

SESSION 2009

---

**CONCOURS EXTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

**Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**COMPOSITION D'ÉLECTROTECHNIQUE**

Durée : 6 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.*

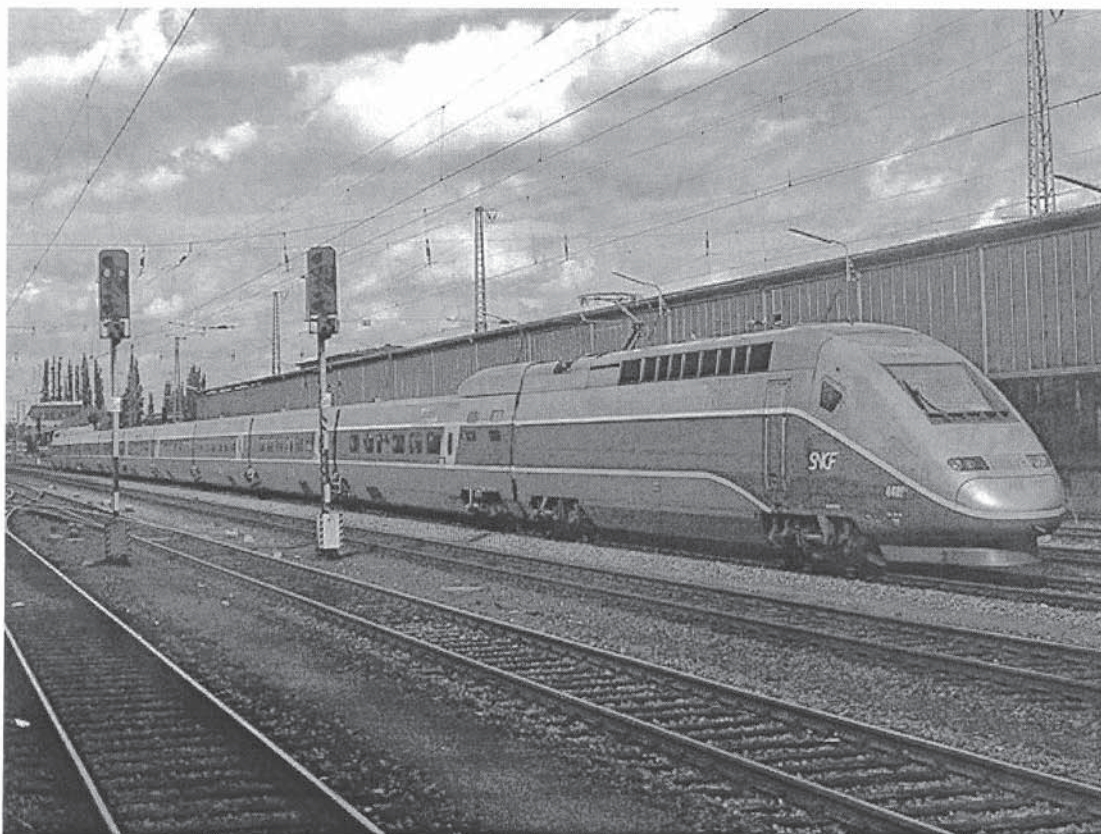
**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement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

## A. Présentation du TGV POS

En Juin 2007, la SNCF assurait la mise en service de la L.G.V. Est, offrant au départ de Paris de nouvelles relations à grande vitesse vers Strasbourg, Metz, Munich, Francfort, Zurich et Luxembourg. Avec une vitesse commerciale de 320km/h sur le parcours français et de 300km/h sur les L.G.V. allemandes, le TGV relie Paris à Francfort en 3h45 et Paris à Munich en 6h, procurant un gain de temps très appréciable. Pour mettre en œuvre ces nouveaux flux de trafic et satisfaire ses exigences commerciales, la SNCF s'est équipée de 15 rames internationales appelées TGV POS (Paris Ost Frankreich Süd Deutschland).

La motorisation de ces nouvelles rames TGV, conçues par l'industriel ALSTOM, répond aux contraintes suivantes :

- La pénétration sur les réseaux allemand et suisse nécessite des rames tri tension adaptées aux tensions 25kV-50Hz monophasée et 1500V continu du réseau français, et, d'autre part, à la tension spécifique des réseaux allemand et suisse : le 15kV-16,7Hz.
- La limitation des frais d'étude et de développement conduisant à une composition similaire à celle d'un TGV classique : Motrice + 8 Remorques + Motrice, et à une structure de la motrice dérivée des développements déjà réalisés sur des projets en cours de construction;
- La limitation des risques en matière d'innovation en vue d'obtenir une « homologation » sur les réseaux allemands, suisses et luxembourgeois ;
- La prise en compte des nouvelles réglementations nationales et internationales relatives à l'interopérabilité (S.T.I. : Spécifications Techniques d'Interopérabilité), à la certification « CE » et au respect de l'environnement.



## **Architecture de la motorisation du TGV POS**

En collaboration avec l'opérateur ferroviaire, l'entreprise ALSTOM a conçu et réalisé une nouvelle chaîne de traction modulaire à motorisation asynchrone. Elle répond aux exigences des S.T.I. et à la réglementation européenne en termes,

- de masse,
- de performance dynamique,
- de facteur de puissance,
- d'efficacité énergétique,
- d'accès aux infrastructures des réseaux français, allemand, suisse et luxembourgeois ;

et à la couplabilité avec les TGV en service sur le réseau français.

Le document **D-1** présente de manière synthétique l'architecture des équipements électriques d'une rame TGV POS. Chaque motrice est constituée de 4 ensembles « essieux moteurs » regroupés au sein de deux bloc moteurs, un par bogie. Chacun des blocs moteurs dispose de ses auxiliaires. Les circuits de chauffage, de climatisation, d'éclairage et de restauration ainsi que les circuits de charge des batteries et de fourniture d'air comprimé de la rame sont alimentés par les « bloc commun ».

### **L'étude proposée porte sur la motorisation d'une rame POS.**

*Le questionnement est structuré en quatre parties indépendantes :*

A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciés par les correcteurs.

Si au cours de l'épreuve, le candidat détecte ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale par écrit dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant précisément les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

#### **B1 : Puissance mécanique nécessaire à la marche du train**

*Dimensionnement de la motorisation à partir des grandeurs mécaniques caractérisant les performances du train.*

#### **B2 : Etude de l'équipement électrique d'une motrice**

*Analyse du schéma de l'alimentation électrique d'un moteur de traction et étude des grandeurs électriques et mécaniques à partir du modèle équivalent.*

#### **B3 : Etude des Ponts Monophasés à Commutation Forcée**

*Analyse du fonctionnement d'un PMCF et dimensionnement des éléments de filtrage associés. Etude de l'entrelacement des PMCF et du spectre fréquentiel du courant absorbé sur la caténaire.*

#### **B4 : Etude thermique des modules PALIX**

*Calcul des pertes dans les semiconducteurs et étude thermique des modules PALIX utilisés pour la réalisation des convertisseurs de la chaîne de traction (PMCF et Onduleur de Traction).*

## B. Questionnement

### B1. Puissance mécanique nécessaire à la marche du train

Pour mener l'étude mécanique, on assimile l'ensemble de la rame (les 2 motrices + les voitures voyageurs) à un point matériel sur lequel s'exercent différentes forces, conformément à la figure 1.1.

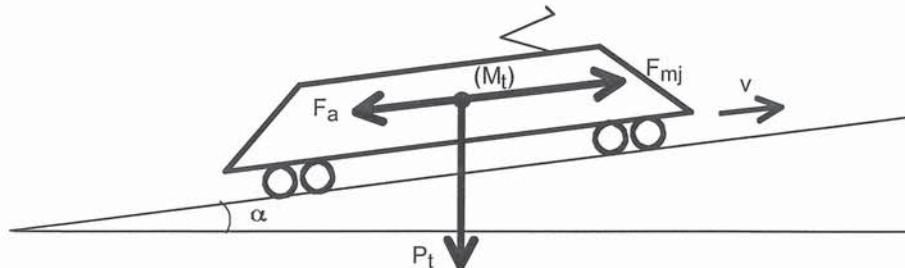


Fig 1.1 : système « train en mouvement »

Les principales grandeurs mécaniques qui caractérisent le système "train en mouvement" sont :

$M_t$  : masse totale du train ;

$F_a$  : résistance à l'avancement du train ; elle englobe les frottements roues/rails et les frottements aérodynamiques ;

$F_i$  : composante de l'effort résistant due à la gravité, fonction de la pente ;

$F_{rj}$  : effort résistant total à la jante ;

$F_{mj}$  : effort moteur à la jante ; correspond à l'effort développé par la motorisation et transmis par l'ensemble des roues motrices ; la force  $F_{mj}$  est positive en traction, elle est négative en freinage ;

$F_{mj_{max}}$  : effort moteur maximal à la jante ; est fonction des caractéristiques limites des moteurs et de la loi de commande appliquée ; dépend de la vitesse et est donné par la caractéristique de traction ;

$v$  : vitesse de déplacement du train (exprimée en m/s) ;

$V$  : vitesse de déplacement du train (exprimée en km/h) ;

$i$  : déclivité ou inclinaison (exprimée en ‰ (pour mille)) ; caractérise le profil de la voie ;  $i$  est positif en montée, négatif en descente ;

$\gamma$  : accélération ;

$g$  : accélération de la pesanteur (on prendra :  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

#### Données numériques :

- Masse totale du train :  $M_t = 416$  tonnes ;
- Vitesse maximale sous caténaire 25 kV :  $V1_{max} = 320$  km/h ;
- Vitesse maximale sous caténaire 15 kV :  $V2_{max} = 300$  km/h.

Une note de calcul interne à la SNCF, donnée en annexe (document D-2), précise la méthode de détermination de la résistance à l'avancement des matériels roulant sur rails.

**Le traitement des questions Q1.2 à Q1.4 nécessite l'utilisation du document réponse DR1**

**Q1.1 :** Pour une vitesse de déplacement constante, donner l'expression de l'effort résistant à la jante  $F_{rj}$  en fonction de  $F_a$ ,  $M_t$  et  $i$ .

**Q1.2 :** Calculer la résistance à l'avancement  $F_a$ , pour plusieurs valeurs de la vitesse comprises entre 0 et la vitesse maximale de la rame (320 km/h). Les résultats seront présentés dans le tableau 1 du document réponse **DR1**.

*Le trajet Paris – Munich comporte plusieurs rampes de déclivité égale à 35 ‰, le maximum de pente atteignant 40 ‰ de déclivité entre Francfort et Cologne.*

**Q1.3 :** Calculer la composante de l'effort due à la gravité  $F_i$  dans une rampe de déclivité égale à 35 ‰. En déduire, pour ce profil de voie, l'effort résistant à la jante  $F_{rj}$  en fonction de la vitesse. Les résultats seront présentés dans le tableau 2 du document réponse **DR1**.

*Sur le document réponse DR1 est représentée la caractéristique de traction effort/vitesse de la motorisation de la rame TGV POS, pour les 2 types d'alimentation : 25 kV sur le réseau français et 15 kV sur le réseau allemand.*

**Q1.4 :** A partir des résultats précédents, tracer dans le plan effort/vitesse, les graphes représentatifs de l'effort résistant à la jante pour une marche en palier (déclivité nulle) et pour la marche dans une rampe de déclivité égale à 35 ‰.

**Q1.5 :** La caractéristique de traction  $F_{mjmax} = f(V)$  présente, en fonction de la vitesse, 2 régimes de fonctionnement distincts. Préciser, pour chaque régime, le mode de contrôle des moteurs asynchrones de traction.

*On souhaite vérifier les performances de la motorisation en accélération.*

*Dans la pratique, pour tenir compte de l'inertie des masses tournantes, on majore la masse totale du train (pour un TGV, le coefficient de majoration est :  $k = 1,04$ ).  $k.M_t$  représente la masse fictive ramenée aux jantes de l'engin moteur.*

**Q1.6 :** En appliquant l'équation fondamentale de la dynamique au système "train en mouvement", écrire la relation liant  $F_{mj}$ ,  $F_a$ ,  $F_i$ ,  $M_t$  et  $\gamma$ .

**Q1.7 :** Calculer l'accélération maximale au démarrage du train sur voie à déclivité nulle.

**Q1.8 :** En considérant une accélération constante, calculer la distance nécessaire pour atteindre la vitesse de 100 km/h. (on prendra pour ce calcul la valeur moyenne de  $\gamma$  entre  $V = 0$  et  $V=100$  km/h).

*Les exigences des STI (spécifications techniques d'interopérabilité) sur le matériel roulant imposent, à vitesse maximale, une accélération résiduelle en palier (déclivité nulle) de 0,05 m/s<sup>2</sup> au minimum.*

**Q1.9 :** Calculer l'accélération résiduelle en palier,

- sous caténaire 15kV (réseau allemand), à la vitesse maximale de 300 km/h ;
- sous caténaire 25kV (réseau français), à la vitesse maximale de 320 km/h.

Vérifier que la spécification concernant ce paramètre est tenue.

A partir des résultats précédents, on va vérifier les caractéristiques mécaniques des moteurs de traction.

8 moteurs, de type asynchrone à cage, équipent l'ensemble de la rame.

Chacune des 2 motrices est constituée de 4 ensembles "essieux-moteurs" regroupés en 2 blocs moteurs, un par bogie. Les moteurs, associés à des réducteurs, sont fixés sous la caisse de la motrice. Pour compenser les mouvements relatifs de la caisse et du bogie, la transmission entre un moto-réducteur et l'essieu est réalisée par arbre télescopique à cardans.

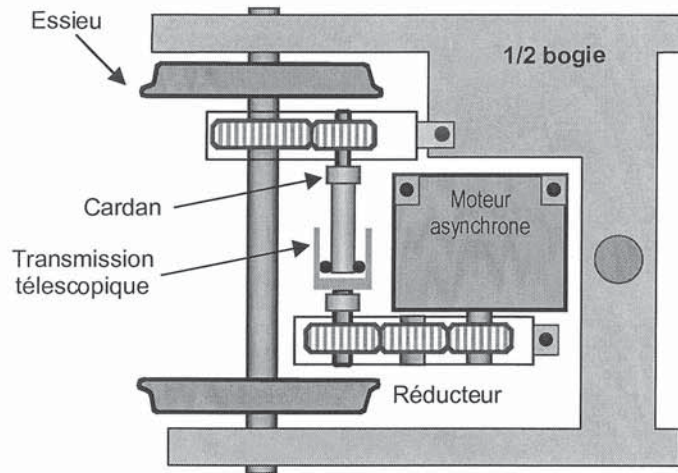


Fig 1.2 : Schéma de la transmission moteur – essieu

**Caractéristiques de la transmission mécanique :**

- rapport de réduction (vitesse sur l'arbre moteur / vitesse sur l'arbre de l'essieu) :  $R = 1,977$  ;
- rendement réducteur + transmission :  $\eta_t = 0,97$  ;
- diamètre des roues :  $d = 900$  mm.

On admet que la puissance nécessaire pour développer l'effort de traction est uniformément répartie sur les 8 moteurs.

**Q1.10 :** Calculer le couple  $C_{dem}$  que doit développer chaque moteur, sur son arbre, pour fournir l'effort de traction à la jante  $F_{mj_{max}}$ , au démarrage du train.

**Q1.11 :** Calculer la vitesse de rotation maximale  $N_{mot}$  (en tr/mn) sur l'arbre moteur, quand la rame se déplace à 320 km/h.

**Q1.12 :** Calculer la puissance  $P_{mot}$  que doit fournir chaque moteur pour produire l'effort à la jante  $F_{mj_{max}}$ , à la vitesse maximale du train sur le réseau français et sur le réseau allemand.

## B2. Etude de l'équipement électrique d'une motrice

Chaque motrice comporte 4 moteurs de type asynchrone, rotor à cage.

Le document **D-3** représente le schéma de la chaîne d'alimentation électrique d'un moteur, comprenant les équipements suivants :

- 2 pantographes PT1 et PT2, de technologies différentes, pour le captage du courant sur la caténaire. PT1 est utilisé sur le réseau 25 kV monophasé et PT2 sur le réseau 15 kV monophasé ainsi que sur le réseau 1500 V continu ;
- le transformateur TR composé :
  - d'un enroulement primaire qui peut être alimenté soit en 25 kV - 50 Hz (réseau français) ou en 15 kV - 16,7 Hz (réseau allemand) ;
  - de 4 enroulements secondaires, avec prise intermédiaire, destinés à alimenter les convertisseurs de traction (1 par moteur) ;
  - de 2 enroulements secondaires destinés à alimenter les équipements auxiliaires de la rame ;
- l'inductance de filtre d'entrée L1 pour le fonctionnement sous caténaire 1500 V continu ;
- le convertisseur PMCF (Pont Monophasé à Commutation Forcée) : redresseur 4 quadrants autorisant le fonctionnement en traction et en freinage par récupération. La commande MLI du PMCF permet de réguler la tension  $U_c$  sur le bus continu et de prélever, sur le réseau alternatif, un courant sinusoïdal et en phase avec la tension ;
- le filtre F:2f destiné à limiter l'ondulation de tension sur le bus continu engendrée par le redressement en dérivant la composante 2f du courant redressé ; il est constitué par le condensateur C2 et les inductances L2, L3 ; en alimentation 25 kV - 50 Hz, le filtre est accordé à 100 Hz et, en alimentation 15 kV - 16,7 Hz, le filtre est accordé à 33 Hz.
- le convertisseur OND : onduleur triphasé à commande MLI qui génère les courants d'alimentation sinusoïdaux du moteur asynchrone et permet, par sa commande, le contrôle du flux et du couple.
- le hacheur HRH et la résistance de puissance RH, permettant un freinage rhéostatique utilisé dans les situations où le freinage par récupération n'est pas possible.
- l'appareillage H.T. comprenant :
  - les disjoncteurs Q1 et Q2 ;
  - les contacteurs KM1 à KM4.

**Q2.1** : Sur le document réponse **DR2**, préciser l'état des disjoncteurs et des contacteurs, quand la rame est sous caténaire :

- 25 kV / 50 Hz ;
- 15 kV / 16,7 Hz ;
- 1500 V continu.

**Q2.2** : En fonction des caractéristiques électriques de la chaîne de motorisation, sous réseau 25 kV, (données dans le document réponse **DR2**), déterminer les valeurs numériques des grandeurs :

- $I_m$  : valeur efficace du courant d'alimentation d'un moteur, considéré sinusoïdal ;
- $\langle I_{DC} \rangle$  : valeur moyenne du courant sur le bus continu,
- $I_e$  : valeur efficace du courant au secondaire du transformateur, supposé sinusoïdal et en phase avec  $V_e$ .

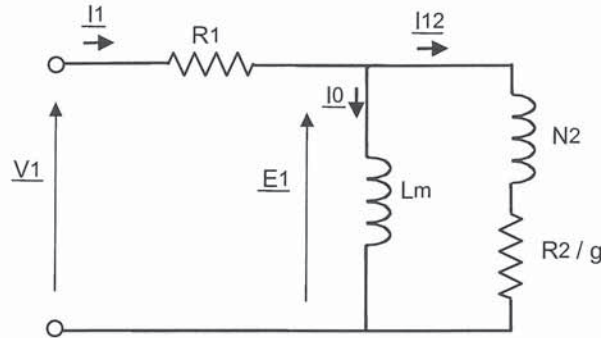
Compléter le tableau du document réponse **DR2**, par les valeurs des courants.

**Q2.3** : On donne  $C_2 = 5 \text{ mF}$ . Calculer les valeurs de L2 et L3.

## Etude d'un moteur de traction à partir de son schéma équivalent

Le schéma équivalent de la machine asynchrone triphasée à rotor en court-circuit, *usuellement utilisé*, traduit, pour une phase, les équations électriques et mécaniques en régime permanent. On l'établit en exploitant l'analogie avec un transformateur, pour laquelle le stator correspond au primaire et le rotor au secondaire en court-circuit. Comme pour un transformateur, l'impédance du secondaire (rotor) peut être « ramenée » au primaire (stator).

On donne, figure 2.1, le schéma équivalent à partir duquel on mènera l'étude.



**Fig 2.1 : Schéma équivalent simplifié étoile d'une machine asynchrone, vu du stator**

**Grandeurs électriques associées au schéma équivalent :**

$R_1$  : résistance d'une phase du stator ;

$R_2$  : résistance d'une phase du rotor, ramenée au stator ;

$g$  : glissement du rotor par rapport au champ tournant ;

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \text{ avec : } \Omega_s : \text{vitesse angulaire de synchronisme, } \Omega : \text{vitesse angulaire du rotor ;}$$

$R_2 / g$  : résistance fictive dans laquelle est consommée la totalité de la puissance transmise au rotor (puissance mécanique, pertes mécaniques et pertes Joule rotoriques), pour une phase

$L_m$  : inductance magnétisante ;

$N_2$  : inductance de fuites globalisées, ramenée au stator ;

$V_1$  : tension, phase-neutre, d'alimentation d'une phase du stator ;

$E_1$  : f.e.m. statorique ;

$I_1$  : courant absorbé dans une phase du stator ;

$I_{12}$  : courant dans une phase rotorique, ramené au stator ;

$I_0$  : courant magnétisant.

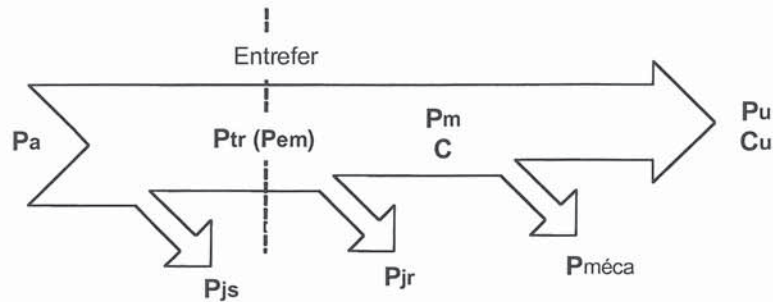
La pulsation des tensions et des courants est  $\omega_s$ , imposée par la fréquence  $f$  de la tension  $V_1$ .

La référence de phase sera prise sur la tension  $V_1$ .

On considère le circuit magnétique non saturé.



On donne, figure 2.2, le diagramme représentatif du bilan de puissance dans la machine et conforme au schéma équivalent précédent.



**Fig 2.2 : Diagramme des puissances**

- $P_a$  : puissance absorbée sur le réseau triphasé d'alimentation ;
- $P_{js}$  : pertes joules stator ;
- $P_{tr}$  : puissance transmise au rotor (ou puissance électromagnétique) ;
- $P_{jr}$  : pertes joules rotor ;
- $P_m$  : puissance mécanique ;
- $C$  : couple agissant sur le rotor (couple électromagnétique) ;
- $P_{méca}$  : pertes mécaniques ;
- $P_u$  : puissance utile, sur l'arbre de la machine ;
- $C_u$  : couple utile sur l'arbre ;

*Remarque* : le schéma équivalent ainsi que le diagramme des puissances ne tiennent pas compte des pertes fer.

### Données numériques :

- Résistances et inductances du modèle :  
 $R_1 = 22 \text{ m}\Omega$  ;  $R_2 = 32 \text{ m}\Omega$  ;  $L_m = 7,7 \text{ mH}$  ;  $N_2 = 480 \text{ }\mu\text{H}$ .
- Nombre de paires de pôles de la machine :  $p = 3$
- Grandeurs caractéristiques pour le point de fonctionnement nominal :
  - Tension d'alimentation :  $V_{1n} = 800 \text{ V}$  (tension entre phases  $U_{1n} = 1385 \text{ V}$ ) ,  $f_n = 110 \text{ Hz}$  ;
  - Glissement nominal :  $g_n = 2,2 \%$  ;
  - Puissance utile nominale :  $P_u = 1200 \text{ kW}$ .

### Etude au point de fonctionnement nominal

**Q2.4** : En négligeant la chute de tension dans  $R_1$  (alors  $\underline{E}_1 = \underline{V}_1$ ), déterminer la valeur efficace et la phase des courants  $I_{12}$  et  $I_0$ . En déduire la valeur efficace de  $I_1$ .

**Q2.5** : Ecrire l'expression de  $P_{jr}$  et de  $P_{tr}$ , déduites du schéma équivalent.

Calculer  $P_{jr}$ ,  $P_{tr}$ ,  $P_{js}$ ,  $P_a$  et  $P_{méca}$ .

En déduire le rendement nominal  $\eta_n$  du moteur.

**Q2.6** : Déterminer les puissances réactives :

- $Q_m$  : puissance réactive magnétisante totale ;
- $Q_f$  : puissance réactive totale due au flux de fuite.

**Q2.7** : Déterminer le facteur de puissance nominal  $\cos\phi_n$  du moteur.

Les questions suivantes seront traitées en négligeant la chute de tension dans  $R_1$  ( $E_1 = V_1$ ).

**Q2.8** : Ecrire la relation liant  $C$  à  $P_{tr}$ .

En déduire l'expression du couple  $C$  en fonction de  $p$ ,  $V_1$ ,  $\omega_s$ ,  $(R_2/g)$  et  $(N_2 \cdot \omega_s)$ . [ relation (1) ]

Modifier la relation (1) pour faire apparaître la pulsation des courants rotoriques ( $\omega_r = g \cdot \omega_s$ ) et

le rapport  $\frac{V}{\omega_s}$ . [ relation (2) ]

Noter que le rapport  $\frac{V}{\omega_s}$  est l'image du flux  $\Phi_t$  total dans la machine.

**Q2.9** : Autour du point de fonctionnement nominal ( $g \rightarrow 0$ ), l'expression précédente de  $C$  peut se simplifier et s'écrit :  $C = k \cdot \omega_r$ .

Etablir la relation simplifiée liant  $C$  et  $\omega_r$  [ relation (3) ] en donnant l'expression littérale de  $k$ .

En utilisant cette relation simplifiée, calculer la valeur numérique du couple électromagnétique  $C_n$  pour le glissement nominal.

**Q2.10** : Quand le glissement varie, le couple passe par un maximum. A partir de la relation (2), déterminer la pulsation rotorique (noté  $\omega_{r\max}$ ) qui correspond au maximum de couple.

Ecrire alors l'expression du couple max :  $C_{\max}$ . [ relation (4) ]

Calculer les valeurs numériques de  $C_{\max}$ ,  $\omega_{r\max}$  et du glissement correspondant  $g_{\max}$ .

**Q2.11** : Sur le document réponse **DR3**, pour  $|g| < 15\%$ , tracer l'allure de la caractéristique  $C(g)$ , la machine fonctionnant en moteur ou en génératrice (gradez l'axe  $C$ ).

Noter les valeurs :  $C_n$ ,  $C_{\max}$ ,  $g_n$  et  $g_{\max}$ .

On donne les caractéristiques de la transmission mécanique.

- rapport de réduction (vitesse sur l'arbre moteur / vitesse sur l'arbre de l'essieu) :  $R = 1,977$  ;
- rendement réducteur + transmission :  $\eta_t = 0,97$  ;
- diamètre des roues :  $d = 900$  mm.

**Q2.12** : Pour le point de fonctionnement nominal des moteurs, calculer :

- le couple utile  $C_u$  sur l'arbre moteur ;
- l'effort moteur à la jante  $F_{mj}$  (pour l'ensemble des 8 moteurs) ;
- la vitesse de déplacement du train (en km/h).

Sur le document réponse **DR3**, tracer le point de la caractéristique de traction correspondant au fonctionnement nominal des moteurs.

## Etude du fonctionnement à vitesse variable

Pour régler la vitesse, on agit sur la fréquence de la tension d'alimentation du stator et, en conséquence, sur la vitesse de synchronisme.

Selon que la vitesse est inférieure ou supérieure à la valeur nominale, deux modes de commande sont mis en œuvre :

- Pour  $\Omega < \Omega_n$  ( $f < f_n$ ) : on agit simultanément sur  $V_1$  et  $f$  (la loi de commande impose  $V/F = \text{constante}$ ).
- Pour  $\Omega > \Omega_n$  ( $f > f_n$ ) :  $V_1 = V_{1n}$  ; on ne peut plus augmenter  $V_1$  ; on peut encore augmenter la vitesse en agissant sur la fréquence à  $V_1 = V_{1n}$ .

Pour ces 2 modes de commande, on étudie, à partir des relations (3) et (4), l'évolution de la caractéristique couple-vitesse autour du point de fonctionnement en régime permanent.

L'allure de la caractéristique couple-vitesse est approchée par les paramètres :

- $\Delta C/\Delta\Omega$  : pente de la droite  $C = f(\Omega)$  pour les faibles valeurs de glissement,
- $C_{\max}$  : couple max,
- $\Delta\Omega_m = \Omega_s - \Omega_m = \frac{\omega_{r\max}}{p}$  : écart de vitesse entre le synchronisme et le point de couple max.

**Q2.13** : A partir de la relation (3), exprimer  $C$  en fonction de la vitesse angulaire de rotation  $\Omega$ .

Pour la fréquence nominale :

- préciser les valeurs numériques de  $\Delta C/\Delta\Omega$ ,  $C_{\max}$  et  $\Delta\Omega_m$  ;
- tracer l'allure de  $C = f(\Omega)$ , pour  $\Omega_m < \Omega < \Omega_s$ , sur le document réponse **DR4** (graduez les axes  $C$  et  $\Omega$ ).

**Q2.14** : Etude pour  $f < f_n$

- Comment évoluent les paramètres  $\Delta C/\Delta\Omega$ ,  $C_{\max}$  et  $\Delta\Omega_m$ , quand on agit sur la fréquence pour régler la vitesse, en deçà de la vitesse nominale ?
- Sur le document réponse **DR4**, tracer l'allure de  $C = f(\Omega)$ , pour  $f_1 = 60$  Hz et  $\Omega_m < \Omega < \Omega_s$ .
- Caractériser ce mode de fonctionnement.

**Q2.15** : Etude pour  $f > f_n$

- Comment évoluent les paramètres  $\Delta C/\Delta\Omega$ ,  $C_{\max}$  et  $\Delta\Omega_m$ , quand on agit sur la fréquence pour régler la vitesse, au delà de la vitesse nominale ?
- Sur le document réponse **DR4**, tracer l'allure de  $C = f(\Omega)$ , pour  $f_2 = 160$  Hz et  $\Omega_m < \Omega < \Omega_s$ .
- Caractériser ce mode de fonctionnement.

**Q2.16** : Pour la vitesse maximale du train sur le réseau français  $V = 320$  km/h,

- Relever l'effort moteur à la jante  $F_{mj}$  sur la caractéristique de traction ;
- Calculer :
  - la vitesse angulaire  $\Omega$  sur l'arbre d'un moteur ,
  - le couple  $C_u$  sur l'arbre d'un moteur ;

Pour la suite, on confondra  $C$  et  $C_u$ .

- A partir de la relation établie en Q2.13, déterminer la fréquence d'alimentation du moteur à 320 km/h ;

- Pour cette fréquence, tracer l'allure de  $C = f(\Omega)$ , sur le document réponse **DR4** ;
- Porter, sur cette caractéristique les points  $C_u$  et  $C_{max}$ .