

# Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

## Partie 2 : Recherche architecturale et environnementale

### 2.1. Analyse d'un mode de transport, le tramway

**Question 1 :** à partir du document ressource 4, dégager les éléments qui expliquent pourquoi ce type de transport est utilisé à nouveau dans notre espace urbain après une période de désintérêt.

**Question 2 :** à partir du document ressource 4, proposer un argumentaire qui pourrait permettre de conseiller une équipe de maîtrise d'ouvrage en charge d'étudier une nouvelle ligne de tramway pour une grande ville de province inscrite dans les appels à projet du Grenelle de l'environnement.

Éléments de réflexion à prendre en compte dans le commentaire proposé par le candidat.

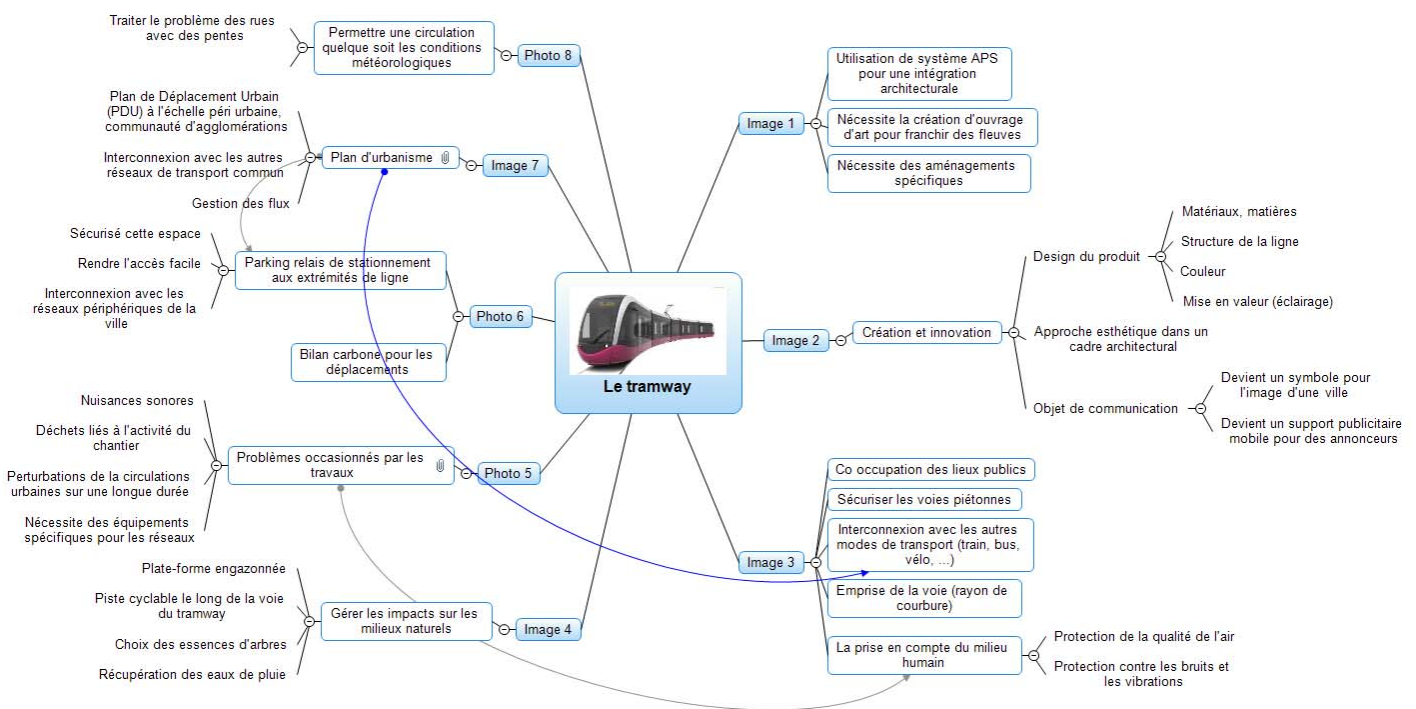


Image de la carte heuristique proposée

### 2.2. Vibrations dues au passage d'un tramway

**ATTENTION 2 questions 3 dans le sujet**

**Question 3 :** la complexité des sols urbains nécessite un modèle de sol de type multicouche hétérogène. Quels phénomènes physiques faut-il prendre en compte lors de la propagation des ondes dans le sol ?

Les problèmes de propagation d'ondes dans un milieu "hétérogène" (souvent supposé multicouche) sont caractérisés par de nombreux phénomènes (dispersion, diffraction, amortissement, réflexion des ondes aux interfaces entre couches...).

**Question 3 :** préciser les théorèmes utilisés pour obtenir les équations (1) et (4). Quel phénomène traduit le coefficient  $E_r \cdot I_r$  de l'équation (1) ?

L'équation (1) s'obtient par application du TRD au rail 1 projeté sur l'axe vertical.

L'équation (4) s'obtient par application du TMD au centre de gravité de la dalle projeté sur l'axe  $\vec{x}$   
 $E_r \cdot I_r$  est le coefficient de raideur en flexion du rail.

**Question 4 :** combien d'inconnues possède le système à 4 équations (1), (2), (3) et (4) ? Combien d'équations de couplage est-il nécessaire d'obtenir pour résoudre le problème ? Comment obtenir ces équations ?

Ce système possède 6 inconnues :  $z_{r1}$ ,  $z_{r2}$ ,  $\theta$ ,  $z_0$ ,  $F_0$ ,  $C_0$

En effet,  $z_1$  et  $z_2$  s'obtiennent géométriquement en fonction de  $z_0$  et  $\theta$ , et  $P_1$  comme  $P_2$  sont les données d'entrée du problème.

6 inconnues pour 4 équations. Il faut deux équations supplémentaires issues de l'étude du couplage dalle / sol (égalité du déplacement verticale de la dalle et du sol en un point et couplage en rotation).

**Question 5 :** les conditions de couplage interviennent dans les termes  $F_{33}$  et  $F_{44}$ . Quels sont les éléments nuls de la matrice de flexibilité  $[F]$  ?

Les termes  $F_{12}$  et  $F_{34}$  sont nuls. Il suffit d'analyser les équations (1) et (2).

**Question 6 :** justifier l'intérêt de mener une campagne de mesures en positionnant des capteurs sur le tramway, le rail et le sol.

La pose de capteurs sur le tramway et sur le rail permet de préciser le modèle à retenir pour l'excitation dynamique ( $P_1(t)$  et  $P_2(t)$ ). En effet, la source des vibrations peut provenir des éléments mécaniques internes au tramway comme des irrégularités de surface du rail (établies théoriquement à l'aide d'une fonction probabilité). La pose de capteur sur le sol permet de valider le modèle retenu pour les déplacements de la dalle et donc du sol.

**Question 7 :** conclure quant aux solutions qui pourraient être retenues pour limiter la transmission des ondes à l'environnement.

Le choix des matériaux constituant les couches de fondations de la plateforme en béton armé et de leurs granulométries respectives est essentiel. L'épaisseur des différentes couches joue bien sûr un rôle important mais à condition que les conditions de mise en œuvre soient satisfaisantes (indice de compactage respecté).

Une semelle micro cellulaire anti-vibratoire, sans serrage du blochet dans un chausson, peut être disposée entre le rail et la dalle. Cette technique est utilisée pour les voies sans ballast.

Il existe aussi, une technique de réalisation de section amortisseuse équipée de dalle flottante, avec une couche supplémentaire en béton, mais cela reste très onéreux.

### Partie 3 : Étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway

**Question 8 :** donner la relation liant la fréquence  $F_S$  de l'alimentation statorique des moteurs de traction et la vitesse de déplacement  $V$  de la rame. Calculer, pour chacun des trois degrés d'usure des roues (neuves, demi-usées, usées) la valeur de  $F_S$  permettant de fonctionner en palier à la vitesse de régime  $V_N$  de 38 km/h. Pour cette question les divers glissements seront négligés.

$$\text{Fréquence mécanique moteur} = \frac{1}{2} \cdot F_S$$

$$\text{Fréquence mécanique roue} = \frac{8}{43} \cdot \frac{F_S}{2}$$

$$\text{Vitesse angulaire roue} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{8}{43} \cdot \frac{F_S}{2}$$

$$\text{Vitesse linéaire} = \pi \cdot \frac{8}{43} \cdot F_S \cdot R \Leftrightarrow F_S = \frac{V \cdot 43}{8 \cdot \pi \cdot R}$$

Les trois valeurs de  $F_S$  sont : **59,21 ; 62,27 ; 65,67 Hz**

**Question 9 :** le variateur de vitesse utilisé permet de faire varier  $F_S$  jusqu'à 115 Hz au maximum. En négligeant à nouveau le glissement des moteurs de traction, calculer le diamètre des roues correspondant à l'usure maximale au-delà de laquelle il ne serait plus possible d'atteindre la vitesse maximale prévue par le constructeur.

On rappelle que la fréquence de rotation  $f$  (en tours/seconde) d'un moteur asynchrone à  $2p$  pôles alimenté par un système de tensions de fréquence  $F_S$  s'obtient par la relation  $f = \frac{F_S}{p}$ , au glissement près.

$$D_{\min} = \frac{V_{\max} \cdot p}{\pi \cdot f \cdot n}$$

$$D_{\min} = 578,86 \text{ mm}$$

### 3.3. Étude du travail des actions mécaniques non-dissipatives

**Question 10 :** calculer la dépense énergétique  $E_{\text{acc\_AW3}}$  nécessaire pour amener l'ensemble du véhicule à sa vitesse nominale de 38 km/h, en régime AW3 avec des roues à demi-usées, à partir de l'arrêt. On néglige à ce stade les efforts dus aux dissipations de frottement et de roulement. Exprimer le résultat en kWh.

$$\text{Roues : moment d'inertie d'une roue neuve : } J_R = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$$

$$J_r = \frac{1}{2} \cdot \left( \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} \cdot \rho_r \cdot \rho_r \right) \cdot \frac{D_1^2}{4} \Leftrightarrow D_1 = 0,580 \text{ m}$$

Énergie cinétique des 12 roues à vitesse  $v$  :

$$E_R = 12 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot J_R \cdot \left( \frac{v}{R} \right)^2 \right]$$

$$E_R = 6,52 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$\text{Moteurs : } \omega_{\text{mot}} = \omega_{\text{roue}} \cdot \frac{43}{8}$$

Énergie cinétique des 4 moteurs :

$$E_{\text{mot}} = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot J_m \cdot \omega_{\text{mot}}^2$$

$$E_{\text{mot}} = 39,81 \cdot 10^4 \text{ J}$$

Énergie cinétique de translation :

$$E_{\text{ramet}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2$$

$$E_{\text{ramet}} = 305,88 \cdot 10^4 \text{ J}$$

$$\text{Total : } E_{\text{acc3}} = 3,522 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,978 \text{ kWh}$$

### 3.4. Étude du travail des forces de dissipation

**Question 11 :** établir en fonction du temps l'expression de la puissance de résistance à l'avancement  $P_r(t)$  lors de la phase de démarrage de 14 secondes, en régime AW3. On mettra  $P_r(t)$  sous la forme :  $P_r(t) = \alpha t^3 + \beta t^2 + \gamma t + \delta$  en précisant les valeurs et les unités des coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$ .

$$v(t) = k \cdot t \quad k = \frac{38}{14} = 2,714 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f_R(t) = A \cdot (k \cdot t)^2 + B \cdot (k \cdot t) + C \quad \text{en } \text{N} \cdot \text{t}^{-1}$$

$$\text{Il vient } P_R(t) = f_R(t) \cdot v(t) = M_3 \cdot f_R(t) \cdot \frac{k \cdot t}{3,6} \text{ avec } M_3 = 54\,905 \text{ kg}$$

$$P_R(t) = \frac{M_3 \cdot [A \cdot k^3 \cdot t^3 + B \cdot k^2 \cdot t^2 + C \cdot k \cdot t]}{3,6}$$

$$P_R(t) = 3,05 \cdot t^3 + 14,61 \cdot t^2 + 1449 \cdot t$$

$$P_R(t) = 31520 \text{ W à } 38 \text{ km/h}$$

$$\alpha \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}^{-3}, \beta \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}^{-2}, \gamma \text{ en } \text{W} \cdot \text{s}, \delta = 0$$

**Question 12 :** calculer en kWh l'énergie  $E_{rd}$  dissipée par la résistance à l'avancement au cours de cette phase de démarrage de 14 secondes.

$$\int_0^{14} (3,050 t^3 + 14,61 t^2 + 1449 t) dt = \frac{3,050}{4} 14^4 + \frac{14,61}{3} 14^3 + \frac{1449}{2} 14^2$$

$$E_{rd} = 184\,660 \text{ Joules, soit } E_{rd} = 0,0513 \text{ kWh}$$

**Question 13 :** calculer en kWh l'énergie  $E_{rp}$  dissipée par la résistance à l'avancement au cours de la marche de 18 secondes à vitesse constante, en palier.

La force motrice en palier est  $M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C)$  avec  $v_N$  exprimé en  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

La puissance est :  $\frac{M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C) \cdot v_N}{3,6}$  avec  $v_N$  en  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , donc cette puissance est égale à

31 250 W.

$$E_{rp} = \frac{M_3 \cdot (A \cdot v_N^2 + B \cdot v_N + C) \cdot v_N}{3,6} \cdot 18 \text{ avec } v_N \text{ en } \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$F_t = 2,986 \text{ kN} \Leftrightarrow E_{rp} = \frac{2,986 \cdot 38 \cdot 18}{3,6} = 567 \text{ kJ} = 0,158 \text{ kWh}$$

**Question 14 :** calculer en kWh l'énergie  $E_b$  nécessaire au fonctionnement des équipements de bord lors du parcours inter-station de 38 secondes.

$$E_b = 50000 \cdot 38 = 1,9 \text{ MJ} = 0,528 \text{ kWh}$$

**Question 15 :** à l'aide des résultats des questions précédentes, donner en kWh une estimation de l'énergie totale  $E_{tot}$  à apporter au véhicule pour l'accomplissement du trajet. L'énergie du freinage est entièrement dissipée au niveau des freins (freinage rhéostatique et mécanique).

$$E_{tot} = E_{acc3} + E_{rd} + E_{rp} + E_b = 1,72kWh$$

### 3.5. Étude de l'apport en énergie par ligne aérienne de contact et pantographe

**Question 16 :** calculer la puissance maximale  $P_{max}$  consommée par la rame et l'intensité correspondante  $i_{max}$  du courant absorbé au pantographe pour le régime AW3.

La puissance maximale est absorbée en fin de phase d'accélération (force et vitesse maximales) :

– puissance de résistance à l'avancement  $P_r = 31520kW$  (voir question 13) ;

$$P_{acc} = F \cdot v = F \cdot k \cdot t \Leftrightarrow F = \frac{2 \cdot E_c}{k \cdot t^2} = 47,4kN$$

– puissance d'accélération

$$P_{acc} = 503kW$$

Puissance des auxiliaires :  $P_{aux} = 50kW$

$$P_{max} = P_r + P_{acc} + P_{aux} = 584kW$$

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{E} = 779 A$$

**Question 17 :** au cours de cet essai, on a relevé :  $P_{max} = 913 kW$  et  $i_{max} = 1217 A$ . Le comptage d'énergie indique que la rame a consommé 2,706 kWh au bout de  $t = 32$  secondes. Commenter les écarts observés entre les valeurs prévues et les valeurs relevées.

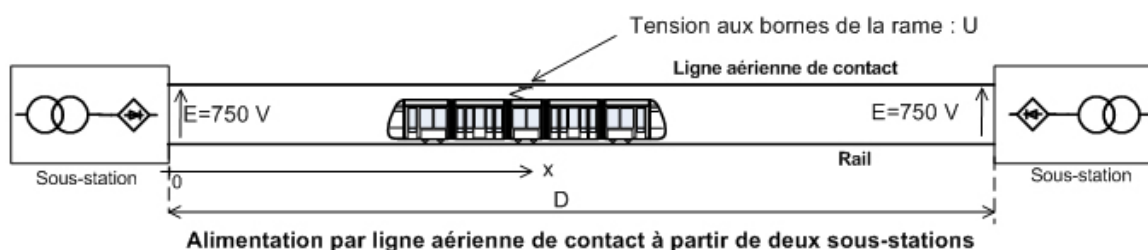
Toutes les grandeurs mesurées sont supérieures aux grandeurs prévues.

- La puissance absorbée au pantographe est supérieure à la puissance motrice, les documents en annexe et la connaissance commune des procédés mis en jeu permettent de prévoir un rendement de 60 à 70% au mieux (dû aux différentes conversions entre le pantographe et le rail).
- On voit sur le relevé que le démarrage se fait en deux temps. La deuxième phase doit mettre en jeu une force plus intense pour "rattraper" le retard pris dans la première phase.
- Le courant est cohérent avec la puissance sous une tension de 750V.
- On consomme en tout 1 kWh de plus (soit 58% de plus) que prévu. La cause en est le rendement, ainsi que l'excédent de consommation en régime lisible sur le graphe (100 kW à vitesse constante en palier - en plus des 50 kW dus aux équipements de bord - au lieu de 32 kW).

**Question 18 :** sur certains modèles de rames, la puissance absorbée au pantographe est volontairement limitée. indiquer quelles seraient les conséquences d'une limitation à 800 kW de la puissance absorbée sur les relevés précédents.

La courbe de puissance serait tronquée à 800 kW. La vitesse à partir de la saturation de puissance croîtrait moins vite. La vitesse de croisière serait atteinte plus tard. Le retour à la puissance de croisière se ferait plus tard.

Le schéma simplifié de l'alimentation électrique d'un tronçon est donné ci-dessous.



**Question 19 :** On souhaite pouvoir apporter la puissance P demandée par la rame. Exprimer, en fonction de x, la tension effective U aux bornes de la rame et calculer la valeur maximale de la distance D entre deux sous-stations permettant un fonctionnement correct dans le cas où P = 1 MW.

Résistance linéique r<sub>li</sub> de la LAC :  $r_{li} = \frac{r}{S}$  en  $\Omega \cdot m^{-1}$

$$S = 150 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow r = 1,678 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \Leftrightarrow r_{li} = 112 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$$

Résistance linéique r<sub>t</sub> du rail en acier

$$S = 9400 \text{ mm}^2 \Leftrightarrow r = 17,1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \Leftrightarrow r_{lr} = 18 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$$

$$r_{lt} = r_{li} + \frac{r_{lr}}{2} = 112 + 9 = 121 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1} = 0,121 \text{ m}\Omega \cdot m^{-1}$$

D'un côté, r<sub>t</sub> · x, de l'autre r<sub>t</sub>(D - x), ce qui fait r<sub>t</sub> · x en parallèle avec r<sub>t</sub>(D - x), soit  $\frac{r_t \cdot x(D-x)}{D}$

L'intensité absorbée par la rame est  $I = \frac{P}{U}$ , avec P = 1 MW

$$\text{D'où } U = E - \frac{r_t \cdot x \cdot (D-x) \cdot U}{D \cdot P}, \text{ ou encore : } U^2 - E \cdot U + \frac{r_t \cdot (D-x)}{D \cdot P} = 0$$

$$\Delta = \frac{E^2 - 4r_t(D-x)}{D \cdot P}, \Delta \text{ est positif quand } x(D-x) < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_t \cdot P}. \text{ Le premier membre est maximal pour}$$

$$x = \frac{D}{2} \text{ et vaut alors } \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Des solutions de l'équation existent si  $\left(\frac{D}{2}\right)^2 < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_t \cdot P}$

$$\text{On obtient alors : } \frac{D^2}{4} < \frac{D \cdot E^2}{4 \cdot r_t \cdot P}, \text{ c'est-à-dire } D < \frac{E^2}{r_t \cdot P} \Leftrightarrow D_{\max} = \frac{E^2}{r_t \cdot P}$$

A.N. : pour E = 750 et P = 1 MW,  $D_{\max} = 4,65 \cdot 10^3 \text{ m}$

### 3.6. Évaluation des possibilités d'autonomie

**Question 20 :** la rame est équipée d'un dispositif de stockage d'énergie embarqué (volant d'inertie), préalablement chargé à sa valeur maximale : 4 kWh. En mode autonome, toute l'énergie nécessaire à la motorisation est prélevée sur ce stockage, qui est rechargé par récupération d'énergie lors des phases de freinage. À l'aide des documents ressource 1, 2 et 3 et des résultats précédents, calculer la valeur de la charge résiduelle dans le dispositif de stockage à l'issue du trajet inter-station type (profil simplifié précédent).

Le rendement de la transmission est de 70 % (volant vers traction)

$$\text{Pour réaliser le trajet, il faut fournir (Q8) : } E_{\text{volant}_1} = \frac{(E_{\text{acc3}} + E_{\text{rd}} + E_{\text{rp}})}{0,7} + E_b - 0,7 \cdot E_{\text{dec}} \text{ avec}$$

$E_{\text{dec}} = E_{\text{acc3}}$ , en supposant que le volant puisse alimenter les équipements de bord avec un rendement 100 %.

$$E_{\text{volant}_1} = \frac{(0,9783 + 0,05513 + 0,158)}{0,7} + 0,528 - 0,7 \times 0,9783 = 1,54 \text{ kWh}$$

**Question 21 :** conclure sur l'intérêt d'un tel dispositif de stockage, en mettant en évidence les perspectives innovantes autant que les limitations.

On observe que le volant de 4 kWh ne permet pas de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de la rame en mode AUTO au-delà de deux trajets courts. Un fonctionnement en totale autonomie sur de courtes distances est cependant envisageable après recharge du volant en station, ce qui permet de franchir des zones non alimentées (pour raisons techniques ou environnementales). Le volant peut aussi être utilisé pour des franchissements moins longs qu'un trajet inter-station.

La précharge du volant en station impose une durée de charge brève, incompatible avec les accumulateurs chimiques classiques.

En mode ECO, le volant fournirait une partie de l'énergie nécessaire, ce qui diminuerait sa décharge tout en limitant les appels de courant sur la LAC.

Le freinage régénératif n'est que partiellement économe, mais il permet tout de même un gain de 2,225 kWh sans récupération à 1,54 kWh avec récupération, soit 30% d'économie.

#### Partie 4 : Dimensionnement de la centrale inertielle

##### 4.1. Choix du matériau du volant parmi deux classes de matériaux

###### 4.1.1. Détermination de la contrainte dans le volant

**Question 22 :** exprimer  $dF_c$  en fonction de  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $R$ ,  $e$ ,  $H$  et  $d\theta$ .

$$dF_c = \omega^2 \cdot R \cdot dm \text{ où } dm = \rho \cdot R \cdot e \cdot H \cdot d\theta \text{ donc } dF_c = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H \cdot d\theta$$

**Question 23 :** en écrivant l'équilibre statique de l'élément, exprimer l'expression de l'effort  $dF_t$  (voir document ressource 5) en fonction de  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $R$ ,  $e$ ,  $H$ .

$$dF_t = 2 \cdot dF_c \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \text{ et au premier ordre } \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \frac{d\theta}{2} \text{ donc } dF_c = dF_t \cdot d\theta$$

$$\text{et } dF_c = dF_t \cdot d\theta = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H \cdot d\theta \text{ soit } dF_t = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H$$

**Question 24 :** en déduire l'expression de la contrainte  $\sigma$  dans le tube en fonction de  $\omega$ ,  $\rho$  et  $R$ .

$$\sigma = \frac{dF_t}{S} = \frac{dF_t}{e \cdot H} = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot e \cdot H}{e \cdot H} = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2$$

###### 4.1.2. Détermination de la vitesse maximale du volant

**Question 25 :** donner l'expression de  $V$ .

$$V = R_2 \cdot \omega$$

**Question 26 :** calculer l'expression de la vitesse  $V$  en fonction de  $\rho$ ,  $\sigma$  et  $K$ .

$$V = R_2 \cdot \omega \text{ et } \sigma = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot R_2^2}{K^2} \text{ d'où } \sigma = \frac{\rho \cdot V^2}{K^2} \text{ et donc } V = K \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

**Question 27** : déduire l'expression de  $V_{max}$  et  $\omega_{max}$  (limite supérieure de la vitesse  $V$  et de  $\omega$ ).

$$V_{max} = \frac{K}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \quad \text{et} \quad \omega_{max} = \frac{K}{2 \cdot R_2} \cdot \sqrt{\frac{R_e}{\rho}}$$

#### 4.1.3. Détermination des densités d'énergie massique et volumique du volant

**Question 28** : déterminer l'expression de l'énergie cinétique maximale  $E_c$  qu'on peut stocker dans un volant de moment d'inertie  $J$ . Exprimer  $E_c$  en fonction de  $m$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $\alpha$  et  $R_e$ .

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot J(\omega_{max})^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \frac{K^2}{4R_2^2} \cdot \frac{R_e}{\rho} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \cdot m(R_2^2 + R_1^2) \right) \frac{K^2}{4 \cdot R_2^2} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

$$R_1 = \alpha \cdot R_2$$

$$E_c = \frac{1}{16} (m(1 + \alpha^2)) \frac{K^2 \cdot R_e}{\rho}$$

**Question 29** : la densité d'énergie volumique est notée  $dv$ . En partant de l'expression de l'énergie cinétique, montrer que  $dv = k \cdot R_e$ . Exprimer  $k$  en respectant les unités suivantes :  $dv$  en  $Wh \cdot m^{-3}$ ,  $R_e$  en Mpa.

$$m = \rho \cdot V$$

$$dv = \frac{E_c}{V} = \frac{\frac{1}{16} (m(1 + \alpha^2)) \frac{K^2 \cdot R_e}{\rho}}{\frac{m}{\rho}} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot R_e$$

1 Wh est égal à 3600 J, un MPa est égal à  $10^6$  Pa

$$dv = \frac{1}{4} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{4 \cdot 3600} \cdot R_e$$

**Question 30** : la densité d'énergie massique est notée  $dm$ . En partant de l'expression précédente, montrer que  $dm = k \cdot \frac{R_e}{\rho}$  en respectant les unités suivantes :  $dm$  en  $Wh \cdot Kg^{-1}$ ,  $R_e$  en MPa,  $\rho$  en  $kg \cdot dm^{-3}$ .

$$dm = \frac{dv}{\rho} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

**Question 31** : quel paramètre doit-on optimiser pour répondre au mieux à cette exigence ? Justifier la réponse.

Si on cherche à optimiser la masse et le prix, il faut optimiser le rapport  $\frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}}$ .

**Question 32** : quel est selon ce critère, le matériau métallique le plus performant parmi ceux proposés sur le graphe du document ressource 8. La sélection sera faite à partir du graphe en justifiant la démarche utilisée.

Il faut calculer les densités d'énergie massique de chaque matériau et diviser par le prix.



L'acier 55S7 est le plus performant des aciers selon ce critère. C'est aussi le plus performant de tous les matériaux proposés.

$$\text{Son rapport } \frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}} = 1,7$$

**Question 33** : quel est, toujours selon ce critère, le matériau composite le plus performant parmi ceux proposés sur le graphe du document ressource 8 ? La sélection sera faite à partir du graphe en justifiant la démarche utilisée.

Le composite le plus performant est le composite fibre carbone/Epoxy. Il est loin derrière l'acier pour ce critère.

$$\text{Son rapport } \frac{\text{densité d'énergie massique}}{\text{Prix}} = 1,1$$

**Question 34** : reprendre les deux questions précédentes en prenant comme objectif d'obtenir le volant le plus léger possible. Donner le critère utilisé et déterminer dans chaque classe (métaux et composites), le matériau le plus performant.

Pour ce critère, il faut optimiser la densité d'énergie massique. L'acier qui arrive en tête est le X210Cr12 de densité d'énergie massique 7,7 Wh/Kg, quant au composite le plus performant, il s'agit du composite fibre carbone/PEEK de densité d'énergie massique 40,6 Wh/Kg

**Question 35** : l'objectif visant à minimiser la masse du volant est primordiale. Montrer que le composite Fibre carbone/Epoxy et l'acier 55S7 constituent dans chacune des classes un compromis intéressant. Faire un choix sur le matériau des deux classes le mieux adapté en regard des deux premiers critères du cahier des charges et justifier.

L'acier 55S7 est très proche du X210Cr12 en terme d'énergie massique (7,6 pour 55S7 et 7,7 pour X210Cr12) en revanche la comparaison du rapport densité d'énergie massique / prix est sans appel et plaide en faveur du 55S7. (11,7 pour 55S7 et 1,1 pour X210Cr12)

De même en terme d'énergie massique, la fibre carbone/Epoxy (36,3 Wh/Kg) n'est pas très éloignée de la fibre carbone/PEEK (40,6 Wh/Kg) mais en revanche, la fibre carbone/Epoxy possède un bien meilleur rapport densité d'énergie massique / prix (1,1 contre 0,4). Son choix semble tout indiqué.

Choix classe métaux : 55S7

Choix classe composite : fibre carbone/Epoxy

#### 4.1.4. Détermination des caractéristiques géométriques et massiques du volant en fonction du matériau

**Question 36** : calculer pour les deux matériaux fibre carbone/Epoxy et acier 55S7 :

- la vitesse  $V_{\max}$  (vitesse périphérique maxi) ;
- la densité d'énergie volumique  $dv$  (en  $\text{Wh} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) ;
- la densité d'énergie massique  $dm$  (en  $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

$$V_{\max} = \frac{K}{2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} = \frac{1,06}{2} \sqrt{\frac{2170 \cdot 10^6}{1580}} = 619,6 \text{ ms}^{-1} \text{ pour fibre carbone/Epoxy}$$

$$V_{\max} = \frac{K}{2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} = \frac{1,06}{2} \sqrt{\frac{2260 \cdot 10^6}{7900}} = 283,8 \text{ ms}^{-1} \text{ pour acier 55S7}$$

La densité d'énergie volumique  $dv$  (en Wh/dm<sup>3</sup>)

$$dv = \frac{1}{4} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{4 \times 3600} \cdot R_e$$

La densité d'énergie massique  $dm$  (en Wh/kg)

$$dm = \frac{dv}{\rho} = \frac{1}{16} (1 + \alpha^2) K^2 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot \frac{R_e}{\rho}$$

		Fibre carbone / Epoxy	55S7
$dv = Ec/V \text{ maxi}$	Wh/m3	57,3	60,1
$dm = Ec/M \text{ maxi}$	Wh/kg	36,3	7,6

**Question 37** : déterminer l'expression de la fréquence de rotation en  $\text{tr} \cdot \text{mn}^{-1}$  du volant pour chaque matériau. Faire les applications numériques.

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_2} = \frac{K}{2 \cdot R_2} \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \text{ et } N_{\max} = \frac{30 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot R_2}$$

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
N maxi	tr/mn	16904,8	7743,0

**Question 38** : déterminer les expressions du volume  $Vol$  (en dm<sup>3</sup>), de la masse  $m$  (en kg) et de la hauteur  $H$  (en mm) pour chaque matériau. Faire les applications numériques, et calculer le prix du volant pour chaque matériau.

On se fixe l'objectif d'atteindre une capacité de stockage de 4 kWh avec le volant d'inertie.

$$V = \frac{4000}{dv} \text{ et } M = \frac{4000}{dm}$$

Le prix du volant d'inertie = (masse) · (prix au Kg)

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
Volume	dm <sup>3</sup>	69,8	66,6
Masse	Kg	110,3	525,9
Prix du volant	euro	3563,5	341,8

$$H = \frac{V}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$$

		Fibre Carbone / Epoxy	55S7
H	mm	283,5	270,3

**Question 39** : choisir parmi les deux matériaux fibre carbone/Epoxy et acier 55S7, celui qui répond au mieux aux deux premiers critères du cahier des charges.

	unité	carbone/Epoxy	acier 55S7
Ec/V maxi	Wh/m <sup>3</sup>	57,3	60,1
(EC/M) / Prix	Wh/Kg	36,3	7,6
Masse	Kg	110,3	525,9
Prix	Euro	3563,5	341,8

Selon la flexibilité associée aux deux premiers critères, la fibre carbone/Epoxy est la mieux adaptée.

#### 4.2. Eco bilan et choix du matériau

**Question 40** : calculer l’empreinte énergétique de chaque volant qu’on notera respectivement  $E_{acier}$  et  $E_{composite}$ . On détaillera les éléments pris en compte.

Phase fabrication :

$E_{fab}$  = énergie obtention + énergie fabrication volant

$$E_{acier\ fab} = 38 \cdot 525,9 + 27,8 \cdot 10 = 20262 \text{ MJ}$$

$$E_{composite\ fab} = 286 \cdot 110,3 + 3,68 \cdot 110,3 = 31952 \text{ MJ}$$

Phase utilisation :

Le volant représente une masse embarquée qui est consommatrice d’énergie à chaque démarrage.

$$\text{La phase de démarrage dure } T_a = \frac{V}{an} = \frac{38}{(3,6 \cdot 1,3)} = 8,11 \text{ s}$$

$$\text{La distance de démarrage } d = \frac{an \cdot t_a^2}{2} = 42,85 \text{ m}$$

Le temps de parcours à vitesse constante :

$$T_c = \frac{(1000 - 2 \cdot 42,85)3,6}{38} = 86,6 \text{ s}$$

$$\text{Soit un temps entre 2 démarrages } T = T_c + 2 \cdot T_a + 15 = 117,8 \text{ s}$$

$$\text{Soit sur 20h : } \frac{20 \cdot 3600}{102,8} = 611 \text{ démarrages.}$$

$$\text{Et sur 10 ans : } n = 611 \cdot 365 \cdot 10 = 2230150 \text{ démarrages}$$

L’énergie consommée pour les démarrages s’écrit :

$E_{dem} = m \cdot an \cdot d \cdot n$  soit pour chaque matériau :

$$E_{acier\ dem} = 525,9 \cdot 1,3 \cdot 42,85 \cdot 223\ 0150 = 65333 \text{ MJ}$$

$$E_{composite\ dem} = 110,3 \cdot 1,3 \cdot 42,85 \cdot 223\ 0150 = 13703 \text{ MJ}$$

Au bilan, l’empreinte énergétique de chaque volant donne :

- $E_{acier} = 20262 + 65333 = 85595 \text{ MJ}$  ;
- $E_{composite} = 31952 + 13703 = 45655 \text{ MJ}$ .

**Question 41** : calculer l’empreinte CO<sub>2</sub> de chaque volant, notée respectivement  $C_{acier}$  et  $C_{composite}$ .

Dans la phase de fabrication (extraction des ressources, fabrication du volant) :

- $C_{acier} = 2,22 \cdot 525,9 + 2,09 \cdot 10 = 1188 \text{ kg CO}_2$ ;
- $C_{composite} = 110,3 \cdot 18 + 0,294 \cdot 110,3 = 2\ 018 \text{ kg CO}_2$ .

Dans la phase d’utilisation :

- $C_{acier} = 0,035 \cdot 223\ 0150 \cdot 525,9 = 41\ 049 \text{ kg CO}_2$  ;

$$- C_{\text{composite}} = 0.035 \cdot 223\,0150 \cdot 110,3 = 8\,609 \text{ kg CO}_2.$$

Soit au final:

$$- C_{\text{acier}} = 1\,188 + 41\,049 = 42\,237 \text{ kg CO}_2 ;$$

$$- C_{\text{composite}} = 2\,018 + 8\,609 = 10\,627 \text{ kg CO}_2.$$

#### 4.3. Bilan face aux critères du cahier des charges et choix du matériau du volant

**Question 42 :** en fonction des études réalisées, conclure sur un choix de volant et justifier la réponse.

L'éco bilan est très favorable au volant en composite. Le paramètre majeur qui donne ce résultat est la différence très importante de masse entre les deux volants. Cette différence entraîne un bilan meilleur pour le volant composite dont la masse est presque 5 fois plus petite.

#### 4.4 Commande de la vitesse du volant d'inertie

**Question 43 :** exprimer la puissance électrique en fonction des seuls courants  $i_d$  et  $i_q$ .

$$p = \left( R \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q + L \cdot \frac{di_d}{dt} \right) i_d + \left( R \cdot i_q + L \cdot \omega \cdot i_d + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \Phi \cdot \omega \right) i_q$$

$$p = R \cdot i_d^2 + L \cdot \frac{di_d}{dt} i_d + R \cdot i_q^2 + L \cdot \frac{di_q}{dt} i_q + \Phi \cdot \omega \cdot i_q$$

**Question 44 :** montrer que la puissance mécanique  $p_m$  et le couple électromagnétique  $\Gamma_{em}$  produits par la machine sont proportionnels à  $i_q$  et donner leur expression.

Les pertes Joules  $Ri^2$  ne contribuent pas à la puissance mécanique. Les termes de transformations non plus, comme indiqué dans le texte. Il reste :

$p_m = \Phi \cdot \omega \cdot i_q$  pour la puissance et  $\Gamma_{em} = \frac{p_m}{\omega} = \Phi \cdot i_q$  pour le couple électromagnétique, tous deux proportionnels à la composante  $i_q$ .

**Question 45 :** montrer que les pertes joules au stator sont minimales lorsque la composante  $i_d$  est nulle.

Les pertes Joules sont données par :

$$P_J = R \cdot i_d^2 + R \cdot i_q^2 \text{ qui est bien minimale quand } i_d^2 \text{ est nul pour } i_q \text{ fixé.}$$

**Question 46 :** exprimer le modèle de comportement obtenu sous la forme

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \lambda (i_q - I_{ref}) \\ \frac{di_d}{dt} = \mu \cdot i_d \end{cases}$$

en précisant les valeurs de  $\lambda$  et  $\mu$ .

On remplace dans le modèle  $v_d$  et  $v_q$  par leurs expressions imposées par la commande :

$$\begin{cases} R \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q + L \cdot \frac{di_d}{dt} = R \cdot i_d + L \cdot a \cdot i_d - L \cdot \omega \cdot i_q \\ R \cdot i_q + L \cdot \omega \cdot i_d + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \Phi \cdot \omega = R \cdot i_q + L \cdot a \cdot (i_q - I_{ref}) + L \cdot \omega \cdot i_d + \Phi \cdot \omega \end{cases}$$

qui donne ainsi :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = a \cdot i_d \\ \frac{di_q}{dt} = a \cdot (i_q - I_{ref}) \end{cases}$$

On a par conséquent :  $\lambda = \mu = a$

**Question 47 :** pour cette commande, exprimer la relation liant la vitesse de rotation  $\omega$  du volant d'inertie à :

- $J$ , moment d'inertie du groupe volant-moteur ;
- $i_{sq}$ , composante du courant statorique ;
- et aux autres paramètres. Les frottements sont négligés.

On admet que le couple moteur est égal au couple électromagnétique. L'équation fondamentale de la dynamique donne :  $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_{em} = \Phi \cdot i_{sq}$

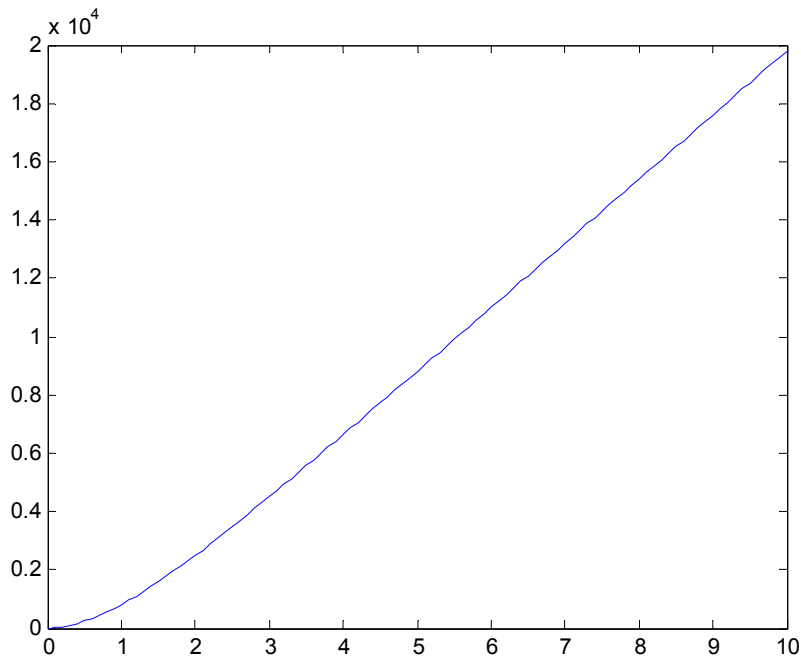
**Question 48 :** exprimer  $\omega(t)$  en réponse à une commande indicielle de  $i_q$  d'amplitude  $I_{ref}$  (vitesse et courants sont pris initialement nuls). Représenter sommairement  $\omega(t)$  sur un graphe en précisant les hypothèses faites pour obtenir le tracé.

L'équation  $\frac{di_q}{dt} = a \cdot (i_q - I_{ref})$  s'intègre immédiatement, à  $i_q$  initialement nul :

$$i_q(t) = I_{ref} (1 - e^{at})$$

De même, à vitesse initiale nulle,  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Phi}{J} \cdot i_{sq} = \frac{\Phi \cdot I_{ref}}{J} (1 - e^{at})$  donne  $\omega(t) = \frac{\Phi \cdot I_{ref}}{J} \left( t + \frac{1}{a} (1 - e^{at}) \right)$

Une évolution typique de la vitesse en réponse à un échelon de la composante  $i_q$  serait :



Dans laquelle on a bien sûr choisi  $a < 0$  afin d'assurer la convergence de  $i_q$ . Après une phase transitoire d'établissement du courant (et donc du couple moteur), la vitesse évolue à couple constant.

**Question 49 :** commenter l'intérêt d'une telle commande, la dynamique obtenue, ainsi que sa dépendance vis des paramètres du modèle qu'elle utilise.

Lorsque  $a < 0$ , cette commande garantit l'annulation asymptotique de  $i_d$  et la poursuite de  $I_{ref}$  par  $i_q$ . Il s'agit d'une commande en couple de la machine. Les deux composantes  $i_d$  et  $i_q$  sont découplées.

Les deux composantes sont régies par la même dynamique, qui est celle d'un système du premier ordre, de constante de temps  $-1/a$ . Le choix de  $a$  permet de régler la dynamique. Une valeur élevée de  $|a|$  permet aux courants de rejoindre rapidement la consigne, mais une valeur excessive risque de saturer les tensions  $v_d$  et  $v_q$ , modifiant alors le comportement prévu.

Cette commande nécessite une bonne connaissance des paramètres du modèle, et suppose qu'ils varient peu pendant le fonctionnement.

Elle requiert la mesure ou l'estimation de la vitesse angulaire, ce qui peut poser quelques difficultés pratiques. Elle requiert la mesure ou l'estimation des composantes  $i_d$  et  $i_q$ .

Une telle loi de commande nécessite un calculateur, une étude des conséquences des variations paramétriques (en particulier sur la convergence en cas d'erreur paramétrique du modèle) devant être envisagée. La discrétisation de la loi de commande et l'étude des conséquences de cette discrétisation sont un préalable à sa validation.

En cas de recours à des estimateurs « observateurs », les conséquences sont délicates à prévoir, car observateurs et commandes sont ici non-linéaires, même si le modèle obtenu est linéaire. Il faudra donc étudier la dépendance observateur-commande (principe de séparation non applicable).

#### 4.5. Comparaison avec d'autres systèmes de stockage

**Question 50 :** exprimer  $P_{vol}$  lors de l'accélération depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de croisière. Donner la valeur maximale  $P_{vol\_max\_acc}$  et calculer en kWh E0-32 .

$$P_{vol} = \frac{P_{jant}}{\eta_m}$$

$$P_{vol\_max\_acc} = \frac{550}{0,7} = 785 \text{ kW}$$

$$E_{0-32} = \int_0^{14} P_{vol}(t) dt + \int_{14}^{32} P_{vol}(t) dt$$

$$E_{0-32} = \frac{1}{2} \cdot 785 \cdot 10^3 \cdot 14 + \frac{150 \cdot 10^3}{0,7} \cdot 18$$

$$E_{0-32} = 9,35 \cdot 10^6 \text{ J} = 2,60 \text{ kWh}$$

**Question 51 :** exprimer  $P_{vol}$  lors de la décélération depuis la vitesse de croisière jusqu'à l'arrêt. Donner la valeur maximale  $P_{vol\_max\_dec}$  et calculer en kWh  $E_{32-38}$ .

$$P_{vol} = P_{jant} \cdot \eta_m$$

$$P_{vol\_max\_dec} = -785 \cdot 0,7 = -550 \text{ kW}$$

$$E_{32-38} = \int_{32}^{38} P_{vol}(t) dt$$

$$E_{32-38} = -\frac{1}{2} 550 \cdot 10^3 \cdot 6$$

$$E_{32-38} = -1,65 \cdot 10^6 \text{ J} = -0,46 \text{ kWh}$$

**Question 52 :** placer sur le diagramme de Ragone les points *A* et *B* correspondant respectivement à  $(E_{0-32}, P_{vol\_max\_acc})$  et  $(E_{32-38}, P_{vol\_max\_dec})$ .

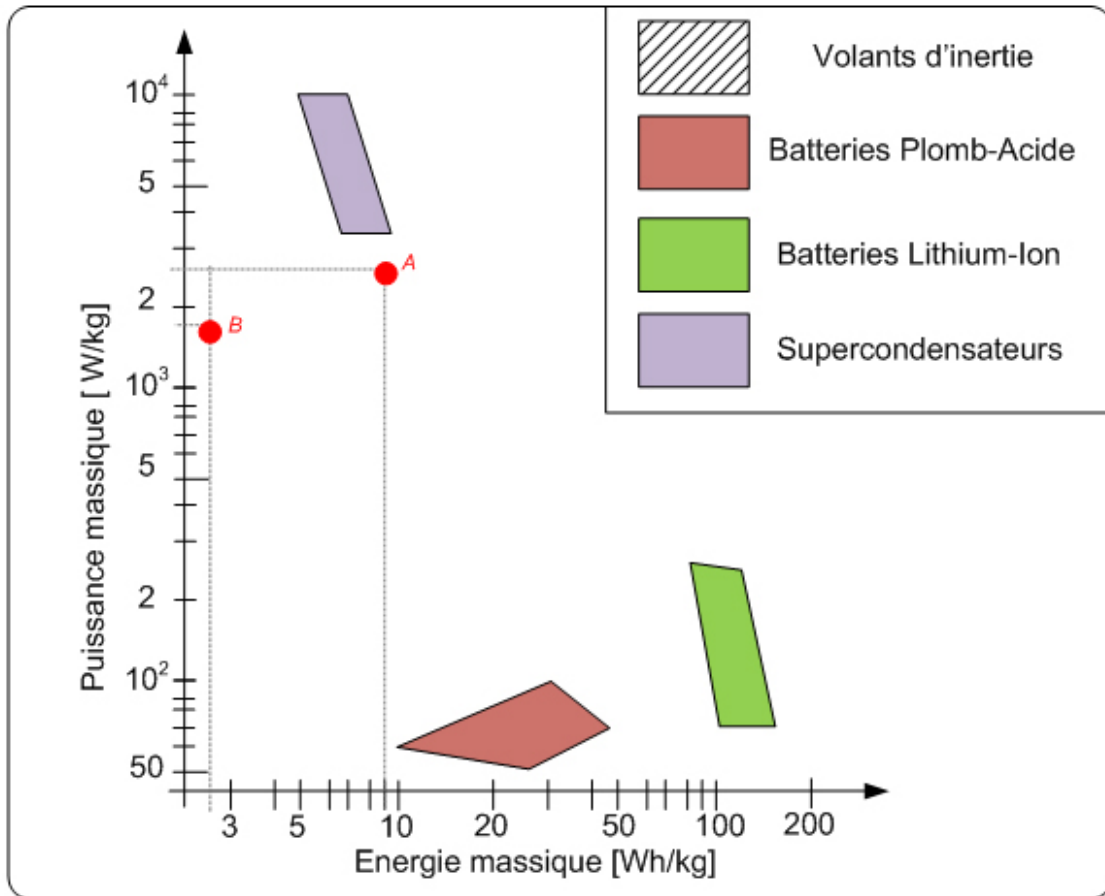
Les puissances et énergies massiques nécessaires sont (volant de 300 kg) :

$$p_{vol\_max\_acc} = \frac{785000}{300} = 2616 \text{ kW / kg}$$

$$e_{0-32} = \frac{2600}{300} = 8,7 \text{ kWh / kg}$$

$$p_{vol\_max\_dec} = \frac{550\,000}{300} = 1833 \text{ kW / kg}$$

$$e_{32-38} = \frac{460}{300} = 1,53 \text{ kWh / kg}$$



**Question 53 :** conclure sur l'adéquation de la solution inertielle comparativement aux autres solutions de stockage proposées.

Le stockage inertielle présente des caractéristiques proches de celles du stockage par super condensateur. Sa puissance massique est légèrement moindre, pour une énergie massique stockée légèrement meilleure. Le choix de l'un ou de l'autre se discute.

À l'opposé, les batteries Pb acide ou Li-Ion, tout en offrant une capacité énergétique plus que satisfaisante, ne sont pas en mesure de délivrer la puissance voulue dans de bonnes conditions. Alors qu'en termes de capacité énergétique des batteries Li-Ion de 30 kg suffiraient, leur masse devrait avoisiner les 5000 kg si l'on veut en extraire les 800 kW nécessaires !

En conclusion, l'utilisation d'un volant de 300 kg (équipements compris) est un choix raisonnable.

**Partie 5 : Étude thermique du moteur de traction**

**Question 54 :** indiquer dans quelles parties du moteur sont localisées les différentes pertes considérées.

- Pertes joules rotoriques : localisées dans le cuivre du rotor.
- Pertes joules statoriques : localisées dans le cuivre du stator.
- Pertes fer statoriques : localisées dans le circuit magnétique du stator.



## 5.1 Échanges convectifs dans les canaux rotoriques

**Question 55 :** à partir du cycle de fonctionnement de référence, calculer la vitesse de rotation  $\Omega_{moy}$  moyenne du moteur en rad/s.

$$\Omega_{moy} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{15} \frac{230}{15} \cdot t \cdot dt + \int_{15}^{30} 230 \cdot dt + \int_{30}^{36} \left( 1380 - \frac{230}{6} \cdot t \right) \cdot dt \right] = 131 \text{ rad/s}$$

**Question 56 :** exprimer le nombre de Rossby  $Ro_{moy}$ , sans unité, en fonction de  $\Omega_{moy}$ ,  $H$ , et  $D$ . Calculer sa valeur.

$$Ro = \frac{Q}{H \cdot \Omega_{moy}} = \frac{S \cdot 12}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 12 \cdot H \cdot \Omega_{moy}} = \frac{24 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{1.2}}{\pi \cdot D^2 \cdot H} = \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{0.2}}{\pi \cdot D^2 \cdot H} = 0,147$$

**Question 57 :** exprimer le nombre de Reynolds  $Re_{moy}$ , sans unité, en fonction de  $\Omega_{moy}$ ,  $D$ ,  $\rho$ , et  $\mu$ . Calculer sa valeur.

$$Re = \frac{\rho \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{1.2}}{\pi \cdot D \cdot \mu} = 2\,094$$

**Question 58 :** calculer le nombre de Nusselt  $Nu_{moy}$  et la constante thermique de convection  $h_{moy}$  pour l'ensemble des canaux rotoriques. Pour une température du fer rotorique de 170°C et une température de l'air intérieur de 100°C, exprimer puis calculer le flux thermique évacué du rotor par les canaux rotoriques.

$$Nu_{moy} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( 1 + 0,23 \cdot Ro^{-1,24} \right) = 31,6$$

$$h_{moy} = 31,6 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$h_{moy} \cdot S = h_{moy} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot 12 = 7,68 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_{fr,ai} = \frac{1}{h_{moy} \cdot S} = 130,2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\Phi = h_{moy} \cdot S \cdot \Delta\theta = h_{moy} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot 12 \cdot \Delta\theta = 538 \text{ W}$$

## 5.2. Influence de l'excentricité des canaux

**Question 59 :** expliquer pourquoi la vitesse de l'air dans les canaux rotoriques est indépendante de l'excentricité.

Le débit dans les canaux rotoriques est imposé par le ventilateur, qui dépend de sa vitesse de rotation et des pertes de charges dans les canaux rotoriques et l'entrefer. Ces grandeurs sont indépendantes de l'excentricité.

**Question 60 :** exprimer la variation relative du nombre de Nusselt  $\frac{\Delta Nu}{Nu_0}$  en fonction de la variation

relative de l'excentricité  $\frac{\Delta H}{H_0}$  autour de la valeur  $Nu_0$  correspondant à la géométrie actuelle du moteur.

Calculer cette variation pour un écart de plus ou moins 10 % autour de  $H_0 = 80 \text{ mm}$ .

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left( 1 + 0,23 \cdot \left( \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_{moy}^{0,2}}{\pi \cdot D^2 \cdot H} \right)^{-1,24} \right)$$

$$Nu = A \cdot (1 + B \cdot H^{1,24})$$

Avec  $A = 9,052$  et  $B = 56,83$

En dérivant, on obtient :  $dNu = A \cdot B \cdot 1,24 \cdot H^{0,24} \cdot dH$

$$D'où : \frac{dNu}{Nu_0} = \frac{A \cdot B \cdot 1,24 \cdot H_0^{1,24}}{A \cdot (1 + B \cdot H_0^{1,24})} \cdot \frac{dH}{H_0}$$

$$\text{Autour de } H_0 = 80e-3, \text{ on obtient : } \frac{dNu}{Nu_0} = 0,883 \cdot \frac{dH}{H_0}$$

$$\text{Pour une variation de l'excentricité de } +/- 10\% : \frac{\Delta Nu}{Nu_0} \approx 0,883 \cdot \frac{\Delta H}{H_0} = +/- 8,8\%$$

**Question 61** : la carte du flux magnétique dans  $\frac{1}{4}$  de la machine asynchrone est représentée ci-dessous. La longueur des flèches représente le niveau d'induction. Expliquer le compromis technique auquel est confronté le constructeur du moteur pour placer les canaux rotoriques.

Il serait donc intéressant d'augmenter l'excentricité pour améliorer le transfert convectif. Mais l'augmentation de l'excentricité aurait pour conséquence de rapprocher les canaux des dents rotoriques. Cette zone du circuit magnétique est le siège d'une forte densité de flux, la percer de canaux augmenterait encore cette induction et accroîtrait les pertes.

### 5.3. Modélisation thermique du moteur en régime statique



**Question 63 :** une fois la simulation complétée et le modèle exécuté, le capteur de flux (Ideal Heat Flow Sensor) indique la valeur '-1360'. En déduire l'expression de  $\theta_a$  température de l'arbre. Calculer la valeur numérique et préciser si la température maximale admissible des roulements est respectée.

$$\theta_{\text{roulement}} = \Phi_a \cdot R_{r,a} + \theta_r = 94,3^\circ\text{C}$$

La température maximale admissible par le roulement n'est pas atteinte.

**Question 64 :** déduire de la question précédente la valeur du flux thermique fourni par le moteur au liquide de refroidissement.

Le flux thermique qui s'échappe par le liquide de refroidissement est le complément de celui qui est évacué par l'arbre :

$$\Phi_{lr} = P_{jr} + P_{jst} + P_{fst} - \Phi_a = 3\,307 + 1087 + 812 - 1360 = 3\,846 \text{ W}$$

#### 5.4. Dimensionnement du système de refroidissement

**Question 65 :** calculer la résistance thermique équivalente au circuit de refroidissement  $R_{lr,0}$  pour assurer l'évacuation de ce flux en limitant la température du liquide à  $80^\circ\text{C}$ .

$$R_{lr,0} = \frac{\theta_{lrout} - \theta_{amb}}{\phi_{lr}} = \frac{80 - 40}{3846} = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

**Question 66 :** le liquide de refroidissement entre dans le moteur à une température  $\Theta_{lrin}$  et en ressort à une température  $\Theta_{lrout} = 80^\circ\text{C}$ . Exprimer le débit de fluide minimal  $D_{lr}$  en litre par minute en fonction de l'élévation de température du fluide ( $\Delta\Theta_{lr} = \Theta_{lrout} - \Theta_{lrin}$ ).

Soit  $W$  la différence d'enthalpie, en Joule, entre le liquide entrant et sortant du moteur :

$$W = m \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$\Phi_{lr} = \rho \cdot D_{lr} \cdot C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr}$$

$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr}}{C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho}$$

**Question 67 :** le liquide de refroidissement est composé d'un mélange eau / éthylène glycol. Le glycol est un antigel. Exprimer la masse volumique  $\rho$  en fonction du taux de glycol dans le mélange  $T_G = \frac{m_G}{m_E + m_G}$  variant de 0 à 100 %.  $m_G$  et  $m_E$  sont respectivement la masse de glycol et la masse d'eau dans le mélange.

$$\rho = \frac{\rho_G \cdot \rho_E}{T_G \cdot \rho_E + (1 - T_G) \cdot \rho_G}$$

**Question 68 :** exprimer la capacité thermique massique en fonction du taux de glycol dans le mélange.

$$C_{TH} = T_G \cdot C_{THG} + (1 - T_G) \cdot C_{THE}$$

**Question 69** : exprimer le débit de fluide  $D_{lr}$  en fonction de  $T_G$ .

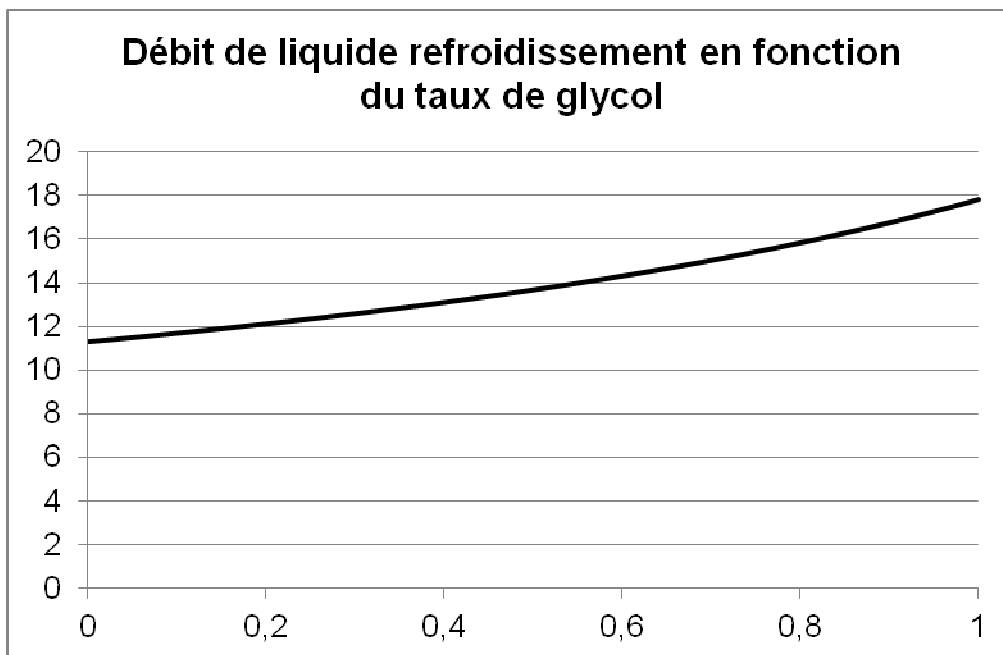
$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr}}{C_{TH} \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho}$$

$$D_{lr} = \frac{\Phi_{lr} \cdot (T_G \cdot \rho_E + (1 - T_G) \cdot \rho_G)}{(T_G \cdot C_{THG} + (1 - T_G) \cdot C_{THE}) \cdot \Delta\theta_{lr} \cdot \rho_G \cdot \rho_E}$$

$$D_{lr} = \frac{3846 \cdot (T_G \cdot 1000 + (1 - T_G) \cdot 1109)}{(T_G \cdot 2400 + (1 - T_G) \cdot 4185) \cdot 5 \cdot 1109 \cdot 1000}$$

$$D_{lr} = \frac{42,35 \cdot 10^{-6} \cdot (T_G - 10,17)}{T_G - 2,35}$$

**Question 70** : on souhaite limiter l'élévation de température du fluide  $\Delta\theta_{lr}$  à 5°C, tracer la caractéristique  $D_{lr} = f(T_G)$ .



**Question 71** : le débit nominal du circuit de refroidissement vaut 14 L·min<sup>-1</sup>, donner le taux maximal d'éthylène glycol dans le circuit de refroidissement.

Le taux de glycol ne doit pas dépasser 56%

### 5.5. Étude en régime dynamique

**Question 72** : la modélisation en régime statique repose sur l'hypothèse que les pertes dans le moteur sont considérées constantes et égales à leurs valeurs moyennes pendant un cycle de fonctionnement du tramway. Vérifier et justifier cette hypothèse.

On constate sur cette simulation que les variations de température du rotor ont une constante de temps de l'ordre de 500 s. Le cycle de référence ayant une durée de 60 s, soit presque dix fois moins, on peut considérer le régime de la machine constant et égal à sa valeur moyenne pour simuler le comportement thermique du moteur.

## 5.6. Intérêt de la motorisation choisie

**Question 73 :** expliquer l'intérêt, pour une application de tramway, d'installer un moteur de type fermé à refroidissement liquide par rapport à une solution classique de moteur refroidi par air.

Le plancher du tramway est très bas pour faciliter la montée et la descente des passagers. La place disponible pour intégrer les bogies sous le tramway est faible. Le moteur, à l'étroit dans son emplacement, ne pourrait être refroidi uniquement par air. La solution choisie permet d'extraire la chaleur du moteur et de la dissiper dans un échangeur placé à un endroit plus aéré. D'autre part, l'air situé à proximité des roues est chargé de poussière, d'humidité et de corps divers susceptibles d'endommager, à long terme, un moteur à entrefer ouvert.

### Synthèse de l'étude

**Question 74 :** en s'appuyant sur les diverses facettes abordées lors de l'étude, expliciter les atouts que présente une ligne de tramway par rapport aux solutions concurrentes pour satisfaire à la demande de transport dans une cité moderne. La réponse devra mettre en évidence une argumentation technique organisée, claire et précise.

La question est très ouverte, il faut cibler les critères les uns après les autres.

Transport public = l'utilisateur n'a pas à gérer le véhicule (stationnement, entretien) quand il ne se déplace pas.

[Solutions concurrentes : transport privé, avec servitudes].

Transport en commun = bon rendement technico-économique pour l'utilisateur.

[Solutions concurrentes : véhicules individuels coûteux à l'achat et à l'usage].

Voie réservée = espace urbain avec possibilité d'habillage (assez) convivial ET indépendance vis à vis d'autres flux de transport.

[Solutions concurrentes : partage de la voirie excluant les aménagements spécifiques d'embellissement ET problèmes de circulation].

Habitabilité et accessibilité (plancher bas intégral autorisé par l'absence d'essieu traversant, vitrage panoramique et absence de cloisons intérieures).

[Solution concurrente : métro souterrain sans visibilité vers l'extérieur.

Solution concurrente autobus : accessibilité parfois délicate.

Ces solutions diffèrent aussi par les aménagements en stations liés à l'accessibilité individuelle et collective].

Énergie électrique (localement) propre = niveau de nuisance atmosphérique (localement) faible

[Solutions concurrentes : véhicules à énergie fossile].

Alimentation par réseau de distribution ET possibilité d'autonomie partielle = approvisionnement permanent en énergie ET disparition possible du réseau d'alimentation (niveau de nuisance visuelle partiellement adaptable); on peut moduler le degré d'autonomie et adapter le rapport {fonctionnement alimenté par le réseau/fonctionnement sans réseau} selon les sites.

[Solutions concurrentes :

- véhicules électriques à autonomie totale : masse et contraintes de recharge du système d'autonomie importantes ;

- véhicules sans autonomie : présence nécessaire du réseau en tout point].

Récupération d'énergie locale (au freinage et en descente) = diminution des sollicitations du réseau et économies d'énergie, gestion au niveau de chaque rame.

[Solutions concurrentes sans récupération d'énergie : dissipation de l'énergie cinétique excédentaire sous forme de chaleur = pertes.

Solutions concurrentes avec récupération d'énergie par le réseau (non locale) : nécessitent des redresseurs réversibles complexes et/ou une synchronisation des séquences de plusieurs rames].

Confort dynamique (Commandabilité/souplesse élevée des systèmes à motorisation électrique).

[Solutions concurrentes : la gestion de la motricité des véhicules non électriques est moins performante, sauf en diesel-électrique, exclus pour des raisons de nuisance en ville et de masse prohibitive].

Niveau de nuisance sonore faible (motorisation électrique silencieuse ET traitement de la transmission des vibrations de la voie).

[Solution concurrente *motorisation* : moteurs à explosion, niveau sonore difficile à gérer].

Solution concurrente *roulement* : roulement sur pneus, nécessite deux conducteurs d'alimentation ET dégradation de la qualité de la surface de roulement].

# Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Cette épreuve est commune aux trois options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 25/11/2011, « cette épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluri-technique automatique ».

## 1. Présentation du sujet

Le sujet proposé pour cette épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur s'appuie sur la problématique liée à l'installation d'un système de transport collectif urbain. Le support technique retenu est un tramway dont le contexte et l'infrastructure se composent de :

- l'environnement citadin dans lequel circule le tramway ;
- les sous-stations d'alimentation de la voie ;
- les moteurs de traction et leur convertisseur ;
- le système de stockage de l'énergie de freinage ;
- les bogies et le système de transmission de l'énergie mécanique.

Cette épreuve, composée de cinq parties indépendantes, a permis de tester chez les candidats, les connaissances et capacités requises dans les champs suivants :

- recherche architecturale et environnementale ;
- étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway ;
- dimensionnement d'une centrale inertielle ;
- étude thermique du moteur de traction.

## 2. Analyse globale des résultats

La majorité des candidats a abordé l'ensemble des parties du sujet et la progression a été principalement linéaire. La progressivité de la difficulté dans le questionnement a permis d'identifier les candidats les plus performants.

Le jury encourage les futurs candidats à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur à poursuivre leur effort de formation afin de développer les compétences transversales de sciences de l'ingénieur.

## 3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

### Partie 2 : Recherche architecturale et environnementale

En préambule, il était proposé au candidat une analyse globale sur ce mode de transport (Questions 1 et 2). On demandait de dégager les éléments qui expliquent pourquoi ce type de transport est utilisé à nouveau dans notre espace urbain après une période de désintérêt, puis de proposer un argumentaire pour conseiller une équipe de maîtrise d'ouvrage en charge d'étudier une nouvelle ligne de tramway pour une grande ville de province inscrite dans les appels à projet du Grenelle de l'environnement.



Tous les candidats ont abordé les deux questions consacrées à cette première partie. Si l'énumération des points-clé du tramway dans son contexte donne des résultats satisfaisants, la moitié des candidats s'est mal positionnée lorsqu'il s'agissait de conseiller la maîtrise d'ouvrage car il y avait les deux points de vue successifs du citoyen-utilisateur et du décideur-maitre d'ouvrage qui adresse ses exigences au maitre d'œuvre.

Le jury recommande aux futurs candidats d'approfondir leur approche concernant la compétitivité des produits et des services notamment sous l'angle de l'économie générale des systèmes (coûts d'acquisition, de fonctionnement, de maintenance, retour sur investissement)

Les questions 3 à 6 traitaient de la propagation des vibrations engendrées par le passage de la rame, puis des moyens techniques à mettre en œuvre pour en atténuer les effets. Le jury constate que les phénomènes physiques mis en jeu et leurs modélisations sont mal maîtrisés par une très grande partie des candidats. Un tiers des candidats seulement justifie convenablement le besoin d'une campagne de mesures, au regard de la nécessaire validation du modèle de description du contact tramway-sol. La question 7 porte sur les types de solutions techniques permettant d'atténuer les vibrations générées dans le sol par le passage du tramway. Un quart des candidats parvient à développer une analyse convenable concernant le problème posé.

Le jury rappelle aux candidats que la modélisation et la simulation associée nécessitent successivement une identification paramétrique du modèle et une validation en vue d'une exploitation future.

### **Partie 3 : Étude des besoins énergétiques d'une rame de tramway**

Aux questions 8 et 9, il était proposé au candidat une vérification du dimensionnement cinématique de l'actionneur principal et de la transmission du tramway. Plus de la moitié des candidats répond de manière satisfaisante aux deux questions concernées.

Les questions 10 à 15 traitaient de la détermination des besoins énergétiques de la rame. Si tous les candidats ont abordé ce questionnement, ce qui est relativement satisfaisant, il n'en demeure pas moins qu'une large majorité d'entre eux est mise en difficulté par des notions aussi fondamentales que l'énergie cinétique et la relation puissance - énergie avec son système d'unités et ses ordres de grandeur.

Les questions 16 à 19 traitaient des caractéristiques du système d'alimentation par ligne de contact. De nouveau, le jury apprécie que tous les candidats aient abordé ce questionnement. Toutefois, il n'en demeure pas moins qu'une large majorité des candidats ne réussit pas à commenter les écarts observés entre les performances mesurées sur le tramway et celles issues de la modélisation. Par ailleurs, la modélisation électrique de l'ensemble caténaire-tramway-rails a présenté beaucoup de difficultés à une majorité de candidats. Quelques copies remarquables sortent cependant du lot.

Le jury souhaite que la culture technologique des candidats puisse se développer notamment grâce à la confrontation, autant qualitative que quantitative, à de nombreux cas réels.

Les questions 20 et 21 étaient l'occasion, pour les candidats, d'effectuer une synthèse sur l'autonomie conférée au tramway par l'utilisation d'un stockage embarqué. Les quelques candidats ayant répondu correctement à ces questions ont fait preuve du niveau de synthèse attendu dans cette épreuve transversale de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

### **Partie 4 : Dimensionnement d'une centrale inertielle**

L'objectif global de cette partie était de déterminer le matériau, les dimensions et le mode de pilotage du volant qui permettent de répondre au mieux aux critères du cahier des charges :

- masse minimale du volant d'inertie ;
- prix de revient optimisé ;
- impact environnemental minimisé.

Dans un premier temps, l'objectif est de répondre aux deux premiers critères du cahier des charges, par le choix de matériaux qui permet de trouver le meilleur compromis entre la masse du volant d'inertie et son coût.

La mise en place d'un modèle de connaissance est nécessaire afin de déterminer la densité massique d'énergie stockée dans un volant d'inertie de géométrie imposée. Celle-ci nécessite des savoirs fondamentaux liés au domaine énergétique. Une majorité des candidats a atteint cet objectif, cependant, il est regrettable que la totalité de ces savoirs transversaux ne soient pas totalement acquis.

Dans un second temps, l'objectif était de choisir le matériau du volant d'inertie parmi les deux sélectionnés préalablement, afin de répondre aux contraintes de masse et d'encombrement.

Les applications numériques n'ont pas toujours été réalisées avec précision par les candidats, ne leur permettant pas de rédiger un argumentaire afin de choisir le matériau adapté.

Dans un troisième temps, l'objectif était de choisir le matériau du volant d'inertie parmi les deux sélectionnés préalablement, afin de répondre à la contrainte de l'impact environnemental.

Cette partie a été peu abordée, en raison principalement des mauvaises applications numériques de la partie précédente. Cependant, même lorsque les calculs sont corrects, la démarche de caractérisation de l'impact environnemental proposée dans le sujet n'est pas toujours comprise et correctement mise en œuvre.

Enfin, les objectifs sont, à travers l'étude d'un mode de commande en vitesse performant, de mettre en évidence les possibilités de pilotage du volant d'inertie dans le contexte du stockage d'énergie embarquée, et enfin de le comparer à d'autres systèmes de stockage embarqués.

Le modèle de l'actionneur étant fourni, la plupart des candidats n'a pas pu justifier la loi de commande proposée, parce qu'ils n'ont pas finalisé des calculs élémentaires.

La comparaison de la solution retenue sur le tramway par rapport à d'autres systèmes de stockage embarqués a été très peu abordée, toujours en raison de la non maîtrise des outils fondamentaux liés au domaine énergétique. De plus, l'analyse des sens de transfert énergétique entre deux sous-systèmes, pourtant fondamentale, n'a pas permis aux candidats de caractériser les bilans de puissance dans les systèmes dissipatifs.

### **Partie 5 : Étude thermique du moteur de traction**

L'objectif global était de modéliser le comportement thermique du moteur pendant le cycle de fonctionnement du tramway et de vérifier que les températures limites de la machine ne sont pas atteintes.

Une étude préliminaire visait à modéliser l'échange thermique entre l'air intérieur de l'actionneur et les canaux rotoriques et à vérifier l'influence d'un paramètre de dimensionnement de la machine sur la qualité de l'échange thermique dans les canaux rotoriques. Par la suite, le candidat était invité à compléter un modèle thermique de la machine asynchrone en vue de vérifier que les températures limites ne sont pas atteintes lors du fonctionnement du tramway. Enfin, le candidat était amené à déterminer le débit et la composition du liquide de refroidissement permettant d'évacuer la chaleur produite par l'actionneur.

Le jury constate que très peu de candidats ont abordé cette partie, alors que les autres obtiennent des résultats honorables. Il est rappelé que la modélisation des phénomènes thermiques touche à des problématiques communes à l'ensemble des trois spécialités de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

On constate par ailleurs un manque de rigueur dans les notations, les calculs, l'homogénéité des expressions mêmes simples et la présentation des résultats.

### **Partie 6 : Synthèse**

L'objectif de cette partie est de produire une synthèse du questionnement mené tout au long du sujet et des solutions apportées à chaque problème.

La synthèse produite - par un très faible nombre de candidats - se réduit trop souvent à un argumentaire commercial très éloigné de l'étude scientifique et technique attendue.

### Conseils du jury

Le jury encourage les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines des sciences de l'ingénieur. Ainsi, le jury apprécie les copies où les candidats tentent de répondre à la globalité du sujet.

Pour ce qui est de la présentation des copies, il est exigé de bien indiquer le numéro des questions traitées et la démarche de résolution. Cette dernière doit être exposée avec rigueur, les hypothèses doivent être explicitées clairement et les notations doivent être précises, claires et respecter scrupuleusement celles imposées dans le sujet.

De plus, les expressions littérales doivent être impérativement présentées de la façon suivante :

- l'expression littérale, sans aucune application numérique, est présentée encadrée ;
- l'expression est ensuite donnée en remplaçant les termes littéraux par leurs valeurs numériques, dans le même ordre que l'expression littérale ;
- le résultat numérique est ensuite indiqué avec l'unité, encadré.

$$R_{fr,ai} = \frac{1}{h_{moy} \cdot \frac{L}{D} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot 12}$$
$$R_{fr,ai} = \frac{1}{31.6 \cdot 11.2 \cdot \pi \cdot (24 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12}$$
$$R_{fr,ai} = 130,2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Le jury apprécie les candidats qui justifient, ou même simplement expliquent, les démarches adoptées pour répondre aux questions posées.

Les réponses aux questions de synthèse doivent être argumentées et concises.

### 4. Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans le cadre de cette nouvelle épreuve transversale. Toutes les questions du sujet ont été abordées par les candidats quelle que soit l'option choisie. Le jury engage fortement les futurs candidats à se préparer conformément aux attendus (arrêté du 25/11/2011).

### 5. Résultats

218 candidats, dont 29 candidats à l'agrégation marocaine, ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 8,4/20 et l'écart-type 3,6/20 avec :

- 19,4 comme meilleure note ;
- 1,9 comme note la plus basse.

