

SESSION 2011

CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

ÉCRIT 1
ÉPREUVE DE SYNTHÈSE

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Le sujet comporte trois dossiers :

- **Mise en situation :**
 - ✓ Présentation générale (6 pages)
 - ✓ Présentation du questionnaire (1 page)

- **Travail demandé :**
 - ✓ Partie A : Etude mécanique du mouvement de levage (1/5 à 5/5)
 - ✓ Partie B : Etude de l'évolution technologique (1/10 à 10/10)
 - ✓ Partie C : Etude du moteur de levage (1/5 à 5/5)
 - ✓ Partie D : Etude du transformateur triphasé (1/5 à 5/5)
 - ✓ Partie E : Etude du poste de livraison (1/3 à 3/3)

- **Ressources :**
 - ✓ Documents techniques (1/9 à 9/9)

Conseils aux candidats :

Les différentes parties du sujet sont indépendantes. De nombreuses questions sont elles mêmes indépendantes. Une lecture attentive de l'ensemble s'avère nécessaire avant de composer.

Les candidats sont priés de rédiger sur le document fourni et il est demandé de présenter clairement les calculs, de dégager et d'encadrer les résultats relatifs à chaque question.

La qualité des réponses (utilisation d'une forme adaptée pour présenter le résultat, justification du résultat), sera prise en compte dans l'évaluation.

SESSION 2011

CAPLP CONCOURS EXTERNE ET CAFEP

Section : **GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Option : **ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE**

MISE EN SITUATION

PORT MARITIME DE LA ROCHELLE

1°) PRESENTATION GENERALE.

Le site de « Chef de baie » du grand port maritime de La Rochelle est équipé actuellement de quatre grues de manutention qui assurent, en fonction de leurs caractéristiques propres, le chargement et le déchargement des différents navires faisant escale au port.

- On trouve notamment :
 - Deux grues sur rail " REGGIANNE " (CB10 et CB11) / conception des années 2000 / capacité maximale 40 T à 40 m.
 - Deux grues sur rail " CAILLARD " (CB1 et CB2) / conception des années 1980 / capacité maximale 33,5 T à 20 m.
- Les grues portuaires "CAILLARD" peuvent effectuer quatre mouvements, mais toujours un seul à la fois :
 - Translation. Déplacement parallèle au quai de chargement-déchargement.
 - Rotation de la tourelle. Chargement et déchargement du bateau.
 - Levage de la charge. Mouvement de translation verticale.
 - Relevage de la flèche. Réglage de la distance de manutention.

Les mouvements de levage et de relevage de la flèche des grues CAILLARD mettent en œuvre des moteurs asynchrones triphasés à rotor bobinés, pilotés par l'intermédiaire de démarreurs / variateurs de vitesse de type « **STATOVAR** » à un procédé de démarrage dit « à crans rotoriques ».

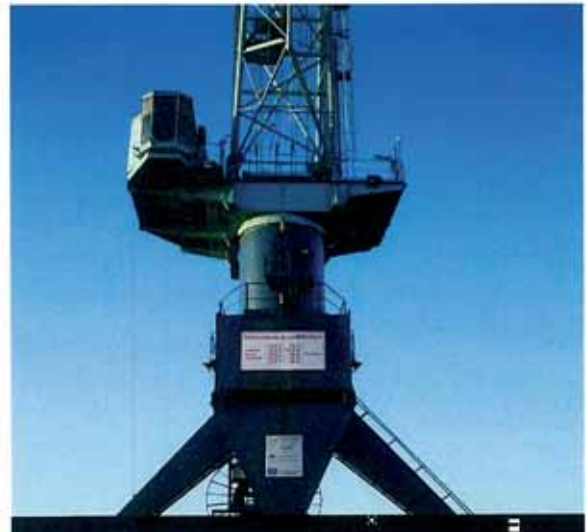
Les pièces détachées devenant difficiles à approvisionner sur le marché et leur délai de livraison devenant de plus en plus important, il a été décidé de procéder au remplacement des variateurs.

L'évolution envisagée devra permettre une remise en service rapide des grues en cas de défaillance.

Nous nous intéresserons aux modifications réalisées actuellement sur la grue CB2 et plus particulièrement au mouvement de levage.



Vue d'ensemble de la grue CB2.



Vue de face de la grue CB2.

2°) DESCRIPTION DES SOLUTIONS CONSTRUCTIVES

MOUVEMENT DE LEVAGE

Le mouvement de levage est assuré par l'enroulement d'un câble sur un tambour à gorges.



Tambours à gorges.

Le tambour de levage est entraîné en rotation par un moteur électrique à rotor bobiné, d'une puissance de 250 kW / 1492 tr.min⁻¹ sous 400 V, via un réducteur à 3 vitesses.



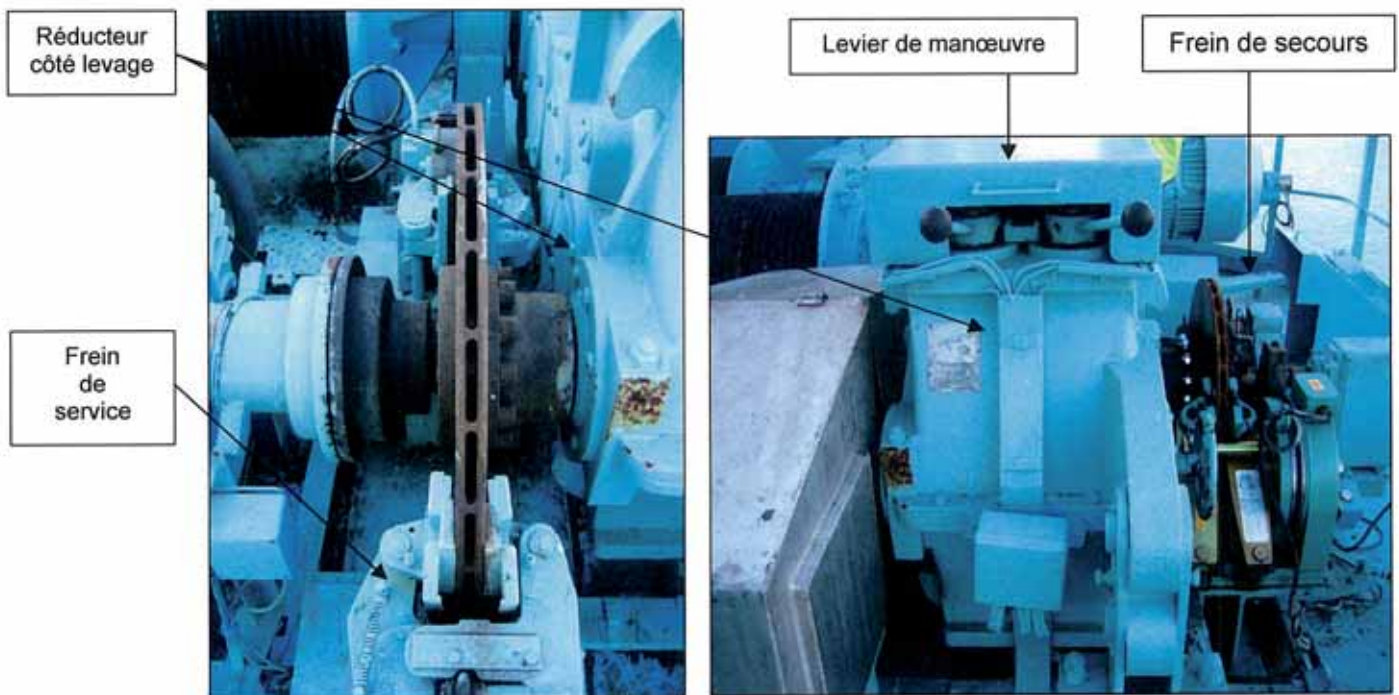
Moteur de levage et frein service.

Le changement de gamme de vitesse s'effectue manuellement via un levier de manœuvre qui modifie le rapport de réduction. Cette sélection est effectuée par le grutier, grue à l'arrêt et avant toute manipulation. Le choix de la gamme de vitesse dépend du poids de la charge à lever et de la portée.



Levier de manœuvre pour le changement de vitesse.

Un frein de service, pris sur l'arbre moteur, garantit le maintien de la charge en cas d'arrêt volontaire du mouvement de levage. En cas de défaillance de l'entraînement, un frein de secours, pris sur un axe intermédiaire du réducteur, est alors associé au frein de service.



Frein de service.

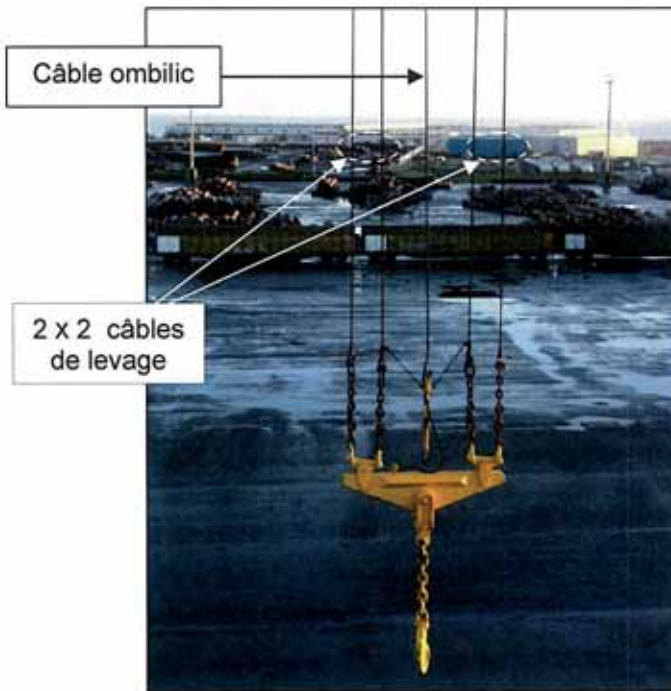
Réducteur et frein de secours.

La commande de mouvement est effectuée par le grutier depuis la cabine de conduite, à l'aide d'un manipulateur équipé d'un potentiomètre pour la consigne de vitesse et de contacts pour la détection du sens de marche. Le pilotage du moteur est assuré par un variateur de vitesse analogique de type « STATOVAR ». Celui-ci assure la régulation côté STATOR via un pont thyristor réversible triphasé et côté ROTOR par le court-circuitage de trois jeux de résistances.

En cas de défaillance, du sélecteur principal, un sélecteur de secours garantit le respect des limites de sécurité du mouvement.

En cas de défaillance du moteur de levage, on procède à son remplacement par un moteur de puissance égale à 150 kW, apte à assurer le fonctionnement en marche dégradée (vitesse moyenne du réducteur).

Un enrouleur de câble d'alimentation d'outil (câble ombilic) est asservi au mouvement de levage.



Crochet de levage.



Enrouleur du câble ombilic

MOUVEMENT DE RELEVAGE DE LA FLECHE



Tambours à gorges.

Le mouvement de relevage est assuré par l'enroulement d'un câble sur un tambour à gorges. Le tambour est entraîné en rotation par un moteur électrique à rotor bobiné, d'une puissance de 122 kW / 1478 tr.min⁻¹ sous 400 V, via un réducteur mécanique.

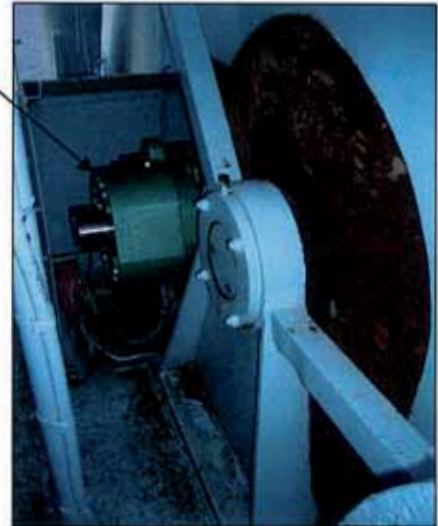
Un frein de service pris sur l'arbre moteur et un frein de secours hydraulique, positionné sur une des flasques du tambour garantissent le maintien en position de la flèche en cas d'arrêt volontaire du mouvement de relevage (frein de service), ou en cas de défaillance de l'entraînement (frein de service et frein de secours).

Frein de service

Frein de secours hydraulique



Moteur de relevage et frein service.



Frein hydraulique

Le pilotage du moteur de relevage est assuré par un variateur de vitesse analogique de type « STATOVAR ». En cas de défaillance du moteur de relevage, on procède à son remplacement par un moteur de puissance 94 kW, apte à assurer le fonctionnement en marche dégradée (vitesse moyenne sur le réducteur). La commande du mouvement de relevage est strictement identique à celle de levage.

Au mouvement de relevage est associé le déplacement des axes des réas de mouflage. Ce dispositif permet de maintenir la charge déplacée à hauteur constante. Le mouflage n'a aucune influence sur les vitesses de levage (rapport de réduction = 1).



Réas de mouflage.

3°) EVOLUTION DE LA SOLUTION CONSTRUCTIVE.

Pour des raisons économiques et compte tenu de son bon état général, le moteur de levage sera conservé et adapté (court-circuitage des enroulements du rotor).

Le variateur, de type « STATOVAR », sera remplacé par un variateur de type « ALTIVAR 71 » à commande vectorielle de flux, particulièrement bien adapté aux applications de levage de forte puissance.

Tous les éléments de puissance et de commande sont implantés dans le local technique situé derrière la cabine de conduite.



Sortie du transformateur triphasé.



Variateur « ALTIVAR ATV 71 ».



Transformateur HTA/BTA (TR2).

MISE EN SITUATION DU SUJET : PORT MARITIME DE LA ROCHELLE

Grue portuaire « CAILLARD CB2 »



PARTIE A : 12 questions

Etude mécanique du mouvement de levage

- Chaîne cinématique
- Calcul des efforts
- Dimensionnement des câbles

PARTIE B : 18 questions

Etude de l'évolution technologique

- Etude de l'ancienne technologie (Statovar) sur charge RL
- Correspondance avec la nouvelle technologie (ATV 71)

PARTIE C : 16 questions

Etude du moteur de levage

- Etude du schéma équivalent monophasé du moteur
- Dimensionnement du moteur

PARTIE D : 17 questions

Etude du transformateur triphasé

- Couplage, indice horaire
- Schéma équivalent monophasé
- Dimensionnement des éléments

PARTIE E : 10 questions

Etude du poste de livraison

- Calcul I_{cc} et Δu
- Protection par disjoncteurs

SESSION 2011

CAPLP CONCOURS EXTERNE ET CAFEP

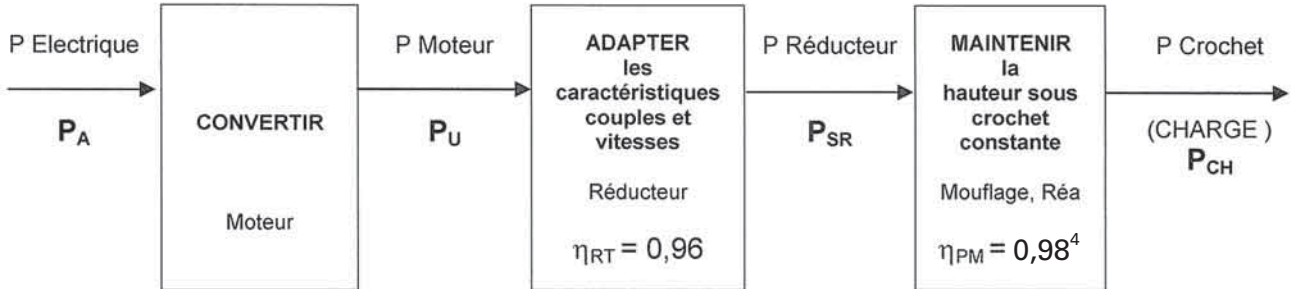
Section : **GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Option : **ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE**

TRAVAIL DEMANDE

ETUDE MECANIQUE DU MOUVEMENT DE LEVAGE

Graphe de transmission de puissance : On adopte le modèle suivant :



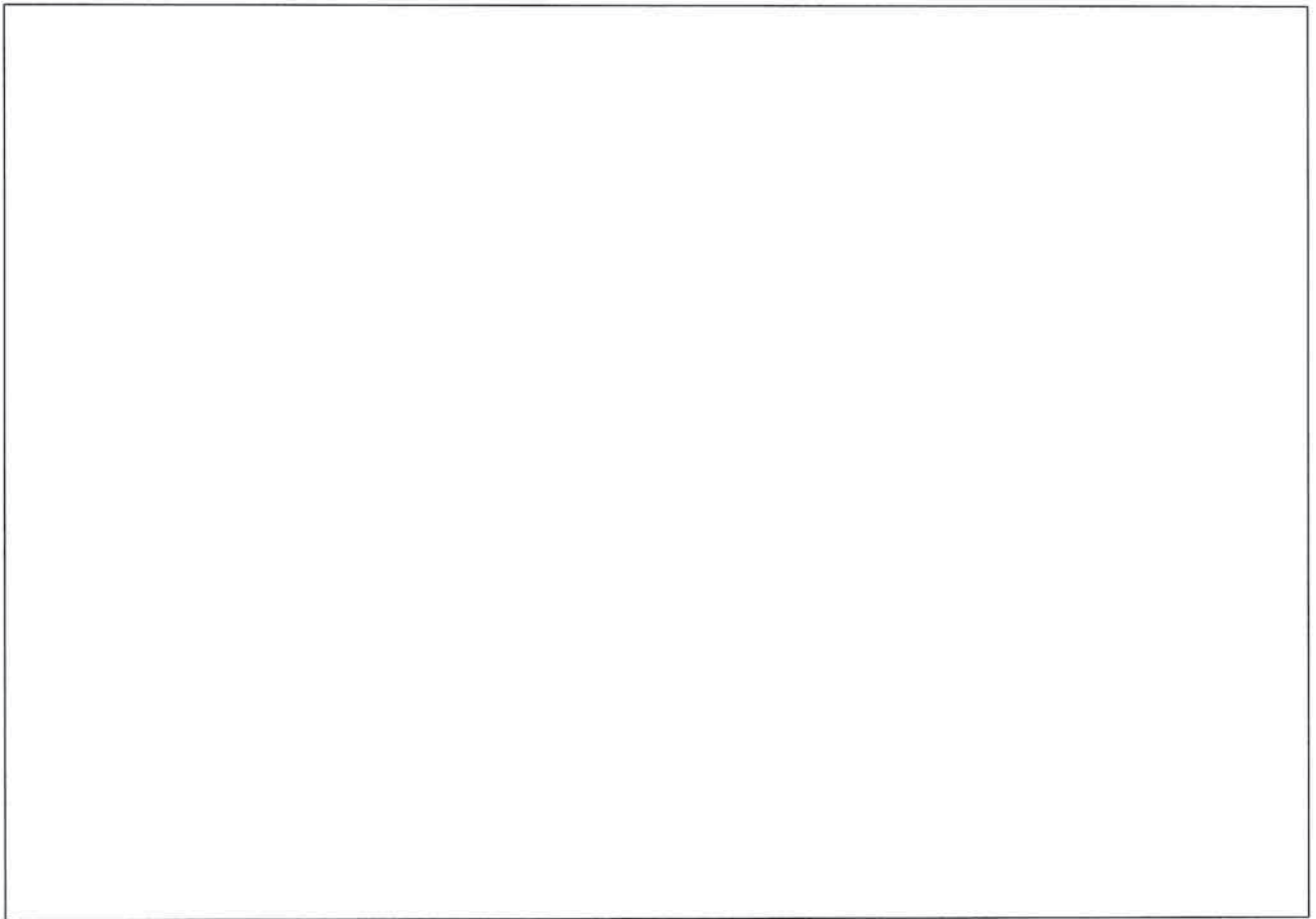
VERIFICATION DU CHOIX DU MOTEUR.

1°) **Calculer** l'énergie potentielle W_P à fournir pour élever la charge maximale depuis le fond de cale bateau jusqu'à la hauteur maximale.

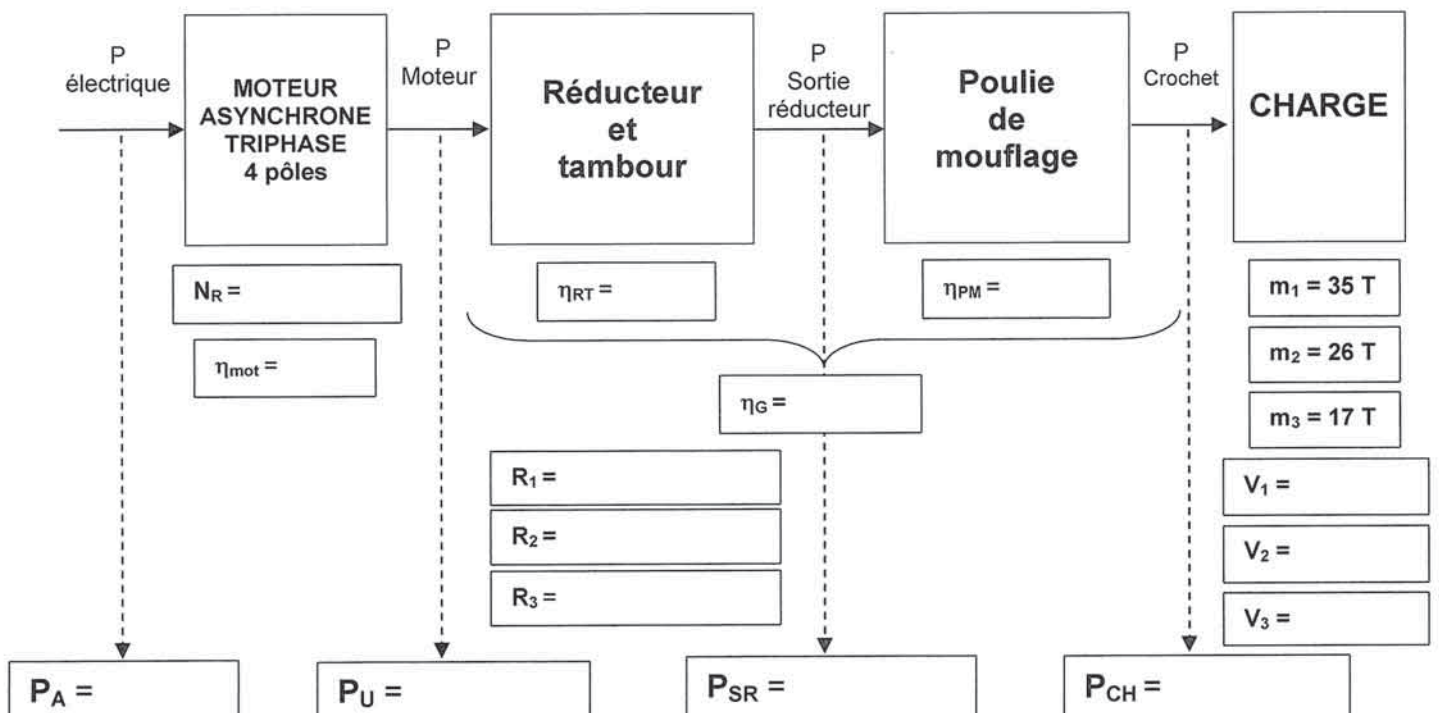
2°) **Calculer** le temps t et la puissance P_{CH} nécessaire au levage de la charge.

3°) En **déduire** la puissance en sortie du réducteur P_{SR} , la puissance utile P_U nécessaire et la puissance absorbée P_A .

4°) Calculer les rapports de réduction R_1 , R_2 et R_3 correspondant à chaque vitesse (V_1 , V_2 , V_3) de levage obtenue par action sur le levier de manœuvre.



5°) Compléter le graphe ci-dessous. (Seules les puissances relevées dans le cas le plus défavorable seront reportées)



6°) **Calculer** le couple $T_{\text{Réd}}$ en sortie de réducteur permettant d'entraîner la masse m_1 à une vitesse constante pendant la phase de montée. En **déduire** la valeur du couple résistant T_{RM} ramené sur l'arbre du moteur.

7°) **Calculer**, dans ces conditions, le couple utile $T_{\text{U mot}}$ du moteur de levage. **Conclure** sur le choix du moteur.

VERIFICATION DU CHOIX DES CABLES DE LEVAGE.

8°) **Calculer** l'effort résistant maximal F exercé par les différentes charges levées.

9°) En **déduire**, l'effort F' appliqué sur chacun des câbles de levage dans les trois cas précédents.

10°) Le câble utilisé est à âme métallique (rupture minimum 180 kg/mm^2). **Déterminer** le coefficient de sécurité spécifique C_0 et **conclure** sur le choix du câble.

11°) **Calculer** l'allongement maximal $\Delta\lambda$ d'un câble de levage.

L'allongement s'écrit : $\Delta\lambda = (N \times \lambda_0) / (E \times S_0)$

N : Force appliquée en N.
 λ_0 : Longueur maximale en mm.
E : Module d'élasticité = 110000 N/mm^2
 S_0 : Section utile en mm^2 .

Coefficient de remplissage du câble = Section d'acier / Section totale = 0,61

Le cahier des charges spécifie un allongement maximum de 0,5 m. **Conclure** sur le câble utilisé.

DEFINIR LA VITESSE MAXIMALE DU VENT AUTORISEE PENDANT LES MANUTENTIONS.

12°) Afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes, le cahier des charges stipule que le balan maximal ne peut excéder 0,65 m pendant la manutention.

Calculer la force latérale F_{vt} exercée par le vent sur un conteneur de 20 T placé à 20 m sous la tête de flèche.

La force exercée par le vent a pour expression : $F_{vt} = S \times C_d \times \rho / 2 \times V_{vt}^2$

ρ = densité de l'air = 1,2 kg/m³ à 20°C

C_d = 1,2

S = Surface du conteneur

En **déduire** la vitesse maximale de vent autorisée pour le fonctionnement de la grue.

ETUDE DE L'EVOLUTION TECHNIQUE

Le moteur d'entraînement du mouvement de levage est actuellement piloté par un variateur de vitesse analogique de type « STATOVAR ». Il sera remplacé par un variateur de type « ALTIVAR 71 » (commande vectorielle de flux).

- Le "Statovar" équivaut à un « bloc gradateur triphasé avec thyristors à disques », permettant de piloter le moteur à rotor bobiné couplé en étoile au stator et au rotor.
- Afin de refroidir les composants de puissance, l'équipement est intégré dans une armoire métallique munie d'une ventilation forcée.
- Les thyristors sont montés sur tiroirs déconnectables. Chaque tiroir supporte deux « thyristors à disques » couplés tête-bêche, deux cartes « armorceurs » et deux cartes de « protection ».
- On assimilera le fonctionnement du « bloc gradateur triphasé avec thyristors à disques » à celui de « trois gradateurs monophasés directs ».

La première partie de l'étude porte sur le fonctionnement d'un tiroir composé, de deux « thyristors à disques couplés « tête-bêche ».

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la solution « ALTIVAR ».

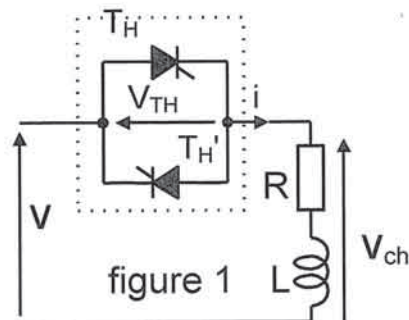
1°) ETUDE DE LA SOLUTION STATOVAR.

Comportement du gradateur monophasé sur une charge inductive.

Le gradateur est alimenté par la tension v . La charge est inductive (figure 1).

On donne : $R = 0,6 \Omega$; $L = 0,98 \text{ mH}$; $v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$; $\tau = L/R$; $\varphi = \text{déphasage (courant / tension)}$

V_{ch} est la tension aux bornes de la charge, i le courant qui la traverse et Z l'impédance de la charge.



On amorce le thyristor T_H lorsque $\omega t = \psi$.

1.1°) Ecrire l'équation différentielle du courant en fonction de θ quand T_H est amorcé.

1.2°) On rappelle que la solution de cette équation est de la forme : $i(\theta) = i_1(\theta) + i_2(\theta)$ avec $i_1(\theta)$ le courant en régime transitoire et $i_2(\theta)$ le courant en régime permanent.

Exprimer la solution $i_1(\theta)$ du courant en régime transitoire en fonction de $\theta, \psi, \omega, \tau$.

1.3°) Exprimer la solution $i_2(\theta)$ du courant en régime permanent sinusoïdal en fonction de V_{eff} , Z , θ et φ .

On donne l'expression de $i_2(\theta) = K_1 \cos(\theta) + K_2 \sin(\theta)$. **Calculer** les coefficients K_1 et K_2 .

1.4°) En utilisant la condition $i(\theta) = 0$ au moment où on amorce T_H , c'est-à-dire pour : $\omega t_0 = \psi$. **Déterminer** la valeur du coefficient K et **donner** l'expression du courant $i(\theta)$.

1.5°) **Calculer** la valeur de τ .

1.6°) Pour la suite du problème, on prendra $\psi = \frac{\pi}{3}$ rad. **Montrer** que $i(\theta)$ peut se réduire au terme sinusoïdal, dont on calculera la valeur avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ rad.

1.7°) Exprimer la valeur efficace $V_{ch\ eff}$ de la charge en fonction de θ_1 , ψ , et V (avec $\varphi = \pi / 6$ rad.).
Calculer la valeur de $V_{ch\ eff}$ pour $\psi = \pi/3$ rad et $\theta_1 \approx \pi + \varphi$.

1.8°) Calculer le courant efficace $I_{ch\ eff}$ et P_{ch} dans la charge dans les conditions précédentes.

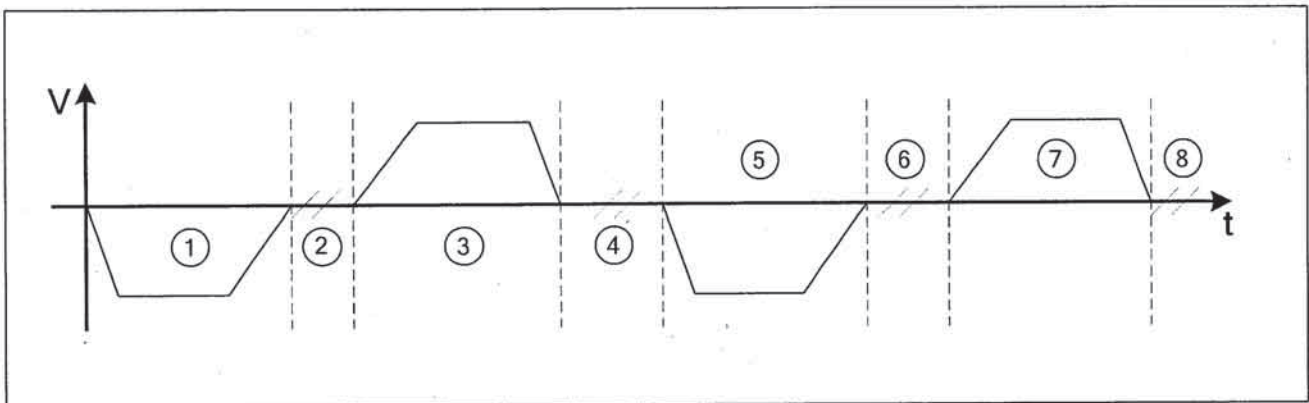
1.9°) A partir des calculs précédents, **effectuer** le choix du bloc gradateur, alimenté par le transformateur TR2 CB2 ainsi que celui du module électronique de commande.

2°) ETUDE DE LA SOLUTION ALTIVAR.

L'ATV 71 est un variateur de vitesse à commande vectorielle de flux. Cette technologie est préconisée pour le levage de charges importantes.

On soulève une charge de 35 T. Le grutier sélectionne une vitesse maximale de 0.633 m.s^{-1} . La course totale est égale à 26 m.

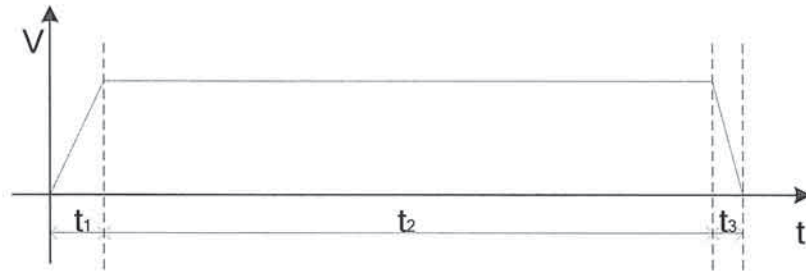
Le cycle complet de chargement d'un bateau est décrit ci-dessous :



Phases de fonctionnement	Actions associées
1	Descente du crochet
2	Positionnement (relevage et rotation) + arrimage
3	Levage
4	Rotation
5	Descente
6	Positionnement (relevage et rotation) + désarrimage
7	Montée du crochet
8	Rotation

Vérification des différents paramètres permettant de justifier le choix du nouveau variateur.

Etude de la phase 3 : Montée de la charge au dessus du quai.



2.1°) Calculer l'accélération γ_1 et la distance parcourue C_1 pendant le temps t_1 avec $t_1 = 3$ s.

2.2°) Calculer l'accélération γ_3 et la distance parcourue C_3 pendant le temps t_3 avec $t_3 = 2$ s.

2.3°) Lors du régime permanent, calculer la distance parcourue C_2 ainsi que le temps t_2 . Préciser la valeur de l'accélération. Calculer le temps total t de la phase 3.

- 2.4°) On prendra :
- Ω_{1T} : Vitesse angulaire du tambour avec $\Omega_{1T} = 2 \text{ rad.s}^{-1}$.
 - Ω_M : Vitesse angulaire du moteur de levage avec $\Omega_M = 156,24 \text{ rad.s}^{-1}$.
 - R_T : Rayon du tambour avec $R_T = 0,315 \text{ m}$.
 - R_1 : Rapport de réduction en petite vitesse. $R_1 = 0,0127 = 1/78,74$
 - Ω_T' : Accélération angulaire du tambour avec $\Omega_T' = \gamma / R_T$
 - Ω_M' : Accélération angulaire du moteur avec $\Omega_M' = k \times \gamma / R_T$ et $k = 1/ R$.

Calculer les accélérations angulaires (tambour et moteur) pour chacune des phases.

Temps	t_1	t_2	t_3
Accélération			
Ω_T' (Tambour)			
Ω_M' (Moteur)			

- 2.5°) On donne :
- J_{MOT} : Inertie du moteur avec $J_{MOT} = 7,164 \text{ kg.m}^2$
 - J_{EQ} : Inertie équivalente de l'ensemble (tambour, réducteur, frein) ramené sur l'arbre moteur avec $J_{EQ} = 2,93 \text{ kg.m}^2$
 - m : Masse de la charge à lever.
 - g : Accélération de la pesanteur avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
 - T_{SR} : Couple sortie réducteur avec $T_{SR} = m \times (g + \gamma) \times R_T$
 - T_{EQ} : Couple équivalent ramené sur l'arbre moteur avec $T_{EQ} = T_{SR} / k$

Donner l'expression littérale de T_{SR} en fonction de m, R_T, g, k et Ω_M' .

2.6°) On donne : T_{MOT} : Couple moteur avec $T_{MOT} = T_{EQ} + (J_{MOT} + J_{EQ}) \times \Omega_{M'}$.

Compléter le tableau en calculant pour chacune des trois phases de fonctionnement, les couples T_{SR} , T_{EQ} et T_{MOT} .

Phases de fonctionnement	$\Omega_{M'}$	T_{SR}	T_{EQ}	T_{MOT}
Phase 1 (t_1)				
Phase 2 (t_2)				
Phase 3 (t_3)				

2.7°) On donne : I_i : Courant efficace du moteur avec $I_i = \sqrt{(I_N \times \sin \varphi_N)^2 + (I_N \times (T_{MOT}/T_N) \times \cos \varphi_N)^2}$
 i (indice pour chacune des phases)

Avec : I_N : Courant nominal moteur ; T_N : Couple nominal moteur

Compléter le tableau en calculant le courant efficace I_i du moteur pour chacune des trois phases de fonctionnement. **Vérifier** que ce courant est inférieur aux données fournies.

On donne : $T_N = 1600 \text{ Nm}$ $\cos \varphi = 0,89$ $I_N = 420 \text{ A}$ $\sin \varphi = 0,456$ $I_i < \text{à } 1,5 \times I_N$

Phases de fonctionnement	T_{MOT}	$I_{(i)}$
Phase 1 (t_1)	$T_{MOT} = 1933 \text{ Nm}$	
Phase 2 (t_2)	$T_{MOT} = 1374 \text{ Nm}$	
Phase 3 (t_3)	$T_{MOT} = 536 \text{ Nm}$	

2.8°) On donne :

$$C_{TH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

et

$$I_{TH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

Calculer les valeurs thermiques équivalentes du couple C_{TH} et du courant I_{TH} .

2.9°) Un des variateurs de vitesse proposés dans la documentation technique correspond-il à l'utilisation ? Le cas échéant, préciser la référence.

ETUDE DU MOTEUR DE LEVAGE

Pour des raisons économiques, le moteur a été conservé et adapté, par suppression des « résistances rotoriques » et court-circuitage des enroulements du rotor.

Par hypothèse simplificatrice et dans le cadre d'une approche industrielle, le moteur sera considéré comme un moteur asynchrone à rotor en court-circuit.

Le moteur de levage a fait l'objet d'une révision générale comprenant l'échange de roulements et des essais complets permettant de contrôler les caractéristiques mécaniques et électriques de la machine.

L'étude porte uniquement sur le schéma équivalent du moteur asynchrone.

ETUDE DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR UN RESEAU FIXE.

La plaque signalétique du moteur porte les indications suivantes :

230 V / 400 V ; 50 Hz ; 250 kW ; 1492 tr.min⁻¹ ; $\cos \varphi = 0,89$

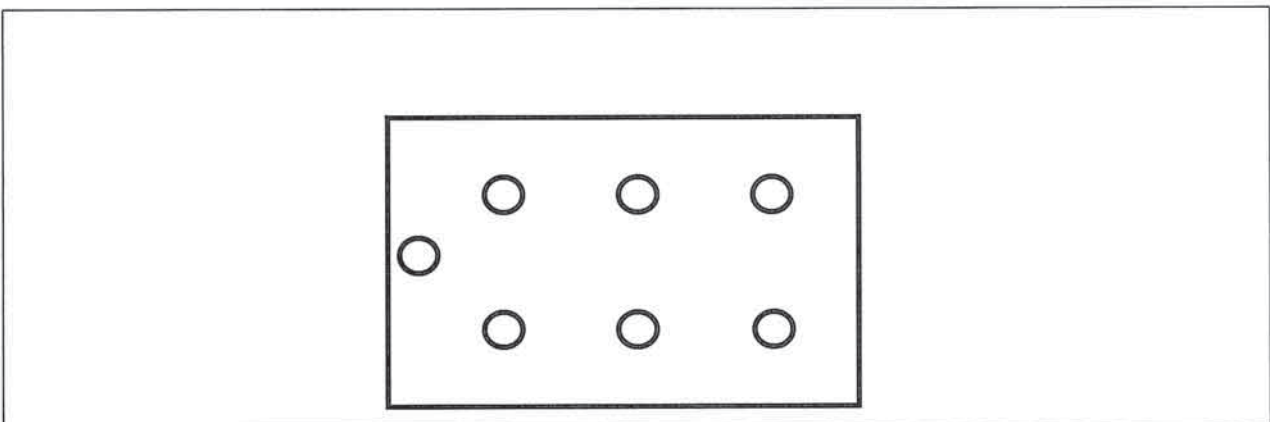
Le moteur est alimenté par un réseau triphasé équilibré 230 V / 400 V de tensions sinusoïdales de fréquence f ; on note V la valeur efficace des tensions simples et g le glissement.

On néglige toute saturation magnétique, les résistances et les inductances de fuite statoriques ainsi que les pertes mécaniques.

JUSTIFICATION DU MOTEUR DE LEVAGE.

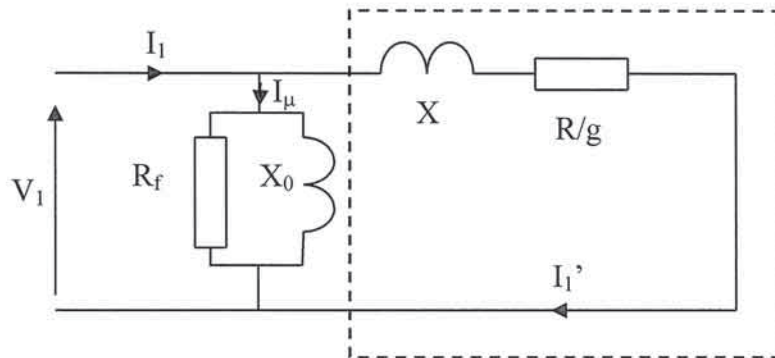
1°) **Déterminer** le nombre de paires de pôles p du moteur et calculer son glissement g .

2°) **Déterminer** le couplage du moteur et représenter la plaque à bornes complète (enroulements, alimentations, repères alphanumériques et couplage).



3°) **Calculer** le couple utile T_u du moteur.

4°) Le schéma équivalent par phase, entre phase et neutre est représenté figure ci-dessous.



Les essais effectués sur la machine à 50 Hz ont donné les résultats suivants.

Essai 1 :

- ✓ A vide effectué à la vitesse de synchronisme sous 400 V entre phases.
- ✓ La puissance absorbée est de $P_o = 1.5$ kW pour une valeur efficace de l'intensité du courant I_o de 133 A.

Essai 2 :

- ✓ Rotor bloqué sous $U_{1cc} = 80$ V
- ✓ Le courant de ligne a pour intensité efficace $I_{1cc} = 430$ A et $P_{1cc} = 1,8$ kW.

4.1°) Représenter le schéma équivalent monophasé du moteur lors de l'essai 1.

4.2°) Déterminer les valeurs des éléments R_f et X_0 . En déduire la valeur de l'inductance L_0 .

4.3°) A partir de l'essai 2, **calculer** la puissance active P_{R_f} consommée par R_f et la puissance réactive Q_{X_0} absorbée par X_0 . **Justifier** qu'il est possible, dans le cadre d'une approche industrielle, de négliger ces puissances.

4.4°) **Calculer** le courant magnétisant I_μ et le comparer à I_{1cc} . **Conclure** (On appelle Z l'impédance équivalente à R_f en parallèle à X_0).

4.5°) A partir de l'essai 2, **exprimer** la puissance active P_R absorbée par R en fonction de P_{1cc} et de R_f . **Calculer** cette puissance. En **déduire** la valeur de R .

4.6°) A partir de l'essai 2, **exprimer** la puissance réactive Q_x absorbée par X en fonction de Q_{1cc} et de X_0 . **Calculer** cette puissance et en déduire la valeur de X .

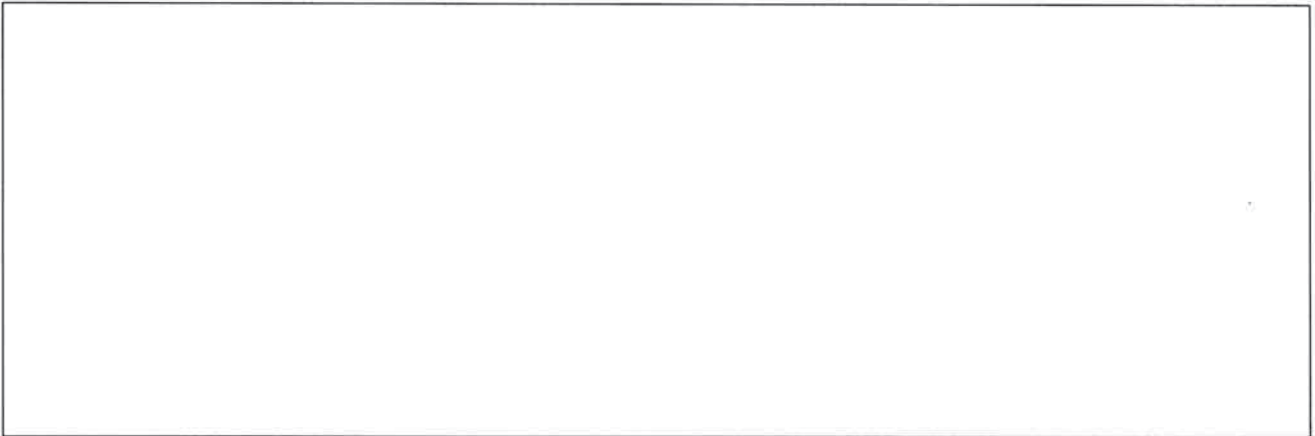
4.7°) A partir des calculs effectués, **indiquer** les grandeurs qui pourront être négligées en vue d'un dimensionnement industriel.

4.8°) **Exprimer** le courant I_1' en fonction de V_1 , de R/g , et de X . **Calculer** sa valeur.

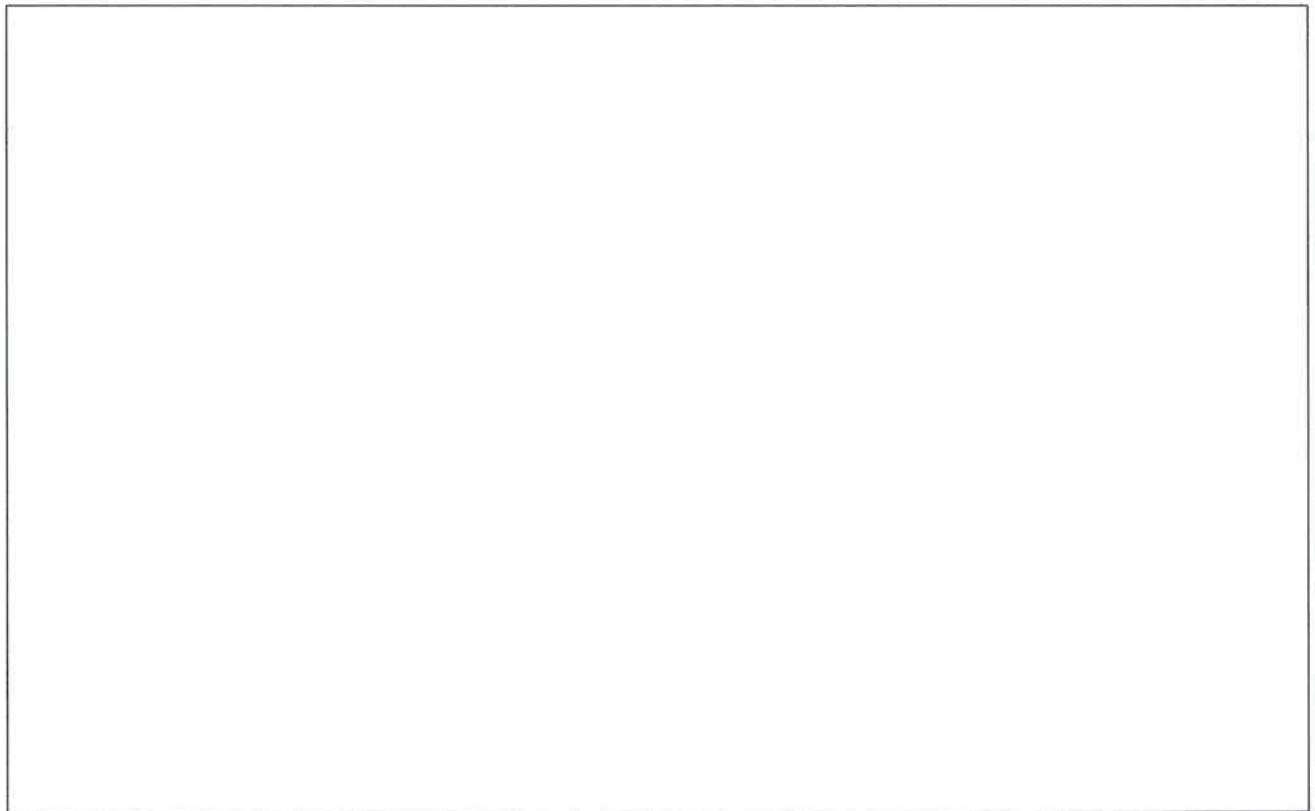
4.9°) **Exprimer** la puissance transmise P_{TR} au rotor en fonction de V_1 , de R/g , et de I_1' .

4.10°) **Exprimer** le couple électromagnétique T_{em} en fonction de cette puissance. **Vérifier** que ce couple peut s'exprimer par la relation : $T_{em} = K \times (V_1^2 / \omega) \times (R/g) / [(R/g)^2 + X^2]$

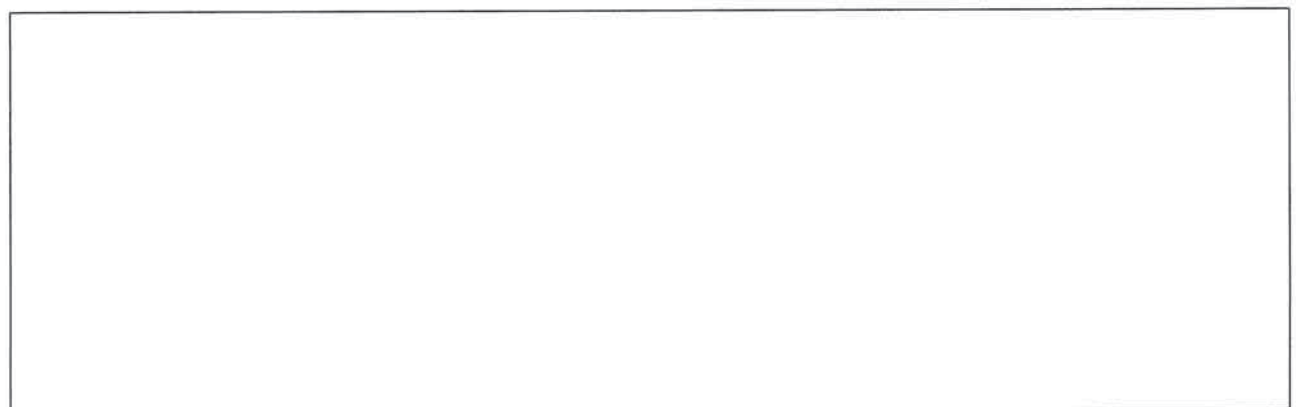
4.11°) Calculer le couple électromagnétique T_{em} .



4.12°) Indiquer pour quelle valeur de glissement g_{max} le moment du couple est maximal. **Calculer** la valeur du couple maximum T_{max} et la vitesse de rotation correspondante N_{max} .



4.13°) Conclure sur le couple maximal. Le moteur choisi est-il adapté à l'utilisation ?



ETUDE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Deux transformateurs triphasés sont situés dans la grue CB2. Le premier, **TR1 CB2**, de faible puissance est dédié à l'éclairage, le chauffage de la cabine et l'alimentation des prises BTA.

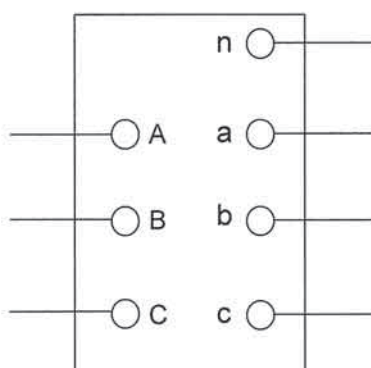
Le second, **TR2 CB2**, de type immergé à remplissage total, est destiné à l'alimentation des moteurs des différents mouvements de manutention (levage, relevage, translation et orientation).

COMPORTEMENT DU TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION TR2 CB2.

Le circuit magnétique a une masse de 840 kg. Il est réalisé en tôles d'acier feuilletées à faibles pertes (1,6 W/kg pour une induction de 1 T). La section des noyaux est de 600 cm².

1°) Couplage et indice horaire :

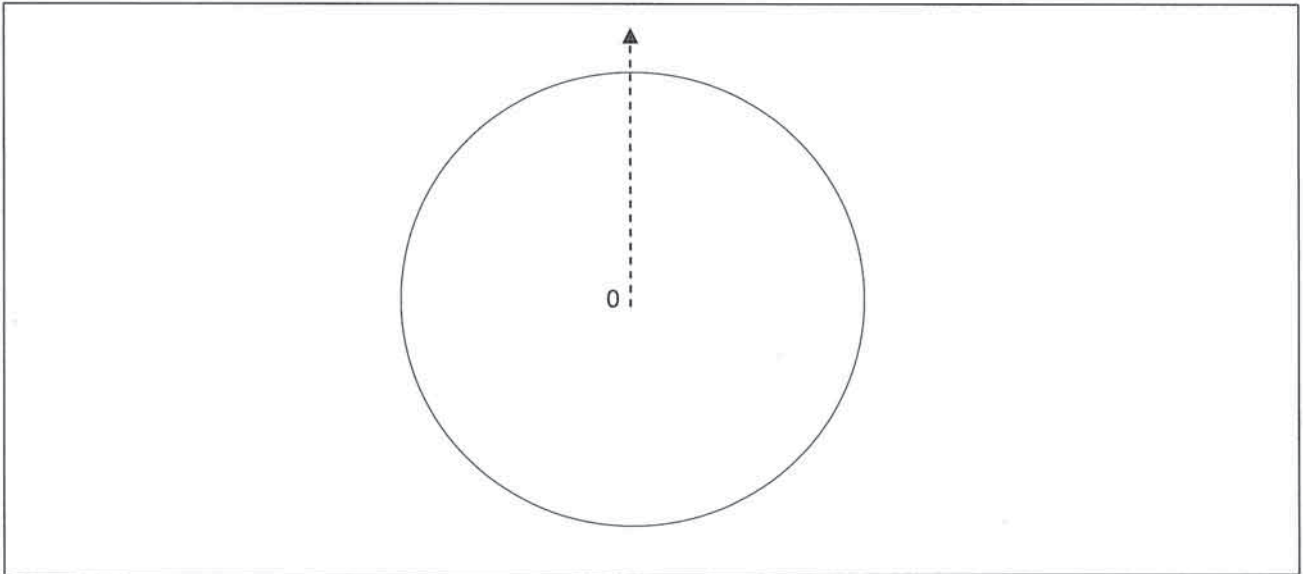
1.1°) Relever le couplage et l'indice horaire du transformateur. **Compléter** le schéma représentatif des enroulements côtés HT et BT.



1.2°) Préciser ce que représente l'indice horaire d'un transformateur ?

Empty box for the answer to question 1.2°)

1.3°) **Tracer** le diagramme vectoriel des tensions simples primaires et secondaires correspondant.



2°) **Calcul des éléments du transformateur :**

2.1°) **Calculer** le rapport de transformation M entre les tensions composées nominales.

2.2°) **Donner** la relation entre M et m (rapport entre le nombre de spires). **Calculer** m .

2.3°) **Justifier** les valeurs des courants primaire (I_1) et secondaire (I_2) portées sur la plaque signalétique.

2.4°) **Donner** la relation permettant de déterminer les pertes ferromagnétiques. **Préciser** où elles sont situées dans un transformateur et ce que l'on peut faire pour les réduire.

2.5°) Calculer les pertes ferromagnétiques P_{fer} totales du transformateur pour une induction maximale $B_M = 1.2 \text{ T}$. **Comparer** le résultat aux indications fournies par le constructeur.

$$P_{\text{fer}} = C_{\text{fer}} \times (f / f_0)^\beta \times (B / B_0)^\eta \times M \quad C_{\text{fer}} = 1,6 \text{ W/kg pour } B_0 = 1 \text{ T à } f_0 = 50 \text{ Hz et } \beta = 2 ; \eta = 2$$

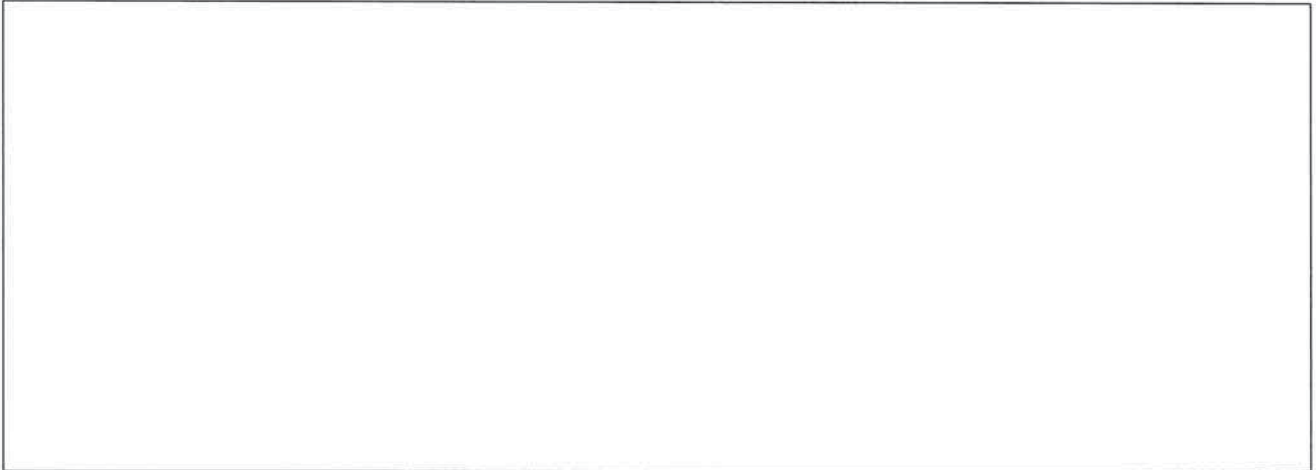
2.6°) Calculer le nombre de spires N_1 de chaque enroulement primaire pour une induction maximale dans le noyau $B_M = 1,2 \text{ T}$.

2.7°) En déduire le nombre de spires N_2 de chaque enroulement secondaire.

2.8°) Calculer la résistance R_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.

2.9°) Donner la définition de U_{cc} (en %). **Calculer** sa valeur.

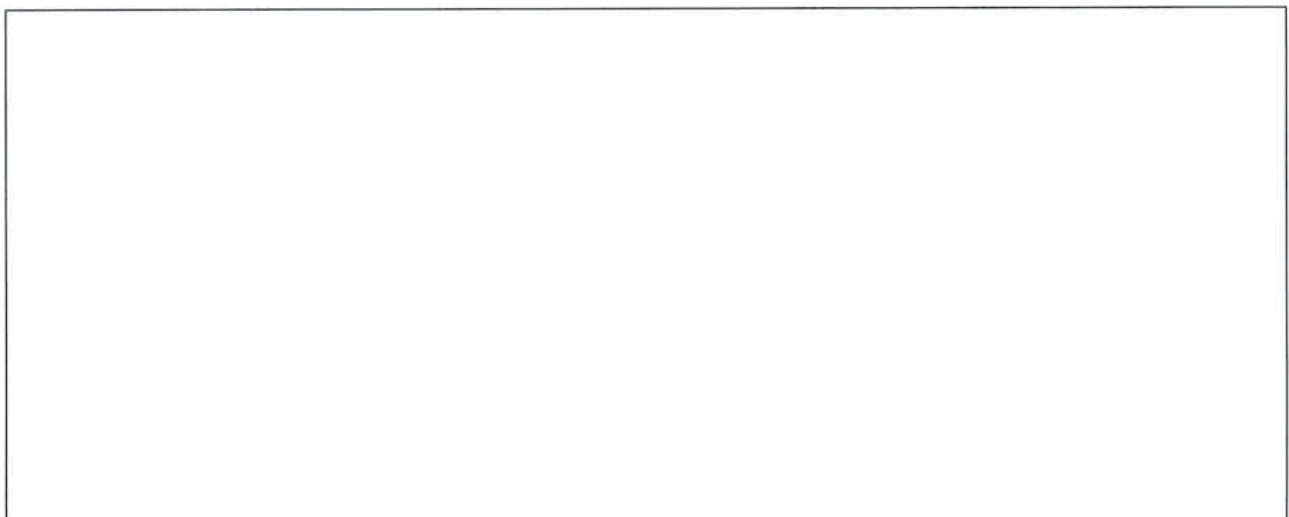
2.10°) Calculer la réactance X_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.



2.11°) Le courant à vide est très faible devant le courant primaire nominal, la réactance et l'inductance de fuite au primaire peuvent donc être négligées. Dans ces conditions, **représenter** le schéma équivalent au primaire du transformateur à vide, vu entre phase et neutre (on prendra R_f et X_m côté HT). **Préciser** ce que représentent R_f et X_m .



2.12°) Calculer les valeurs des éléments R_f et X_m du schéma précédent.



2.13°) Calculer les chutes de tensions simples ΔV_2 et composées ΔU_2 pour un $\cos \varphi_2 = 0,8$. Comparer le résultat aux spécifications du constructeur.

2.14°) Vérifier la valeur η du rendement du transformateur.

ETUDE DU POSTE DE LIVRAISON

Sur le quai « Chef de baie », lieu de chargement et déchargement des marchandises où sont situées les quatre grues CB, sont disposées les fosses de répartition « Feeder 1 » et « Feeder 2 ».

Chaque Feeder permet d'alimenter deux grues : Le feeder 1 alimente les grues CB1 et CB10, le feeder 2 alimente les grues CB2 et CB11.

L'étude porte sur une partie du poste de livraison de « Chef de baie » composée de cinq transformateurs : Trois transformateurs de puissance apparente 1400 kVA (15 kV / 5,5 kV) et deux transformateurs de puissance apparente 400 kVA (15,5 kV / 0,4 kV).

Afin de déterminer la protection à installer dans le hangar 31, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de la liaison poste « chef de baie / Hangar 31 » pour déterminer le pouvoir de coupure (P_{dc}) des protections. TR1 alimente TGBT 1 et TR2 alimente TGBT 2.

Un court-circuit triphasé est simulé en amont de D21. Il est limité par l'impédance du réseau Z_A , l'impédance du transformateur Z_{TR} et l'impédance des câbles Z_C .

Données de références :

Réseau amont (ramené au secondaire) : $P_{cc} = 500 \text{ MVA}$ $R_A = 0,05 \text{ m}\Omega$ $X_A = 0,35 \text{ m}\Omega$
Transformateur TR2 : $S = 400 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4 \%$ $P_{cu} = 4800 \text{ W}$ $U_{20} = 410 \text{ V}$
Câble C_2 : $L_2 = 150 \text{ m}$ $S_2 = 2 \times 120 \text{ mm}^2$ résistivité du cuivre $\rho = 22,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Réactance linéique (câbles séparés): $X_{cl} = 0,24 \text{ m}\Omega/\text{m}$
TGBT 1 et TGBT 2 : On négligera l'influence des jeux de barre

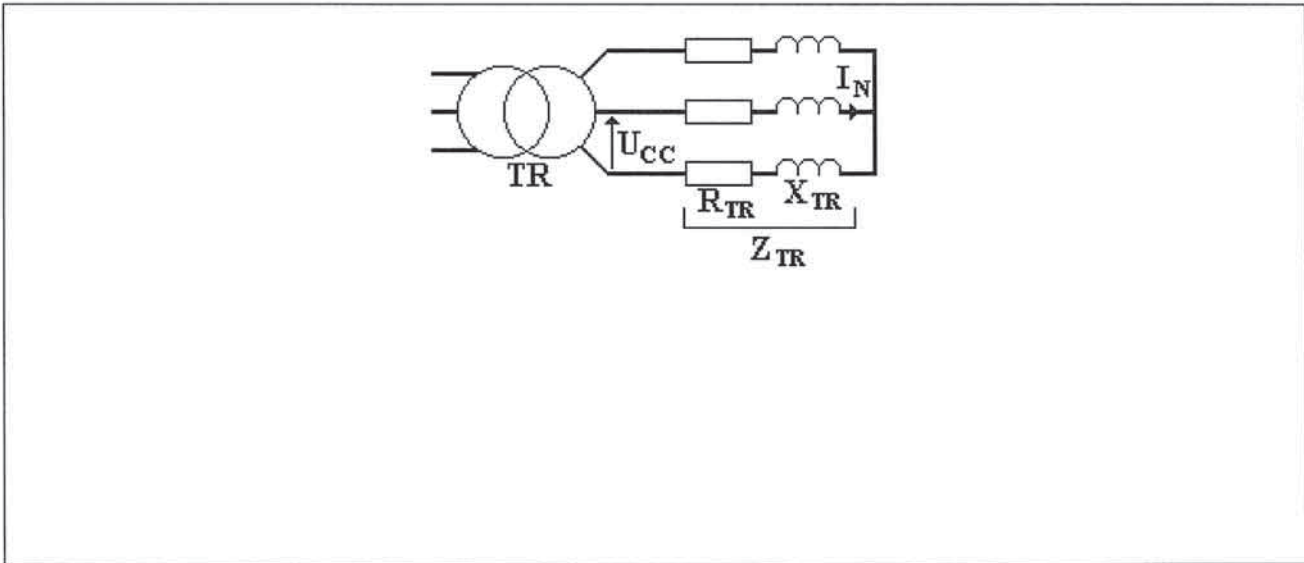
VERIFICATION DU CHOIX DES CABLES D'ALIMENTATION.

1°) **Etablir** le schéma équivalent par phase.

2°) **Déterminer** le courant nominal I_{2n} au secondaire de TR2.

3°) **Déterminer** la résistance d'enroulement R_{TR} vue du secondaire de TR2.

4°) Déterminer, à partir du schéma ci-dessous, l'impédance du secondaire Z_{TR} de TR2. En déduire la réactance X_{TR} .



5°) Calculer l'impédance totale Z_1 à prendre en compte afin de déterminer la valeur minimale du Pdc du disjoncteur principal D20 situé au départ du TGBT 2 en protection amont.

Calculer le court-circuit I_{cc1} en aval de D20 sachant que la réactance du disjoncteur $X_d = 0,15 \text{ m}\Omega$ et sa résistance $R_d = 0$.

6°) Déterminer la résistance R_{C2} du câble terminal C_2 du TGBT 2 au hangar 31.

7°) Déterminer la réactance X_{C2} du câble terminal C_2 du TGBT 2 au hangar 31.

8°) Calculer l'impédance totale Z_2 à prendre en compte.

9°) Calculer le court-circuit I_{cc2} en aval du disjoncteur D21 et **conclure** sur la valeur minimale du Pdc du disjoncteur D21 situé en protection amont du hangar 31.

10°) Calculer la chute de tension ΔV du câble terminal C_2 et **vérifier** la conformité de la chute de tension relative $\Delta V / V$ qui doit, selon la norme, être inférieure à 8 % de la tension simple à vide V_0 . L'utilisation impose $\cos \varphi = 0,8$; $b = 2$ en monophasé ou continu et 1 en triphasé équilibré.

On rappelle :
$$\Delta v = b \times [\rho \times (L / S) \cos \varphi + X_{cl} \times L \times \sin \varphi] \times I_b$$

SESSION 2011

CAPLP CONCOURS EXTERNE ET CAFEP

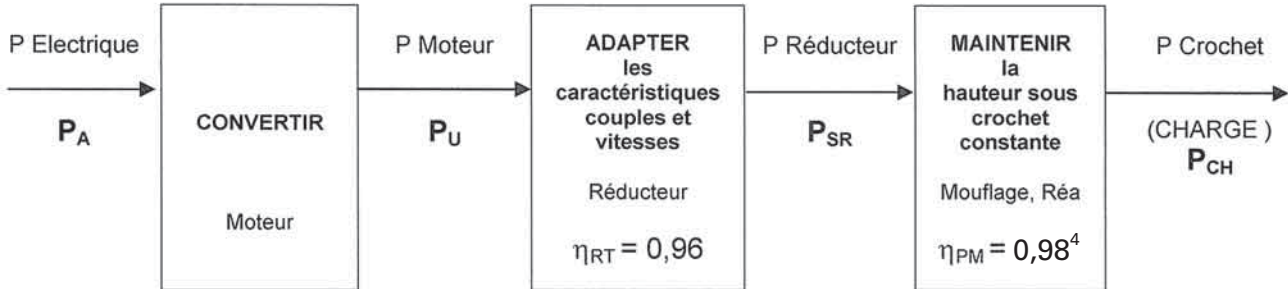
Section : **GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Option : **ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE**

TRAVAIL DEMANDE

ETUDE MECANIQUE DU MOUVEMENT DE LEVAGE

Graphe de transmission de puissance : On adopte le modèle suivant :



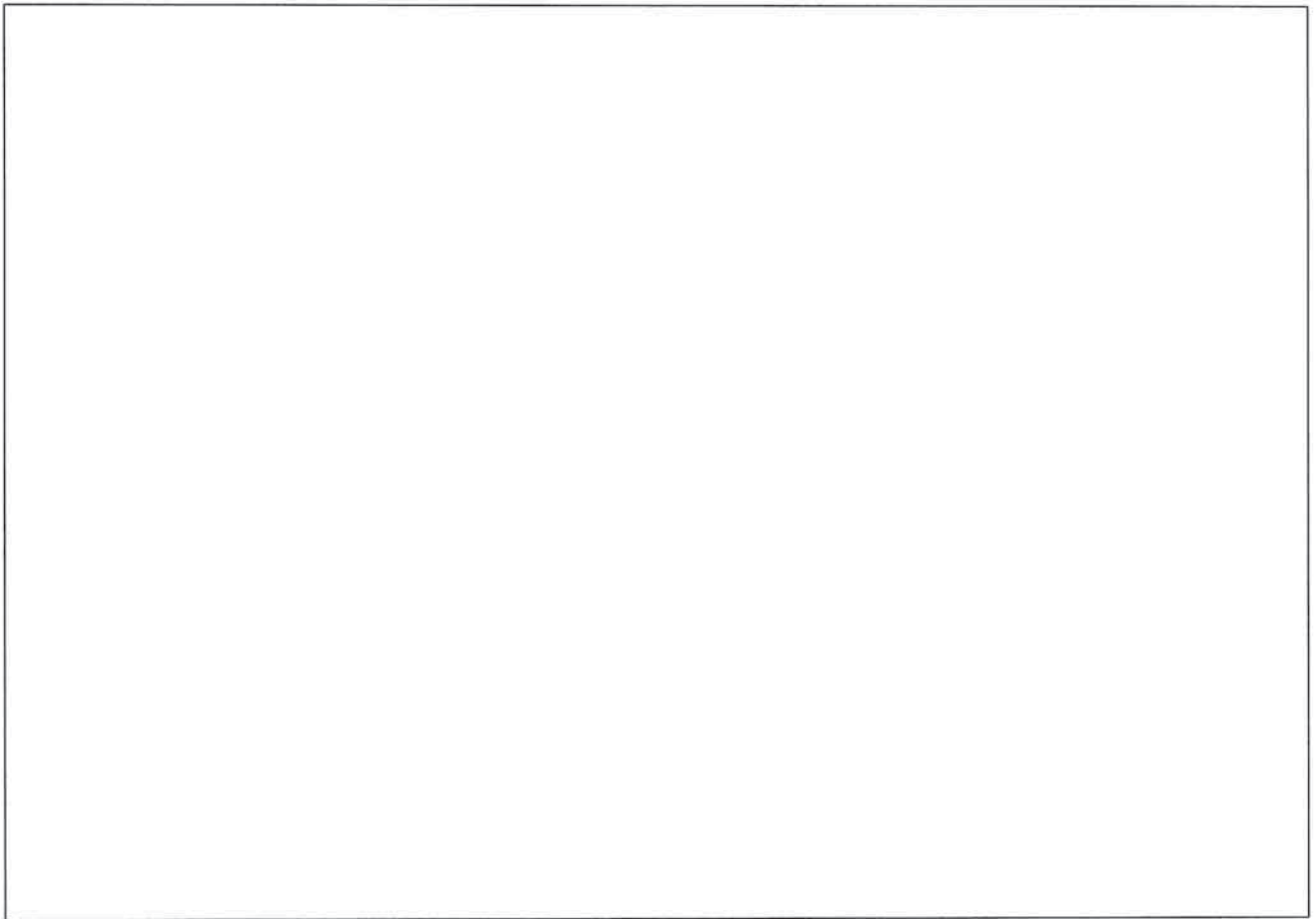
VERIFICATION DU CHOIX DU MOTEUR.

1°) **Calculer** l'énergie potentielle W_P à fournir pour élever la charge maximale depuis le fond de cale bateau jusqu'à la hauteur maximale.

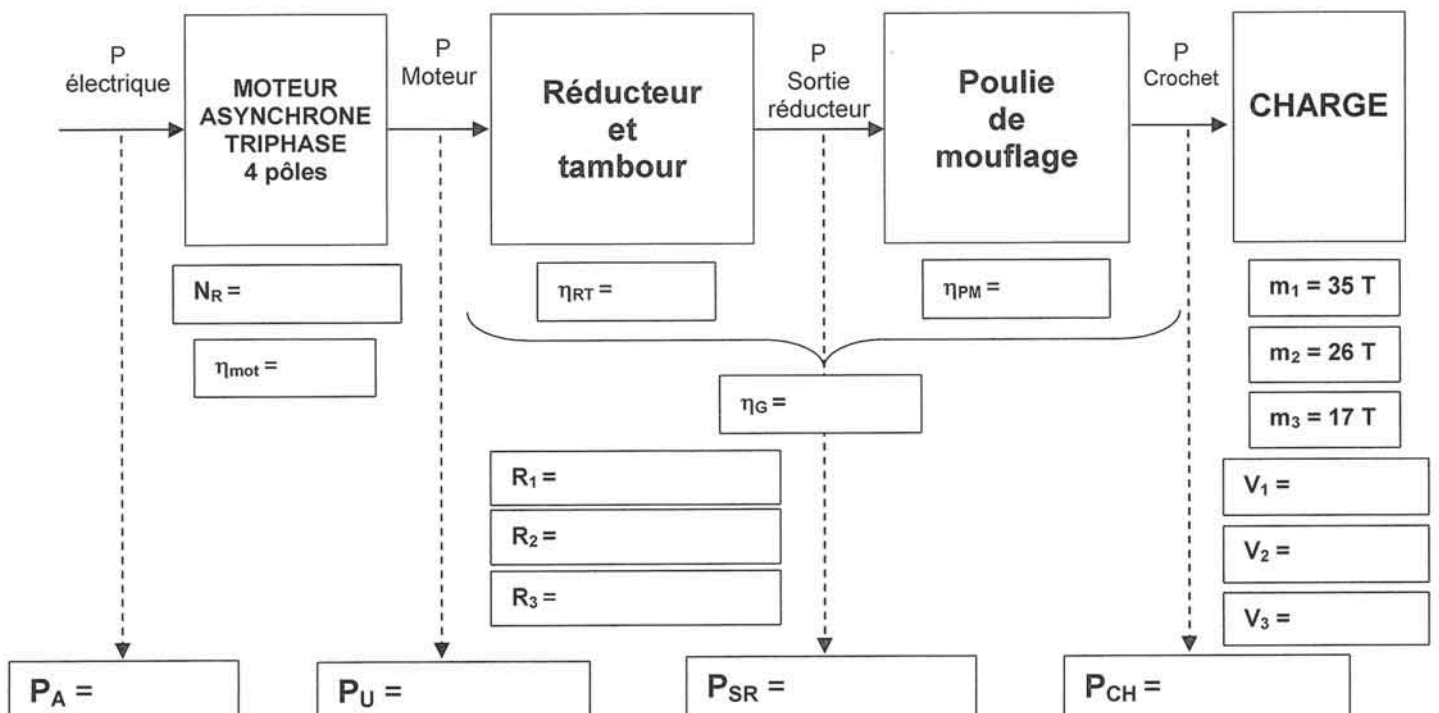
2°) **Calculer** le temps t et la puissance P_{CH} nécessaire au levage de la charge.

3°) En **déduire** la puissance en sortie du réducteur P_{SR} , la puissance utile P_U nécessaire et la puissance absorbée P_A .

4°) Calculer les rapports de réduction R_1 , R_2 et R_3 correspondant à chaque vitesse (V_1 , V_2 , V_3) de levage obtenue par action sur le levier de manœuvre.



5°) Compléter le graphe ci-dessous. (Seules les puissances relevées dans le cas le plus défavorable seront reportées)



6°) **Calculer** le couple $T_{\text{Réd}}$ en sortie de réducteur permettant d'entraîner la masse m_1 à une vitesse constante pendant la phase de montée. En **déduire** la valeur du couple résistant T_{RM} ramené sur l'arbre du moteur.

7°) **Calculer**, dans ces conditions, le couple utile $T_{\text{U mot}}$ du moteur de levage. **Conclure** sur le choix du moteur.

VERIFICATION DU CHOIX DES CABLES DE LEVAGE.

8°) **Calculer** l'effort résistant maximal F exercé par les différentes charges levées.

9°) En **déduire**, l'effort F' appliqué sur chacun des câbles de levage dans les trois cas précédents.

10°) Le câble utilisé est à âme métallique (rupture minimum 180 kg/mm^2). **Déterminer** le coefficient de sécurité spécifique C_0 et **conclure** sur le choix du câble.

11°) **Calculer** l'allongement maximal $\Delta\lambda$ d'un câble de levage.

L'allongement s'écrit : $\Delta\lambda = (N \times \lambda_0) / (E \times S_0)$

N : Force appliquée en N.
 λ_0 : Longueur maximale en mm.
E : Module d'élasticité = 110000 N/mm^2
 S_0 : Section utile en mm^2 .

Coefficient de remplissage du câble = Section d'acier / Section totale = 0,61

Le cahier des charges spécifie un allongement maximum de 0,5 m. **Conclure** sur le câble utilisé.

DEFINIR LA VITESSE MAXIMALE DU VENT AUTORISEE PENDANT LES MANUTENTIONS.

12°) Afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes, le cahier des charges stipule que le balan maximal ne peut excéder 0,65 m pendant la manutention.

Calculer la force latérale F_{vt} exercée par le vent sur un conteneur de 20 T placé à 20 m sous la tête de flèche.

La force exercée par le vent a pour expression : $F_{vt} = S \times C_d \times \rho / 2 \times V_{vt}^2$

ρ = densité de l'air = 1,2 kg/m³ à 20°C

C_d = 1,2

S = Surface du conteneur

En **déduire** la vitesse maximale de vent autorisée pour le fonctionnement de la grue.

ETUDE DE L'EVOLUTION TECHNIQUE

Le moteur d'entraînement du mouvement de levage est actuellement piloté par un variateur de vitesse analogique de type « STATOVAR ». Il sera remplacé par un variateur de type « ALTIVAR 71 » (commande vectorielle de flux).

- Le "Statovar" équivaut à un « bloc gradateur triphasé avec thyristors à disques », permettant de piloter le moteur à rotor bobiné couplé en étoile au stator et au rotor.
- Afin de refroidir les composants de puissance, l'équipement est intégré dans une armoire métallique munie d'une ventilation forcée.
- Les thyristors sont montés sur tiroirs déconnectables. Chaque tiroir supporte deux « thyristors à disques » couplés tête-bêche, deux cartes « armorceurs » et deux cartes de « protection ».
- On assimilera le fonctionnement du « bloc gradateur triphasé avec thyristors à disques » à celui de « trois gradateurs monophasés directs ».

La première partie de l'étude porte sur le fonctionnement d'un tiroir composé, de deux « thyristors à disques couplés « tête-bêche ».

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la solution « ALTIVAR ».

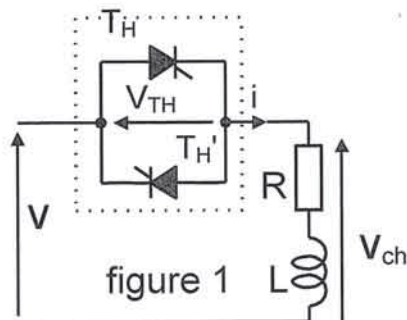
1°) ETUDE DE LA SOLUTION STATOVAR.

Comportement du gradateur monophasé sur une charge inductive.

Le gradateur est alimenté par la tension v . La charge est inductive (figure 1).

On donne : $R = 0,6 \Omega$; $L = 0,98 \text{ mH}$; $v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$; $\tau = L/R$; $\varphi = \text{déphasage (courant / tension)}$

V_{ch} est la tension aux bornes de la charge, i le courant qui la traverse et Z l'impédance de la charge.



On amorce le thyristor T_H lorsque $\omega t = \psi$.

1.1°) Ecrire l'équation différentielle du courant en fonction de θ quand T_H est amorcé.

1.2°) On rappelle que la solution de cette équation est de la forme : $i(\theta) = i_1(\theta) + i_2(\theta)$ avec $i_1(\theta)$ le courant en régime transitoire et $i_2(\theta)$ le courant en régime permanent.

Exprimer la solution $i_1(\theta)$ du courant en régime transitoire en fonction de $\theta, \psi, \omega, \tau$.

1.3°) Exprimer la solution $i_2(\theta)$ du courant en régime permanent sinusoïdal en fonction de V_{eff} , Z , θ et φ .

On donne l'expression de $i_2(\theta) = K_1 \cos(\theta) + K_2 \sin(\theta)$. **Calculer** les coefficients K_1 et K_2 .

1.4°) En utilisant la condition $i(\theta) = 0$ au moment où on amorce T_H , c'est-à-dire pour : $\omega t_0 = \psi$. **Déterminer** la valeur du coefficient K et **donner** l'expression du courant $i(\theta)$.

1.5°) **Calculer** la valeur de τ .

1.6°) Pour la suite du problème, on prendra $\psi = \frac{\pi}{3}$ rad. **Montrer** que $i(\theta)$ peut se réduire au terme sinusoïdal, dont on calculera la valeur avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ rad.

1.7°) Exprimer la valeur efficace $V_{ch\ eff}$ de la charge en fonction de θ_1 , ψ , et V (avec $\varphi = \pi / 6$ rad.).
Calculer la valeur de $V_{ch\ eff}$ pour $\psi = \pi/3$ rad et $\theta_1 \approx \pi + \varphi$.

1.8°) Calculer le courant efficace $I_{ch\ eff}$ et P_{ch} dans la charge dans les conditions précédentes.

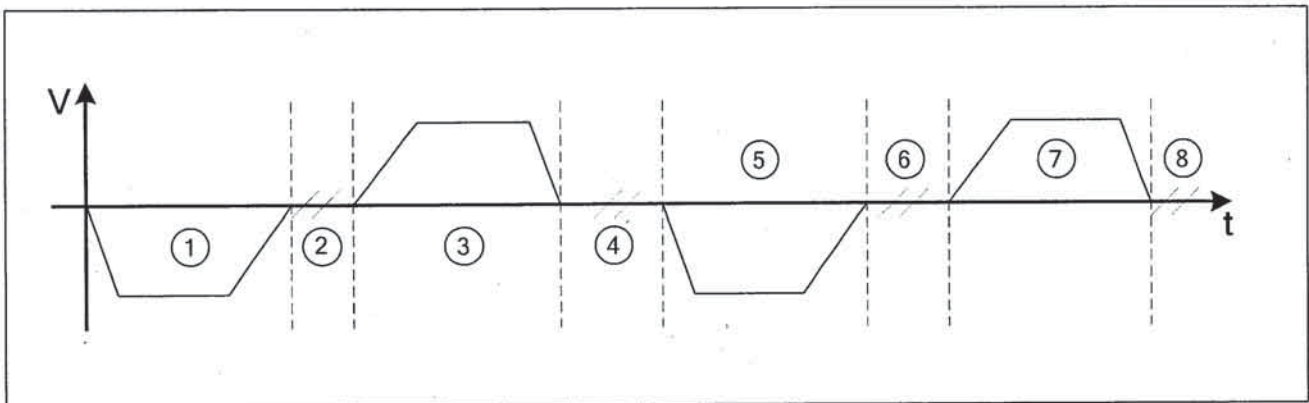
1.9°) A partir des calculs précédents, **effectuer** le choix du bloc gradateur, alimenté par le transformateur TR2 CB2 ainsi que celui du module électronique de commande.

2°) ETUDE DE LA SOLUTION ALTIVAR.

L'ATV 71 est un variateur de vitesse à commande vectorielle de flux. Cette technologie est préconisée pour le levage de charges importantes.

On soulève une charge de 35 T. Le grutier sélectionne une vitesse maximale de 0.633 m.s^{-1} . La course totale est égale à 26 m.

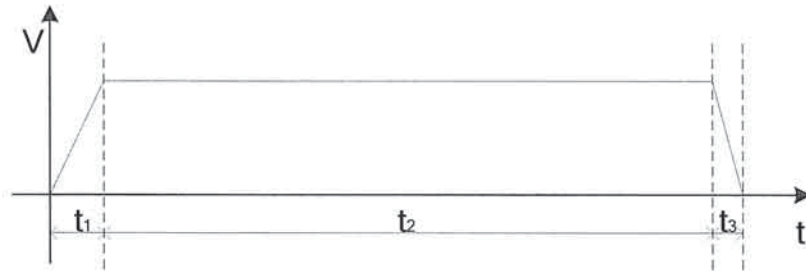
Le cycle complet de chargement d'un bateau est décrit ci-dessous :



Phases de fonctionnement	Actions associées
1	Descente du crochet
2	Positionnement (relevage et rotation) + arrimage
3	Levage
4	Rotation
5	Descente
6	Positionnement (relevage et rotation) + désarrimage
7	Montée du crochet
8	Rotation

Vérification des différents paramètres permettant de justifier le choix du nouveau variateur.

Etude de la phase 3 : Montée de la charge au dessus du quai.



2.1°) Calculer l'accélération γ_1 et la distance parcourue C_1 pendant le temps t_1 avec $t_1 = 3$ s.

2.2°) Calculer l'accélération γ_3 et la distance parcourue C_3 pendant le temps t_3 avec $t_3 = 2$ s.

2.3°) Lors du régime permanent, calculer la distance parcourue C_2 ainsi que le temps t_2 . Préciser la valeur de l'accélération. Calculer le temps total t de la phase 3.

- 2.4°) On prendra :
- Ω_{1T} : Vitesse angulaire du tambour avec $\Omega_{1T} = 2 \text{ rad.s}^{-1}$.
 - Ω_M : Vitesse angulaire du moteur de levage avec $\Omega_M = 156,24 \text{ rad.s}^{-1}$.
 - R_T : Rayon du tambour avec $R_T = 0,315 \text{ m}$.
 - R_1 : Rapport de réduction en petite vitesse. $R_1 = 0,0127 = 1/78,74$
 - Ω_T' : Accélération angulaire du tambour avec $\Omega_T' = \gamma / R_T$
 - Ω_M' : Accélération angulaire du moteur avec $\Omega_M' = k \times \gamma / R_T$ et $k = 1/ R$.

Calculer les accélérations angulaires (tambour et moteur) pour chacune des phases.

Temps	t_1	t_2	t_3
Accélération			
Ω_T' (Tambour)			
Ω_M' (Moteur)			

- 2.5°) On donne :
- J_{MOT} : Inertie du moteur avec $J_{MOT} = 7,164 \text{ kg.m}^2$
 - J_{EQ} : Inertie équivalente de l'ensemble (tambour, réducteur, frein) ramené sur l'arbre moteur avec $J_{EQ} = 2,93 \text{ kg.m}^2$
 - m : Masse de la charge à lever.
 - g : Accélération de la pesanteur avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
 - T_{SR} : Couple sortie réducteur avec $T_{SR} = m \times (g + \gamma) \times R_T$
 - T_{EQ} : Couple équivalent ramené sur l'arbre moteur avec $T_{EQ} = T_{SR} / k$

Donner l'expression littérale de T_{SR} en fonction de m, R_T, g, k et Ω_M' .

2.6°) On donne : T_{MOT} : Couple moteur avec $T_{MOT} = T_{EQ} + (J_{MOT} + J_{EQ}) \times \Omega_{M'}$.

Compléter le tableau en calculant pour chacune des trois phases de fonctionnement, les couples T_{SR} , T_{EQ} et T_{MOT} .

Phases de fonctionnement	$\Omega_{M'}$	T_{SR}	T_{EQ}	T_{MOT}
Phase 1 (t_1)				
Phase 2 (t_2)				
Phase 3 (t_3)				

2.7°) On donne : I_i : Courant efficace du moteur avec $I_i = \sqrt{(I_N \times \sin \varphi_N)^2 + (I_N \times (T_{MOT}/T_N) \times \cos \varphi_N)^2}$
 i (indice pour chacune des phases)

Avec : I_N : Courant nominal moteur ; T_N : Couple nominal moteur

Compléter le tableau en calculant le courant efficace I_i du moteur pour chacune des trois phases de fonctionnement. **Vérifier** que ce courant est inférieur aux données fournies.

On donne : $T_N = 1600 \text{ Nm}$ $\cos \varphi = 0,89$ $I_N = 420 \text{ A}$ $\sin \varphi = 0,456$ $I_i < \text{à } 1,5 \times I_N$

Phases de fonctionnement	T_{MOT}	$I_{(i)}$
Phase 1 (t_1)	$T_{MOT} = 1933 \text{ Nm}$	
Phase 2 (t_2)	$T_{MOT} = 1374 \text{ Nm}$	
Phase 3 (t_3)	$T_{MOT} = 536 \text{ Nm}$	

2.8°) On donne :

$$C_{TH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

et

$$I_{TH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}}$$

Calculer les valeurs thermiques équivalentes du couple C_{TH} et du courant I_{TH} .

2.9°) Un des variateurs de vitesse proposés dans la documentation technique correspond-il à l'utilisation ? Le cas échéant, préciser la référence.

ETUDE DU MOTEUR DE LEVAGE

Pour des raisons économiques, le moteur a été conservé et adapté, par suppression des « résistances rotoriques » et court-circuitage des enroulements du rotor.

Par hypothèse simplificatrice et dans le cadre d'une approche industrielle, le moteur sera considéré comme un moteur asynchrone à rotor en court-circuit.

Le moteur de levage a fait l'objet d'une révision générale comprenant l'échange de roulements et des essais complets permettant de contrôler les caractéristiques mécaniques et électriques de la machine.

L'étude porte uniquement sur le schéma équivalent du moteur asynchrone.

ETUDE DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR UN RESEAU FIXE.

La plaque signalétique du moteur porte les indications suivantes :

230 V / 400 V ; 50 Hz ; 250 kW ; 1492 tr.min⁻¹ ; $\cos \varphi = 0,89$

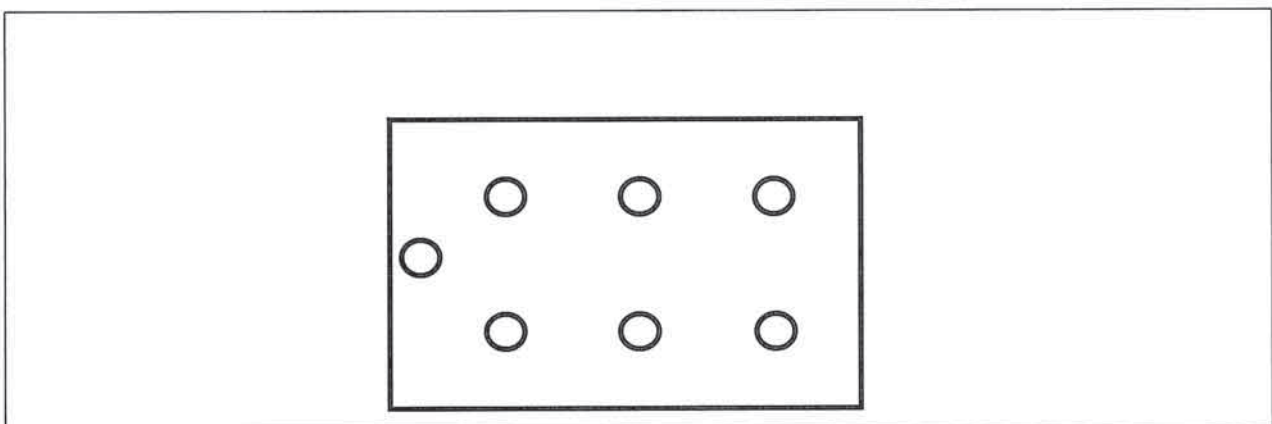
Le moteur est alimenté par un réseau triphasé équilibré 230 V / 400 V de tensions sinusoïdales de fréquence f ; on note V la valeur efficace des tensions simples et g le glissement.

On néglige toute saturation magnétique, les résistances et les inductances de fuite statoriques ainsi que les pertes mécaniques.

JUSTIFICATION DU MOTEUR DE LEVAGE.

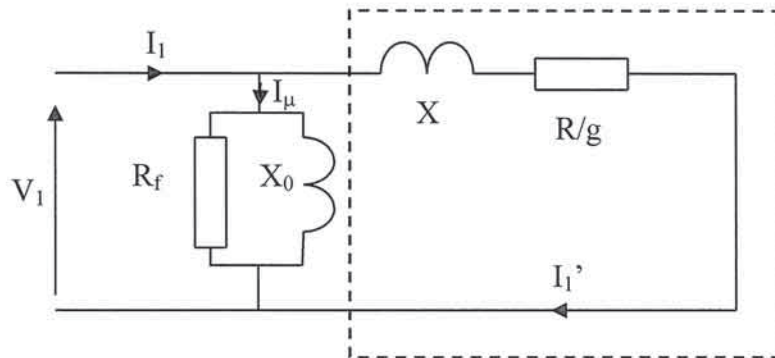
1°) **Déterminer** le nombre de paires de pôles p du moteur et calculer son glissement g .

2°) **Déterminer** le couplage du moteur et représenter la plaque à bornes complète (enroulements, alimentations, repères alphanumériques et couplage).



3°) **Calculer** le couple utile T_u du moteur.

4°) Le schéma équivalent par phase, entre phase et neutre est représenté figure ci-dessous.



Les essais effectués sur la machine à 50 Hz ont donné les résultats suivants.

Essai 1 :

- ✓ A vide effectué à la vitesse de synchronisme sous 400 V entre phases.
- ✓ La puissance absorbée est de $P_o = 1.5$ kW pour une valeur efficace de l'intensité du courant I_o de 133 A.

Essai 2 :

- ✓ Rotor bloqué sous $U_{1cc} = 80$ V
- ✓ Le courant de ligne a pour intensité efficace $I_{1cc} = 430$ A et $P_{1cc} = 1,8$ kW.

4.1°) Représenter le schéma équivalent monophasé du moteur lors de l'essai 1.

4.2°) Déterminer les valeurs des éléments R_f et X_0 . En déduire la valeur de l'inductance L_0 .

4.3°) A partir de l'essai 2, **calculer** la puissance active P_{R_f} consommée par R_f et la puissance réactive Q_{X_0} absorbée par X_0 . **Justifier** qu'il est possible, dans le cadre d'une approche industrielle, de négliger ces puissances.

4.4°) **Calculer** le courant magnétisant I_μ et le comparer à I_{1cc} . **Conclure** (On appelle Z l'impédance équivalente à R_f en parallèle à X_0).

4.5°) A partir de l'essai 2, **exprimer** la puissance active P_R absorbée par R en fonction de P_{1cc} et de R_f . **Calculer** cette puissance. En **déduire** la valeur de R .

4.6°) A partir de l'essai 2, **exprimer** la puissance réactive Q_x absorbée par X en fonction de Q_{1cc} et de X_0 . **Calculer** cette puissance et en déduire la valeur de X .

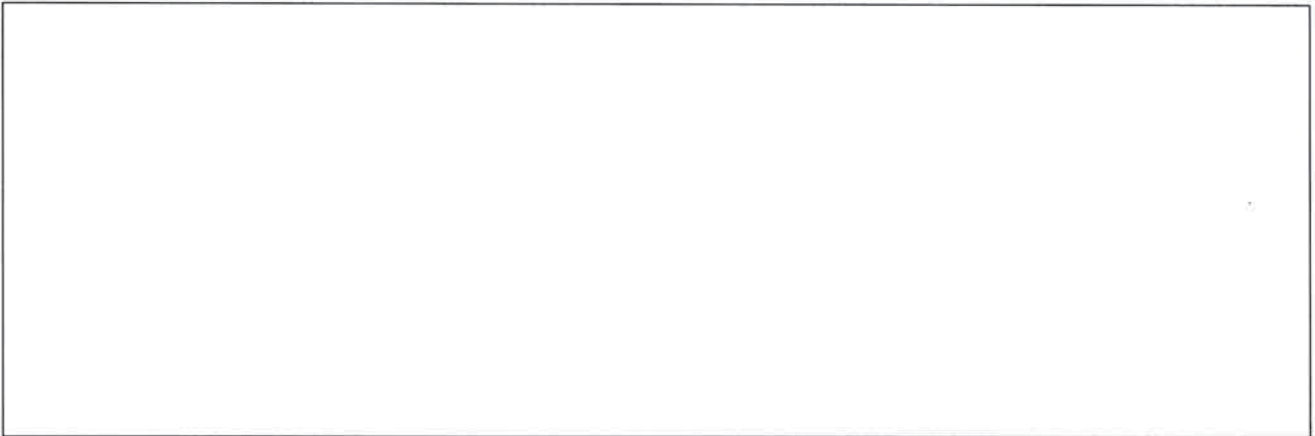
4.7°) A partir des calculs effectués, **indiquer** les grandeurs qui pourront être négligées en vue d'un dimensionnement industriel.

4.8°) **Exprimer** le courant I_1' en fonction de V_1 , de R/g , et de X . **Calculer** sa valeur.

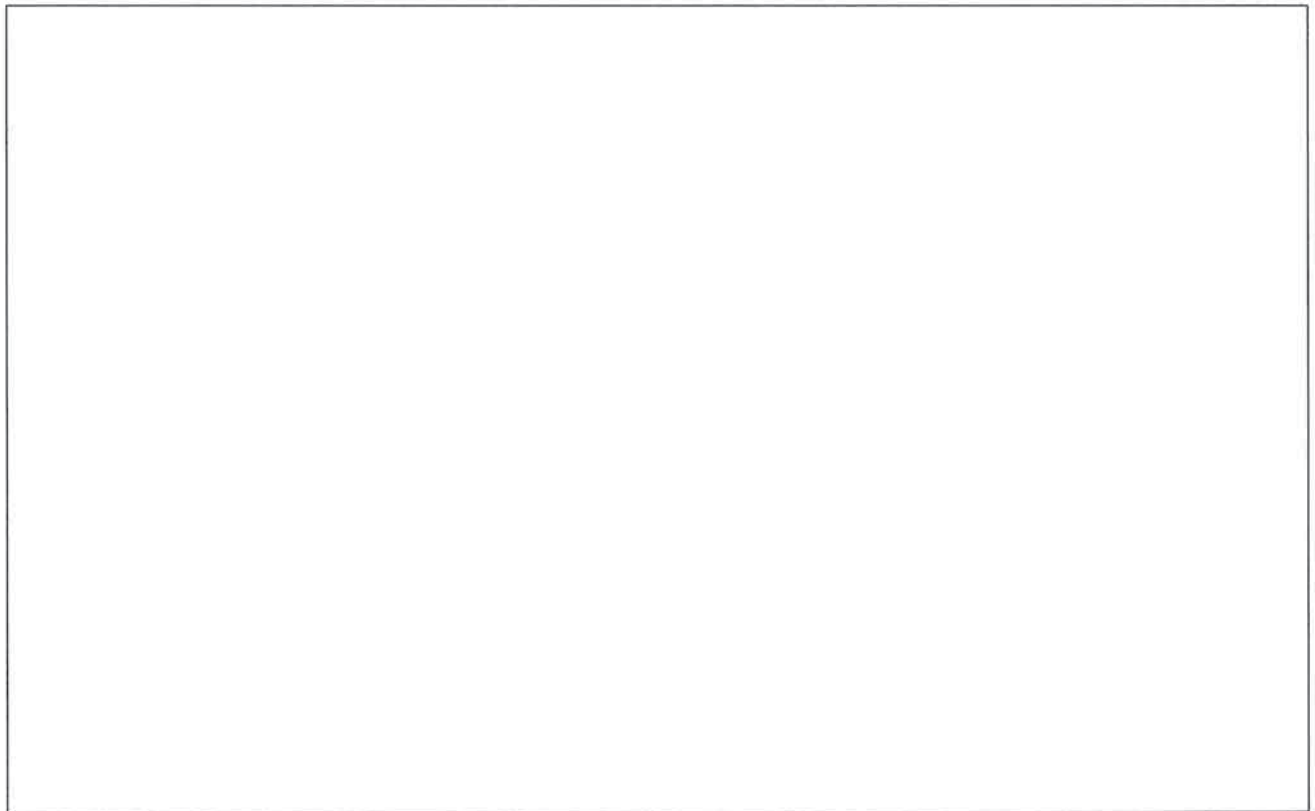
4.9°) **Exprimer** la puissance transmise P_{TR} au rotor en fonction de V_1 , de R/g , et de I_1' .

4.10°) **Exprimer** le couple électromagnétique T_{em} en fonction de cette puissance. **Vérifier** que ce couple peut s'exprimer par la relation : $T_{em} = K \times (V_1^2 / \omega) \times (R/g) / [(R/g)^2 + X^2]$

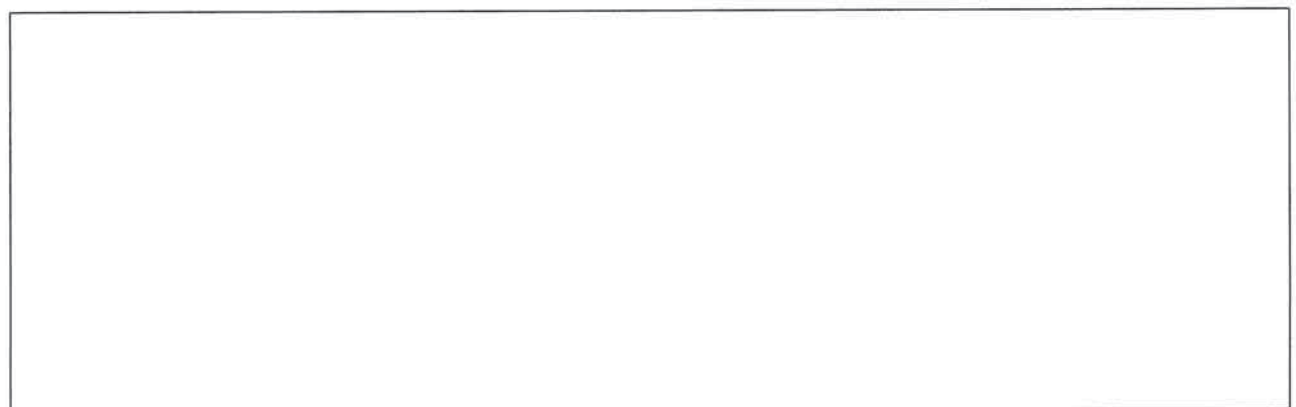
4.11°) Calculer le couple électromagnétique T_{em} .



4.12°) Indiquer pour quelle valeur de glissement g_{max} le moment du couple est maximal. **Calculer** la valeur du couple maximum T_{max} et la vitesse de rotation correspondante N_{max} .



4.13°) Conclure sur le couple maximal. Le moteur choisi est-il adapté à l'utilisation ?



ETUDE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Deux transformateurs triphasés sont situés dans la grue CB2. Le premier, **TR1 CB2**, de faible puissance est dédié à l'éclairage, le chauffage de la cabine et l'alimentation des prises BTA.

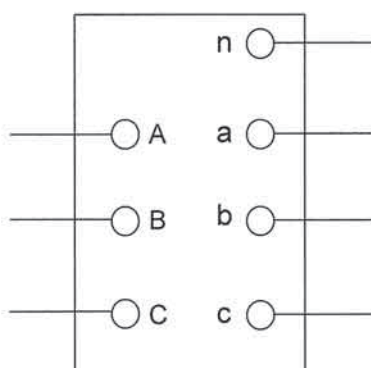
Le second, **TR2 CB2**, de type immergé à remplissage total, est destiné à l'alimentation des moteurs des différents mouvements de manutention (levage, relevage, translation et orientation).

COMPORTEMENT DU TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION TR2 CB2.

Le circuit magnétique a une masse de 840 kg. Il est réalisé en tôles d'acier feuilletées à faibles pertes (1,6 W/kg pour une induction de 1 T). La section des noyaux est de 600 cm².

1°) Couplage et indice horaire :

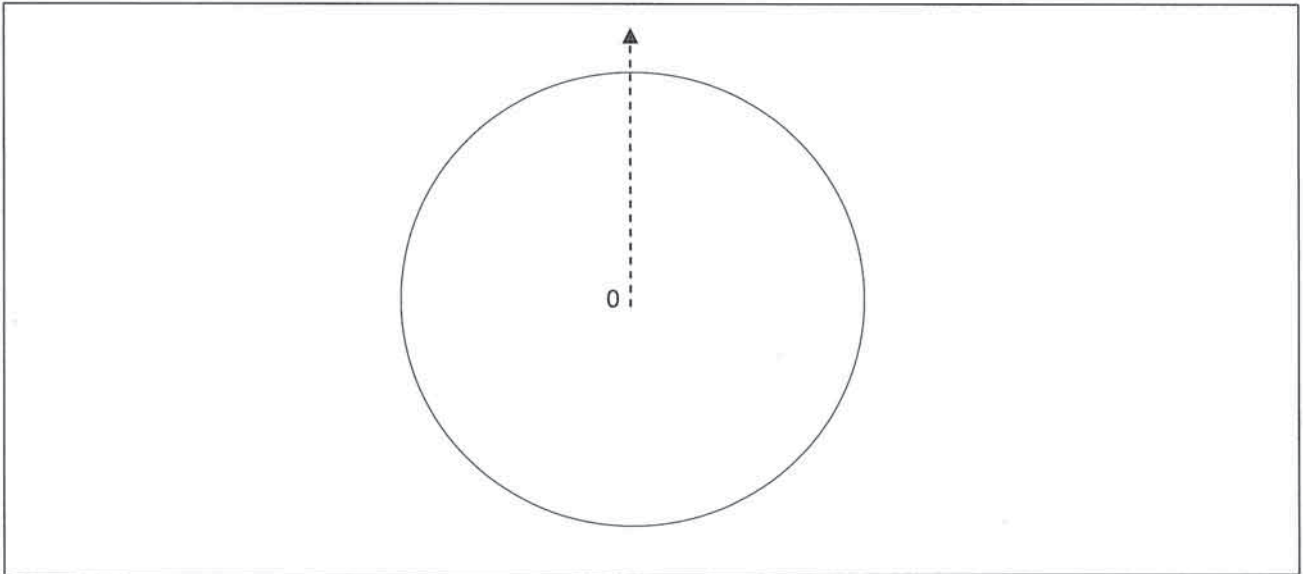
1.1°) **Relever** le couplage et l'indice horaire du transformateur. **Compléter** le schéma représentatif des enroulements côtés HT et BT.



1.2°) **Préciser** ce que représente l'indice horaire d'un transformateur ?

Empty box for the answer to question 1.2°.

1.3°) **Tracer** le diagramme vectoriel des tensions simples primaires et secondaires correspondant.



2°) **Calcul des éléments du transformateur :**

2.1°) **Calculer** le rapport de transformation M entre les tensions composées nominales.

2.2°) **Donner** la relation entre M et m (rapport entre le nombre de spires). **Calculer** m .

2.3°) **Justifier** les valeurs des courants primaire (I_1) et secondaire (I_2) portées sur la plaque signalétique.

2.4°) **Donner** la relation permettant de déterminer les pertes ferromagnétiques. **Préciser** où elles sont situées dans un transformateur et ce que l'on peut faire pour les réduire.

2.5°) Calculer les pertes ferromagnétiques P_{fer} totales du transformateur pour une induction maximale $B_M = 1.2$ T. **Comparer** le résultat aux indications fournies par le constructeur.

$$P_{fer} = C_{fer} \times (f / f_0)^\beta \times (B / B_0)^\eta \times M \quad C_{fer} = 1,6 \text{ W/kg pour } B_0 = 1 \text{ T à } f_0 = 50 \text{ Hz et } \beta = 2 ; \eta = 2$$

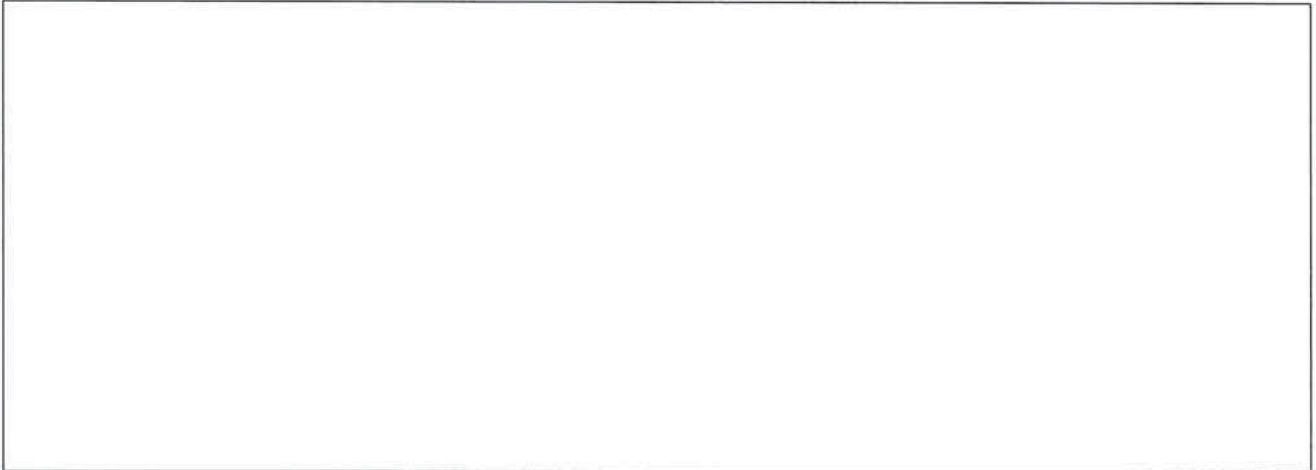
2.6°) Calculer le nombre de spires N_1 de chaque enroulement primaire pour une induction maximale dans le noyau $B_M = 1,2$ T.

2.7°) En déduire le nombre de spires N_2 de chaque enroulement secondaire.

2.8°) Calculer la résistance R_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.

2.9°) Donner la définition de U_{cc} (en %). **Calculer** sa valeur.

2.10°) Calculer la réactance X_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.



2.11°) Le courant à vide est très faible devant le courant primaire nominal, la réactance et l'inductance de fuite au primaire peuvent donc être négligées. Dans ces conditions, **représenter** le schéma équivalent au primaire du transformateur à vide, vu entre phase et neutre (on prendra R_f et X_m côté HT). **Préciser** ce que représentent R_f et X_m .



2.12°) Calculer les valeurs des éléments R_f et X_m du schéma précédent.



2.13°) Calculer les chutes de tensions simples ΔV_2 et composées ΔU_2 pour un $\cos \varphi_2 = 0,8$. Comparer le résultat aux spécifications du constructeur.

2.14°) Vérifier la valeur η du rendement du transformateur.

ETUDE DU POSTE DE LIVRAISON

Sur le quai « Chef de baie », lieu de chargement et déchargement des marchandises où sont situées les quatre grues CB, sont disposées les fosses de répartition « Feeder 1 » et « Feeder 2 ».

Chaque Feeder permet d'alimenter deux grues : Le feeder 1 alimente les grues CB1 et CB10, le feeder 2 alimente les grues CB2 et CB11.

L'étude porte sur une partie du poste de livraison de « Chef de baie » composée de cinq transformateurs : Trois transformateurs de puissance apparente 1400 kVA (15 kV / 5,5 kV) et deux transformateurs de puissance apparente 400 kVA (15,5 kV / 0,4 kV).

Afin de déterminer la protection à installer dans le hangar 31, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de la liaison poste « chef de baie / Hangar 31 » pour déterminer le pouvoir de coupure (P_{dc}) des protections. TR1 alimente TGBT 1 et TR2 alimente TGBT 2.

Un court-circuit triphasé est simulé en amont de D21. Il est limité par l'impédance du réseau Z_A , l'impédance du transformateur Z_{TR} et l'impédance des câbles Z_C .

Données de références :

Réseau amont (ramené au secondaire) : $P_{cc} = 500 \text{ MVA}$ $R_A = 0,05 \text{ m}\Omega$ $X_A = 0,35 \text{ m}\Omega$
Transformateur TR2 : $S = 400 \text{ kVA}$ $U_{cc} = 4 \%$ $P_{cu} = 4800 \text{ W}$ $U_{20} = 410 \text{ V}$
Câble C_2 : $L_2 = 150 \text{ m}$ $S_2 = 2 \times 120 \text{ mm}^2$ résistivité du cuivre $\rho = 22,5 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Réactance linéique (câbles séparés): $X_{cl} = 0,24 \text{ m}\Omega/\text{m}$
TGBT 1 et TGBT 2 : On négligera l'influence des jeux de barre

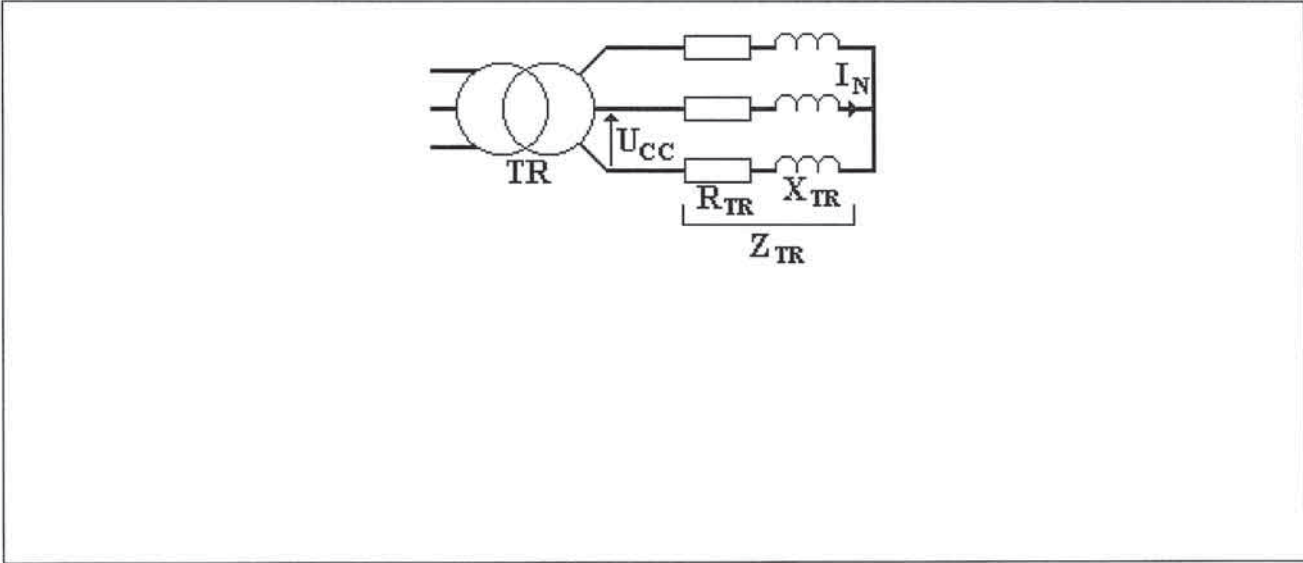
VERIFICATION DU CHOIX DES CABLES D'ALIMENTATION.

1°) **Etablir** le schéma équivalent par phase.

2°) **Déterminer** le courant nominal I_{2n} au secondaire de TR2.

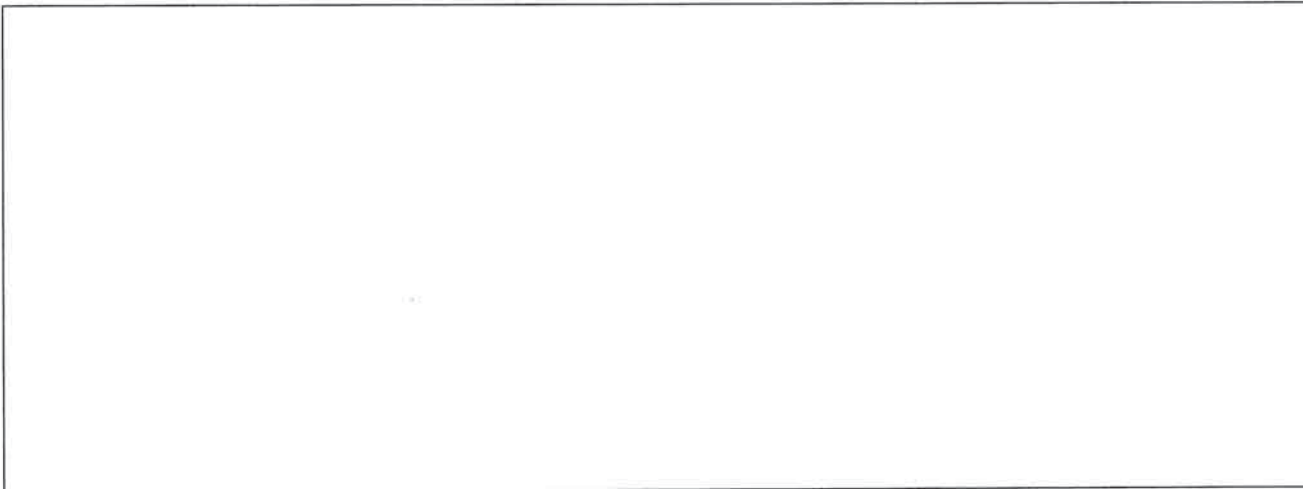
3°) **Déterminer** la résistance d'enroulement R_{TR} vue du secondaire de TR2.

4°) Déterminer, à partir du schéma ci-dessous, l'impédance du secondaire Z_{TR} de TR2. En déduire la réactance X_{TR} .

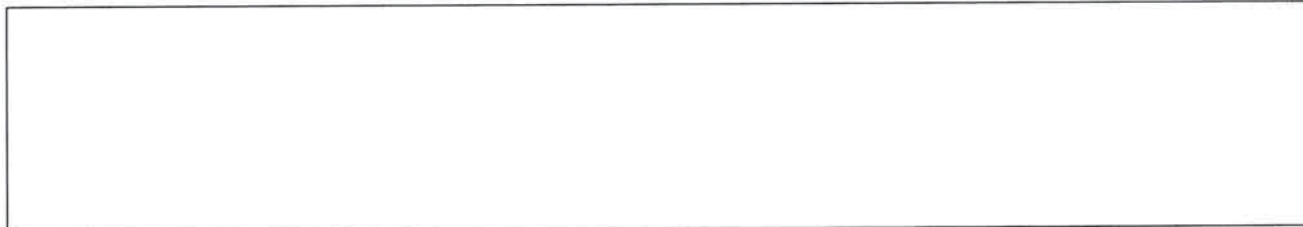


5°) Calculer l'impédance totale Z_1 à prendre en compte afin de déterminer la valeur minimale du Pdc du disjoncteur principal D20 situé au départ du TGBT 2 en protection amont.

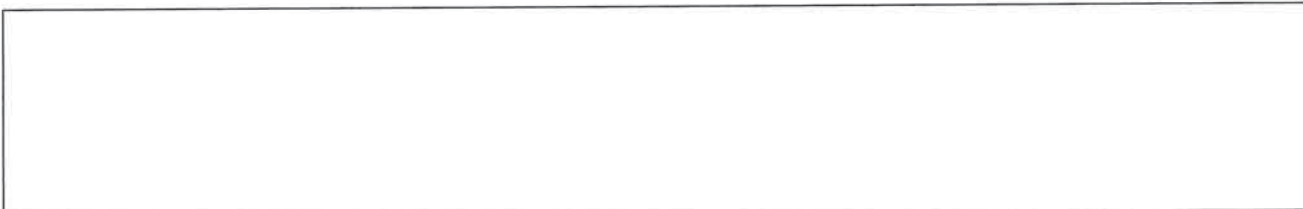
Calculer le court-circuit I_{cc1} en aval de D20 sachant que la réactance du disjoncteur $X_d = 0,15 \text{ m}\Omega$ et sa résistance $R_d = 0$.



6°) Déterminer la résistance R_{C2} du câble terminal C_2 du TGBT 2 au hangar 31.



7°) Déterminer la réactance X_{C2} du câble terminal C_2 du TGBT 2 au hangar 31.



8°) Calculer l'impédance totale Z_2 à prendre en compte.

9°) Calculer le court-circuit I_{cc2} en aval du disjoncteur D21 et **conclure** sur la valeur minimale du Pdc du disjoncteur D21 situé en protection amont du hangar 31.

10°) Calculer la chute de tension ΔV du câble terminal C_2 et **vérifier** la conformité de la chute de tension relative $\Delta V / V$ qui doit, selon la norme, être inférieure à 8 % de la tension simple à vide V_0 . L'utilisation impose $\cos \varphi = 0,8$; $b = 2$ en monophasé ou continu et 1 en triphasé équilibré.

On rappelle :
$$\Delta v = b \times [\rho \times (L / S) \cos \varphi + X_{cl} \times L \times \sin \varphi] \times I_b$$