

SESSION 2017

**AGREGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Options :** sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique,  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique,  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des  
constructions.

**ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN SYSTÈME  
PLURITECHNIQUE**

Durée : 5 heures

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

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

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

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

**NB :** *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.*

**COMPOSITION DU SUJET**

- **SUJET :**

Mise en situation	page 2
Partie 1 : Vérification des bogies	page 4
Partie 2 : Confort des usagers	page 8
Partie 3 : Freinage	page 10
Partie 4 : Confort des utilisateurs – économie d'énergie - Ventilation	page 17
Partie 5 : Etude d'une dalle de station de métro	page 19
Partie 6 : Exploitation pédagogique	page 21

- **DOCUMENTS :**

**DOCUMENTS TECHNIQUES (DT1 à DT8) :**

Documents spécifiques et relatifs au support de l'étude	page 24
---	---------

**DOCUMENTS PÉDAGOGIQUES (DP1 à DP5) :**

Documents spécifiques à l'exploitation pédagogique	page 34
--	---------

**DOCUMENTS RÉPONSES (DR1 à DR4) :**

Documents qui seront à compléter et à rendre par le candidat	page 43
--	---------

**Le sujet comporte 6 parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre différent.**

**Les différentes parties seront traitées sur des copies séparées.**

**Toutes les réponses devront être détaillées sur la copie et les résultats encadrés ou soulignés.**

**Préciser les unités des résultats**

**Tous les documents réponses DR1 à DR4, remplis ou non, sont à rendre avec les copies.**

**Il est conseillé de composer pendant environ 3h pour les parties 1 à 5 et 2h pour la partie 6**

## METRO DE LOS TEQUES

### MISE EN SITUATION :



#### *Présentation du métro de Los Teques (Vénézuéla)*

La ville de Los Teques au Vénézuéla possède actuellement deux lignes de métro et envisage une extension afin de désenclaver une zone isolée de la commune, entre San Antonio et La Rinconada. La société ALSTOM a fourni 22 trains Metropolis composés de 6 voitures chacun. Une partie de cette commande a été livrée à Los Teques pour alimenter la ligne existante. Pour la nouvelle ligne, la ville souhaite intégrer la mise en place de ce métro dans une démarche de développement durable et a choisi la société ALSTOM pour ses solutions également inscrites dans cette démarche. Il s'agit maintenant de vérifier si la solution d'ALSTOM convient pour cette extension de ligne.



*Modèle 3D de la nouvelle ligne (San Antonio – La Rinconada)*

L'extension sera composée de 6 nouvelles stations (Modèle 3D de la nouvelle ligne)

Depuis plusieurs années, la société Alstom a adopté une politique engagée vis-à-vis des problématiques d'impact environnemental. L'éco conception fait partie intégrante de toutes les réflexions et ce à tous les niveaux. La société a défini des priorités qui sont :

- Efficacité énergétique,
- Confort et sécurité des utilisateurs,
- Réduction du bruit et des vibrations,
- Matières premières non polluantes,
- Contrôle des émissions de fluides et de particules,
- Intégration dans le paysage.

Les diagrammes d'exigences partiels (DT1) abordent deux aspects importants de la démarche. Le premier diagramme explicite les exigences liées au déplacement du train qui doit être mis en mouvement, guidé et arrêté. La partie 1 consistera à vérifier la géométrie des bogies au regard des contraintes du tracé. La partie 3 aura pour objectif de vérifier le freinage du train dans le cas d'un arrêt d'urgence.

Le deuxième diagramme d'exigences prend en compte le confort et la sécurité des utilisateurs dans le cadre d'une station ou en tant que passager. La partie 2 traitera de la stabilité du train tandis que les parties 4 et 5 concerneront respectivement la récupération d'énergie et la construction d'une mezzanine.

Le Métropolis d'Alstom est composé de deux voitures motrices M avec poste de conduite, de trois voitures motrices intermédiaires Nx et d'une remorque R.



Longueur du train	129,65 m
Hauteur du train	3 m
Vitesse maximale	90 km/h
Vitesse commerciale	80 km/h
Structure	aluminium
Capacité en passagers	1470 (226 assises et 1244 debout)

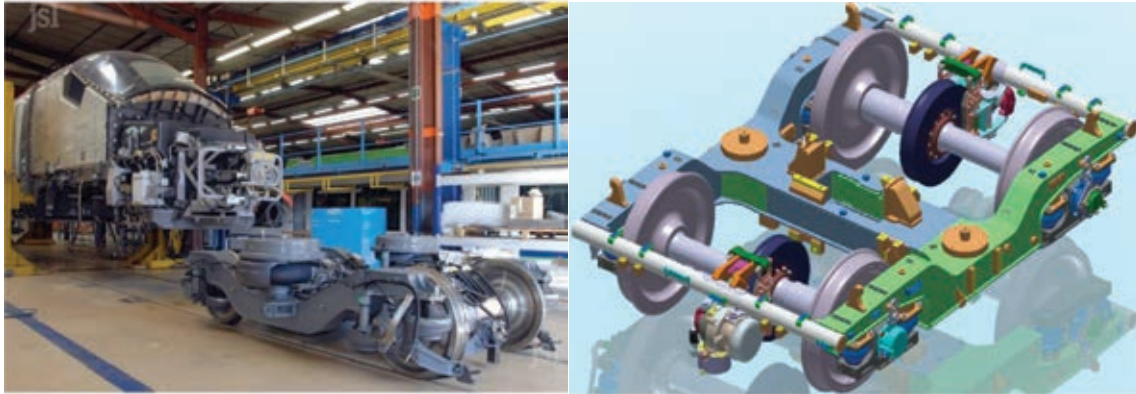
**Caractéristiques d'un train Métropolis**

## Partie 1. Vérification des bogies

Les contraintes locales (habitations, ouvrages, topographie, etc.) sont importantes dans ce secteur et ont limité le choix d'un tracé linéaire qui aurait été plus rapide et moins coûteux. Pour satisfaire toutes ces contraintes, le tracé doit comporter des virages avec un faible rayon de courbure. L'objectif de cette partie sera de vérifier la géométrie des roues et le comportement en virage au regard des exigences du cahier des charges.

Les voitures motrices sont équipées de deux bogies comprenant chacun deux essieux motorisés. La remorque possède deux bogies à deux essieux non motorisés (figure ci-dessous).

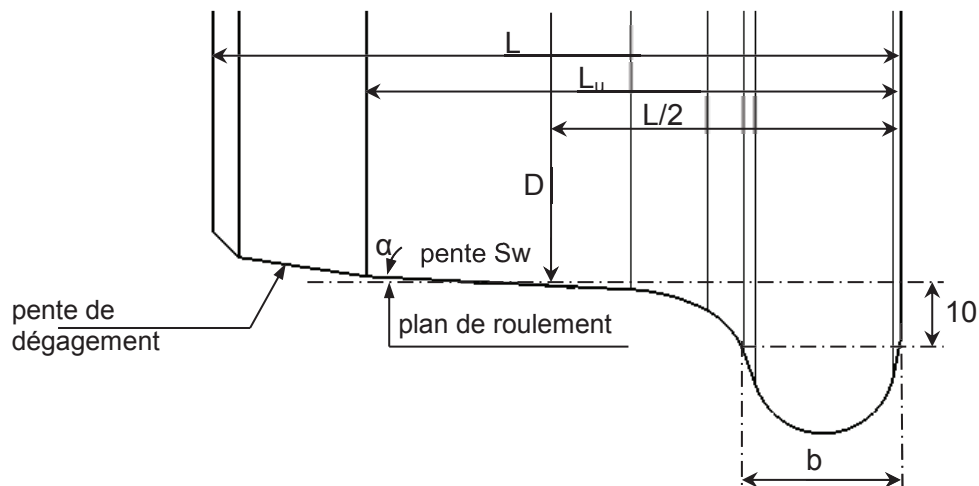
Les essieux sont liés au châssis du bogie par l'intermédiaire de la suspension primaire. La suspension secondaire prend place entre la caisse de la voiture et le châssis du bogie.



**Bogie non motorisé**

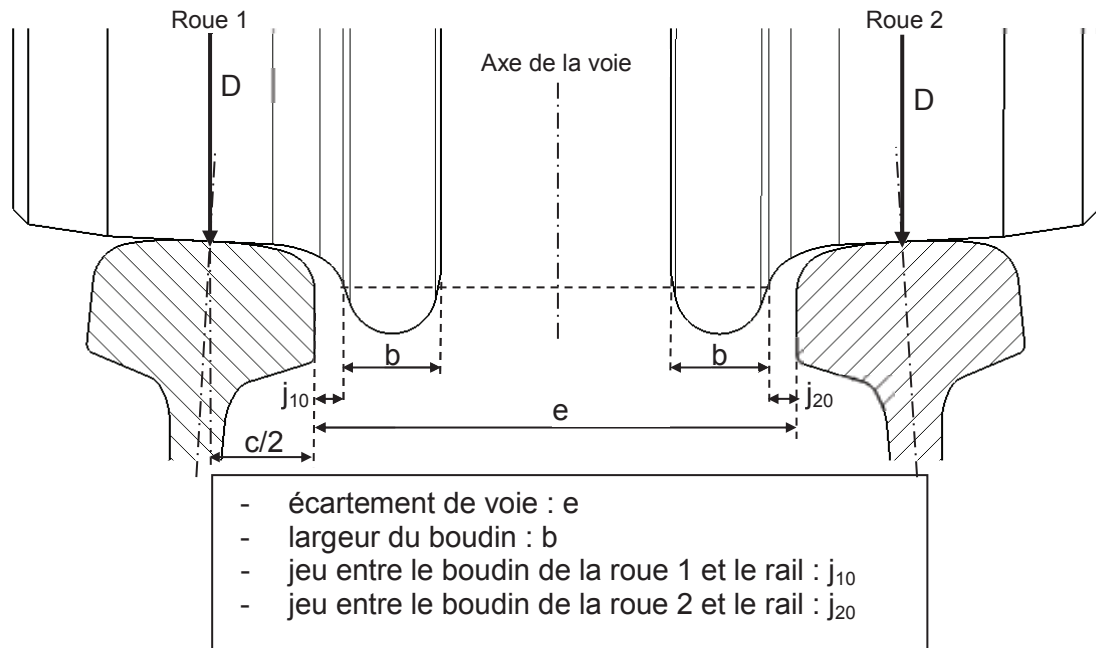
### Exigence : Roulement d'une rame en courbe (DT1)

Il s'agira de vérifier la courbure minimale des rails permise par la géométrie des bogies. Le profil des roues est conique, de demi-angle au sommet  $\alpha$ , permettant à chacune d'elles de parcourir les longueurs différentes de chaque file de rail en courbe en se plaçant sur le diamètre correspondant du cône. Les roues sont munies d'un épaulement circulaire appelé « boudin », de largeur  $b$ , participant au guidage de l'essieu. La géométrie du roulement est donnée figure 1.



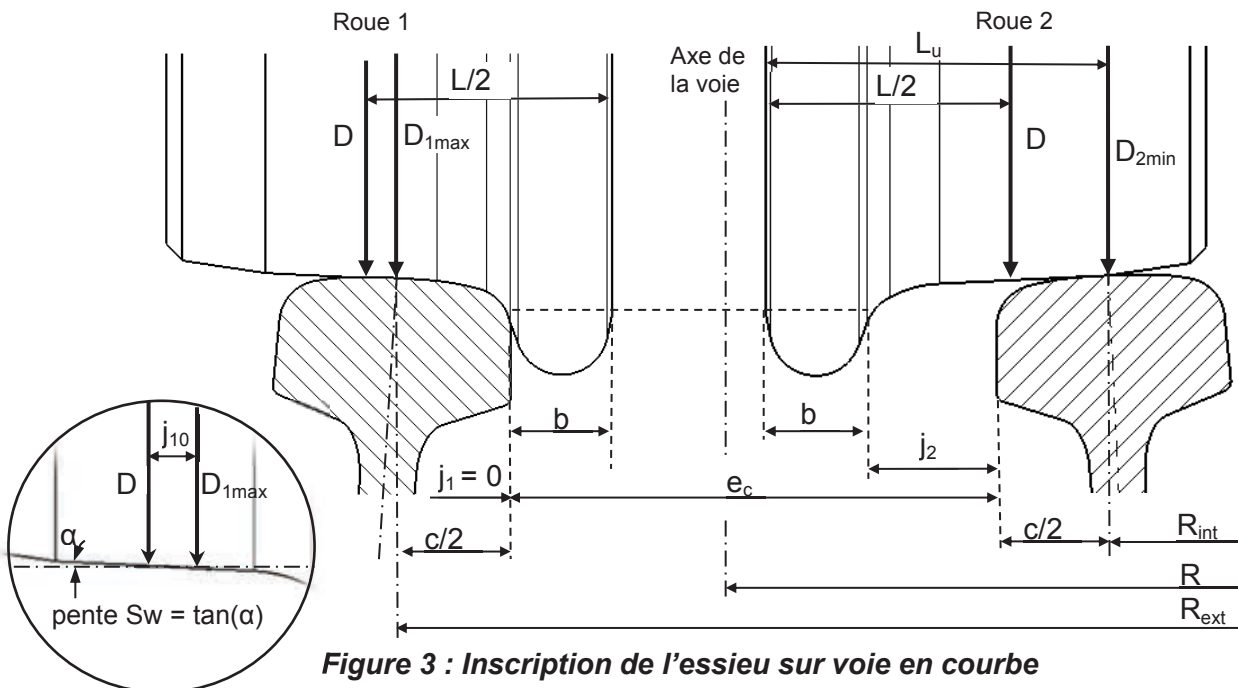
**Figure 1 : profil de la roue**

En ligne droite, le roulement théorique a lieu sur le diamètre nominal  $D$ , identique pour les deux roues d'un essieu parcourant la même longueur sur les deux files de rails (figure 2).



**Figure 2 : Inscription de l'essieu en ligne droite**

En courbe de rayon  $R$ , de l'axe de la voie, les roues de l'essieu se positionnent suivant deux diamètres de roulement  $D_1$  et  $D_2$  de sorte que les longueurs parcourues sur chacune des files de rails permettent une vitesse de rotation identique des deux roues (figure 3). C'est ce que l'on appelle le roulement en cône.



**Figure 3 : Inscription de l'essieu sur voie en courbe**

Pour obtenir une bonne inscription de l'essieu en courbe, la condition de roulement en cône doit être satisfaite.

La condition extrême se produit lorsque le boudin de la roue 1 frotte sur le champignon du rail et lorsque sur la roue 2, le rail est à la limite de largeur utile de la roue (figure 3). Le cumul de ces deux

conditions est possible car l'écartement de la voie en courbe, noté  $e_c$ , est supérieur à l'écartement de la voie, noté  $e$ , en ligne droite.

Le jeu de la voie ( $j_1 + j_2$ ) permet de limiter l'usure des boudins de roue ainsi que des épaules des rails et de réaliser le roulement en cône en courbe.

**Question 1.1.** A l'aide de la figure 2, déterminer l'expression du jeu  $j_{10}$  en fonction de  $L$ ,  $c$  et  $b$ .

**Question 1.2.** En considérant le contact entre le boudin de la roue 1 et le rail extérieur présenté sur la figure 3, déterminer l'expression du diamètre  $D_{1\max}$  en fonction du diamètre nominal  $D$ , du jeu  $j_{10}$  et de la pente  $Sw$  du cône de la roue 1 puis l'expression du diamètre  $D_{2\min}$  en fonction du diamètre nominal  $D$ , des largeurs  $L$  et  $L_u$ , ainsi que de la pente  $Sw$ .

**Question 1.3.** Exprimer le rayon  $R$ , de l'axe de voie, en fonction de l'écartement des voies  $e_c$ , des diamètres  $D_{1\max}$  et  $D_{2\min}$  ainsi que de la largeur des rails  $c$ .  
Pour cela le candidat considèrera le roulement sans glissement qui permet d'écrire une relation entre  $D_{1\max}$ ,  $D_{2\min}$ ,  $R_{\text{ext}}$  et  $R_{\text{int}}$ .

**Question 1.4.** Calculer numériquement le rayon minimal que devront avoir les courbes de la ligne de métro. Pour un parcours sinueux avec des rayons de courbes petits, comment faut-il choisir le diamètre  $D$  des roues et la pente  $Sw$ ?

**Question 1.5.** Conclure par rapport à l'exigence du cahier des charges.

**Données numériques :**  $D = 840$  mm ;  $e_c = 1455$  m ;  $Sw = \tan(\alpha) = 0,05$  ;  $L = 135$  mm ;  $c = 65$  mm ;  $b = 22$  mm ;  $L_u = 119$  mm.

## Exigence – Renversement du train (DT1)

Cette fois il est question de vérifier le facteur de sécurité au renversement compte tenu des irrégularités de courbure des rails.

En courbe si la voie restait sur un plan horizontal, les boudins des roues presseraient contre le rail extérieur. Pour éviter cela, le plan de la voie doit être disposé perpendiculairement à la résultante des forces qui agissent sur le train. De ce fait, un dévers  $h$  est créé entre le rail extérieur et le rail intérieur.

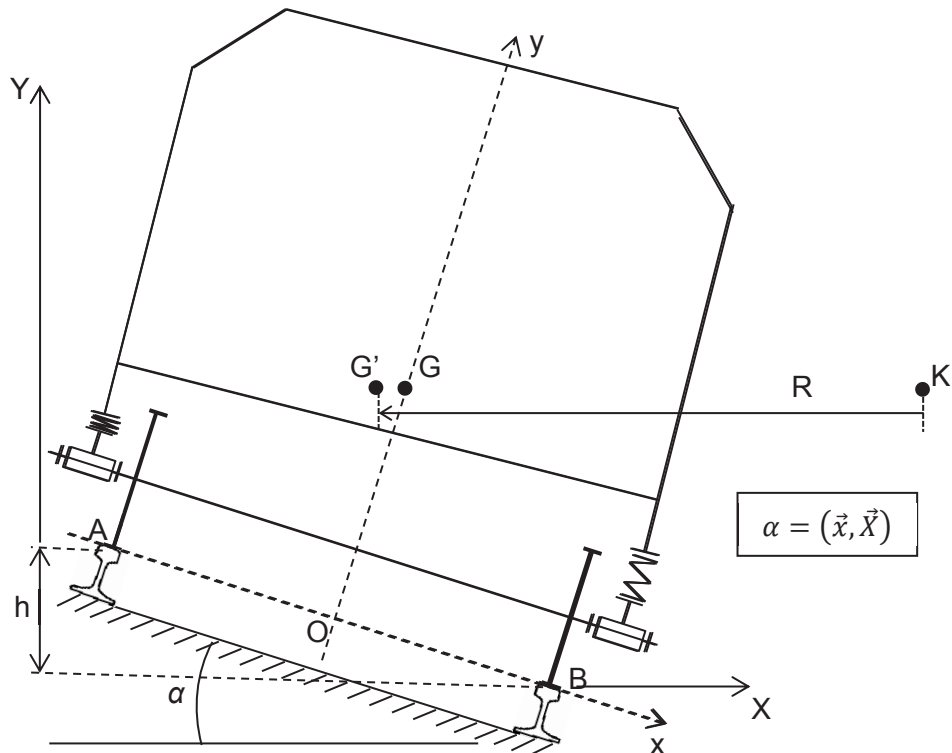


Figure 4 : Définition du dévers  $h$

On note  $G$  le centre de gravité de la voiture à l'arrêt.

On souhaite vérifier le non renversement du train en courbe. Pour ce calcul de stabilité, nous tiendrons compte du déplacement latéral  $GG'$ , du centre de gravité de la voiture étudiée par suite de la compression des ressorts de suspension :  $\overrightarrow{GG'} = -\frac{s}{\cos(\alpha)}\vec{X}$  et  $\overrightarrow{AG'} = L\vec{X} + H\vec{Y}$

### Modélisation du contact roue/rail :

Les contacts roue/rail sont supposés ponctuels.

- L'inertie des roues et de tous les solides en rotation est négligée ;
- Le contact d'une roue avec le rail rehaussé est modélisé par le torseur suivant :

$$\{T(\text{railA} \rightarrow \text{roue})\} = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R}_{\text{railA} \rightarrow \text{roue}} = T_1 \vec{x} + N_1 \vec{y} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A$$

- Le contact d'une roue avec le rail en contre-bas est modélisé par le torseur suivant :

$$\{T(\text{railB} \rightarrow \text{roue})\} = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R}_{\text{railB} \rightarrow \text{roue}} = T_2 \vec{x} + N_2 \vec{y} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_B$$

- L'accélération de la pesanteur est notée :  $\vec{g} = -g\vec{Y}$



- Une voiture a une masse  $m$ . Le train a une vitesse constante  $V$  et parcourt une courbe de rayon  $R$ . Si on note  $K$  le centre de la courbe :  $\overrightarrow{KG} = -R\vec{x}$
- L'écartement des voies est défini comme suit :  $\overrightarrow{AB} = e\vec{x}$ .
- On note  $R_0(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  et  $R_1(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  les deux repères de la figure 4.

**Question 1.6.** En appliquant le principe fondamental de la dynamique en A, trouver une équation scalaire permettant d'exprimer  $N_2$ .

On prendra pour la suite :  $L = \left(\frac{e}{2} - s\right) \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} + H \cdot \tan(\alpha)$

**Question 1.7.** Exprimer la condition de non renversement et montrer que le facteur de sécurité au renversement peut se mettre sous la forme suivante ( $\alpha$  restant petit) :

$$n = \frac{\left(\frac{e}{2} - s\right)}{\left(\frac{V^2}{gR} - \frac{h}{e}\right) H}$$

**Question 1.8.** On limite l'accélération transversale à  $1,12 \text{ m/s}^2$  pour le confort des passagers. Déterminer numériquement le facteur de sécurité  $n$  et conclure vis-à-vis du cahier des charges.  $h = 100 \text{ mm}$  ;  $s = 10 \text{ cm}$  ;  $H = 1,5 \text{ m}$  ;  $e = 1,520 \text{ m}$  ;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

## Partie 2. Confort des usagers

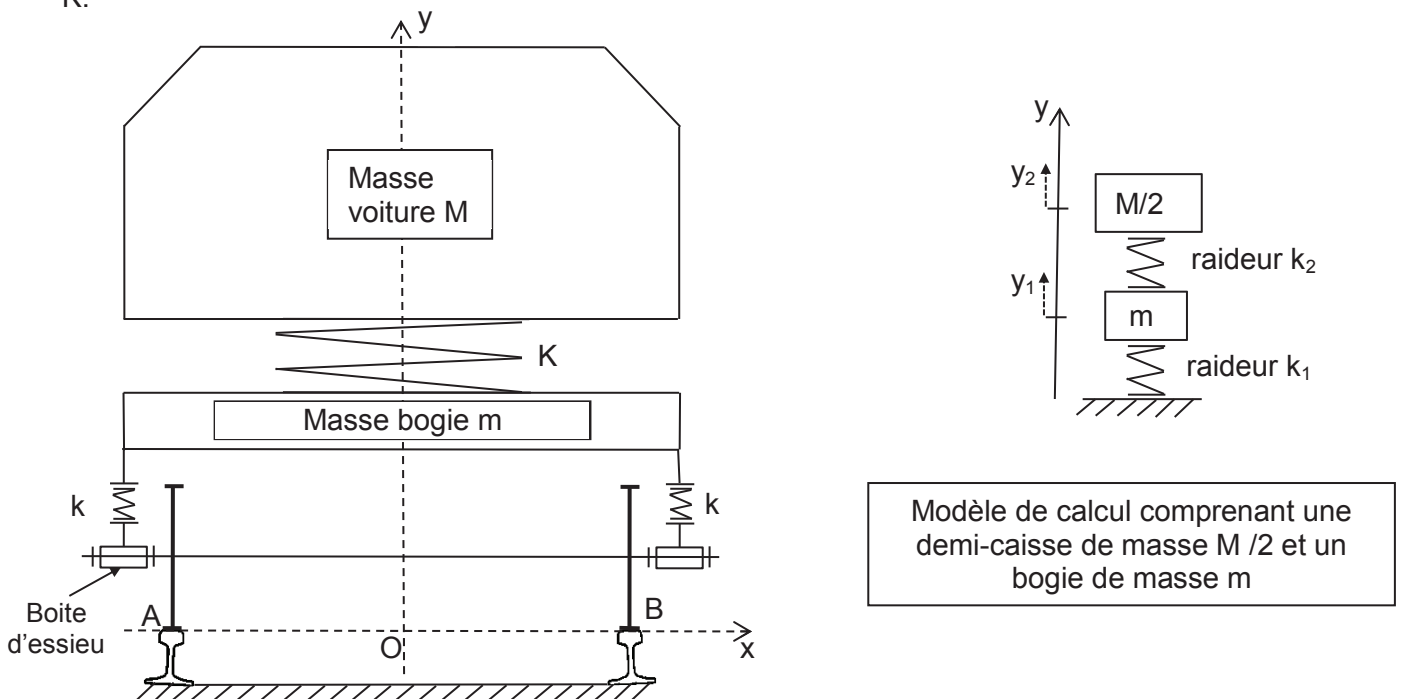
### Exigence : Stabilité (DT1)

Cette partie a pour objectif de vérifier la stabilité de la rame par une analyse fréquentielle de l'ensemble bogie-caisse (mode de pompage uniquement).

On assimile la caisse d'une voiture à une masse  $M$  reliée à chaque bogie par une raideur  $K$ .

Un bogie de masse  $m$  est lié à chaque boîte d'essieu par l'intermédiaire d'une raideur  $k$ .

La suspension primaire entre un bogie et ses deux essieux est donc modélisée par 4 ressorts de raideur  $k$  en parallèle. La suspension secondaire entre un bogie et sa caisse par un ressort de raideur  $K$ .



**Figure 5 : Modèle des suspensions primaire et secondaire – Modèle de calcul équivalent**

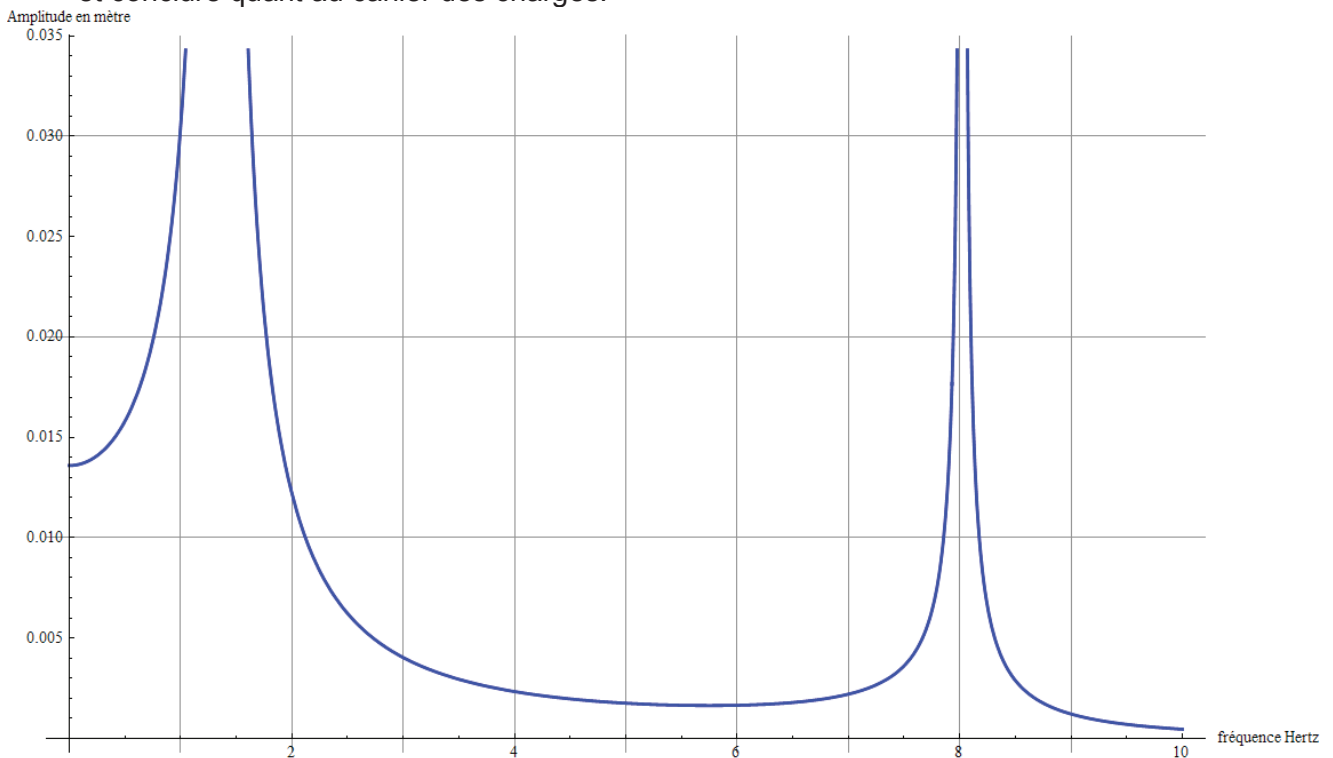
Afin de déterminer les fréquences propres en pompage du système, on étudie une demi-caisse comme le montre le modèle de calcul de la figure 5. On appelle respectivement  $y_1$  et  $y_2$  les déplacements verticaux absolus des masses  $m$  et  $M/2$  par rapport à leur position d'équilibre.

**Question : 2.1.** Exprimer les raideurs  $k_1$  et  $k_2$  du modèle en fonction des raideurs  $k$  et  $K$  du modèle de suspension primaire et secondaire.

**Question : 2.2.** Ecrire les deux équations différentielles qui régissent les mouvements des masses  $m$  et  $M/2$ .

**Question : 2.3.** Quel est l'intérêt d'analyser les fréquences propres ?

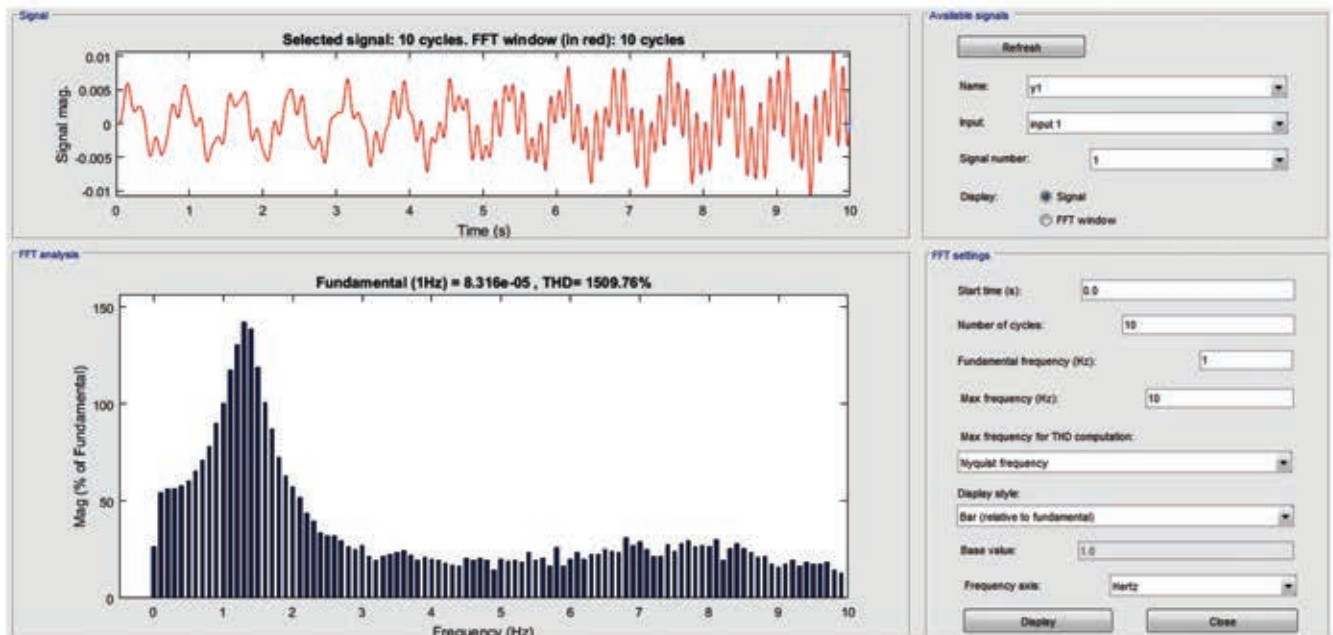
**Question : 2.4.** Lorsque l'on excite le système avec une force sinusoïdale sur la masse  $M/2$ , on obtient la réponse en module du déplacement de  $y_1$  de la figure 6. Justifier l'allure de la courbe et conclure quant au cahier des charges.



**Figure 6 : Analyse fréquentielle de la suspension**

**Question : 2.5.** Sur le document DR1 compléter le schéma du modèle de simulation de la suspension étudiée en précisant les valeurs des paramètres des blocs rajoutés. Identifier les éléments de la suspension et indiquer les données d'entrée et de sortie du modèle de simulation.

**Question : 2.6.** La figure 7 présente la réponse fréquentielle de la suspension du modèle Simscape avec amortissement. Commenter les modifications apportées sur la réponse fréquentielle.



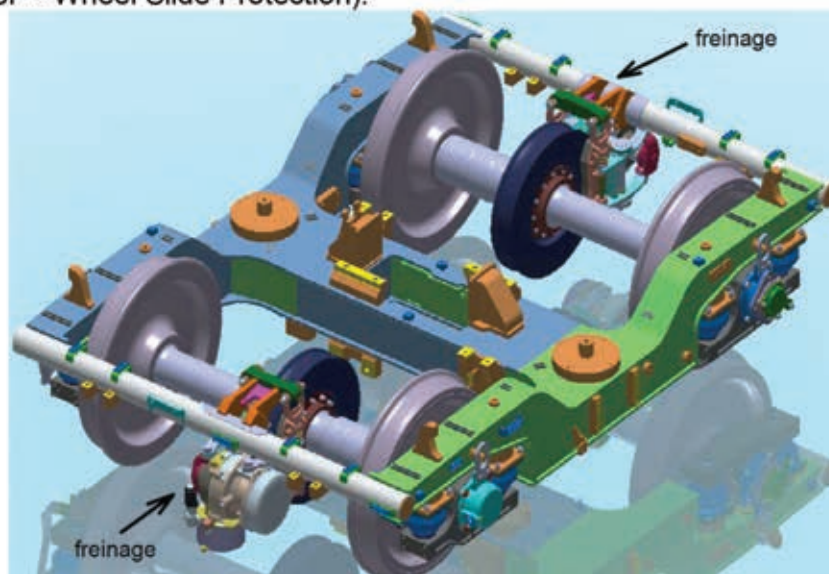
**Figure 7 : Analyse fréquentielle Simscape**

### Partie 3. Freinage

Dans le domaine des transports ferroviaires, le phénomène d'adhérence entre roues et rails est au cœur des problématiques de traction et de freinage car les transferts de puissance reposent sur le contact entre deux corps en acier possédant un très faible coefficient de frottement.

Le contact entre la roue et le rail (figure 2) est directement lié à la forme de la partie supérieure du rail (« le champignon »), au profil de la roue et aux caractéristiques des matériaux en contact.

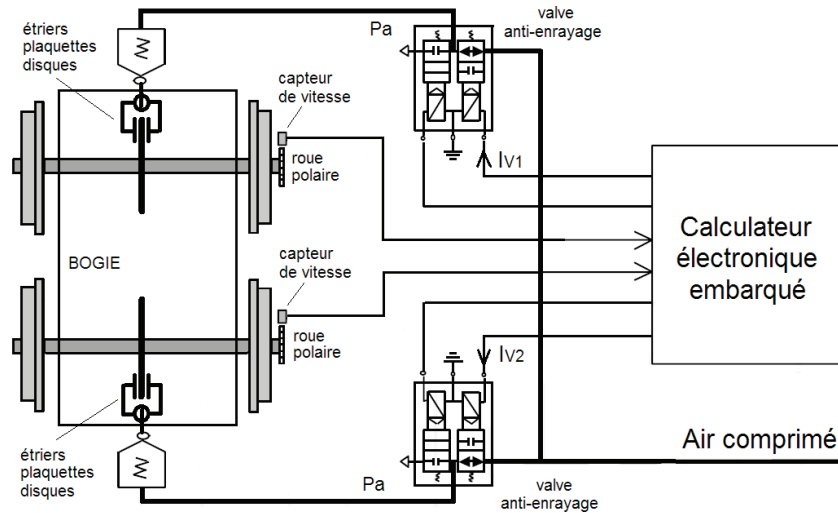
Pendant la phase de freinage qui fera l'objet de notre étude, un couple est appliqué aux essieux du bogie par l'intermédiaire d'un système de freinage électrique et/ou pneumatique. Si la valeur de ce couple dépasse une certaine limite (dépendant de l'adhérence entre roues et rails), les roues peuvent alors être rapidement bloquées et glisser sur les rails. Ce phénomène est appelé « enrayage » et peut avoir des conséquences graves sur la sécurité. Pour éviter ce phénomène, les véhicules sur rails sont équipés de dispositifs qui détectent l'enrayage et adaptent la valeur du couple de freinage afin de récupérer de l'adhérence. Deux unités de freinage pneumatique à disques équipent les bogies de la rame de métro de Los Teques (figure 8). Chaque unité est associée à un système de freinage anti-enrayage (WSP - Wheel Slide Protection).



**Figure 8 : Bogie de la rame de métro de Los Teques**

**Exigence : Arrêt d'urgence (DT1)**

D'un point de vue réglementaire, un dispositif anti-enrayage (WSP – Wheel Slide Protection) sert à exploiter au mieux l'adhérence disponible en contrôlant le relâchement et la reprise des efforts de freinage. Par conséquent, ces systèmes de freinage anti-enrayage améliorent la sécurité en réduisant les distances d'arrêt. Ils sont le plus souvent constitués d'un capteur de vitesse, d'une valve « anti-enrayage » et d'un calculateur électronique embarqué (figure 9). L'étude permettra de vérifier la distance d'arrêt.



**Figure 9 : Système de freinage anti-enrayage (WSP – Wheel Slide Protection)**

Hypothèses :

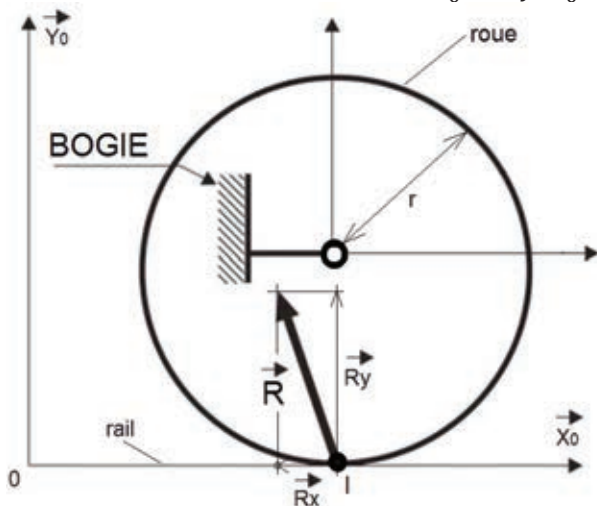
- Une rame du métro de Los Teques comporte généralement six voitures.



**Figure 10 : Rame du métro de Los Teques**

- Le repère Galiléen  $R_0 (0, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$  est lié au sol (rail) et la rame et ses bogies se déplacent (figure 11) en ligne droite (sans pente) dans le sens de l'axe  $\vec{X}_0$  ( $X_0 > 0$ ). Par ailleurs, la réaction du rail sur la roue ( $\vec{R}$ ) est notée :

$$\vec{R} = R_x \cdot \vec{X}_0 + R_y \cdot \vec{Y}_0 + R_z \cdot \vec{Z}_0 \text{ avec } R_y = M \cdot g \text{ et } R_z = 0$$



M : Masse freinée par la roue  
g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>)

**Figure 11 : Repère Galiléen et déplacement de la rame**

- La masse totale de la rame est supposée équitablement répartie sur chacune des roues. La masse freinée par une roue ( $M$ ) est supposée égale à 7250 kg.
- La résistance de l'air ainsi que les masses des roues, des essieux et du système de freinage pneumatique à disques sont négligées.

Le glissement ( $s$ ) relatif au contact de la roue sur le rail est défini de la manière suivante :

$$s = 1 - \frac{V}{V_T}$$

$V$  (m/s) : vitesse du point de contact appartenant à la roue ( $l$ ) par rapport au bogie.

$V_T$  (m/s) : vitesse linéaire de la rame de métro (supposée connue à tout instant).

La figure 12 donne l'allure du facteur de freinage ( $\mu$ ) en fonction du glissement ( $s$ ). Sa valeur maximum est obtenue au point A. A partir de ce maximum et si l'effort de freinage n'est pas réduit, l'adhérence diminue très rapidement et le glissement ( $s$ ) augmente ce qui peut conduire au blocage de la roue. Cependant, le facteur de freinage ( $\mu$ ) peut augmenter à nouveau (à partir du point B) si le glissement ( $s$ ) est maîtrisé, son maximum sera atteint au point C. C'est la régulation du glissement ( $s$ ) dans la zone de reprise d'adhérence (entre les points B et C) qui fera l'objet de notre étude.

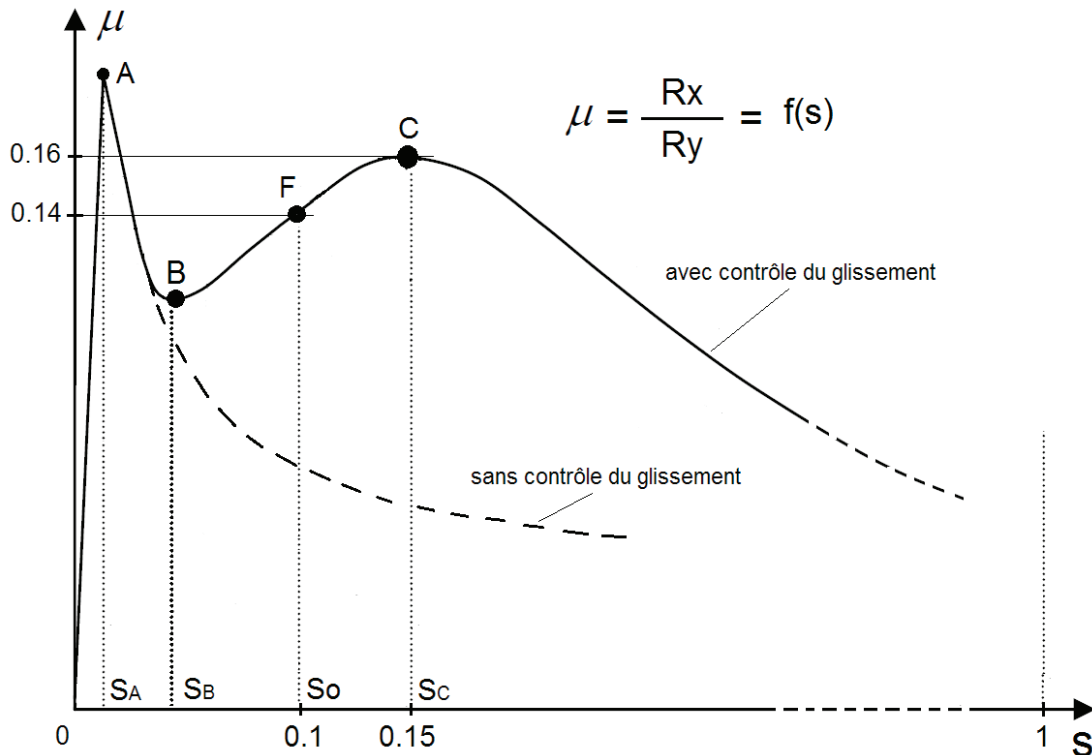


Figure 12 : Facteur de freinage ( $\mu$ ) en fonction du glissement ( $s$ )

Le schéma fonctionnel de la régulation du glissement ( $s$ ) en phase de freinage est représenté sur la figure 13.

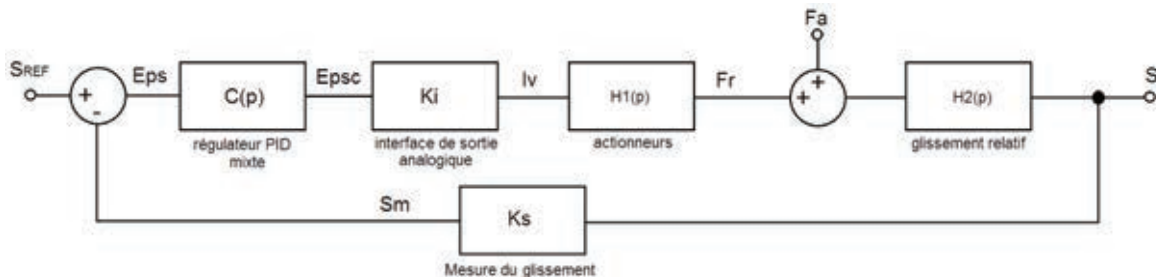


Figure 13 : Schéma fonctionnel de la régulation du glissement ( $s$ )

## Modélisation du glissement (s) en phase de freinage

La rame de métro se déplace à la vitesse constante ( $V_{T0}$ ) de 30 km/h lorsqu'un ordre de freinage est donné. En supposant que le système de freinage anti-enrayage agisse au voisinage du point de fonctionnement  $F$  (figure 12) et que l'action de freinage est identique sur chaque roue de la rame de métro :

**Question 3.1.** Calculer la décélération (supposée constante) liée au freinage. En déduire la distance et le temps de freinage de la rame de métro.

On montre après linéarisation que l'évolution du glissement (s) en fonction de la force de freinage ( $fr$ ) appliquée à une roue de la rame de métro est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$J \cdot V_{T0} \cdot \dot{s}(t) + r^2 \cdot M \cdot g \cdot f'(s_0) \cdot s(t) = r^2 \cdot fr(t)$$

Remarques :

- $r$  : rayon d'une roue de la rame de métro ( $r = 420 \text{ mm}$ ).
- $M$  : masse freinée par une roue de la rame de métro ( $M = 7250 \text{ kg}$ ).
- $J$  : moment d'inertie ( $J = M \cdot r^2 / 2$ ) de la roue par rapport à l'axe  $\vec{Z}_0$  ( $J = 639.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ).
- $V_{T0}$  : vitesse linéaire de la rame au point de fonctionnement  $F$  ( $V_{T0} = 30 \text{ km/h}$ ).
- $g$  : accélération de la pesanteur ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- $f'(s) = \frac{d\mu}{ds}$  : variation du facteur de freinage ( $\mu$ ) en fonction d'une variation du glissement (s).
- «  $p$  » représente la variable de la transformée de Laplace.

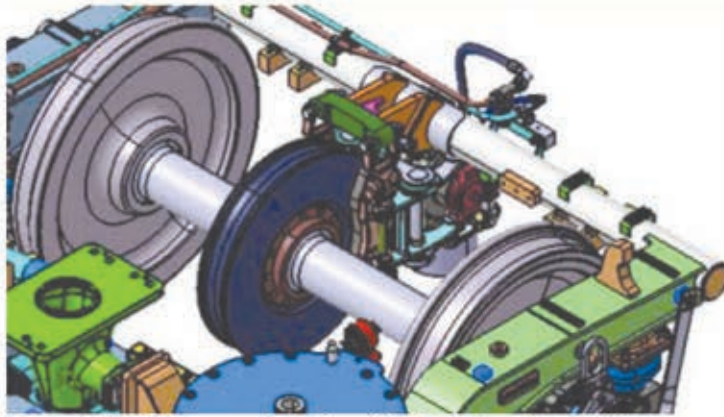
**Question 3.2.** En linéarisant le comportement du facteur de freinage ( $\mu$ ) au voisinage du point de fonctionnement  $F$  (figure 12), déterminer la valeur de  $f'(s_0)$ .

**Question 3.3.** Montrer que la fonction de transfert entre le glissement (s) et la force de freinage ( $fr$ ) peut s'écrire  $H_2(p) = \frac{S(p)}{Fr(p)} = \frac{K_2}{1 + \tau_2 \cdot p}$ . Vous donnerez l'expression littérale et la valeur numérique du gain statique  $K_2$  et de la constante de temps  $\tau_2$ .

**Question 3.4.** En régime établi, calculer la valeur de la force de freinage ( $Fr_0$ ) qui permettra d'obtenir le glissement souhaité au point de fonctionnement  $F$  (figure 12).

## Modélisation des actionneurs

Les actionneurs mis en œuvre pour ralentir l'essieu (figure 14) sont une valve anti-enrayage, un étrier et des plaquettes de frein. Les plaquettes de frein, situées de part et d'autre du disque, sont poussées au moyen de deux pistons placés dans l'étrier. Ces pistons reçoivent de l'air comprimé de la valve anti-enrayage. La pression d'air en sortie de la valve anti-enrayage ( $Pa$ ) est proportionnelle à un courant continu ( $Iv$ ) compris entre 4 et 20 mA (figure 9). Il est important de noter que les plaquettes et l'étrier ne doivent en aucun cas se déformer pour permettre une progressivité maîtrisée de l'intensité de freinage.



**Figure 14 : Disque de frein, étrier et valve anti-enrayage**

Dans la pratique, on ne recherche que très rarement le modèle de connaissances d'un système trop sophistiqué car sa mise en équation est à la fois difficile et irréaliste. Le plus souvent, l'automaticien préfère élaborer un modèle de comportement à partir de données expérimentales authentiques et comportant un nombre limité de paramètres. Ce modèle est utilisable pour la simulation, la commande ou la détection de défaillances. La réponse à un échelon de consigne de la fonction de transfert  $H_1(p)=Fr(p)/lv(p)$  correspondant aux actionneurs a été relevée expérimentalement. Cette réponse est apériodique et a été modélisée par une fonction de transfert du second ordre du type :

$$H_1(p) = \frac{K_1}{(1+\tau_1.p).(1+\tau_2.p)} \text{ avec } K_1=625N/mA, \tau_1=0.05s, \tau_2=0.2s$$

### Modélisation de l'interface de sortie analogique

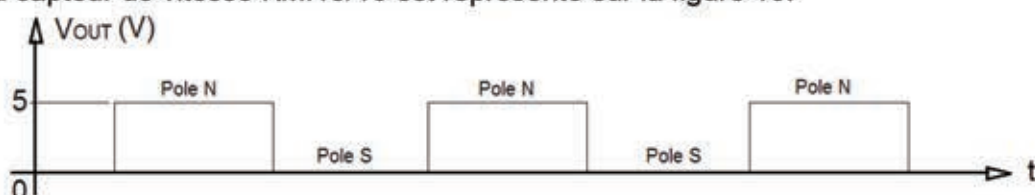
La valve anti-enrayage (bobine) se commande à partir d'une consigne en courant du type 4-20 mA. Cette valve anti-enrayage est connectée à une carte d'entrées-sorties numérique 12 bits (document réponse 2) disposant d'une sortie analogique (4-20 mA) passive (2 fils). Cette carte d'entrées-sorties est associée au calculateur électronique embarqué (figure 9).

**Question 3.5.** Représenter le câblage de la valve anti-enrayage (document DR2).

**Question 3.6.** Déterminer la relation permettant de calculer le courant dans la boucle ( $I_v$ ) à partir du nombre binaire 12 bits non signé ( $Epsc$ ) issu du régulateur PID mixte (figure 13). En déduire la valeur du gain  $K_i$  ( $K_i=dI_v/dEpsc$ ) correspondant à l'interface de sortie analogique (figure 13).

### Modélisation de la mesure du glissement (s)

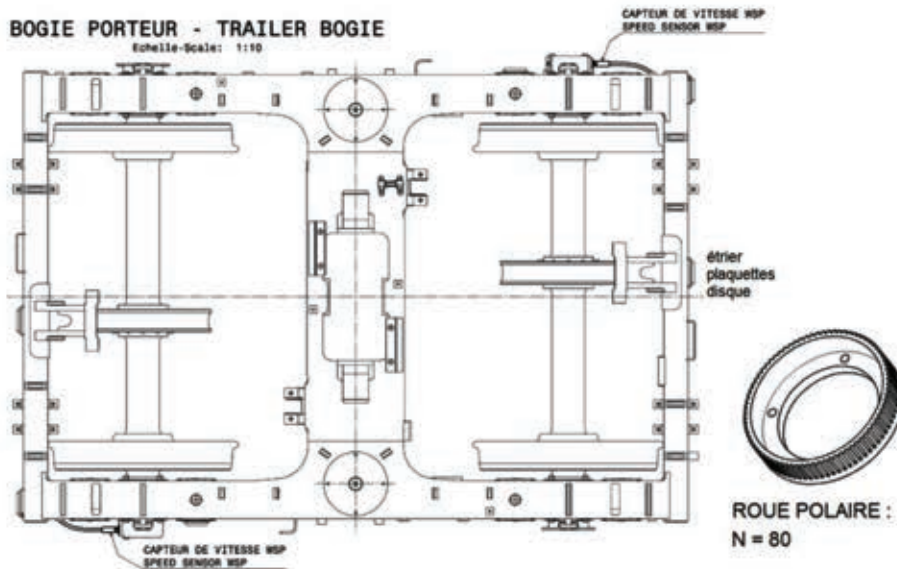
La mesure du glissement ( $s$ ) s'effectue à partir de la mesure de la vitesse circonférentielle ( $V$ ) de la roue du bogie (1) et de la vitesse linéaire ( $V_T$ ) de la rame de métro (supposée connue à tout instant). Pour cela, une roue polaire (possédant  $N$  pôles nord et sud) directement accouplée à l'essieu (figure 16) et un capteur de vitesse magnéto résistif KMI15/16 (document DT2) sont mis en œuvre pour mesurer la vitesse angulaire de la roue ( $\omega_r$ ). Le signal de sortie ( $V_{OUT}$ ) du conditionneur de signal associé au capteur de vitesse KMI15/16 est représenté sur la figure 15.



**Figure 15 : Signal de sortie ( $V_{OUT}$ ) du conditionneur de signal associé au capteur de vitesse KMI15/16**

**Question 3.7.** La mesure de la vitesse angulaire de la roue ( $\omega_r$ ) s'effectue en comptant (entrée compteur 24 bits de la carte d'entrées-sorties) le nombre de périodes ( $n$ ) du signal issu du montage ( $V_{OUT}$ ) associé au capteur de vitesse KMI15/16 dans une fenêtre temporelle de largeur  $\Delta t$ . Déterminer (en l'absence de glissement ( $s$ )) la relation permettant de calculer la vitesse circonférentielle ( $V$ ) de la roue en fonction de  $r$ ,  $n$ ,  $N$  et  $\Delta t$ .

**Question 3.8.** Déterminer (en l'absence de glissement ( $s$ )) le nombre de périodes ( $n$ ) du signal issu du montage ( $V_{OUT}$ ) associé au capteur de vitesse KMI15/16 lorsque la rame de métro se déplace à 30 km/h (la largeur de la fenêtre temporelle  $\Delta t$  est supposée égale à 500 ms).



**Figure 16 : Mesure de la vitesse angulaire de la roue ( $\omega_r$ )**

### Régulation du glissement ( $s$ ) en phase de freinage

La régulation du glissement ( $s$ ) en phase de freinage (figure 13) est confiée à un régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) mixte de fonction de transfert :

$$C(p) = \frac{K_p \cdot (1 + T_i \cdot p + T_i \cdot T_d \cdot p^2)}{T_i \cdot p}$$

Les trois paramètres à régler sont  $K_p$  (gain proportionnel),  $T_i$  (constante de temps intégrale) et  $T_d$  (constante de temps dérivée).

**Question 3.9.** On se propose de régler les paramètres ( $T_i, T_d$ ) du régulateur PID mixte de manière à compenser les pôles de la fonction de transfert  $H_1(p)$ . Déterminer la valeur des constantes de temps intégrale ( $T_i$ ) et dérivée ( $T_d$ ) à implanter dans le régulateur PID mixte.

Pour évaluer les performances statiques de la régulation du glissement ( $s$ ) en réponse à une variation d'adhérence (considérée comme une force perturbatrice externe venant s'ajouter à la force de freinage ( $F_r$ )), on applique à l'entrée de perturbation un échelon de faible amplitude  $F_a(p) = 100/p$ . On considérera qu'il n'y a pas de variation de la consigne de glissement ( $S_{REF} = 0$ ).

**Question 3.10.** Calculer l'erreur ( $E_{ps}$ ) statique (justifier le résultat obtenu). Quelle action du régulateur (Proportionnelle, Intégrale ou Dérivée) permet de satisfaire l'exigence relative aux variations d'adhérence (justifier votre réponse) ?



## Communication sur le bus CAN

La communication entre le système de freinage anti-enrayage (WSP - Wheel Slide Protection) et le système informatique de gestion de la rame de métro (figure 17) s'effectue sur un bus CAN (Control Area Network). On supposera que le protocole CAN standard 2.0 A (document DT4) est mis en œuvre.

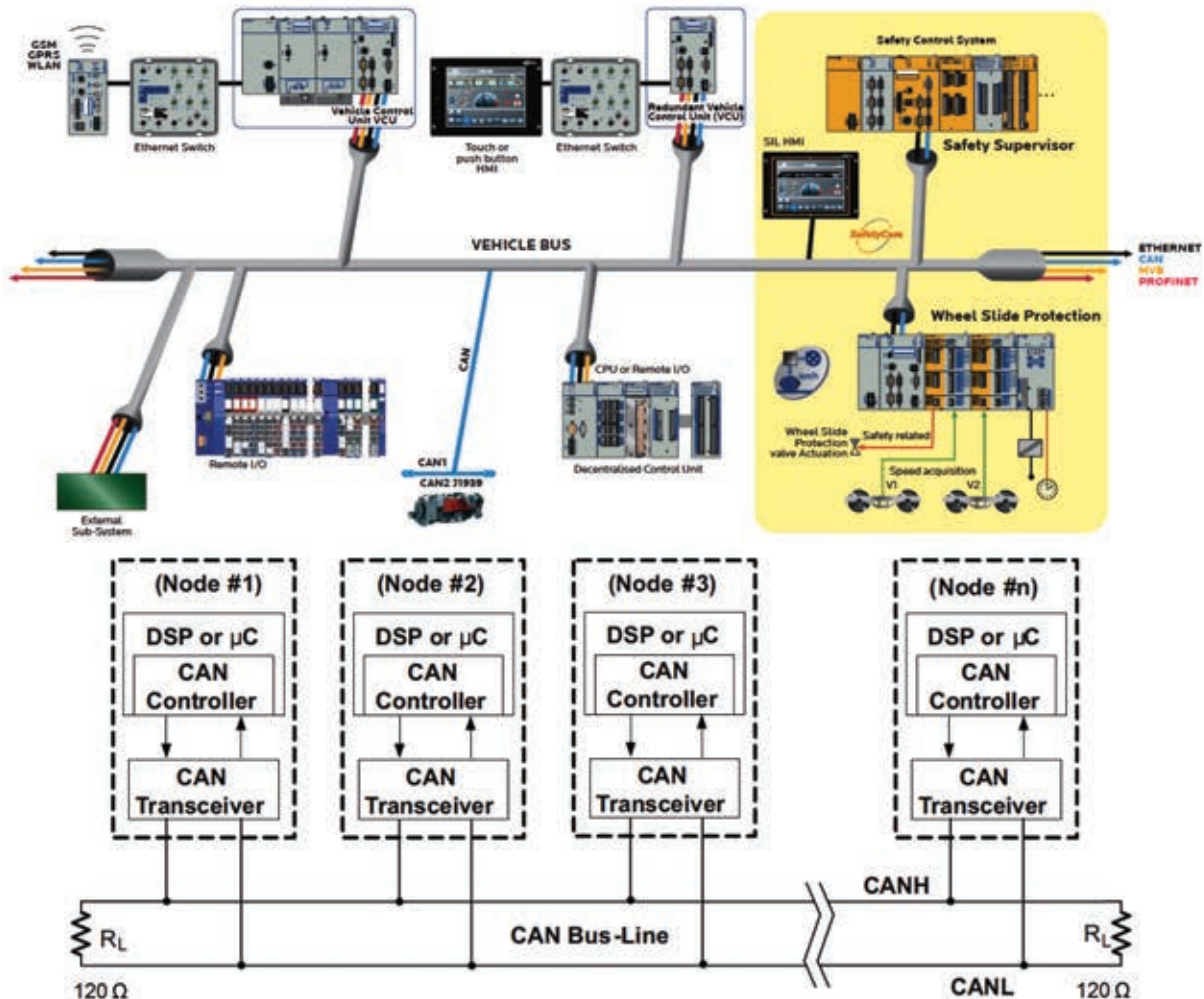


Figure 17 : Communication sur le bus CAN

**Question 3.11.** Trois stations cherchent à émettre des données sur le bus CAN (document réponse 3), compléter le chronogramme représentant l'activité résultante sur le bus. Préciser quelle station réussira (arbitrage) à transmettre ses informations sur le bus CAN. Justifier votre réponse.

**Question 3.12.** Déterminer les longueurs minimum et maximum (en bits) d'une trame de données (document DT4) circulant sur le bus CAN (sans bitstuffing).

**Question 3.13.** Calculer le rendement du protocole CAN standard 2.0 A lorsque l'on émet une trame de données complète (document DT4).

**Question 3.14.** Sur le document réponse 3, compléter la trame (sans le champ CRC) envoyée au système de freinage anti-enrayage (WSP - Wheel Slide Protection) lorsque le système de gestion de la rame de métro émet la consigne de glissement « 0.10 » codée en ASCII (documents DT4 et DT5).

#### Partie 4. Confort des utilisateurs – économie d'énergie – Ventilation

Un des axes d'évolution de cette nouvelle ligne est la re-conception du système de ventilation des stations de métro. Afin de diminuer les dépenses énergétiques du système de climatisation la société envisage de pré-refroidir gratuitement l'air neuf prélevé à l'extérieur de la station de métro grâce à un système de récupération d'énergie rudimentaire.

Ce système permettra d'échanger thermiquement entre l'air neuf à la température extérieure de 35°C et l'air extrait à la température intérieure de 25°C.

Le récupérateur de chaleur est constitué par une gaine rectangulaire unique de longueur  $L=70$  m.

A l'intérieur de cette gaine circulent à contre-courants et séparés à mi-hauteur par une fine plaque en acier les deux flux d'air.

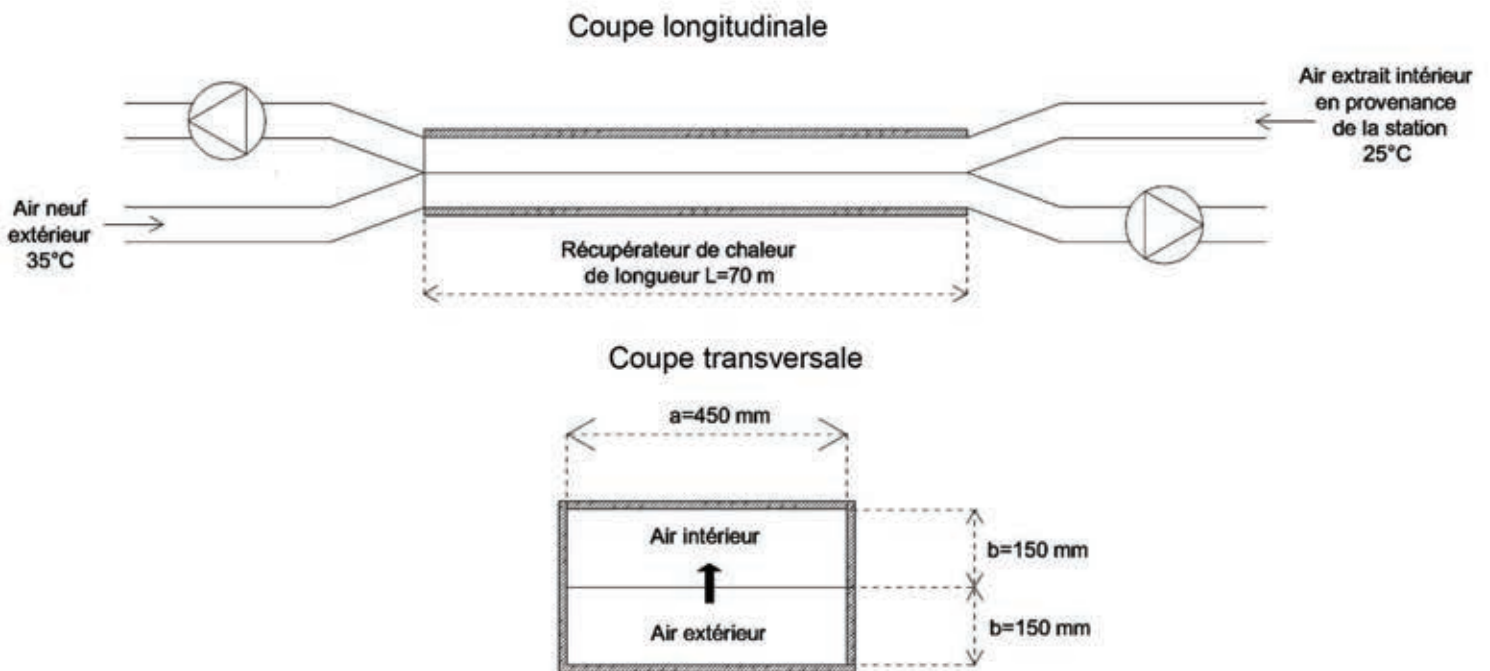
L'échangeur est extérieurement calorifugé. On supposera ainsi qu'il n'existe pas de pertes thermiques vers l'extérieur de l'échangeur.

#### Exigence : Récupération d'énergie (DT1)

On souhaite dans cette partie :

- Déterminer les caractéristiques de l'échangeur ;
- vérifier que cette solution n'entraîne pas de condensation à l'intérieur du récupérateur, ce qui pourrait générer des problèmes d'hygiène ;
- Estimer la puissance de refroidissement du récupérateur à partir du modèle proposé.

Le modèle retenu pour l'étude est représenté sur les deux schémas ci-dessous :



**Figure 18 : Modèle ventilation**

Les débits massiques d'air neuf et d'air extrait sont identiques.

On supposera une masse volumique de l'air supposée constante et égale à  $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Question 4.1.** Déterminer la vitesse moyenne d'écoulement de l'air  $v$  en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans l'échangeur pour l'air neuf et l'air extrait.

**Données :**

- Besoins en air neuf  $30 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  par personne.
- Nombre de personnes : 100.
- Les dimensions géométriques sont représentées figure 18.

**Question 4.2.** Calculer la perte de charge linéique sur l'air neuf et l'air extrait.

**Données :**

- Perte de charge linéique :  $j = 0,012 \times \frac{v^{1,8}}{d_h^{1,2}}$  en  $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$
- Dans le cas d'une géométrie rectangulaire le diamètre est remplacé par le diamètre hydraulique noté  $d_h$  qui se calcule de la manière suivante :  $d_h = \frac{2ab}{a+b}$ , avec  $a$  et  $b$  les dimensions de la section rectangulaire.

**Question 4.3.** Les pertes de charge dues aux frottements sont transformées en chaleur. Calculer la puissance thermique linéaire  $p$  en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$  récupérée par chaque fluide.

Rappel :  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$

**Question 4.4.** Calculer le coefficient d'échange  $U$  de l'échangeur sachant que les coefficients d'échanges superficiels entre le fluide chaud (air neuf) et la paroi et le fluide froid (air extrait) et la paroi sont identiques  $h_C = h_F$ .

**Données :**

- $h_C = h_F = 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .
- Epaisseur de la plaque d'acier :  $e = 2 \text{ mm}$ .
- Conductivité de l'acier :  $\lambda_a = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

**Question 4.5.** On définit deux grandeurs permettant de caractériser l'échangeur :

- Nombre d'unité de transfert de l'échangeur :  $\text{NUT} = \frac{US}{\dot{m}C_p}$ , avec  $U$  le coefficient d'échange de l'échangeur considéré comme constant,  $S$  la surface d'échange de l'échangeur,  $\dot{m}$  le débit massique (identique pour les deux fluides) et  $C_p$  la chaleur massique à pression constante.
- $A = \frac{p}{\dot{m}C_p}$ , avec  $p$  la puissance thermique linéique produite par les frottements du fluide en mouvement.

Après avoir brièvement expliqué la signification de ces deux grandeurs, donner leur valeur numérique respective puis commenter les résultats.

**Données :**

- Chaleur massique à pression constante de l'air supposée constante et égale à  $C_p = 1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .
- $p = 5,52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$

**Question 4.6.** Après avoir établi la valeur de la température de rosée de l'air extérieur, montrer qu'il n'existe pas de risque de condensation dans l'échangeur.

**Données :**

- Hygrométrie relative de l'air extérieur :  $HR=50\%$ , avec  $HR = 100 \times \frac{P_{VE}}{P_{VS}}$ ,  $P_{VE}$  étant la pression partielle de vapeur d'eau et  $P_{VS}$  la pression de vapeur saturante.
- Pression de vapeur saturante de l'eau  $P_{VS} = 10^{\frac{7,625 \cdot t}{241+t} + 2,7877}$ .  $P_{VS}$  en Pa et  $t$  en °C.
- On rappelle que la température de rosée  $t_R$  est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser :  $P_{VS}(t_R) = P_{VE}(t)$

**Question 4.7.** A partir d'un bilan thermique global sur l'échangeur, montrer que

$$T_{CE} - T_{CS} = T_{FS} - T_{FE} - 2AL$$

**Données :**

- $T_{CE}$  : Température d'entrée du fluide chaud.
- $T_{CS}$  : Température de sortie du fluide chaud.
- $T_{FE}$  : Température d'entrée du fluide froid.
- $T_{FS}$  : Température de sortie du fluide froid.
- On tient compte de l'apport de chaleur dû aux pertes de charges.

**Question 4.8.** On montre également que  $\frac{T_{FS} - T_{FE}}{T_{CE} - T_{FE}} = \frac{NUT}{NUT + 1} + \frac{AL}{T_{CE} - T_{FE}}$

Calculer la température de l'air neuf en sortie de l'échangeur, puis la puissance de refroidissement de l'air neuf économisée grâce au récupérateur.

Que devient cette puissance si on ne tient plus compte de l'apport de chaleur dû aux pertes de charge ? Commenter.

**Données :**

- $A = 0,0055 \text{ °C} \cdot \text{m}^{-1}$
- $NUT = 0,63$

**Partie 5. Etude d'une dalle d'une station du métro**

Afin de faciliter le déplacement des usagers entre les différents quais d'une des stations de métro la construction d'une mezzanine a été retenue.

L'objectif de cette partie est de déterminer le ferrailage à mettre en place en partie courante d'une dalle qui surplombe les voies de circulation du métro dans une des stations. Dans une station de la ligne du métro, trois niveaux de dalles se succèdent du haut vers le bas, une dalle supérieure de couverture qui reçoit les charges des éléments situés au-dessus de la station, une dalle intermédiaire « mezzanine » qui sert aux locaux techniques et à la circulation des usagers et un radier supportant les quais et les voies de circulation du métro (DT4)

**Exigence : Assurer la sécurité des utilisateurs (DT1)**

L'objet de cette étude est la vérification de dimensionnement des structures aux règlements Eurocodes sur la dalle intermédiaire « mezzanine » réalisée en béton armé coulé en place (DT4 et DT5). On étudie les contraintes de flexion dans la dalle en particulier à la mi-portée de ses appuis. Cependant, l'étude d'une dalle continue sera approchée par une méthode simplificatrice issue du règlement BAEL et justifiée par les Recommandations Professionnelles.

L'étude se limitera à la partie centrale de la dalle comprise entre les deux voiles intermédiaires. Le sens de portée de la dalle sera le sens transversal à la station de métro.

**Question 5.1.** Déterminer la longueur de la portée entre appuis de cette zone de dalle en prenant en considération les indications de l'Eurocode 2 (DT6).

On étudie le chargement qui s'applique sur une bande de dalle d'un mètre de largeur. Les différentes valeurs du chargement de la dalle seront donc exprimées par mètre de largeur de dalle.

**Question 5.2.** A partir du DT7 déterminer la valeur des charges permanentes linéiques « G » et des charges d'exploitation linéiques (Q). Ces charges linéiques seront exprimées en  $\text{kN.m}^{-1}$  arrondies à 0,1 près. En déduire la valeur de la combinaison d'actions à l'état limite ultime (E.L.U.) s'exerçant sur la dalle.

On suppose tout d'abord que cette travée centrale de la dalle est indépendante des travées de rives et qu'il s'agit d'une dalle isostatique entre deux appuis (les deux travées de rives sont donc négligées).

**Question 5.3.** Représenter en justifiant, le schéma mécanique de la dalle avec ses liaisons, son chargement, ses dimensions et le système d'axes qui lui est associé. Cette représentation sera conforme à celle usuellement utilisée en mécanique des poutres.

On considère à partir de maintenant que la portée de la dalle est égale à 15 m et qu'elle supporte une charge uniformément répartie résultante de la combinaison d'actions à l'E.L.U. égale à  $33 \text{ kN.m}^{-1}$

**Question 5.4.** Tracer le diagramme de variation du moment fléchissant  $M_{fz}$  le long de cette zone de dalle. Indiquer la valeur maximale du moment  $M_{fz\max}$ .

On souhaite prendre en compte la continuité de la dalle (dalles de rive de part et d'autre de la travée centrale) sans avoir à mener les calculs nécessaires à la résolution de ce système hyperstatique. On demande pour cela de tenir compte de la continuité en évaluant forfaitairement les moments sur appuis et en en déduisant le moment en travée (DT8). On prendra désormais la valeur approchée  $M_{fz\max} = 900 \text{ kN.m}$  pour le moment de flexion maximal de la dalle.

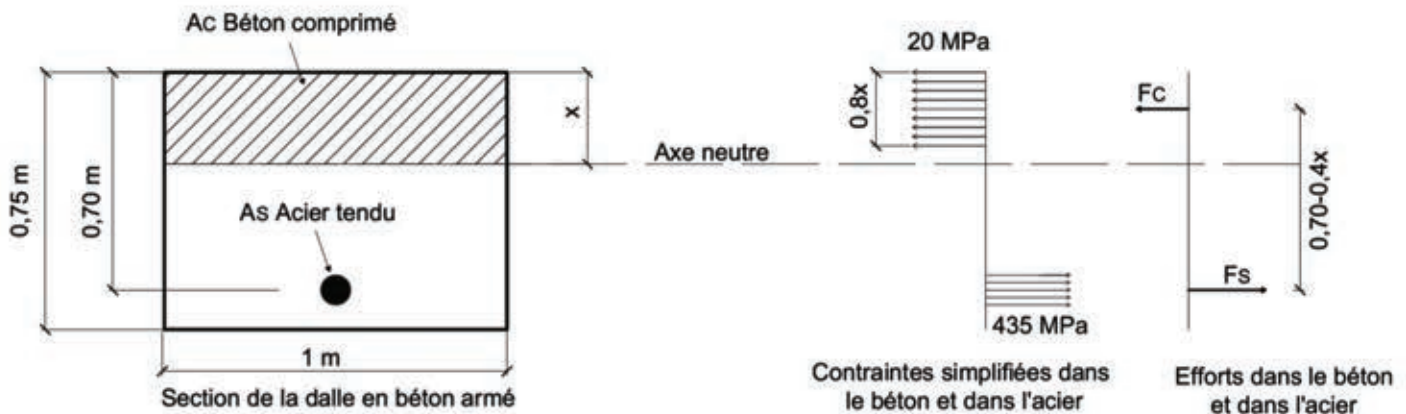
**Question 5.5.** Tracer le diagramme de variation du moment fléchissant  $M_{fz}$  le long de la travée centrale de la dalle en appliquant la méthode forfaitaire du DT8. Indiquer les valeurs du moment de flexion sur chaque appui et la valeur du moment de flexion maximum en travée.

### Dimensionnement de la section d'armatures longitudinales à mi-portée

On s'intéresse à la répartition des contraintes normales à la section de béton se trouvant à mi-portée de la dalle. On considère maintenant que le moment fléchissant maximum dans cette section est égale à  $M_{fz\max} = 675 \text{ kN.m}$ .

Une section de béton armé soumise à de la flexion se caractérise par (figure 19) :

- Une zone supérieure de béton comprimé de hauteur  $x$  (section  $A_c$ ) pour laquelle on considère que le béton est sollicité de manière uniforme sur toute sa hauteur à sa limite réglementaire de résistance à la compression (20 MPa).
- Une zone inférieure de béton tendu qui est négligé en raison de la faible résistance à la traction du béton. Dans cette zone, les efforts de traction sont donc repris uniquement par les armatures longitudinales en acier placées en partie basse (section  $A_s$ ) et qui sont sollicitées à la limite réglementaire de la résistance de l'acier (435 MPa).
- Pour tenir compte du comportement du béton décrit sous la forme d'une « parabole-rectangle » dans le règlement, la hauteur de béton comprimé est réduite à la valeur  $0,8.x$ .



**Figure 19 : Caractéristiques d'une section de béton armé**

**Question 5.6.** A partir des valeurs des contraintes indiquées pour le béton et pour l'acier, établir l'expression de l'effort dans le béton  $F_c$  en fonction de  $x$  et l'expression de l'effort dans l'acier  $F_s$  en fonction de  $A_s$ .

**Question 5.7.** Déterminer la hauteur de béton comprimé  $x$  en écrivant l'expression du moment  $M_{fzmax}$  fonction de l'effort  $F_c$  et du bras de levier.

**Question 5.8.** Déterminer la valeur de la section d'acier  $A_s$  en écrivant l'expression du moment  $M_{fzmax}$  fonction de l'effort  $F_s$  et du bras de levier.

## Partie 6. Exploitation pédagogique

Cette partie vise l'élaboration d'une séquence d'enseignement en première STI2D, à partir de l'étude d'une situation réelle dans un contexte industriel.

La qualité de la réflexion et la pertinence des propositions didactiques et pédagogiques seront prises en compte dans les réponses aux questions.

### Avertissement :

- Le (ou la) candidat(e) est invité(e) à formuler toutes les hypothèses nécessaires à la compréhension de ses choix et décisions en termes de propositions didactiques et pédagogiques.
- Il sera tenu compte de la capacité du (ou de la) candidat(e) à répondre aux différentes parties dans leur globalité plutôt que répondre aux questions de façon dispersée.
- Il sera tenu compte, pour chaque partie, de la capacité du (ou de la) candidat(e) à décrire sa démarche, les données et hypothèses formulées, les connaissances mobilisées.
- Il sera tenu compte dans la correction de la clarté et de la concision des réponses.

### Contexte pédagogique :

Les réflexions pédagogiques qui sont proposées dans cette partie doivent amener à construire une séquence de formation relative à **l'enseignement technologique transversal du baccalauréat STI2D**. Les programmes des enseignements spécifiques de spécialité résultant d'un prolongement de l'enseignement technologique transversal dans des champs techniques particuliers.

Classe : 1 STI2D	Nbre élève : 32	Effectif réduit : 16
Enseignement Technologique Transversal	Nbre heures classe entière : 2h	Nbre heures effectif réduit : 5h
Période	Milieu de première	

### Problématique pédagogique

Les résultats de l'épreuve écrite Enseignements technologiques Transversaux montre la difficulté pour les élèves pour résoudre des problèmes de statique dans des contextes différents. L'étude portera sur l'élaboration d'une séquence pédagogique traitant l'équilibre des solides qui doit être abordé en première avec un niveau taxonomique 3 ainsi que les modèles de comportement de niveau taxonomique 2. Vous avez en votre possession des documents pédagogiques (DP2, DP3) proposant des ressources mais vous pouvez vous en écarter et proposer d'autres possibilités.

**Question 6.1.** Sur feuille de copie et à l'aide du document pédagogique DP1 :

Décrire en détail l'organisation globale proposée pour la séquence. Expliquer ces choix. Le candidat précisera et justifiera :

- la mise en situation en lien avec le contexte industriel proposé ;
- le ou les problème(s) à résoudre ;
- les résultats attendus ;
- les compétences développées ;
- le ou les supports utilisés ;
- les cours ou les synthèses envisagées ;
- les activités prévues ;
- nombre d'élève par activités ;
- l'organisation des groupes à effectif réduit (îlots).

**Question 6.2.** Sur feuille de copie et à l'aide des documents DP1 et DR4 :

Les heures à effectifs réduits permettent la mise en place d'îlots. Dans l'exemple proposé quatre groupes de quatre élèves travaillent sur des supports différents : Mezzanine d'une station, essieux de bogie, poteaux électrique, accroche des véhicules.

Préciser et détailler les activités, « étude de dossier – résolution de problème » et « expérimentation – simulation » du groupe d'élèves travaillant sur la mezzanine.

Le candidat précisera :

- la démarche pédagogique envisagée ;
- les tâches des élèves ;
- la répartition de ces tâches au sein du groupe ;
- les liens avec les compétences à évaluer ;

- L'utilisation des outils numériques (E.N.T, logiciel, etc.) ;
- Les ressources nécessaires (Diagrammes SysML, documents techniques, tutoriels logiciels, etc.) ;
- Les maquettes didactiques utilisables.

**Question 6.3.** Sur feuille de copie :

Préciser et détailler la ou les modalités d'évaluation associées à l'activité de groupe de la question précédente (formative et/ou sommative)

Proposer une méthode et une grille d'évaluation. Le candidat précisera :

- Les compétences évaluées ;
- Les indicateurs de performances observés ;
- La mise en œuvre.

**Question 6.4.** Sur feuille de copie :

On suppose maintenant que l'établissement souhaite mettre en place l'expérimentation définie par l'arrêté du 11 juillet 2016 qui autorise des pratiques pédagogiques relatives au choix différé de la spécialité. Voté au C.A, l'équipe pédagogique organise un renforcement de l'enseignement technologique transversal en début d'année et par conséquent un renforcement de l'enseignement de spécialité en fin d'année. Le cadre réglementaire impose notamment :

- le respect des programmes des enseignements technologiques transversaux et spécifiques des spécialités du cycle terminal de la série STI2D (la démarche de projet permet de mobiliser les compétences communes aux quatre spécialités) ;
- le respect du volume horaire annuel des enseignements technologiques transversaux et de spécialité.

Présenter en quoi cette organisation impacte l'organisation annuelle et montrer l'intérêt.