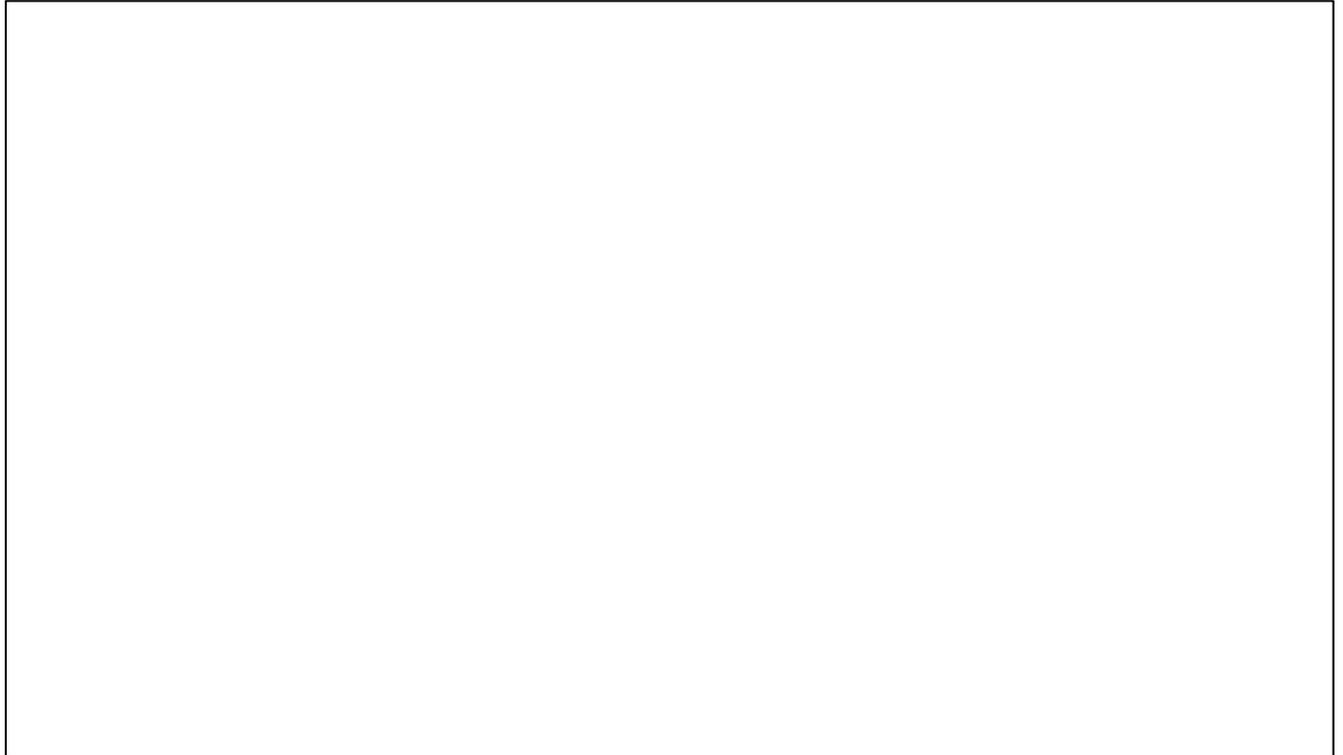
Fonctionnement en non sinusoïdal.

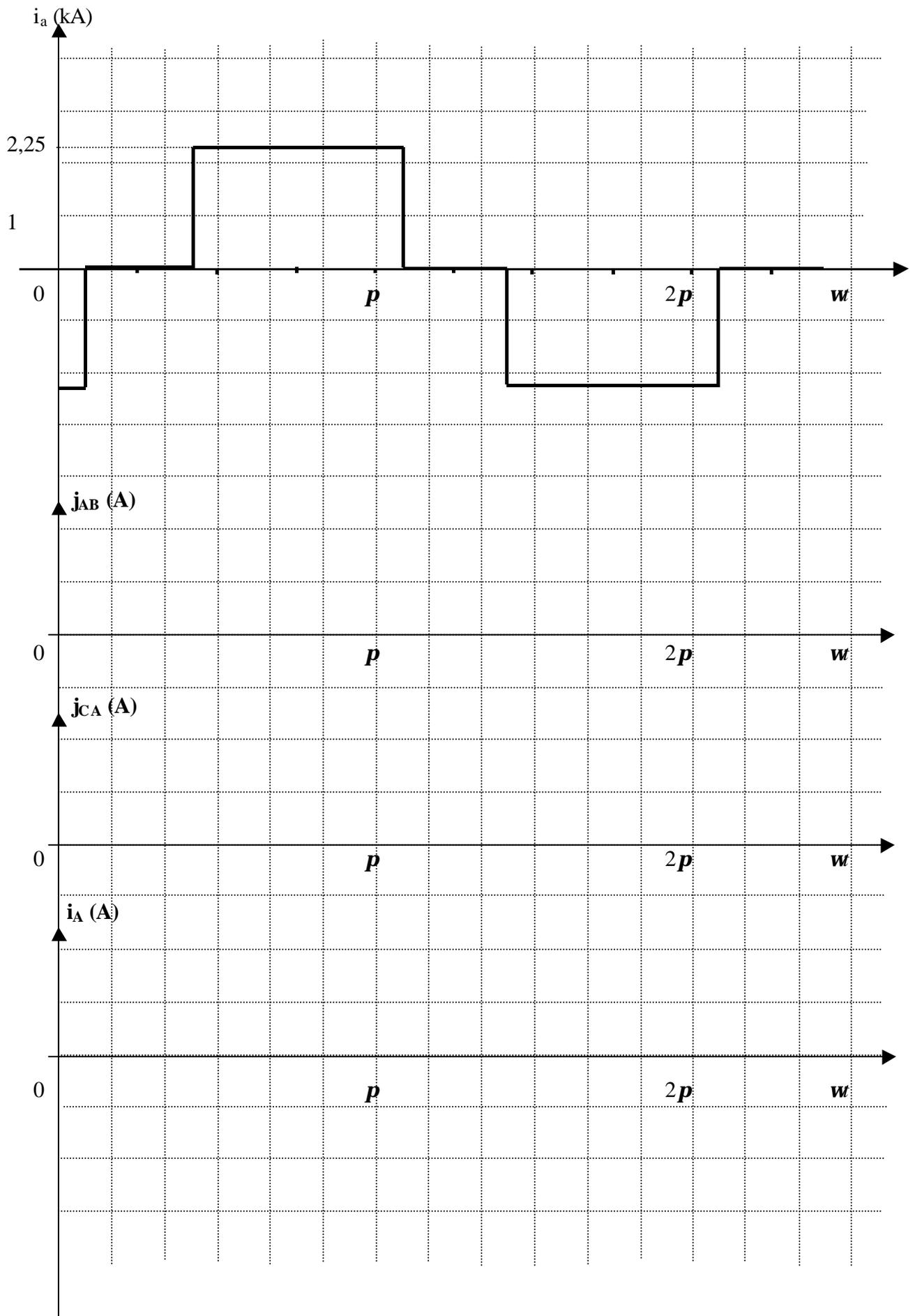
On met en service le convertisseur commandant les moteurs asynchrones.

Le courant circulant alors dans une phase secondaire $i_a(\omega t)$ est représenté page suivante (12)

C.8 Représenter sur le document (page 12) les courants $j_{AB}(\omega t)$, $j_{CA}(\omega t)$, et $i_A(\omega t)$.

C.9 Déterminer les intensités efficaces I_a de $i_a(\omega t)$, $J_{AB}(\omega t)$, et $I_A(\omega t)$.





C.10 Représenter sur le même document (page 12) l'allure du fondamental $i_{aF}(\omega t)$ de $i_a(\omega t)$.
Quel est le déphasage φ_F de ce fondamental par rapport à la tension $v_{an}(\omega t) = V_{an} \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$?



C.11 Calculer l'intensité efficace I_{aF} de $i_{aF}(\omega t)$.



C.12. Calculer la puissance fournie par le transformateur dans ce mode de fonctionnement.



PARTIE D

ETUDE DE LA DISTRIBUTION

On s'intéresse dans cette partie à l'alimentation électrique de l'éclairage et des besoins divers du tunnel.

Pour les calculs de la partie D, utiliser comme référence le schéma simplifié donné en annexe 2 ainsi que les tableaux des annexes 3 et 4.

L'éclairage du tunnel et du viaduc peut être assuré par deux moyens :

- Alimentation normale par deux transformateurs 20kV/400V (TR1/TR2)
- Alimentation secourue prise en charge par un groupe électrogène 210kVA.

D.1 Evaluation des courants de court circuit des générateurs.

Hypothèses de calcul:

- Les deux transformateurs sont en service.
- La puissance en court-circuit du réseau amont est de 500MVA.
- On néglige dans tous les calculs l'impédance du jeu de barres "JDB TR1/TR2" repéré "C2".
- On prendra pour la résistivité du cuivre $\rho = 2,25 \times 10^{-8} \Omega.m$

D.1.1 Pour quelle(s) raison(s) doit on connaître les intensités de court-circuit aux différents points d'une installation au moment de la conception.

D.1.2 Calculer la valeur du courant de court circuit triphasé équilibré appelé "**I_{cc31}**" au niveau du jeu de barres "JDB TR1/TR2", dans le cas où l'alimentation est fournie par les deux transformateurs.

I_{cc31} =

D.1.3 Calculer la valeur du courant de court circuit triphasé " I_{cc32} " à la sortie de l'alternateur en régime transitoire.

$I_{cc32} =$ _____.

D.2 Calculs des courants de court circuit dans le cas où l'alimentation est assurée par les deux transformateurs 250kVA.

Hypothèses de calcul : On prendra pour la suite des calculs $I_{cc31} = 18kA$

D.2.1 Calculer la valeur du courant de court circuit triphasé " I_{cc33} " au niveau de l'alimentation du primaire du transformateur "TE1" de 48kVA 400V/5500V.

$I_{cc33} =$ _____.

Pour continuer l'étude du circuit d'alimentation de l'éclairage, nous allons traverser un transformateur élévateur de tension "TE1" 400V/5,5kV de 48kVA. On suppose le transformateur comme parfait.

D.2.2 Justifier le choix technologique d'un tel transformateur.

D.2.3 Démontrer comment l'impédance coté primaire peut être ramenée au secondaire.

D.3 Evaluation des chutes de tension en ligne.

Hypothèses de calcul :

Nous nous situons proche du régime nominal de l'installation. Nous partons sur les hypothèses suivantes :

- On néglige l'impédance du jeu de barre "TR1/TR2" repéré C2.
- Pour les câbles C1 et C1', In = 300A et facteur de puissance = 0,86
- Pour le jeu de barre "N/S" repéré C3, In = 400 A et facteur de puissance = 0,86
- Pour le câble C4, In = 250A et facteur de puissance = 0,86
- Pour le câble C5, In = 60A et facteur de puissance = 0,93

L'impédance des disjoncteurs sera négligée.

D.3.1 Calculer la valeur de la chute de tension en volt et en % entre le secondaire des transformateurs d'alimentations TR1 et TR2 et le primaire du transformateur d'éclairage TE1.

DU =

D.4 Vérification de la tenue des conducteurs aux contraintes thermiques correspondant à I_{cc1} .

On va chercher à vérifier la tenue en température du câble C1 au secondaire du transformateur TR1 si un court-circuit à lieu au niveau du jeu de barres "TR1/TR2" repéré C2.

Hypothèses de calcul :

Si le courant de court-circuit est rapidement coupé (de quelques dixièmes de secondes à 5 secondes maximum), l'échauffement est dit adiabatique. Pour un temps inférieur à 5 secondes, la contrainte thermique dans le câble se calcule avec la formule suivante :

$$I^2 \cdot t = K^2 \cdot S^2 \quad \text{avec } S \text{ en mm}^2, I \text{ en A et } t \text{ en sec.}$$

- Utiliser pour la valeur de la résistivité du cuivre dans cette partie C4 la valeur obtenue par calcul pour les températures données dans l'application.
- Température maximale du câble en court-circuit = 240°C

D.4.1 Calculer la valeur de la résistivité du cuivre pour une température de début du court-circuit de 70°C.

$r_{70^\circ} =$ <input type="text"/>

D.4.2 Expliquer ce que veut dire "Echauffement adiabatique".

--

D.4.3 A partir de l'équation thermique, déterminer la valeur du coefficient K nécessaire pour le calcul des contraintes thermiques.

(Rappel : $Q = m \cdot C_m \cdot \Delta\theta$ avec : Q en joules , m en kg , C_m en J/kg.°C)

$K =$ <input type="text"/>

D.4.4 Dans l'hypothèse de l'échauffement adiabatique, calculer le temps maximum de maintien du court-circuit, et en déduire si cette valeur est compatible avec le temps de fonctionnement du disjoncteur.

T = <input style="width: 150px;" type="text"/>

D.5 Contrôle de la qualité de la protection des personnes contre les contacts indirects.

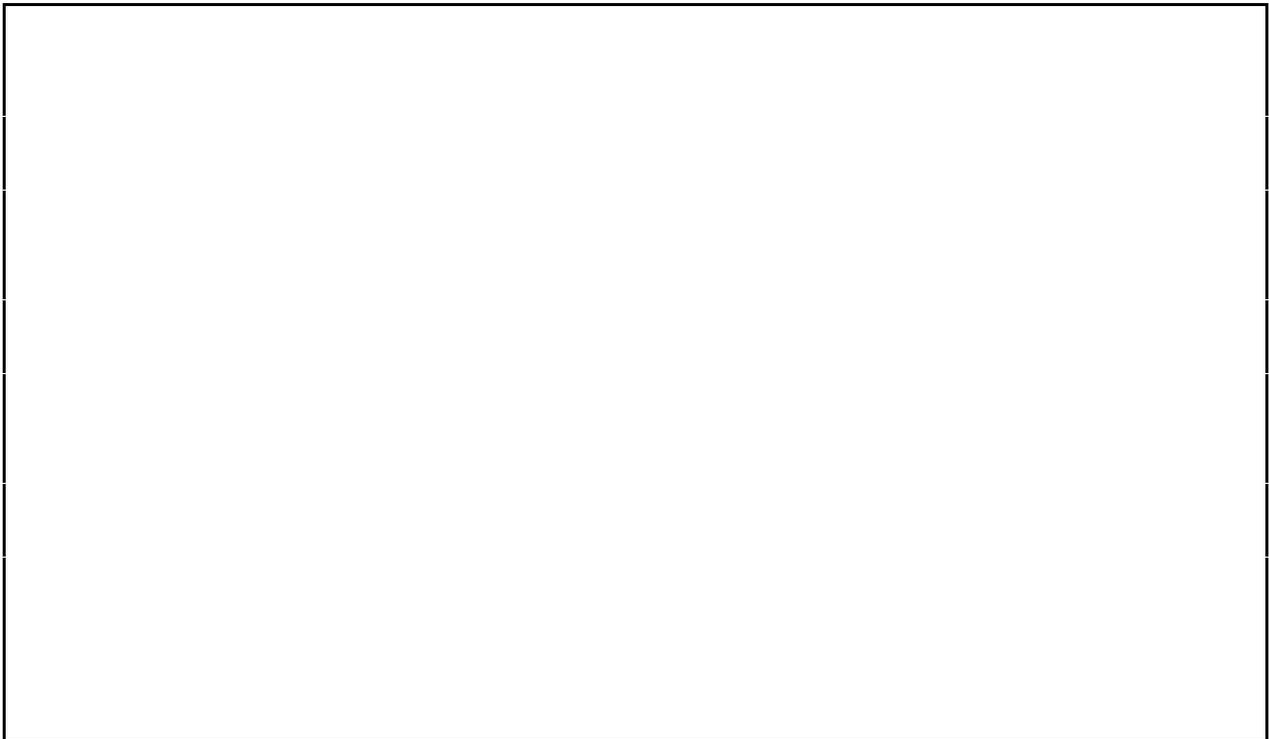
Hypothèses de calcul :

On prendra la méthode des impédances préconisée par la norme NFC 15-105 qui prend en compte les impédances du réseau amont vues du secondaire, ainsi que toutes les impédances de la boucle de défaut. On négligera l'impédance des disjoncteurs, du jeu de barre "TR1/TR2" repéré C2, ainsi que celle du défaut (défaut franc). Le local est considéré comme un local sec.

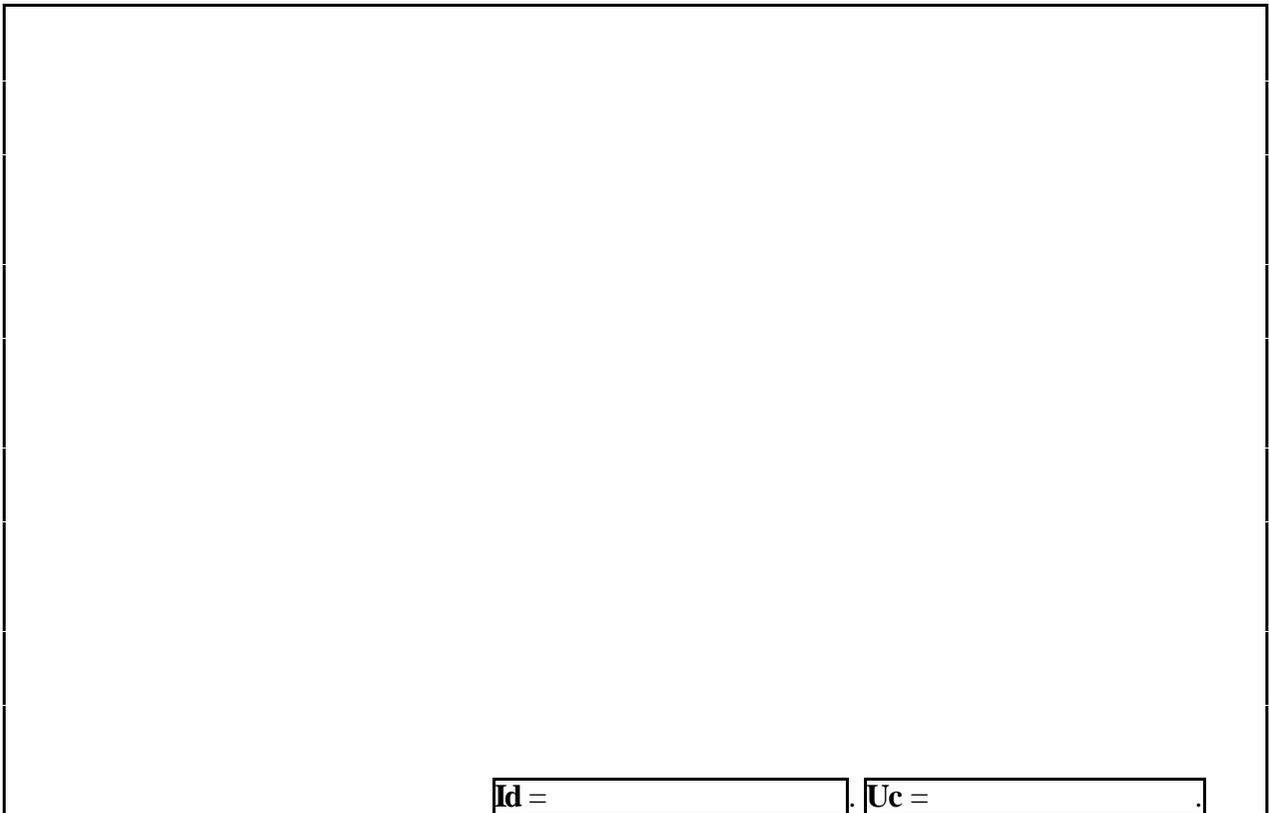
D.5.1 Identifier le schéma de liaisons à la terre qui a été adopté pour l'installation située entre le transformateur TR1/TR2 et le transformateur élévateur du circuit d'éclairage TE1.
Rappeler la signification des lettres que vous allez utiliser pour donner votre réponse.

--

D.5.2 A partir de schéma simplifié donné en annexe 2, tracer le schéma équivalent de la maille permettant de mettre en évidence la circulation du courant de défaut, la tension de contact, les impédances dans le cas où un défaut interviendrait au niveau du jeu de barres JDB N/S, au dessus de D4.



D.5.3 Calculer la valeur du courant de défaut "Id" ainsi que la valeur de la tension de contact "Uc". En déduire si la protection des personnes est bien assurée dans cette partie du circuit.



Id = . **Uc** = .

D.6 Compensation de l'énergie réactive au niveau des circuits d'éclairage.

Le circuit d'éclairage au secondaire du transformateur TE2 est constitué par des lampes à décharge sodium basse pression. Le circuit raccordé au secondaire du transformateur est composé de 15 luminaires SOX135 et de 15 luminaires SOX35 répartis sur les 3 phases. La compensation de l'énergie réactive est directement réalisée au secondaire du transformateur TE2 par une batterie de condensateur triphasée.

D.6.1 Justifier la nécessité de relever la valeur du facteur de puissance d'une installation industrielle. Indiquer précisément dans le cas où cette compensation est réalisée à l'origine de chaque circuit, sur quels éléments de l'installation va intervenir cette amélioration, du point de vue technique et économique.

D.6.2 On désire améliorer le facteur de puissance du circuit d'éclairage. Calculer la batterie de condensateur à utiliser pour obtenir une $Tg \varphi = 0,4$. Donner les caractéristiques d'un condensateur (capacité et tension) dans les deux cas suivants :

- Couplage des 3 condensateurs en étoile .
- Couplage des 3 condensateurs en triangle.

ANNEXE 1

PRINCIPES GENERAUX DE VENTILATION

1. Généralités.

Le ventilateur est une turbomachine réceptrice qui fournit l'énergie nécessaire pour entretenir l'écoulement de l'air dans le circuit de ventilation. Il doit être choisi pour débiter un certain volume d'air sous une certaine pression (qui dépend de la résistance du circuit) .

Le débit délivré par un ventilateur est à la fois fonction de ses caractéristiques propres et de la perte de charge maximale pouvant exister dans l'installation.

A une vitesse de rotation donnée, un ventilateur peut être caractérisé par quatre courbes représentant les variations, en fonction du débit volume Q (m^3/s) traversant le ventilateur, de :

- la différence de pression totale du ventilateur ΔP , définie comme la différence algébrique entre les pressions totales à la bride de refoulement et à la bride d'aspiration ;
- la puissance absorbée ou puissance à l'arbre P_a (W), puissance mécanique fournie à l'arbre d'entraînement du ventilateur ;
- le rendement du ventilateur h_{dyn} , défini comme le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée ;

$$h_{dyn} = \frac{Pu}{Pa} = \frac{Q \cdot \Delta P}{Pa}$$

- la puissance acoustique , exprimée en dB.

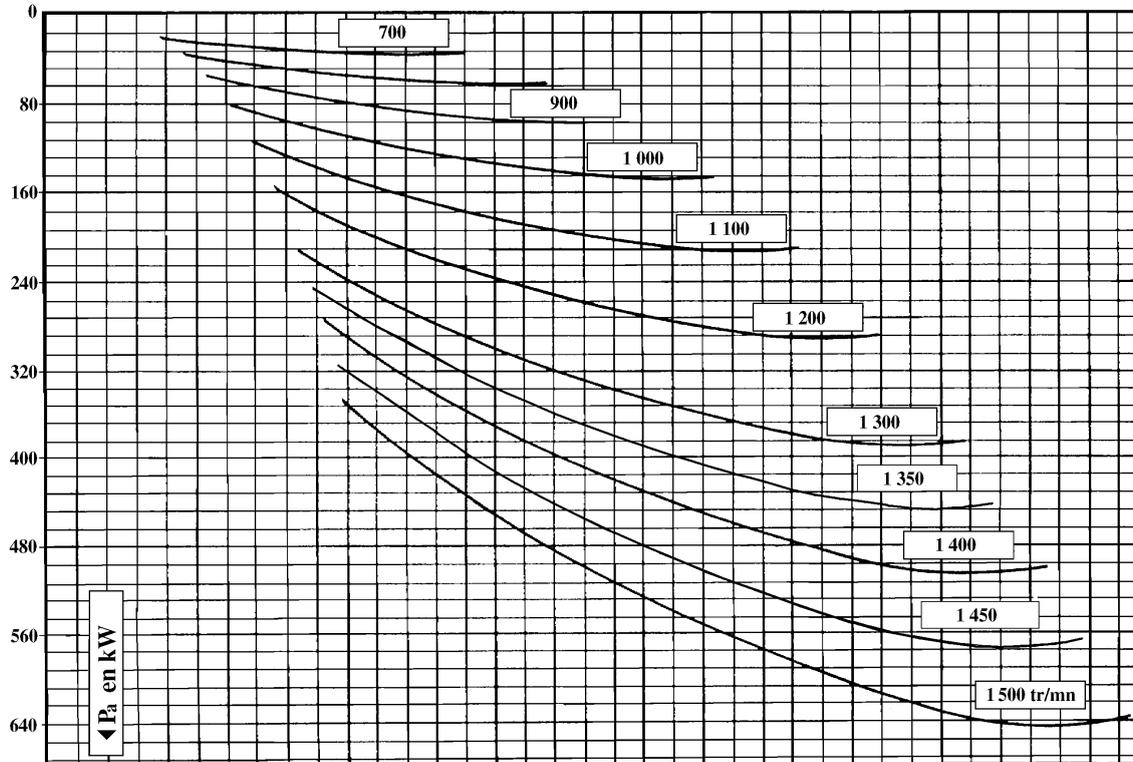
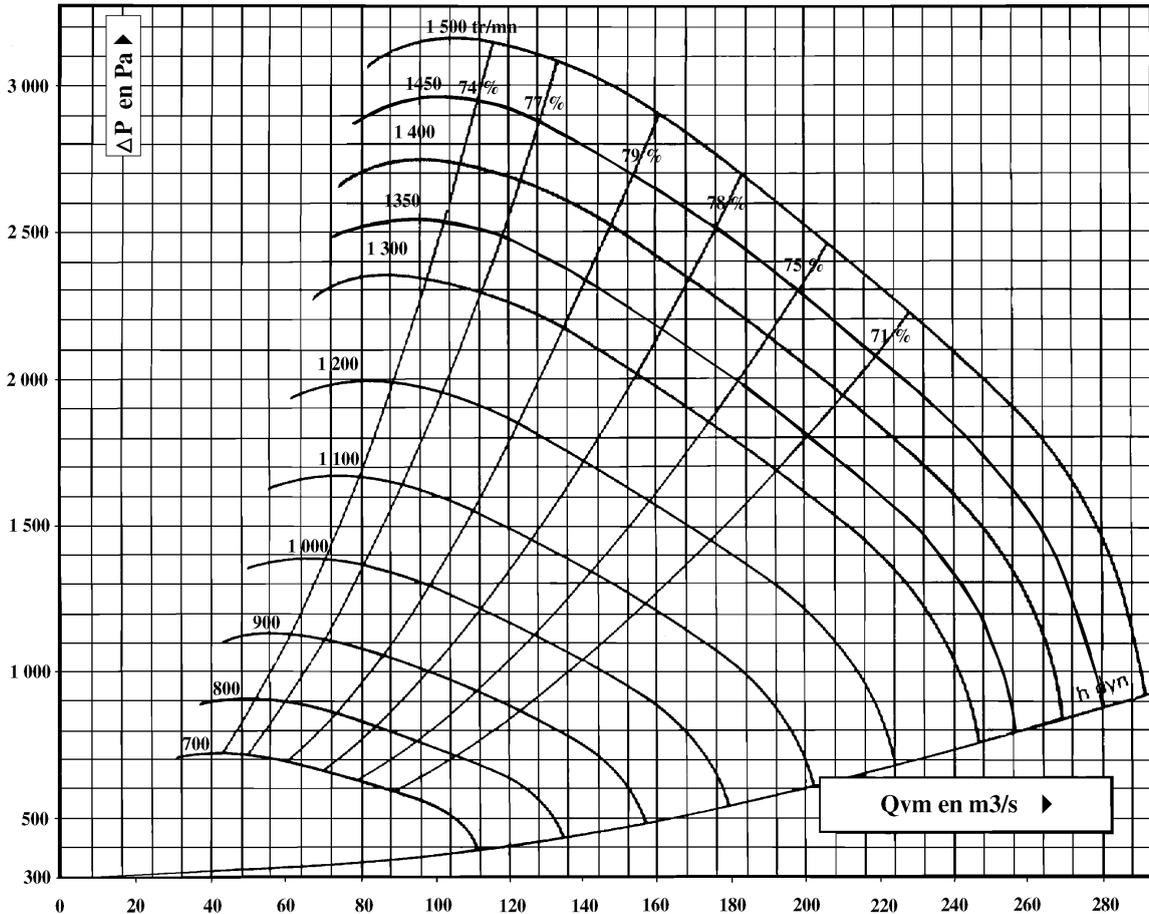
Si la vitesse de rotation N varie, le débit varie proportionnellement à N^2 et la puissance absorbée à N^3 .

2. Point de fonctionnement d'un ventilateur.

Soit un ventilateur ayant une courbe débit-pression connue, que l'on introduit dans un circuit dont on a calculé la parabole débit-perte de charge . Le débit mis en jeu sera tel que la pression fournie par le ventilateur égale la perte de charge du circuit. Le rendement du ventilateur h_{dyn} peut varier de 0,3 à 0,85 environ selon le modèle et le point de fonctionnement. On ne peut donc pas adapter n'importe quel ventilateur à n'importe quel réseau.

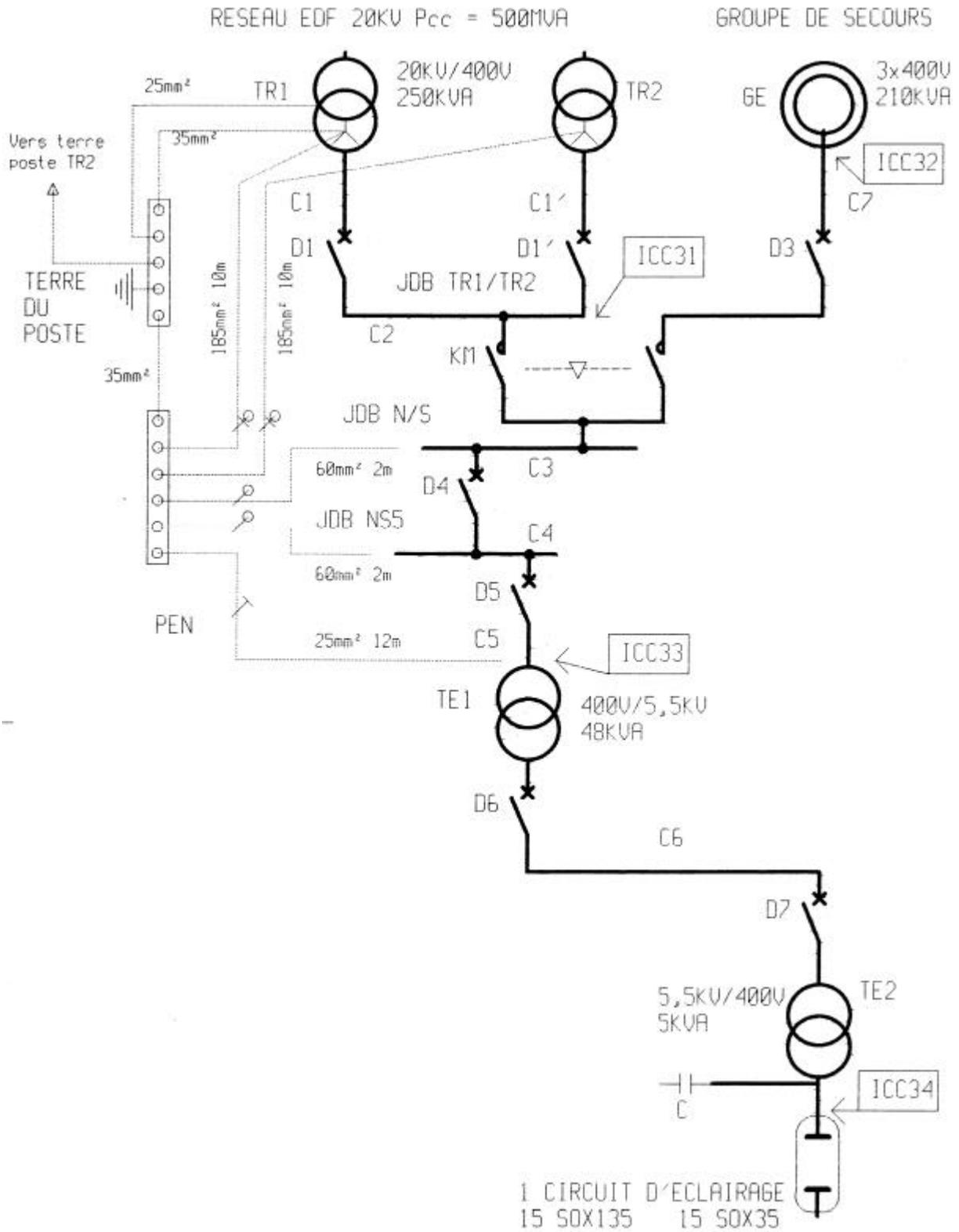
Extrait des cahiers de notes documentaires n° 125, 1986

Caractéristiques du ventilateur hélicoïdal à entraînement direct du réseau air frais.
on admettra les caractéristiques du ventilateur suivant



ANNEXE 2

Schéma simplifié permettant l'étude du circuit de distribution.



ANNEXE 3

TGBT Eclairage et besoins divers : caractéristiques des éléments du circuit.

- Impédances (Ztr), résistances (Rtr), réactances (Xtr) par phase d'un transformateur vu du secondaire.

Tension	U ₂₀ =237V				U ₂₀ =410V			
	Puissance (kVA)	Ucc (%)	Rtr (mW)	Xtr (mW)	Ztr (mW)	Ucc (%)	Rtr (mW)	Xtr (mW)
100	4	11,79	19,13	22,47	4	35,3	57,23	67,24
160	4	5,15	13,06	14,04	4	15,63	39,02	42,03
250	4	2,92	8,5	8,99	4	8,93	25,37	26,9
315	4	2,21	6,78	7,13	4	6,81	20,22	21,34
400	4	1,1614	5,38	5,62	4	5,03	16,04	16,81
500	4	1,235	4,32	4,49	4	3,9	12,87	13,45

- Résistances (Ra), réactances (Xa) par phase du réseau amont vue du secondaire du transformateur HT/BT.

Pcc	U ₀ (V)	Ra (mW)	Xa (mW)
250 MVA	237	0,033	0,222
	410	0,1	0,7
500 MVA	237	0,017	0,111
	410	0,04	0,350

- Caractéristiques de l'alternateur du groupe de secours.

Tension à vide pour un enroulement	V ₀ = 237V
Puissance apparente globale	210 kVA
Couplage des enroulements	Etoile neutre sorti
Réactances transitoires	X'd = 15,6%
Rapport résistance/réactance (Ra/X'al)	R/X = 0,15

Calcul de la réactance transitoire de l'alternateur : $X'al = \frac{U_0^2}{S_n} \cdot X'd$

- Caractéristiques des transformateurs.

Transformateurs TR1 et TR2 :

20kV/400V 250kVA Couplage Yzn11 U₂₀ = 410V Ucc = 4%

Transformateur TE1 :

400V/5,5kV 48 kVA Couplage Dyn11 U₂₀ = 5,612kV Ucc = 2,5%
Pcuivre = 853W

Transformateur TE2 :

5,5kV/400V 5 kVA Couplage Dyn11 U₂₀ = 410V Ucc = 2,5%
Rtr = 0,31 Ztr en conformité avec la norme NFC 52-410

ANNEXE 4

TGBT Eclairage et besoins divers : caractéristiques des éléments du circuit.

- Caractéristiques des conducteurs.

Caractéristiques générales du cuivre :

Résistivité du cuivre à 0°C	$\rho_0 = 1,72 * 10^{-8} \Omega \cdot m$
Coefficient de température	$\alpha = 3,93 * 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Masse volumique	$Mv = 8900 \text{ kg/m}^3$
Chaleur massique	$Cm = 380 \text{ J/ kg.}^\circ\text{c}$

Résistances et réactances par phase des principaux éléments du circuit :

Élément	R	X
Disjoncteur	négligeable	0,15 mΩ
Jeu de barre	Calculé avec ρ	0,15 mΩ/m
Câble	Calculé avec ρ	0,08 mΩ/m
Contacteur / Fusible	négligeable	négligeable

Caractéristiques des câbles et jeu de barres :

Repère câble	Longueur (m)	Section (mm ² /ph)	Type
C1 C1' TR1/D1	8	185	R2V cuivre
C2 JDB TR1/TR2	6	120	J.D.B. cuivre
C3 JDB N/S	6	120	J.D.B. cuivre
C4 JDB N/S5	1	120	J.D.B. cuivre
C5 D5/ TE1	15	25	R2V cuivre
C6 D6/D7	1800	16	R2V cuivre
C7 GE/D3	26	185	R2V cuivre
PEN liaison neutre TR1/PEN ou TR2/PEN	10	185	R2V cuivre
PE liaison masse TE1/PEN	12	25	R2V cuivre

Nb : Température maximale du câble R2V en court-circuit = 240°C

- Caractéristiques des luminaires.

Lampe Sodium Basse pression	Puissance du Tube (W)	Puissance absorbée par le luminaire (W)	Puissance apparente (VA)	Nombre de luminaires
SOX135	135	160,5	192	15
SOX35	35	43,5	147,2	15

CORRIGE

1

PARTIE A

ETUDE MECANIQUE : VENTILATEUR AIR FRAIS

Données du problème :

Diamètre de la gaine d'air frais: 2 m

Vitesse de l'air dans la gaine : 51 m/s, pour une perte de charge totale de 265 daPa

Ventilateur :

Entraînement : motoventilateur de type axial à entraînement direct

Inertie : 92 Kg.m²

Moteur :

Diamètre du rotor : 0.6 m

Longueur du rotor : 1.3 m

U = 380 / 660 V

I_n = 857 / 495 A

Cos φ = 0,88

h = 0,965

I_d / I_n = 5,56

T_{max} / T_n = 3

T_d / T_n = 1,7

Réseau :

660 V entre phases

f : 50 Hz

Etude des données constructeur (Voir annexe 1)

Hypothèses de calculs :

On suppose que la température est constante dans la gaine , que l'écoulement de l'air est homogène dans toute la gaine de ventilation (la pression est considérée comme constante).

Les frottements mécaniques du motoventilateur sont négligés.

Masse volumique moyenne du rotor : 708 Kg/m³

On considère le couple moteur et le couple résistant constants.

A.1 Déterminer le débit volumique

$$Q_v = S \cdot V_a = \pi \cdot D^2/4 \cdot V_a = \pi \cdot 51 = \mathbf{160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

Q_v : débit volumique en m³/s

S : section de la gaine en m²

V_a : vitesse du fluide en m/s

A.2 Déterminer et justifier la vitesse de rotation du ventilateur dans les conditions de fonctionnement nominales :

D'après le réseau de courbes de l'annexe 1 , ΔP : 265 daPa , 2650 Pa ; Q_v : 160 m³.s⁻¹

n : 1450 tr.mn⁻¹

A.3 Déterminer la puissance absorbée par le ventilateur :

D'après le réseau de courbes de l'annexe 1 ; $Q_v : 160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $n : 1450 \text{ tr} \cdot \text{mn}^{-1}$
 $P_a : 480 \text{ kW}$

A.4 Calculer la vitesse angulaire de synchronisme en $\text{rd} \cdot \text{s}^{-1}$:

$n_s : 1500 \text{ tr} \cdot \text{mn}^{-1}$
 $n : 1450 \text{ tr} \cdot \text{mn}^{-1}$
 $\mathbf{W_s = \pi \cdot n_s / 30 = 157.08 \text{ rd} \cdot \text{s}^{-1}}$

A.5 Calculer le couple de démarrage:

$\mathbf{W = \pi \cdot n / 30 = 151.84 \text{ rd} \cdot \text{s}^{-1}}$
 $T_n = P_u / \Omega = 3\ 161 \quad \text{Nm}$
 $\mathbf{T_d = 1.7 T_n = 5\ 373,94 \quad \text{Nm}}$

A.6 Calculer le moment d'inertie de l'ensemble motoventilateur.

On considère deux cylindres pleins sur le même axe
 $J_{\text{rotor}} = 1/2 M R^2 = 1/2 \rho V_{\text{rotor}} \cdot R^2 = 11,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $J_{\text{ventilateur}} = 92 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $J_{\text{total}} = J_{\text{rotor}} + J_{\text{ventilateur}} = 103,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

A.7 Calculer l'accélération angulaire de l'ensemble motoventilateur.

$T_{\text{moteur}} - T_{\text{résistant}} = J_{\text{total}} \cdot \mathbf{W}' = T_{\text{accélération}}$
 (N.m) (N.m) (kg.m²)(rd.s⁻²)
 $T_{\text{résistant}} = T_{\text{air}} = P_u / \mathbf{W} = 480\ 000 / 151,84 = 3161,22 \text{ Nm} \quad (= T_n)$
 $T_{\text{moteur}} - T_{\text{résistant}} = 5\ 373,94 - 3161,22 = 2\ 212,72 \text{ Nm}$
 $\mathbf{W}' = T_{\text{moteur}} - T_{\text{résistant}} / J_{\text{total}} = 2\ 212,72 / 103,7 = \mathbf{21,33 \text{ rd} \cdot \text{s}^{-2}}$

A.8 Calculer la durée du temps de démarrage pour la vitesse nominale de ventilation

On considère que le mouvement est uniformément varié
 (page 1 : ... On considère le couple moteur et le couple résistant constants...)

$\mathbf{W = 1/2 W' t^2}$
 $\mathbf{t = \sqrt{\frac{2W}{W'}} = 3,77 \text{ s}}$

PARTIE B

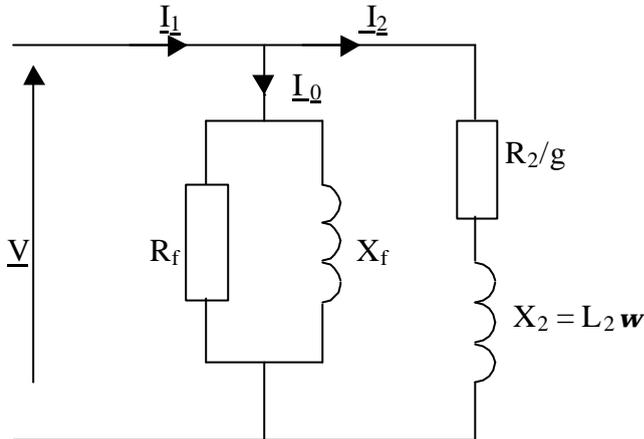
LE MOTEUR ASYNCHRONE ET SON VARIATEUR.

On s'intéresse dans cette partie à l'étude électrique du moteur du ventilateur d'air frais.

Moteur couplé directement au réseau.

B.2 Etude du schéma équivalent.

Le schéma équivalent pour une phase est donné ci-dessous :



A vide, le moteur consomme un courant de 142A avec un $\cos \varphi$ de 0,049.

La puissance consommée est de 8 kW et la vitesse de 1500 tr/min

On admettra que la fréquence de rotation est de 1450 tr.min^{-1}

B.2.1 Donner la définition de R_f , X_f , R_2/g et X_2 :

R_f : résistance rendant compte des pertes fer

X_f : réactance magnétisante

R_2/g : résistance du rotor ramenée au stator

X_2 : réactance du rotor ramenée au stator

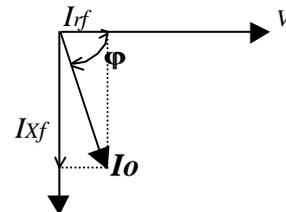
B.2.2 Calculer R_f et X_f :

$$R_f = 3 V^2 / P_0 = 54,45 \Omega$$

$$X_f = 3 V^2 / Q_0 = 3 V^2 / P_0 \tan \varphi_0 = 2,67 \Omega$$

Ou $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$ $R_f = V / I_{0a}$ $R_f = 54,76 \Omega$

$I_{0r} = I_0 \sin \varphi_0$ $X_f = V / I_{0r}$ $X_f = 2,686 \Omega$



B.2.3 En régime nominal, calculer la valeur complexe de I_2 en prenant V comme origine :

$$I_2 = I_1 - I_0 \quad \text{et } I_n = 495A$$

$$I_{1a} = I_n \cos \varphi \quad I_{1r} = I_n \sin \varphi$$

$$I_1 = I_{1a} - j I_{1r} \quad I_1 = 435,6 - 235,112j$$

$$I_0 = I_{0a} - j I_{0r} \quad I_0 = 6,958 - 141,829j$$

$$I_2 = 428,642 - 93,283j$$

$$|I_2| = 438,675 A$$

$$\arg(I_2) = -12,277 \text{ deg}$$

B.2.4 En déduire les valeurs de R_2 et X_2 :

$$\underline{Z}_2 = \underline{V} / \underline{I}_2 = \frac{\left[\frac{660}{\sqrt{3}}; 0^\circ \right]}{\left[438,7; -12,27^\circ \right]} = [0,8686; 12,27^\circ] ; \frac{R_2}{g} = Z_2 \cdot \cos j_2 = 0,8488 \text{ W}$$

$$\text{au point nominal : } g = \frac{1500-1450}{1500} = 0,0333$$

$$R_2 = Z_2 \cdot \cos j_2 \cdot g = 0,02829 \Omega$$

$$X_2 = Z_2 \cdot \sin j_2 = 0,1846 \Omega$$

B.2.5 Calculer pour le point nominal, la puissance transmise au rotor et les pertes joule rotor :

$$P_{tr} = 3 I (R_2 / g) (d2 \varphi)^2 \quad P_{tr} = 4,9 \cdot 10^5 = 490 \text{ kW}$$

$$P_{jr} = 3 R_2 (d2 \varphi)^2 \quad P_{jr} = 16 \text{ 335 W}$$

B.2.6 Ecrire la relation liant le couple électromagnétique T_{em} au glissement g :

$$T_{em}(gx) = \frac{3V^2}{\Omega s} \frac{\frac{R_2}{gx}}{\left(\frac{R_2}{gx}\right)^2 + X_2^2} = \frac{3V^2}{\Omega s} \frac{1}{\frac{R_2}{g} + \frac{g}{R_2} X_2^2}$$

B.2.7 Montrer que le couple maximum $T_{em \max}$ est obtenu lorsque $R_2/g = X_2$:

$$T_{em}(gx) = \frac{3V^2}{\Omega s} \frac{1}{\frac{R_2}{g} + \frac{g}{R_2} X_2^2} \quad T_{em} \text{ est maximum si } \frac{R_2}{g} + \frac{g}{R_2} X_2^2 \text{ est minimal}$$

$$d \left(\frac{R_2}{g} + \frac{g}{R_2} X_2^2 \right) / dg = -\frac{R_2}{g^2 \max} + \frac{X_2^2}{R_2} = 0$$

$$\frac{R_2}{g^2 \max} = \frac{X_2^2}{R_2}$$

$$\frac{R_2^2}{g^2} = X_2^2$$

$\text{La dérivée est nulle lorsque : } \frac{R_2}{g} = X_2$
--

B.2.8 Calculer la vitesse de rotation en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour le couple maximum :

$$g_{\max} = \frac{R_2}{X_2} = 0,153$$

$$W_{g_{\max}} = W_s (1 - g_{\max})$$

$$\Omega_{g_{\max}} = 1270 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$$

B.3 étude du moteur asynchrone piloté par un variateur U/f

Caractéristiques moto-variateur.

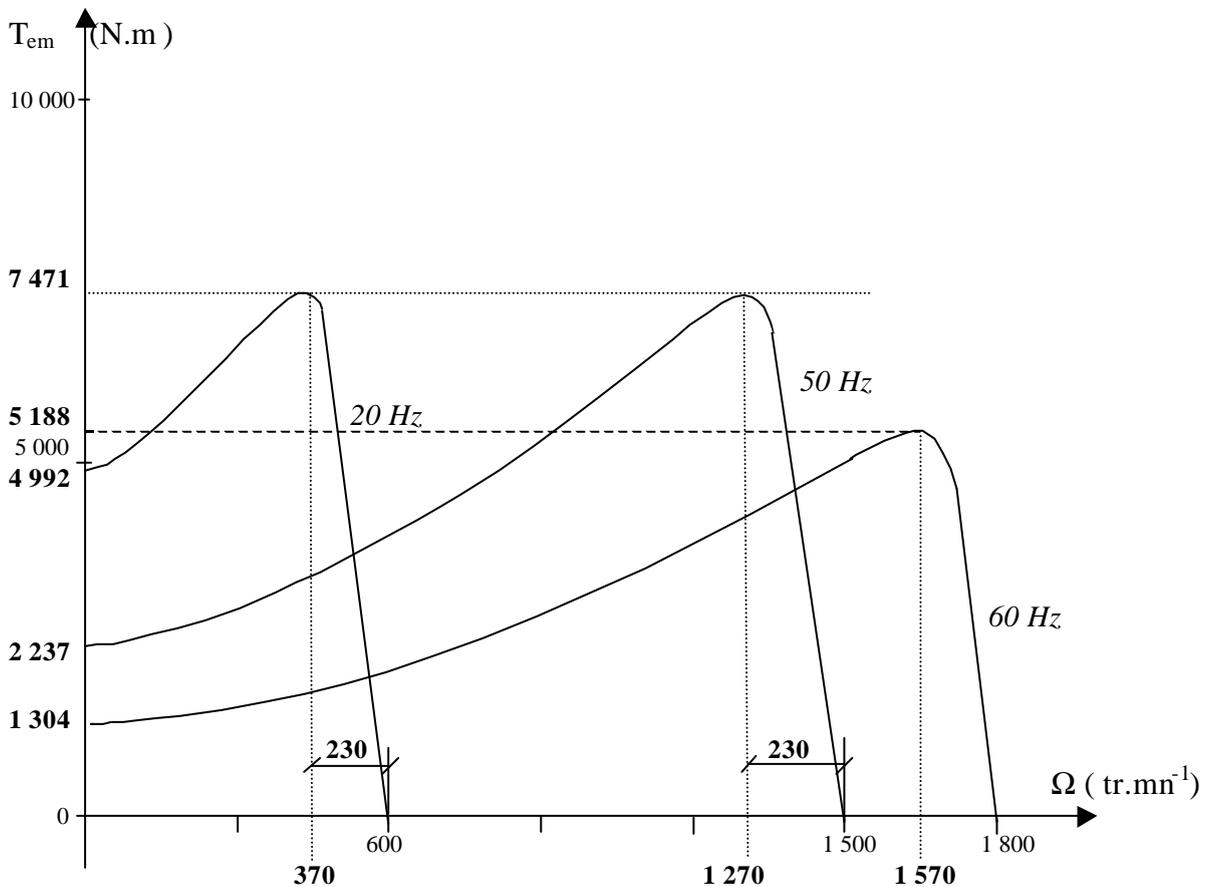
B.3.1 Montrer que $T_{em \max}$ reste constant si le rapport U/f le reste aussi :

$$T_{em \max} = \frac{3V^2}{\Omega_s} \frac{1}{2X_2} \quad w_s = \frac{w}{P} = \frac{2pf}{P}$$

$$T_{em \max} = \frac{3P}{2p} \frac{V^2}{f} \frac{1}{2X_2} = \frac{3P}{2p} \frac{V^2}{f} \frac{1}{2L_2 w}$$

$$T_{em \max} = \frac{3P}{8p} \frac{V^2}{f^2} \frac{1}{L^2} = k. \frac{V^2}{f^2} = cste \quad \text{si } V/f = cste$$

B.3.2 En tenant compte des limites précédentes, représenter l'allure des courbes $T_{em}(\Omega)$ pour $f = 20, 50$ et 60 Hz.



B.3.3 Calculer pour chaque valeur de f, les valeurs de $T_{em,max}$ et la vitesse de rotation n max en tr/min correspondante :

F	V	$T_{em,max}$	n
20	152	7 471	370
50	380	7 471	1 270
60	380	5 188	1 570

B.3.4 Pour des vitesses proches de la vitesse de synchronisme, rechercher une relation linéaire entre T_{em} et Ω :

$$T_{em} = \frac{3V^2}{\Omega_s} \frac{1}{\frac{R_2}{g} + \frac{g}{R_2} X_2^2} \text{ avec } \Omega \approx \Omega_s \text{ et } \frac{R_2}{g} \gg X_2^2$$

$$T_{em} = \frac{3V^2}{\Omega_s} \frac{g}{R_2} = \frac{3V^2}{R_2 \cdot \Omega_s^2} \cdot (\Omega_s - \Omega)$$

Equation linéaire, pour V et Ω_s données, cette fonction ne dépend que de Ω .

B.3.5 Montrer que la pente de cette droite reste constante si le rapport U/f le reste aussi :

$$T_{em} = \frac{3V^2}{R_2 \cdot \Omega_s^2} \cdot (\omega_s - \omega) = \frac{3}{R_2} \cdot \frac{V^2}{\Omega_s^2} \cdot (\omega_s - \omega)$$

$$\text{De pente} = \frac{3}{R_2} \left(\frac{V}{\Omega_s} \right)^2 = \frac{3p^2}{R_2 \cdot 4p^2} \cdot \left(\frac{V}{f} \right)^2$$

Si $\frac{V}{f} = \text{cste}$, la pente est constante.

B.3.6 En considérant que le couple de pertes de la machine asynchrone est constant et vaut $T_p = 60 \text{ Nm}$ et que le couple résistant a pour équation $T_r = 0,137 \Omega^2$, calculer le point de fonctionnement (T_r, Ω) pour $f = 40 \text{ Hz}$:
(on utilisera la formule simplifiée de $T_{em}(\Omega)$)

$$T_{em} = T_p + T_r \text{ P } \frac{3p^2}{R_2 \cdot 4p^2} \cdot \left(\frac{V}{f} \right)^2 \cdot (\omega_s - \omega) = T_p + 0,137 \omega^2$$

$$\text{On pose : } \frac{3p^2}{R_2 \cdot 4p^2} \cdot \left(\frac{V}{f} \right)^2 = k$$

$$0,137 \omega^2 + k \omega - k \omega_s + T_p = 0$$

résolution d'une équation de 2^{ème} degré :

2 solutions

$$\omega_1 = 122,3 \text{ rd.s}^{-1}$$

$$\omega_2 = -4\,652 \text{ rd.s}^{-1}$$

$$\omega > 0 \text{ P } \omega = \omega_1$$

$$(\omega = 1167,5 \text{ tr.mn}^{-1})$$

$$T_{em} = T_p + 0,137 \Omega^2 = 60 + 0,137 (122,3)^2 = 2\,108 \text{ Nm}$$

CORRIGE

PARTIE C

LES TRANSFORMATEURS

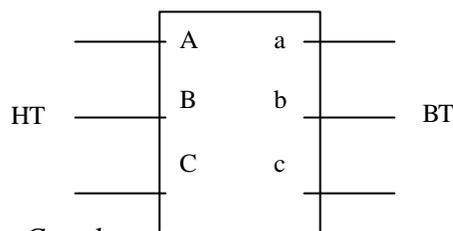
L'installation comporte plusieurs transformateurs triphasés de type *sec*, à *colonne*. On s'intéresse dans cette partie à l'étude d'un des transformateurs alimentant les motoventilateurs.

Transformateur de ventilation TRV1 :

C'est un transformateur triphasé Dyn11, alimenté au primaire sous 20 kV, 50Hz.

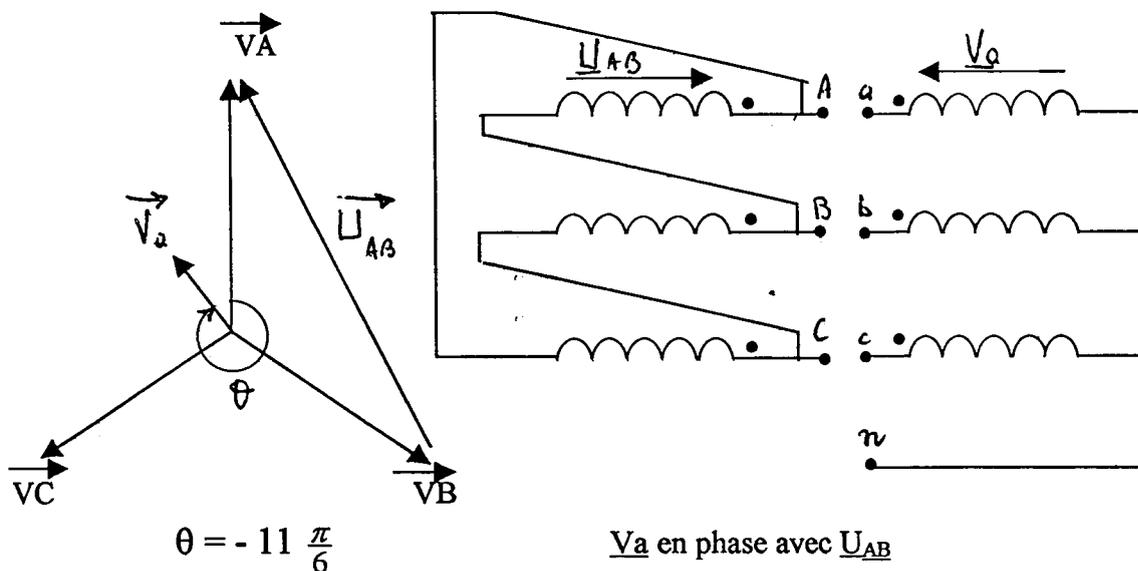
Le secondaire est relié, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un variateur, à trois moteurs asynchrones identiques de puissance utile 470 kW chacun, de rendement 0,924 et de facteur de puissance 0,97.

On adoptera la notation suivante :



C.1 Couplage :

Donner le diagramme vectoriel des tensions primaires et secondaires, et le schéma de branchement des enroulements correspondant au couplage Dyn11.



Essai à vide d'un transformateur TRV1

Pour réaliser l'essai à vide, ne disposant pas d'une alimentation de 20kV, on alimente le transformateur TRV1 du côté du secondaire sous 660 V entre phases.

On relève une tension entre phases côté sortie de 19 130 V, et une puissance de 2 840W (pour l'ensemble du transformateur).

Déduire de ces mesures :

C.2 Le rapport de transformation m_c pour une colonne :

$$m_c = V_{20} / U_{10} = \frac{660/\sqrt{3}}{19130}$$

$$m_c = 19,92 \cdot 10^{-3}$$

C.3 Le nombre de spires d'un enroulement primaire sachant qu'un enroulement secondaire comporte 23 spires :

$$m_c = N_2 / N_1 \quad N_1 = N_2 / m_c = 23 / 19,92 \cdot 10^{-3} \quad N_1 = 1155 \text{ spires}$$

C.4 Les pertes fer globales dans le transformateur lors de cet essai (le courant secondaire de l'essai à vide est faible)

Le flux est le même qu'il soit créé par l'enroulement primaire ou secondaire pour la tension à vide :

$$P_{fer} = P_{20} = 2840 \text{ W}$$

C.5 Quelles pertes fer aurait-on trouvées en alimentant le transformateur sous 20 kV au primaire ?

$$P_{fer} = 2840 \cdot 20\,000^2 / 19\,130^2 = 3104 \text{ W}$$

Fonctionnement en sinusoïdal :

Maintenant, le transformateur est branché normalement, primaire sous 20 kV, et alimente directement (variateur by-passé) les trois moteurs asynchrones fonctionnant à charge nominale.

- C.6 Calculer la chute de tension entre phases. Exprimer cette valeur en pourcentage de la tension secondaire à vide.

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 \text{ avec } U_{20} = \sqrt{3} \cdot 19,92 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 690 \text{ V}$$

$$U_2 = 660 \text{ V}$$

$$\Delta U_2 / U_{20} \text{ (en \%)} = (30 / 690) \cdot 100 = \mathbf{4,34 \%}$$

- C.7 Déterminer le rendement du transformateur, sachant que les résistances apparentes du primaire et du secondaire, mesurées entre phases, sont respectivement $R_{1a}=3,65 \Omega$ et $R_{2a}=1 \text{ m}\Omega$.

$$P_{um} = 3 \times 470 \text{ kW} = 1\,410 \text{ kW}$$

$$P_{am} = P_u / \mathbf{h} = 1\,410 / 0,924 = 1\,526 \text{ kW}$$

$$I_2 = P_{am} / \sqrt{3} \cdot U_2 \cos \mathbf{j} = 1\,376,2 \text{ A}$$

$$P_2 = P_{am} = 1\,526 \text{ kW}$$

$$P_{fer} = 3\,104 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} m_c = J_1 / I_2 \quad J_1 = m_c \cdot I_2 &= 1,99 \cdot 10^{-2} \cdot 1\,376,2 \\ J_1 &= 27,4 \text{ A} \\ I_1 = J_1 \cdot \sqrt{3} &= 27,4 \cdot \sqrt{3} = 47,4 \text{ A} \end{aligned}$$

$$P_j = \frac{3}{2} R_{1a} \cdot I_1^2 + \frac{3}{2} R_{2a} \cdot I_2^2 = 15\,142,7 \text{ W}$$

$$\mathbf{\eta} = P_2 / (P_2 + P_{fer} + P_j)$$

$$\mathbf{\eta} = \mathbf{98,8 \%}$$

Fonctionnement en non sinusoïdal.

On met en service le convertisseur commandant les moteurs asynchrones.

Le courant circulant alors dans une phase secondaire $i_a(\omega t)$ est représenté page suivante (12)

C.8 Représenter sur le document (page 12) les courants $j_{AB}(\omega t)$, $j_{CA}(\omega t)$, et $i_A(\omega t)$.

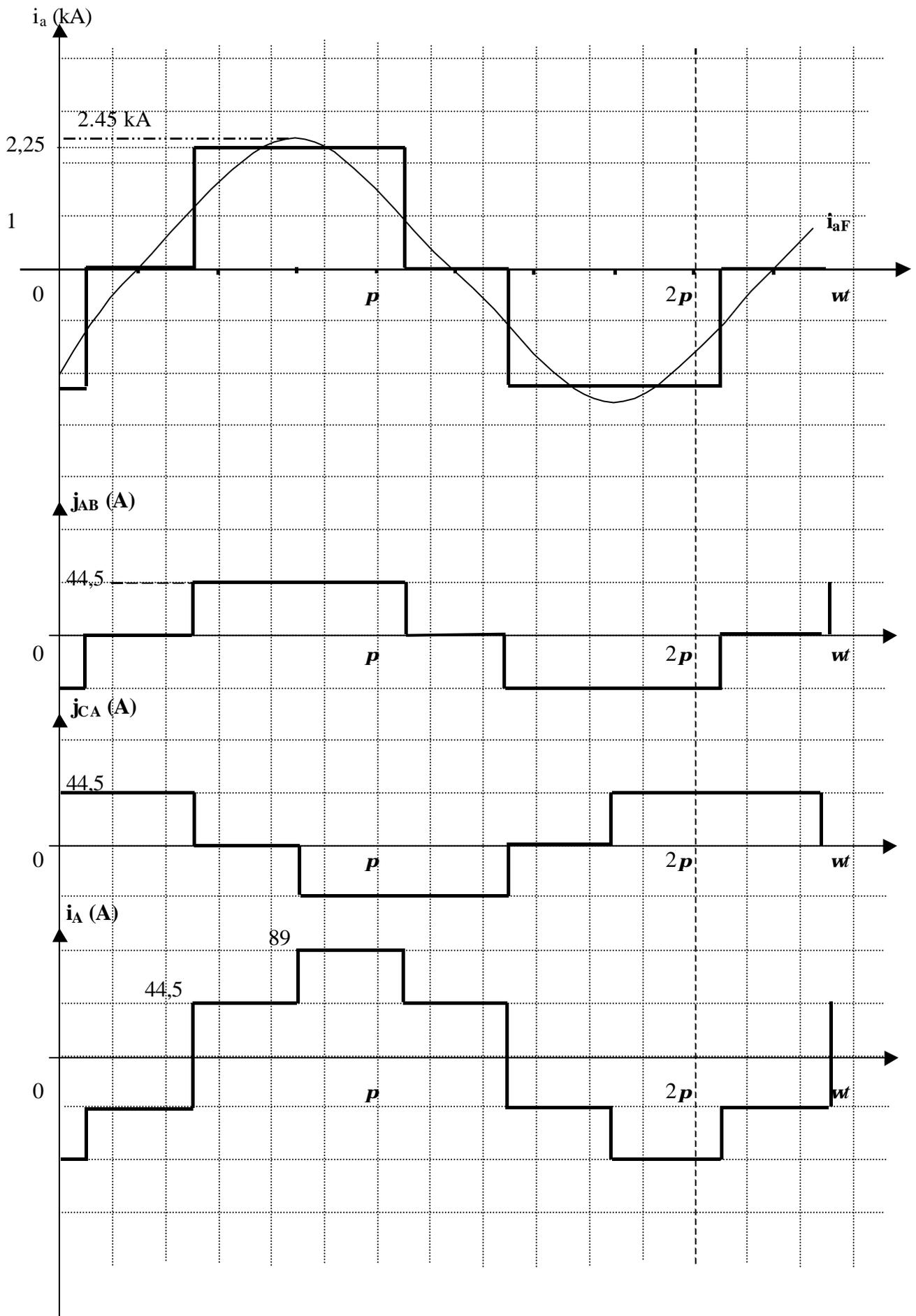
C.9 Déterminer les intensités efficaces I_a de $i_a(\omega t)$, $J_{AB}(\omega t)$, et $I_A(\omega t)$.

$$I_{a\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_a^2(\omega t) dt$$

$$I_{a\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 2,25^2 \cdot 2} = 1,837 \text{ kA}$$

$$J_{AB\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 2 \cdot 44,8^2} = 36,58 \text{ A} \quad (\text{ou } J_{AB\text{eff}} = m_c \cdot I_{a\text{eff}})$$

$$I_{A\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 2 \cdot 44,8^2 + \frac{1}{3} (2 \cdot 44,8)^2} = 44,8 \cdot \sqrt{2} = 63,36 \text{ A} \quad (\text{ou } I_A = J_{AB} \cdot \sqrt{3})$$

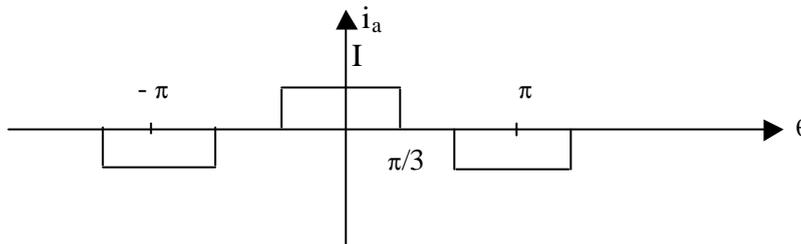


C.10 Représenter sur le même document (page 12) l'allure du fondamental $i_{aF}(\omega t)$ de $i_a(\omega t)$.

Quel est le déphasage φ_F de ce fondamental par rapport à la tension $v_{an}(\omega t) = V_{an} \sqrt{2} \sin(\omega t)$?

$$\varphi_F = \frac{p}{4}$$

C.11 Calculer l'intensité efficace I_{aF} de $i_{aF}(\omega t)$.



$$\hat{I}_{aF} = \frac{2}{2p} \int_{-p}^{+p} i_a \cos q \, dq = 2 \frac{2}{2p} \int_0^p i_a \cos q \, dq = 2 \cdot 2 \cdot \frac{2}{2p} \int_0^{p/2} i_a \cos q \, dq$$

$$\hat{I}_{aF} = \frac{4I}{p} [\sin q]_0^{p/3} = \frac{4\sqrt{3}}{2p} I$$

$$I_{aF} = \hat{I}_{aF} / \sqrt{2}$$

$$I_{aF} = 1,75 \text{ kA}$$

C.12. Calculer la puissance fournie par le transformateur dans ce mode de fonctionnement.

Seul, le fondamental du courant transporte la puissance quand la tension est sinusoïdale.

$$P = \sqrt{3} U_2 I_{aF} \cos \varphi_F$$

$$P = 1,41 \text{ MW}$$

$$I_{c32} = 1874 \text{ A}$$

D.2 Calculs des courants de court circuit dans le cas où l'alimentation est assurée par les deux transformateurs 250kVA.

Hypothèses de calcul : On prendra pour la suite des calculs $I_{c31} = 18 \text{ kA}$

D.2.1 Calculer la valeur du courant de court circuit triphasé " I_{c33} " au niveau de l'alimentation du primaire du transformateur "TE1" de 48kVA 400V/5500V.

Au niveau de "JDB" : TR1/TR2" (§D.1.2)	R = 4,99 mΩ	X = 13,43 mΩ
JDB N/S repéré C3 :	R = 1,13 mΩ	X = 0,9 mΩ
Disjoncteur D4 :	R = 0 mΩ	X = 0,15 mΩ
JDB NS5 repéré C4 :	R = 0,19 mΩ	X = 0,15 mΩ
Disjoncteur D5 :	R = 0 mΩ	X = 0,15 mΩ
Câble C5 :	R = 13,5 mΩ	X = 1,2 mΩ

$$R_{\text{total}} = \Sigma R = 19,81 \text{ m}\Omega \quad X_{\text{total}} = \Sigma X = 15,98 \text{ m}\Omega \quad Z_{\text{total}} = 25,45 \text{ m}\Omega$$

$$I_{c33} = 9301 \text{ A}$$

Pour continuer l'étude du circuit d'alimentation de l'éclairage, nous allons traverser un transformateur élévateur de tension "TE1" 400V/5,5kV de 48kVA. On suppose le transformateur comme parfait.

D.2.2 Justifier le choix technologique d'un tel transformateur.

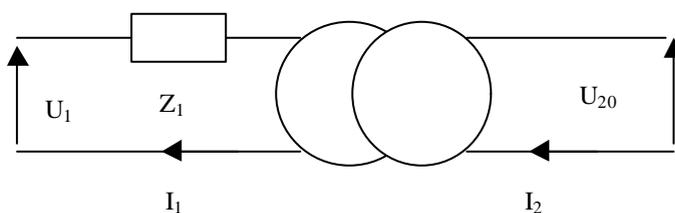
Le fait d'utiliser un transformateur élévateur de tension permet de diminuer les chutes de tension en ligne ($C6 = 1800\text{m}$)
Les caractéristiques des transformateurs HT-EP tiennent compte des conditions particulières de fonctionnement des lampes à décharge.

-Lors de la mise sous tension, les condensateurs de compensation provoquent un phénomène semblable à un court-circuit, tant qu'ils ne sont pas chargés.

-Lors de la mise sous tension, les lampes à décharges provoquent un appel de courant important. (1,5 à 1,8 x I_n pendant 3 à 6 minutes).

-Le courant n'est plus sinusoïdal, donc très chargé en harmoniques, d'où une augmentation non négligeable de la valeur efficace du courant déterminé d'après la puissance des lampes.

D.2.3 Démontrer comment l'impédance coté primaire peut être ramenée au secondaire.



Si le transformateur est considéré comme parfait :

$$U_1 \cdot I_1 = U_{20} \cdot I_2$$

$$U_1^2 / Z_1 = U_{20}^2 / Z_2$$

$$Z_2 = (U_{20} / U_1)^2 \cdot Z_1$$

D.3 Evaluation des chutes de tension en ligne.

Hypothèses de calcul :

Nous nous situons proche du régime nominal de l'installation. Nous partons sur les hypothèses suivantes :

- On néglige l'impédance du jeu de barre "TR1/TR2" repéré C2.

- Pour les câbles C1 et C1', $I_n = 300\text{A}$ et facteur de puissance = 0,86

- Pour le jeu de barre "N/S" repéré C3, In = 400 A et facteur de puissance = 0,86
 - Pour le câble C4, In = 250A et facteur de puissance = 0,86
 - Pour le câble C5, In = 60A et facteur de puissance = 0,93
- L'impédance des disjoncteurs sera négligée.

D.3.1 Calculer la valeur de la chute de tension en volt et en % entre le secondaire des transformateurs d'alimentations TR1 et TR2 et le primaire du transformateur d'éclairage TE1.

Repère	Ib A	Cosj	R mW	X mW	DU
C1	300	0,86	0,97	0,64	0,603
C3	400	0,86	1,13	0,9	0,991
C4	250	0,86	0,19	0,15	0,103
C5	60	0,92	13,5	1,2	1,35

$\Delta U \text{ total} = 3,05\text{V}$ $\Delta U \text{ total}\% = \Delta U \text{ total} * 100/400 = \mathbf{0,76\%}$

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_b * (R * \cos j + X * \sin j)$$

DU = 3,05V soit 0,76%

D.4 Vérification de la tenue des conducteurs aux contraintes thermiques correspondant à Ic1.

On va chercher à vérifier la tenue en température du câble C1 au secondaire du transformateur TR1 si un court-circuit à lieu au niveau du jeu de barres "TR1/TR2" repéré C2.

Hypothèses de calcul :

Si le courant de court-circuit est rapidement coupé (de quelques dixièmes de secondes à 5 secondes maximum), l'échauffement est dit adiabatique. Pour un temps inférieur à 5 secondes, la contrainte thermique dans le câble se calcule avec la formule suivante :

$$I^2 \cdot t = K^2 \cdot S^2 \quad \text{avec } S \text{ en mm}^2, I \text{ en A et } t \text{ en sec.}$$

- Utiliser pour la valeur de la résistivité du cuivre dans cette partie C4 la valeur obtenue par calcul pour les températures données dans l'application.
- Température maximale du câble en court-circuit = 240°C

D.4.1 Calculer la valeur de la résistivité du cuivre pour une température de début du court-circuit de 70°C.

$$r_{70} = r_0 (1 + \alpha t) = 1,72 * 10^{-8} * (1 + 3,93 * 10^{-3} * 70) = 2,19 * 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$r_{70} = \mathbf{2,19 \times 10^{-8} \text{ W.m}}$$

D.4.2 Expliquer ce que veut dire "Echauffement adiabatique".

Une transformation de température est dite adiabatique si elle est effectuée sans échange avec l'extérieur. Dans notre cas, on admet que si le temps de passage du courant est inférieur à 5 secondes, la chaleur produite reste au niveau du métal de l'âme, et n'a pas le temps de se dissiper dans les autres éléments du câble.

D.4.3 A partir de l'équation thermique, déterminer la valeur du coefficient K nécessaire pour le calcul des contraintes thermiques.

(Rappel : $Q = m \cdot C_m \cdot \Delta\theta$ avec : Q en joules , m en kg , C_m en $J/kg.^{\circ}C$)

$$W = R \cdot I^2 \cdot t = (\rho \cdot l / S) \cdot I^2 \cdot t = m \cdot c_m \cdot \Delta\theta = (V \cdot M_v) \cdot C_m \cdot \Delta\theta$$

$$\text{Volume } V = S \cdot l$$

$$\text{Donc } I^2 \cdot t = (S \cdot l \cdot M_v \cdot C_m \cdot \Delta\theta) / (\rho \cdot l / S) = (S^2 \cdot M_v \cdot C_m \cdot \Delta\theta) / \rho = K^2 \cdot S^2$$

$$\text{Avec } K^2 = M_v \cdot C_m \cdot (\Delta\theta) / \rho$$

Application numérique .

$$K^2 = 8900 \cdot 380 \cdot (240 - 70) / 2.19 \cdot 10^{-8} = 2,625 \cdot 10^{16}$$

$$K = 1,62 \cdot 10^8$$

Si la section est donnée en mm^2 , alors $K = 162$

$$K = 162$$

D.4.4 Dans l'hypothèse de l'échauffement adiabatique, calculer le temps maximum de maintien du court-circuit, et en déduire si cette valeur est compatible avec le temps de fonctionnement du disjoncteur.

$$t = K^2 \cdot S^2 / I^2 = 162^2 \cdot 185^2 / 18000^2 = 2,77 \text{ s}$$

Déclencheur STR53UE, $I_{rm}=3400A$ temporisé à 300ms (schéma p9)

Le déclenchement instantané du magnétique, malgré la temporisation (300 ms), va agir bien avant le temps calculé ci-dessus. On peut en déduire que le câble est largement dimensionné par rapport au courant de court-circuit et il ne subira pas de dommages.

Temps compatible avec la protection utilisée.

$$t = 2,77 \text{ s}$$

D.5 Contrôle de la qualité de la protection des personnes contre les contacts indirects.

Hypothèses de calcul :

On prendra la méthode des impédances préconisée par la norme NFC 15-105 qui prend en compte les impédances du réseau amont vues du secondaire, ainsi que toutes les impédances de la boucle de défaut. On négligera l'impédance des disjoncteurs, du jeu de barre "TR1/TR2" repéré C2, ainsi que celle du défaut (défaut franc). Le local est considéré comme un local sec.

D.5.1 Identifier le schéma de liaisons à la terre qui a été adopté pour l'installation située entre le transformateur TR1/TR2 et le transformateur élévateur du circuit d'éclairage TE1. Rappeler la signification des lettres que vous allez utiliser pour donner votre réponse.

Schéma page 9

Le schéma de liaison à la terre retenu pour cette question est un schéma TN

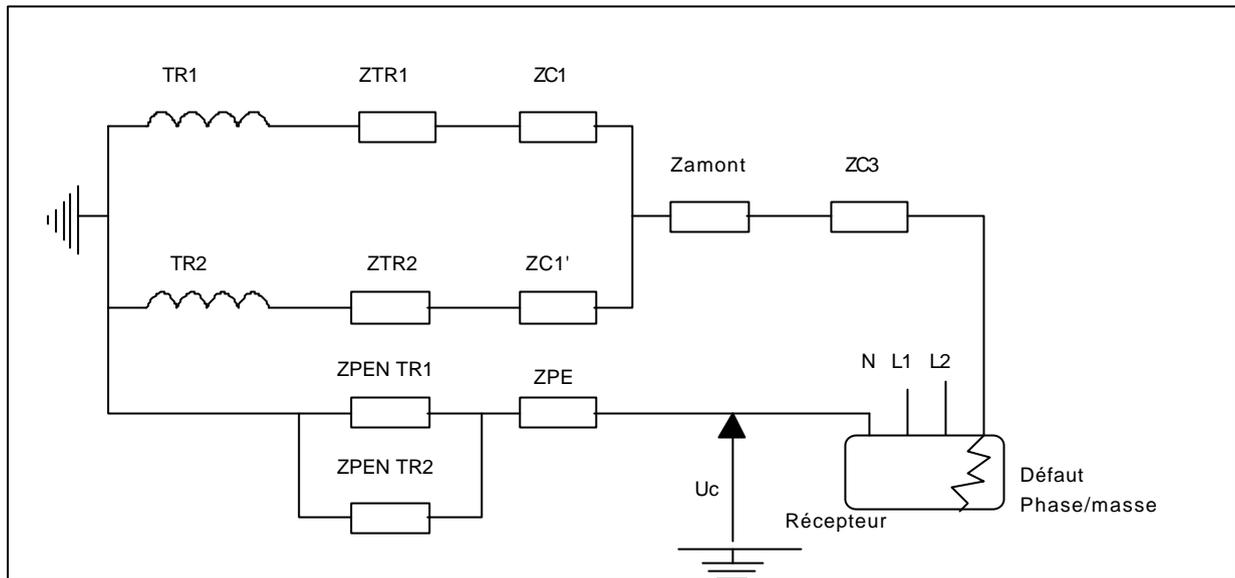
- Il est TN-C en amont des interrupteurs sectionneurs situés au dessous du jeu barre Normal/Secours.
- Il est TN-S en aval des interrupteurs sectionneurs.

T : neutre de la source relié à la terre. N : Masses des récepteurs mis au neutre.

C : Neutre et conducteur de protection confondus en un conducteur commun PEN.

S : Neutre et conducteur de protection séparés.

D.5.2 A partir de schéma simplifié donné en annexe 2, tracer le schéma équivalent de la maille permettant de mettre en évidence la circulation du courant de défaut, la tension de contact, les impédances dans le cas où un défaut interviendrait au niveau du jeu de barres JDB N/S, au dessus de D4.



D.5.3 Calculer la valeur du courant de défaut "Id" ainsi que la valeur de la tension de contact "Uc". En déduire si la protection des personnes est bien assurée dans cette partie du circuit.

Transformateur TR1/TR2 :	R = 8,93 mΩ	X = 25,37 mΩ
Câble C1/C1' :	R = 0,97 mΩ	X = 0,64 mΩ
Impédance amont :	R = 0,04 mΩ	X = 0,35 mΩ
Câble C3 :	R = 1,13 mΩ	X = 0,9 mΩ
Conducteur de protection :	R = 0,75 mΩ	X = 0,3 mΩ
Conducteur PEN :	R = 1,22 mΩ	X = 0,8 mΩ
Résistance de la boucle de défaut :	R = 7,48 mΩ	X = 14,96 mΩ

$$I_{\text{défaut}} = V_{20} / Z_{\text{boucle}} = 14\,170\text{A}$$

$$U_{\text{contact}} = Z_{(pe+pen)} \cdot I_d = 22\text{V}$$

Cette tension est inférieure à la tension de sécurité, donc non dangereuse. Cependant, elle sera coupée par le disjoncteur magnétothermique D1 ($I_{\text{rm}} = 3400\text{A}$) en un temps inférieur à 300ms.

$$I_d = \mathbf{14\,170\text{A}} \quad U_c = \mathbf{22\text{V}}$$

D.6 Compensation de l'énergie réactive au niveau des circuits d'éclairage.

Le circuit d'éclairage au secondaire du transformateur TE2 est constitué par des lampes à décharge sodium basse pression. Le circuit raccordé au secondaire du transformateur est composé de 15 luminaires SOX135 et de 15 luminaires SOX35 répartis sur les 3 phases.

La compensation de l'énergie réactive est directement réalisée au secondaire du transformateur TE2 par une batterie de condensateur triphasée.

D.6.1 Justifier la nécessité de relever la valeur du facteur de puissance d'une installation industrielle. Indiquer précisément dans le cas où cette compensation est réalisée à l'origine de chaque circuit, sur quels éléments de l'installation va intervenir cette amélioration, du point de vue technique et économique.

- Diminution de la facture du fournisseur d'énergie.
En tarif vert, EDF fournit gratuitement l'énergie réactive jusqu'à concurrence de 40% de l'énergie active ($T_g \varphi = 0,4$). Au delà de cette valeur, cette énergie est facturée.
- Diminution de l'intensité en ligne pour la partie se trouvant en amont de la compensation, pour une même puissance apparente. Ceci intervient sur :
 - Diminution des sections des câbles d'alimentation.
 - Diminution des pertes en ligne.
 - Réduction des chutes de tension en lignes.
 - Une augmentation de la puissance disponible.

D.6.2 On désire améliorer le facteur de puissance du circuit d'éclairage. Calculer la batterie de condensateur à utiliser pour obtenir une $T_g \varphi = 0,4$. Donner les caractéristiques d'un condensateur (capacité et tension) dans les deux cas suivants :

- Couplage des 3 condensateurs en étoile .
- Couplage des 3 condensateurs en triangle.

Puissance totale active du circuit d'éclairage :

$$P_t = 3060 \text{ W}$$

Puissance totale réactive du circuit :

$$Q_t = 3690 \text{ var}$$

Tangente

$$T_g \varphi = 1,21$$

Batterie de condensateur :

$$Q_c = P_t \times (T_g \varphi - 0,4) = 2466 \text{ var}$$

$$Q_c = 2466 \text{ var}$$

En étoile :

$$\text{Tension supportée par les condensateurs : } U_{\max} = \sqrt{2} \times V = 335 \text{ V}$$

$$\text{Chaque condensateur doit fournir } 1/3 Q_c \text{ soit } 822 \text{ var}$$

$$C = \frac{Q}{V^2 \cdot \omega} = \frac{822}{230^2 \cdot 100 \cdot \pi} = 50 \text{ nF}$$

$$C_Y = 50 \text{ mF}$$

$$U = 335 \text{ V}$$

En triangle :

$$\text{Tension supportée par les condensateurs : } U_{\max} = 566 \text{ V}$$

$$C = \frac{822}{400^2 \cdot 100 \cdot \pi} = 16 \text{ nF}$$

$$C_D = 16 \text{ mF}$$

$$U = 566 \text{ V}$$