

**Partie A : Electrification d'une ligne ferroviaire
(à faire sur copies séparées)**

L'usage des notes de cours et du téléphone portable est interdit durant l'examen.

EXERCICE 1 : CONNAISSANCE GENERALE

Questions à traiter

- 1) Présentez les avantages et inconvénient des engins de traction électrique et autonome (thermique).
- 2) Justifiez de l'électrification d'une ligne.
- 3) Présentez l'ensemble des types d'alimentations électriques ferroviaire.
- 4) Donnez le schéma d'électrification d'une ligne ferroviaire alimenté à tension continue par trois sous-stations.
- 5) Donnez le schéma d'électrification d'une ligne ferroviaire alimenté à tension alternative par trois sous-stations. Expliquez le rôle des postes de mise en parallèle.

EXERCICE 2 : ELECTRIFICATION D'UNE LIGNE FERROVIAIRE

Cas d'étude

Cette étude porte sur l'électrification d'une ligne ferroviaire sous tension 1500V DC en antenne et sans mise en parallèle. La ligne d'une distance de 4km est exploitée par le gestionnaire d'infrastructure qui autorise une grille de circulation avec 4 trains au maximum. L'espacement de ces 4 trains est considéré constant et identique. Les calculs cinématiques ont montrés que l'effort de traction sur cette zone nécessitait des engins d'une puissance nominale de 930kW (au pantographe).

La modélisation physique du circuit de traction est complexe et nécessite des approximations et simplifications. Les hypothèses sont les suivantes :

- Tension continue ;
- Tension U_{ss} à la sortie de la sous-station constante pour toutes les sous-stations et donc indépendante de l'intensité. En réalité cette tension est fonction de la tension du secondaire du transformateur et donc du courant de charge ;
- Courant I_{train} constant impliquant la non-prise en compte des puissances de rabatement fonction de la tension caténaire au pantographe.

Type d'alimentation	Minimum	Valeur nominale (V)	Maximum
DC	1 000	1 500	1 800

- **Tableau 1.** : Valeurs normatives d'une alimentation 1500V DC

Composant	Résistivité électrique (ρ_{elec}) [$\Omega \cdot mm^2/km$]	Section (S_{elec}) [mm^2]
Caténaire	18,8	100 à 400
Rail	130	6450

- **Tableau 2.** : Caractéristiques de la ligne électrique

Questions à traiter

- 1) Donnez l'expression de chacune des tensions des pantographes des trains en fonction de la tension à la sous-station qui est fixée à 1500V.
- 2) Calculez l'intensité absorbée par chacun des trains.
- 3) Pour valider le plan de tension, calculez la tension de chacun des trains en considérant une section de caténaire maximale (400mm²).
- 4) Afin de réduire les coûts de l'infrastructure, calculez la section de caténaire minimale permettant de satisfaire le plan de tension.
- 5) Suite à une augmentation de la vitesse maximale sur la ligne, la puissance des trains est de 1200 kW, calculez le nouveau plan de tension. Si celui-ci n'est pas satisfait, identifiez le ou les trains circulant sous tension en dehors des normes et proposer une solution de renforcement.
- 6) La solution de renforcement étant refusée pour des raisons de coût, déterminez la puissance maximale des trains pouvant circuler sur la ligne en considérant une section maximale de caténaire (400mm²). Ce calcul est à réaliser en considérant que la puissance de tous les trains est identique sur toute la ligne.
- 7) Le gestionnaire d'infrastructure vous demande d'étudier également la solution qui consiste à maintenir le ou les trains à 1200kW quand le plan de tension respecte les normes et à réduire la puissance uniquement du ou des trains quand la tension normative au pantographe n'est pas respectée. Dans ces conditions calculez la puissance maximale du ou / des trains qui permettra de respecter le plan de tension.

Partie B : Chaines de traction électriques (à faire sur copies séparées)

L'usage des notes de cours et du téléphone portable est interdit durant l'examen.

EXERCICE 1 : CONNAISSANCE GENERALE

Questions à traiter

- 1) Citer les quatre différentes chaînes de traction actuelles.
- 2) Citer au moins quatre avantages d'utiliser un PMCF (Pont Monophasé à Commutation Forcée) plutôt qu'un pont mixte dans les chaînes de traction récentes.
- 3) Comment s'appelle la manière de contrôler en parallèle les PMCF au secondaire du transformateur afin d'annuler les harmoniques de commutation sur le courant primaire?
- 4) Quelles sont les quatre fonctions de base d'une chaîne de traction ?
- 5) Quels sont les principaux composants d'une chaîne de traction bi-tensions ?

EXERCICE 2 : ASSOCIATION CONVERTISSEUR- MACHINE ASYNCHRONE

Cas d'étude

Une rame du tramway de Strasbourg se compose de quatre bogies dont trois sont moteurs. Un bogie moteur est composé de quatre roues entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé par l'intermédiaire d'un réducteur. Une rame de tramway est donc motorisée par douze moteurs asynchrones. Les dimensions d'une rame de tramway sont 33,10 m x 2,4 m x 3,1 m (longueur x largeur x hauteur). La vitesse maximale en service de la rame est de 60 km/h.

Les moteurs asynchrones sont définis par les caractéristiques ci-dessous :

- Puissance utile nominale : $P_{UN} = 24,6 \text{ kW}$
- Couple utile nominal : $C_{UN} = 90 \text{ Nm}$
- Tension nominale entre phases : $U_{SN} = 585 \text{ V}$
- Fréquence statorique nominale : $f_{SN} = 88 \text{ Hz}$
- Nombre de paires de pôles : $p = 2$
- Facteur de puissance nominal : $(\cos(\varphi))_N = 0,7341$
- Rendement nominal : $\eta_N = 0,9309$
- Moment d'inertie du rotor : $J = 0,112 \text{ kg.m}^2$.

Le schéma simplifié de la chaîne de traction retenu pour le tramway de Strasbourg est donné en Annexe 1. Chaque onduleur de traction alimente deux des quatre machines asynchrones placées sur chaque bogie. Cette commande indépendante des roues situées à droite et à gauche du bogie permet d'améliorer les passages en courbe.

L'association du convertisseur et de la motorisation doit permettre le fonctionnement de la machine asynchrone dans les quatre quadrants mécaniques c'est-à-dire pour le tramway de Strasbourg, la circulation dans les deux sens de marche et le freinage électrique.

Nous supposons dans cette partie que les tensions alimentant les machines asynchrones sont triphasées sinusoïdales et que le modèle équivalent par phase (ramené au stator) de ces machines peut être assimilé au schéma simplifié de la Figure 1 (page 2).

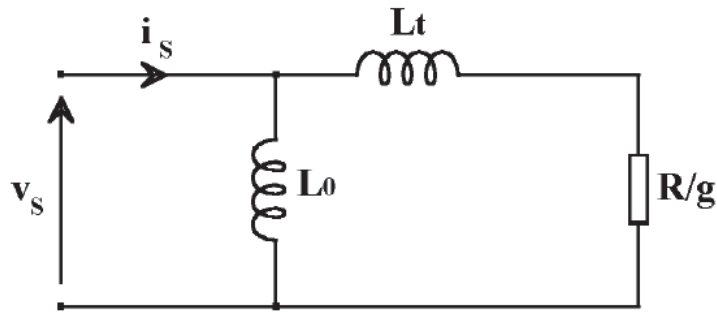


Figure 1

Les valeurs des éléments du modèle équivalent par phase sont :

- $R = 0,138 \Omega$
- $L_t = 2,38 \text{ mH}$
- $L_0 = 26,55 \text{ mH}$

Questions à traiter

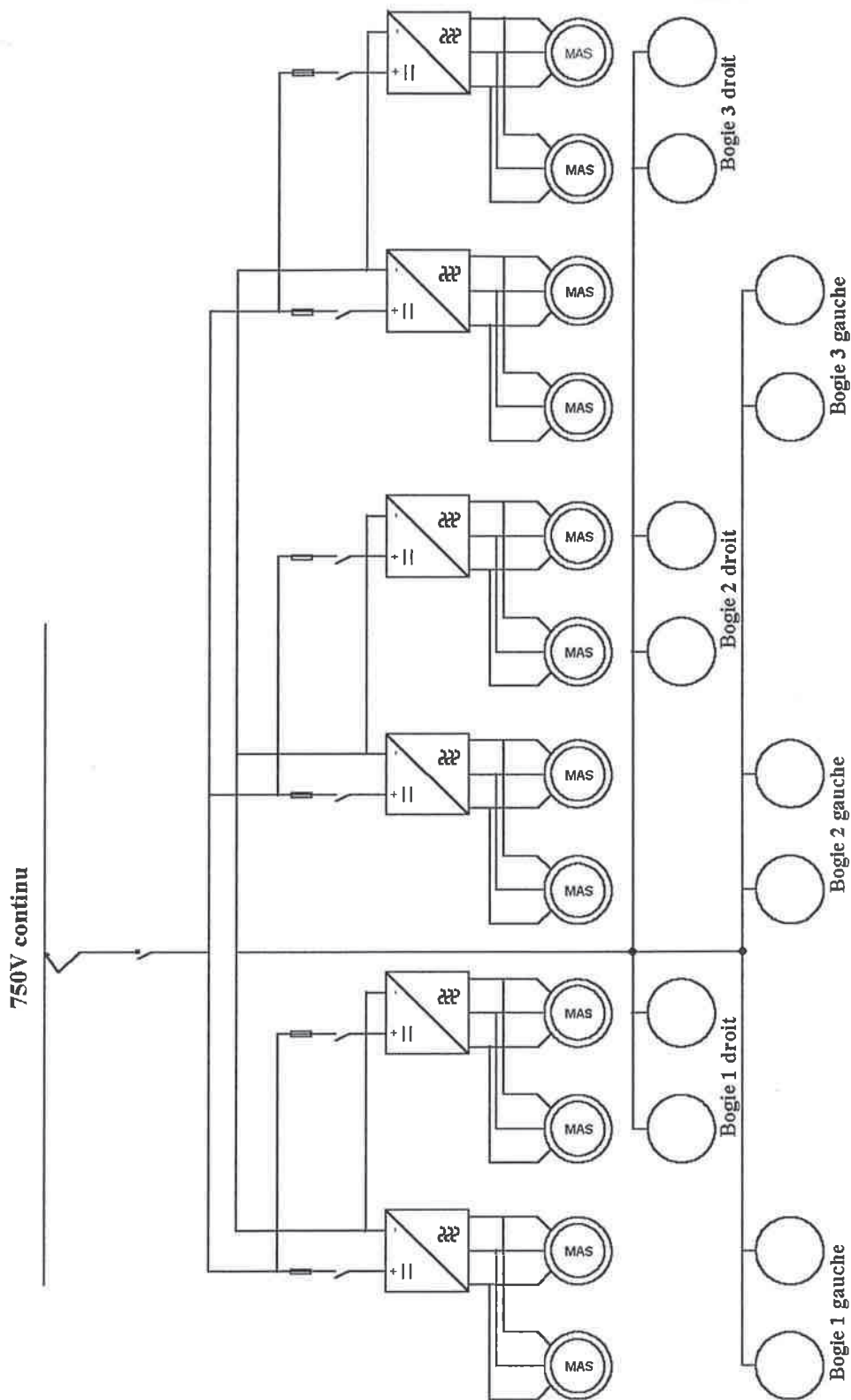
- 1) A partir des caractéristiques des moteurs asynchrones, au point de fonctionnement nominal, calculer le courant statorique, la vitesse de rotation et la vitesse de synchronisme.
- 2) A partir du modèle équivalent par phase de la Figure 1, donner une signification physique des éléments L_0 , L_t , R et g . Quels sont les deux autres éléments qui n'ont pas été pris en compte pour le modèle équivalent ?
- 3) Déterminer l'expression du couple électromagnétique C_{em} en fonction de V_{Seff} , L_t , R , g , p et ω_s (pulsation des tensions statoriques). Vous mettrez le résultat sous la forme ci-dessous en précisant les expressions et valeurs de A et de g_0 :

$$C_{em} = \frac{A}{\frac{g}{g_0} + \frac{g_0}{g}}$$

- 4) Déterminer l'expression du déphasage φ_s de v_s par rapport à i_s en fonction de L_0 , L_t , R , g et ω_s .
- 5) Donner les valeurs numériques de φ_s pour $V_{Seff} = 338 \text{ V}$, $f_s = 88 \text{ Hz}$, $p = 2$ et pour $C_{em} = 90 \text{ Nm}$ puis $C_{em} = -90 \text{ Nm}$.
- 6) Préciser la vitesse de rotation du moteur N_r (en tr/min) pour $f_s = 88 \text{ Hz}$, $C_{em} = 90 \text{ Nm}$ puis $C_{em} = -90 \text{ Nm}$.
- 7) Compléter le Document Réponse 1 en représentant les tensions v_{BN} , v_{CN} et les courants i_A , i_B , i_C dans chacun des quatre quadrants mécaniques. Vous choisirez comme déphasages des tensions simples par rapport aux courants, ceux calculés à la question 5) en considérant le même couple électromagnétique en valeur absolue pour chacun des quatre quadrants $|C_{em}| = 90 \text{ Nm}$.
- 8) Si on désire faire varier le point de fonctionnement en vitesse du tramway tout en garantissant un couple maximum constant, quel type de commande de l'onduleur + moteur proposeriez-vous ? Quelles sont les deux phases de cette commande selon la vitesse de rotation ?

Annexe 1

Schéma simplifié de la chaîne de traction



Document Réponse 1 (le faire avec soin et utiliser des couleurs)

NOM:
PRÉNOM:

