

Épreuve d'admissibilité de sciences industrielles de l'ingénieur

A. Présentation de l'épreuve

Arrêté du 28 décembre 2009 modifié

- Durée totale de l'épreuve : 6 heures
- Coefficient 1

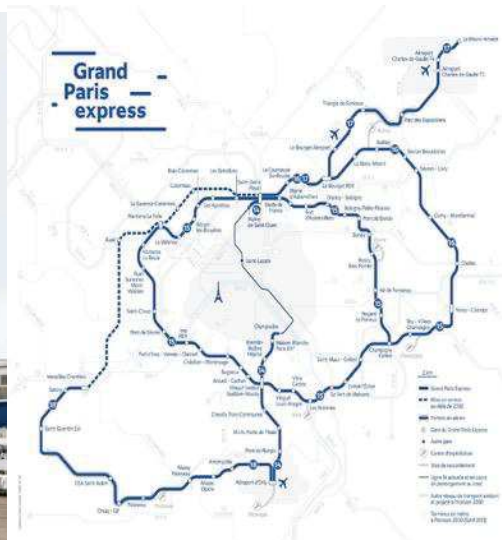
L'épreuve est commune à toutes les options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session, quelle que soit l'option choisie.

Elle 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 pluritechnologique automatique.

B. Sujet

Le sujet est disponible en téléchargement sur le site du ministère à l'adresse :

https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externer/96/6/s2021_agreg_externer_sii_1_138_9966.pdf



C. Éléments de correction

Contexte et étude préliminaire

Question 1

Les trois piliers du développement durable sont les enjeux sociaux, économiques, et environnementaux. L'analyse s'effectue du point de vue de chacun de ces enjeux :

- enjeu social, favoriser la mobilité des franciliens dans une région où les bassins d'emploi sont parfois très éloignés des zones d'habitation ;
- enjeu économique, faciliter les liaisons entre les centres d'affaires et les aéroports ;
- enjeu environnemental, augmenter la part des transports en commun avec un mode de transport utilisant l'énergie électrique, quasiment décarbonée en France.

Choix de la technologie du tunnelier

Question 2

Tunnelier vs tunnel à tranchée couverte :

- pour une tranchée couverte, le tracé doit approximativement suivre le tracé d'axes de communication existants. En passant sous des habitations, cela nécessite de nombreuses expropriations et destructions de bâtiments.
- le relief doit être régulier pour avoir une ligne de métro sans variation brutale d'altitude.
- les nuisances de chantier sont beaucoup plus importantes.

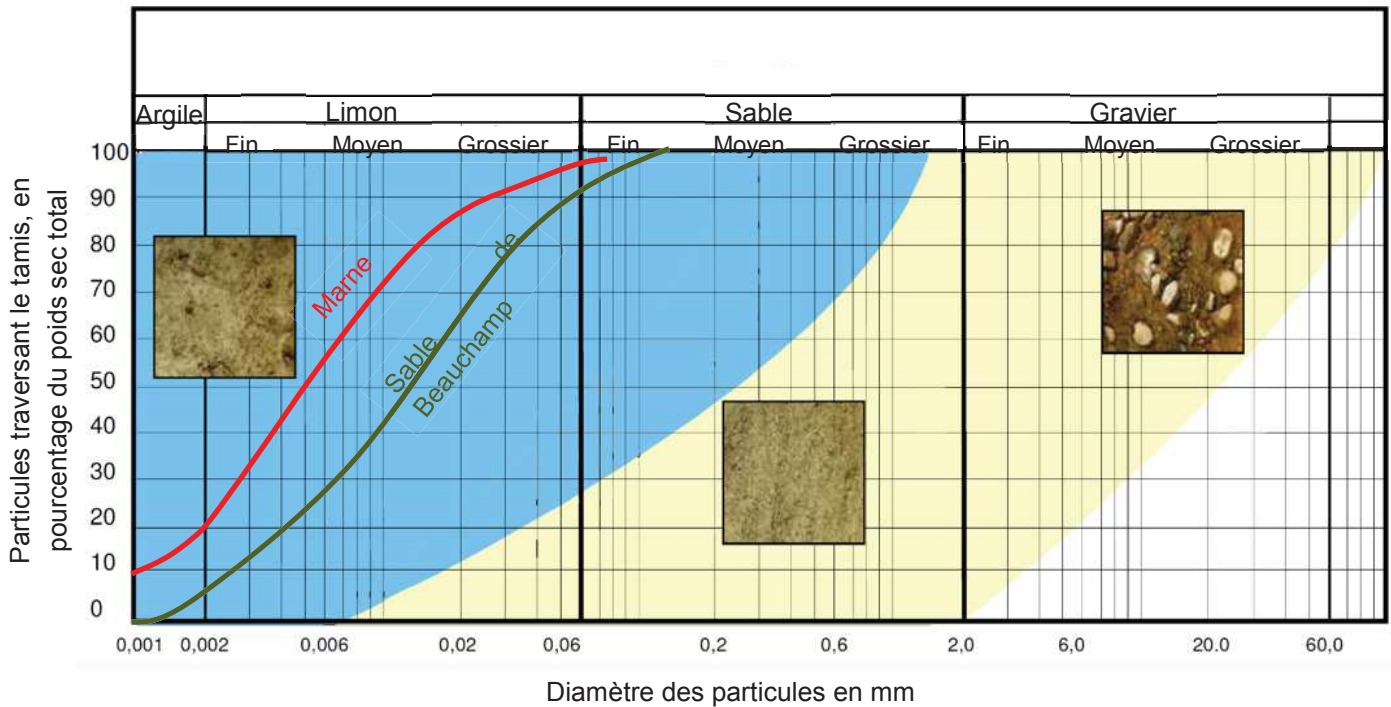
Tunnelier vs explosifs :

- réduit des nuisances sonores pour l'environnement ;
- limite la fragilisation de la roche ;
- pas de fumées toxiques difficiles à évacuer pour de longs tunnels ;
- sûreté pour le personnel.

Question 3

On relève sur le document technique DT4 un passage à travers de la marne, des sables de Beauchamp et du calcaire de Saint-Ouen.

Question 4



On constate bien que les deux courbes d'analyse granulométrique de la marne et des sables de Beauchamp se situent dans la zone de travail adaptée pour un tunnelier à pression de terre.

Question 5

La lecture du planning journalier permet d'identifier un fonctionnement en 3x8, avec une durée consacrée à l'excavation de 13h. Avec un fonctionnement 5 jours sur 7, le temps d'excavation hebdomadaire est donc de 65h.

Question 6

Le volume entre deux filets consécutifs est donné par : $V = \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_f^2)}{4} \cdot (p - e)$

Donc le débit volumique maximal vaut : $Q_m = \eta \cdot V \cdot N_v$

Question 7

La tête de coupe peut donc extraire : $Q_r = \frac{Q_m}{1+F} = 1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Or $Q_r = V_m \cdot S$ avec $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ et $D = 9,83 \text{ m}$, diamètre du tunnel.

Donc $V_m = \frac{Q_m}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (1+F)} = \frac{\eta \cdot \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_f^2)}{4} \cdot (p - e) \cdot N_v}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (1+F)} = \frac{\eta \cdot (D_e^2 - D_f^2) \cdot (p - e) \cdot N_v}{D^2 \cdot (1+F)} = 0,0178 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 1,07 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$

Question 8

Dans le document technique DT3, on relève la longueur de galerie à creuser de 3 274 m.

$\frac{3\,274}{1,07} = 3\,059 \text{ h}$ de creusement.

$\frac{3\,059}{65} = 47,1 \text{ semaines}$ soit environ une 1 année et 1 semaine de creusement.

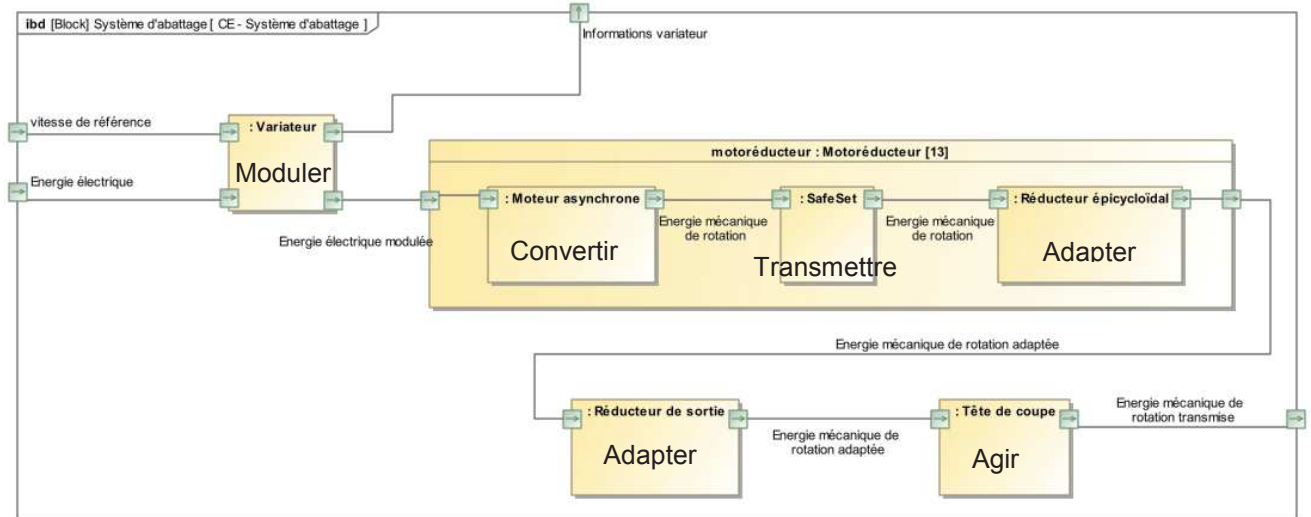
L'exigence 1.1.2 indique une durée maximale de 15 mois, donc celle-ci est respectée.

Tous les calculs ont été faits uniquement autour de la vis d'Archimède, sans problème. De plus, la vis est l'élément limitant dans le cas de terrains meubles mais la tête de coupe risque d'être limitante dans le cas de terrains durs. C'est d'ailleurs pour cela que l'on utilise un tunnelier à pression de terre.

La marge utilisée est liée aux variations de type de terrain, aux pannes et/ou casses potentielles, etc.

Analyse de la chaîne de puissance du système d'abattage

Question 9



Question 10

Par lecture graphique :

- en fonctionnement normal, la vitesse maximale est de $2\,522,7 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, le couple maximal est de $2\,259 \text{ N}\cdot\text{m}$ et enfin la puissance maximale vaut $\frac{2522,7 \times 2\pi}{60} \times 1329 = 351 \text{ kW}$.
- en fonctionnement exceptionnel, la vitesse maximale est de $2\,522,7 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, le couple maximal est de $2\,801 \text{ N}\cdot\text{m}$ et enfin la puissance maximale vaut $\frac{2522,7 \times 2\pi}{60} \times 1647 = 435 \text{ kW}$.

Question 11

La situation est celle d'un train à axes parallèles et fixes, pour un engrenage intérieur on a donc :

$$r_c = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{3c/0}} = + \frac{Z_{3c}}{Z_4}$$

Question 12

En traduisant le roulement sans glissement aux deux points de contact, et en se plaçant dans le repère du porte-satellites, on peut écrire directement $\frac{\omega_{2a/3a}}{\omega_{0/3a}} = + \frac{Z_{0a}}{Z_{2a}}$ et $\frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{2a/3a}} = - \frac{Z_{2a}}{Z_1}$. En multipliant ces deux expressions, puis en écrivant la composition des vitesses en passant par le repère du bâti, on obtient :

$$\frac{\omega_{2a/3a}}{\omega_{0/3a}} \times \frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{2a/3a}} = \frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{0/3a}} = \frac{\omega_{1/0} + \omega_{0/3a}}{\omega_{0/3a}} = - \frac{Z_{0a}}{Z_1}$$

Enfin, on exprime le rapport souhaité :

$$r = \frac{\omega_{1/0} - \omega_{3a/0}}{\omega_{3a/0}} = \frac{Z_{0a}}{Z_1}$$

$$r_1 = \frac{\omega_{3a/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_{0a}}$$

Question 13

De manière analogue, on obtient r_2 et r_3 . D'où : $r_2 = \frac{\omega_{3b/0}}{\omega_{3a/0}} = \frac{Z_{3a}}{Z_{3a} + Z_{0b}}$ et $r_3 = \frac{\omega_{3c/0}}{\omega_{3b/0}} = \frac{Z_{3b}}{Z_{3b} + Z_{0c}}$.

Alors :

$$r = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{3c/0}} \times \frac{\omega_{3c/0}}{\omega_{3b/0}} \times \frac{\omega_{3b/0}}{\omega_{3a/0}} \times \frac{\omega_{3a/0}}{\omega_{1/0}} = r_c \cdot r_3 \cdot r_2 \cdot r_1$$

$$r = \frac{Z_{3c}}{Z_4} \times \frac{Z_{3b}}{Z_{3b} + Z_{0c}} \times \frac{Z_{3a}}{Z_{3a} + Z_{0b}} \times \frac{Z_1}{Z_1 + Z_{0a}}$$

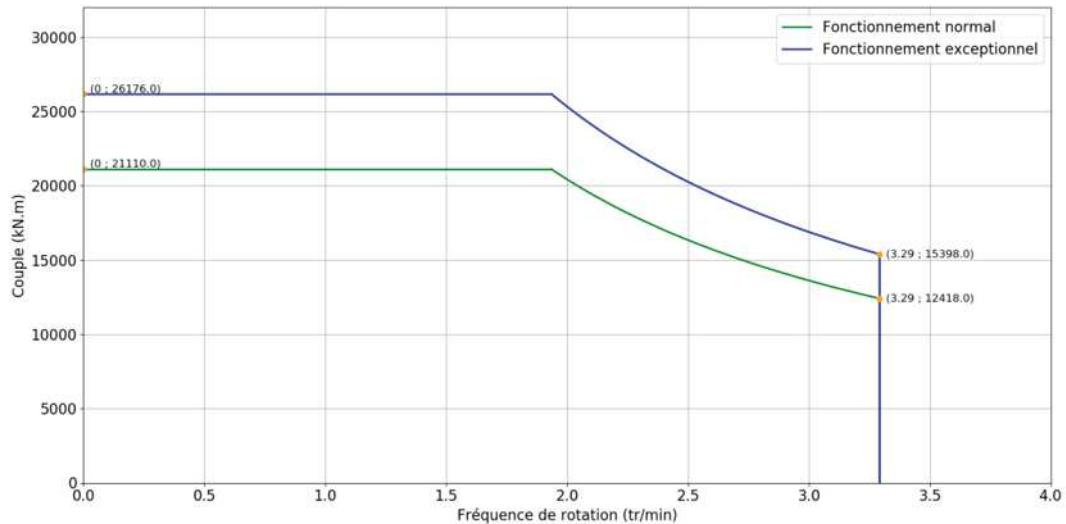
L'application numérique donne : $r \approx 0,0013 \approx \frac{1}{767}$.

Question 14

En régime stationnaire : $P_{tête} = N_{mot} \cdot \rho_{epi}^3 \cdot \rho_{red} \cdot P_u$

$$\text{Donc } C_{tête} = \frac{N_{mot} \cdot \rho_{epi}^3 \cdot \rho_{red} \cdot C_u}{r}$$

Question 15



Question 16

Pour ce diamètre de tunnelier ($D = 9,83\text{m}$), le couple maximum installé est usuellement de l'ordre de 20 000 kN.m. Ici, on est plutôt de l'ordre de 26 000 kN.m en fonctionnement exceptionnel, donc la puissance installée est largement surdimensionnée.

Commande des moteurs

Protocole de communication

Question 17

Avantages du réseau Profibus : moins de câbles, plus de flexibilité,...

Inconvénients du réseau Profibus : lenteur, si une connexion est défectueuse toute la branche tombe ...

Le réseau Profibus peut accueillir 126 éléments, alors que 63 éléments sont à piloter. Le réseau Profibus est donc adapté.

31 éléments peuvent être pilotés par segment donc 1 segment sera dédié à la tête de coupe (13 esclaves) et 2 segments pour les autres éléments (2×25 esclaves).

Question 18

Télégramme envoyé :

	MSB										LSB						
PKE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
IND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
PWE-H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PWE-L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Valeur hexadécimale
0065
0052
0000
0000

Télégramme reçu :

	MSB										LSB						
PKE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
IND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
PWE-H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PWE-L	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1

Valeur hexadécimale
0065
0052
0000
05CD

Bien que codé sur 16 bits, il n'y a pas de mise à l'échelle (facteur 1) ; la valeur se lit donc directement. La précision est donc bien de 1 tr.min⁻¹.

Question 19

Les deux critères prépondérants à retenir sont :

- aucun risque en cas de blocage du rotor. Si la roue de coupe est bloquée, il n'y a pas de risque de démagnétisation des moteurs.
- la mise en parallèle des moteurs peut se faire sans asservissement, ce qui est très intéressant avec les 13 moteurs à piloter.

Ensuite, d'autres critères confirment le choix de moteurs asynchrones : le besoin de couple au démarrage est faible car il se fait sans que la roue de coupe soit en prise dans le terrain, il y a peu de limites sur la masse embarquée, leur entretien est facile, leur prix est compétitif, etc.

Question 20

$$I' = \frac{V}{\sqrt{X^2 + \left(\frac{r}{g}\right)^2}}$$

$$P_{tr} = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot I'^2 = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot \frac{V^2}{X^2 + \left(\frac{r}{g}\right)^2}$$

Question 21

En supposant le glissement faible : $\left(\frac{r}{g}\right)^2 \gg X^2$

L'expression précédente devient : $P_{tr} = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot I'^2 = 3 \cdot \frac{g}{r} \cdot V^2$

or $P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s = C_u \cdot \Omega_s$ car il n'y a pas de pertes mécaniques.

avec $\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$ la vitesse de synchronisme en rad.s⁻¹.

donc : $C_u = 3 \cdot \frac{g}{r \cdot \Omega_s} \cdot V^2$

Question 22

En remplaçant dans l'expression précédente le glissement : $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

Il vient $C_U = 3 \cdot \frac{V^2}{r \cdot \Omega_s^2} \cdot (\Omega_s - \Omega)$

Donc :

$$a = -\frac{3 \cdot V^2}{r \cdot \Omega_s^2} \quad \text{et} \quad b = \frac{3 \cdot V^2}{r \cdot \Omega_s}$$

Applications numériques : $\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = 157 \text{ rad.s}^{-1}$ $a = -486 \text{ N.m.s.rad}^{-1}$ $b = 76\,400 \text{ N.m}$

Question 23

$\Delta N = 1 \text{ tr.min}^{-1}$ soit $\Delta \Omega = 0,1047 \text{ rad.s}^{-1}$ donc $\Delta C_U = a \cdot \Delta \Omega \approx 51 \text{ Nm}$

Vérification de la résistance de la chaîne de puissance

Question 24

On a $\tau_{max} = \frac{C_U}{I_O} \cdot \frac{d_I}{2}$

A.N. : $\tau_{max} = 15 \text{ MPa}$

Question 25

Cette valeur doit être comparée à la résistance pratique au glissement : R_{pg} .

On en déduit un coefficient de sécurité : $s = \frac{R_{pg}}{\tau_{max}} = 7,8$.

Ce coefficient de sécurité plutôt élevé s'explique par le contexte d'utilisation. Ici, la masse n'est pas un critère, donc le système peut être largement surdimensionné, d'autant plus que des ruptures de pièces dans un environnement aussi difficile d'accès, et avec des coûts d'exploitation particulièrement élevés, sont à proscrire.

Question 26

$$C_{sup} = G \cdot I_O \cdot \frac{\Delta \alpha}{L} = 9 \text{ N.m}$$

La valeur est extrêmement faible en comparaison avec C_U . Le surcouple introduit par le retard angulaire est donc tout à fait négligeable.

Question 27

Dans la documentation, on relève qu'avec un diamètre d'arbre $d_I = 100 \text{ mm}$, le couple transmissible maximal est de 15 kN.m .

Pour cette valeur de couple, la contrainte maximale dans l'arbre de transmission vaut environ 75 MPa . La contrainte vaut alors 1,5 fois moins que la résistance pratique au glissement. Il n'y a donc pas encore de déformation plastique de l'arbre de transmission au déclenchement du SafeSet.

Synthèse

Question 28

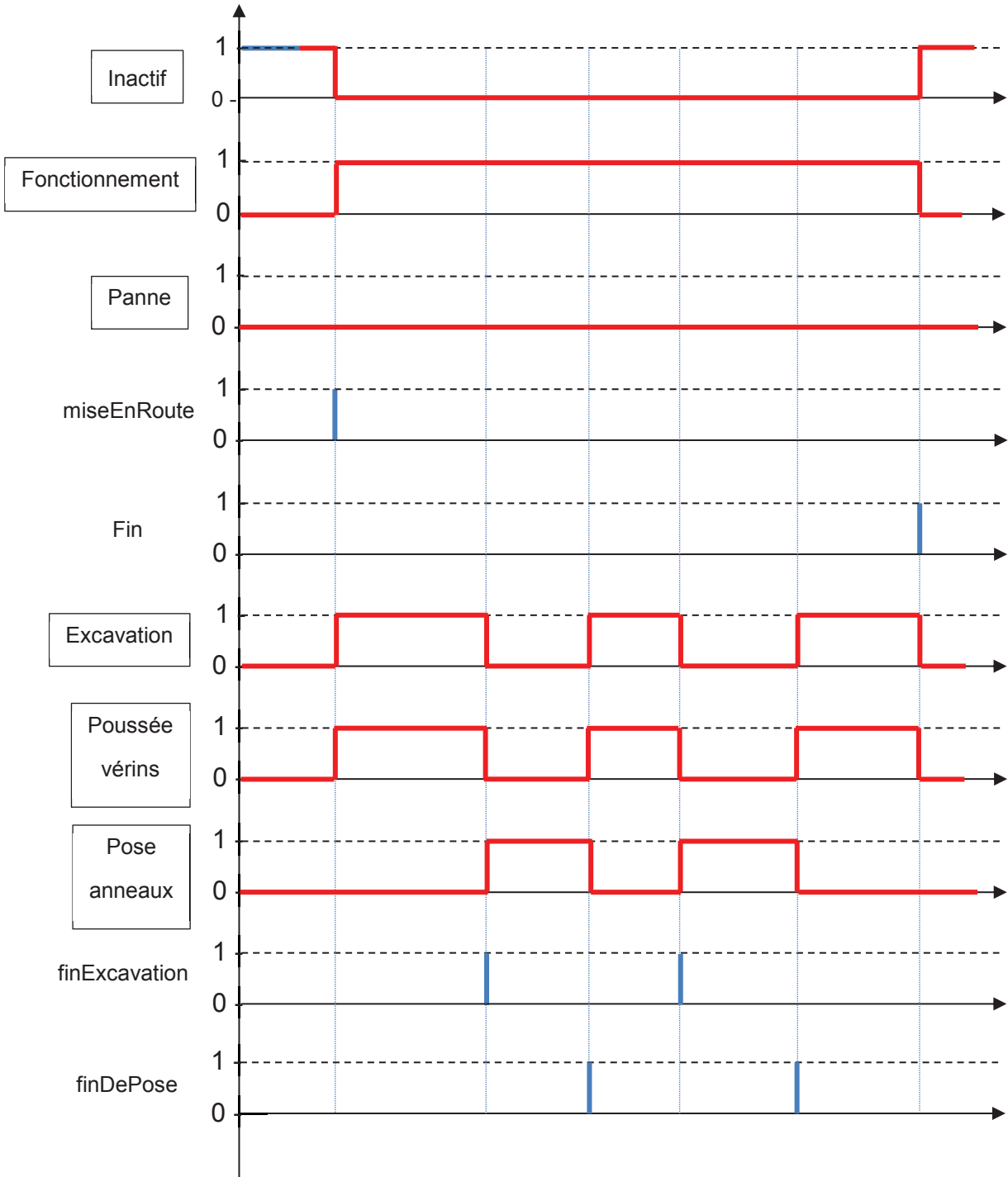
Le couple maximum transmissible par le SafeSet est de 15 kN.m , très au-dessus des variations de 9 N.m dues au décalage angulaire ou de 51 N.m dues au différentiel de vitesse. Ces variations sont donc négligeables et ne provoquent pas le déclenchement du SafeSet.

Le déclenchement se produit si un moteur se bloque. La tête de coupe est alors entraînée par 12 moteurs au lieu de 13, ce qui n'empêchera pas le fonctionnement du tunnelier compte tenu du surdimensionnement global de l'ensemble des composants.

La tête de coupe peut également être bloquée dans le sol ; les moteurs sont alors « calés » à leur couple maximum de $2\,800 \text{ N.m}$, ce qui n'a pas pour effet de déclencher les 13 SafeSet.

Étude du système d'avance

Question 29



Étude de la gestion de la position et orientation de la tête de coupe

Question 30

On se retrouve en coordonnées sphériques. Dans ce cas :

$$\overrightarrow{A_n A_{n+1}} = d \cdot \vec{e}_{AB} = d \cdot \cos \gamma \vec{z} + d \cdot \sin \gamma \vec{e}'_{Ab}$$

La projection du vecteur directeur \vec{e}'_{Ab} donne :

$$\vec{e}'_{Ab} = \cos \beta \vec{x} + \sin \beta \vec{y}$$

Enfin :

$$\overrightarrow{A_n A_{n+1}} = \begin{matrix} d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta \\ d \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta \\ d \cdot \cos \gamma \end{matrix} \Big|_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

Par conséquent dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, les coordonnées du point A_{n+1} sont :

$$(X_n + d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta, Y_n + d \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta, Z_n + d \cdot \cos \gamma)$$

Question 31

En python :	En pseudo-code
<pre>def determinationZone(xv:float, yv:float, xr:float, yr:float) : dx = xr-xv dy = yr-yv d = ((xr-xv)**2+(yr-yv)**2)**(1/2) a = numpy.arctan2(dy,dx)/(2*numpy.pi)*360 # entre - pi / pi -> -180 / 180 if d*1e2 <= 5 : zone = 1 elif 5 < d*1e2 <= 10 : if -45 <= a < 45 : zone = 3 elif 45 <= a < 135 : zone = 2 elif -135 <= a < -45 : zone = 4 else : zone = 5 else : if -45 <= a < 45 : zone = 7 elif 45 <= a < 135 : zone = 6 elif -135 <= a < -45 : zone = 8 else : zone = 9 return(zone)</pre>	<pre>Fonction determinationZone(xv,yv,xr,yr) dx <- xr-xv dy <- yr-yv d <- ((xr-xv)**2+(yr-yv)**2)**(1/2) a <- tangente de l'angle mais prenant en compte les signes de cos et sin pour avoir un angle sur -pi,pi, puis le ramener en degré Si d en cm < 5 alors zone = 1 Si d entre 5 et 10 Si l'angle entre -45 et 45 alors zone = 3 Si l'angle entre 45 et 135 alors zone = 2 Si l'angle entre -135 et -45 alors zone = 4 Sinon zone = 5 Sinon Si l'angle entre -45 et 45 alors zone = 7 Si l'angle entre 45 et 135 alors zone = 6 Si l'angle entre -135 et -45 alors zone = 8 Sinon zone = 9 Retourner (zone)</pre>

Question 32

Torseur de la liaison glissière : $\{v_{T_i/C_i}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ \lambda_i \vec{x}_{ci} \end{matrix} \right\}_{\forall P}$

Torseur de la liaison pivot : $\{v_{C_i/O}\} = \left\{ \begin{matrix} \delta_i \vec{z}_i \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_{\forall P \in (O_i, \vec{z}_i)}$

Question 33

Cet assemblage est composé de structures en parallèles, chacune étant composée de n liaisons en série : pivot – glissière – rotule.

La liaison équivalente d'un assemblage série est obtenue en sommant les torseurs cinématiques (éléments de réduction exprimés au même point).

La liaison équivalente à la structure en parallèle est obtenue en égalisant les torseurs cinématiques (au même point).

Question 34

Le résultat n'est pas une liaison normalisée (en tout cas pas au point B – qui reste cependant le meilleur point d'expression). Cette liaison pourrait être appelée une liaison linéaire annulaire à doigt. Elle est intéressante dans la mesure où la tête de coupe doit être positionnée pour supporter les courbures autour de \vec{y}_i et \vec{z}_i . Le déplacement selon l'axe \vec{x}_i permet quant à lui d'amortir la sortie des vérins de poussée et leurs effets sur la tête de coupe.

Question 35

L'hypothèse de petits déplacements est clairement validée. Le ratio est très grand entre les déplacements utiles et les déplacements parasites.

Enfin, on remarque que les angles sont de l'ordre de 1° comme souhaité dans le diagramme des exigences.

Par conséquent la cinématique particulière d'orientation du bouclier est validée.

Question 36

Ici, un accéléromètre peut être utilisé en inclinomètre ou, plus simplement, un gyroscope peut également être utilisé.

Analyse du système de poussée

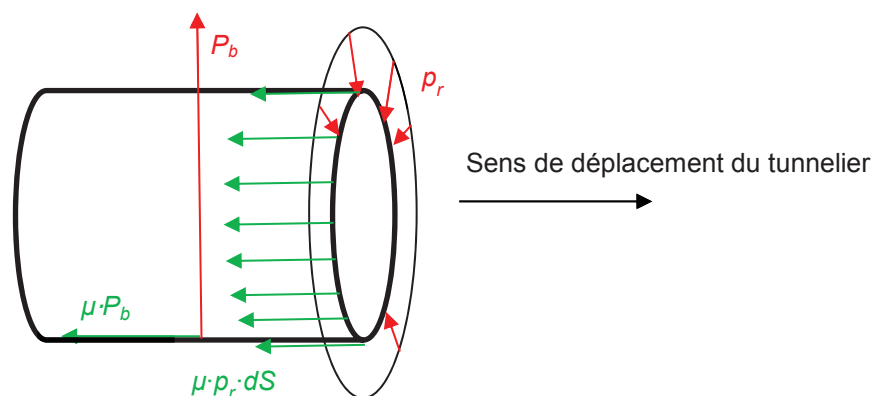
Question 37

Deux réponses sont possibles compte tenu de la précision de la représentation :

- au point marqué « b » : altitude la plus basse atteinte par le tunnelier ;
- dans la zone marquée Ch.14+500 : colonne de matière au-dessus du tunnelier la plus importante avec le monticule.

Pour une analyse plus fine, il faudrait également disposer de la masse volumique des matériaux, mais la composition du terrain varie peu le long du profil, donc ces propositions fournissent une bonne première approche.

Question 38



Le frottement est modélisé par les lois de Coulomb, dans une situation de glissement. En phase de poussée, il y a glissement entre le bouclier et le sol. Donc :

$$F_1 = \mu \cdot \left(P_b + \pi \cdot L_b \cdot d_b \cdot \frac{\rho_v + \frac{\rho_h^{max} + \rho_h^{min}}{2}}{2} \right)$$

Application numérique : $F_1 = 21\,700$ kN

Question 39

Il faut effectuer le changement de variable : $h = H + \frac{d_b}{2} - z_M$

D'où $p_f(z_M) = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - z_M \right)$

Soit $A = -K_0 \cdot \gamma_{eq}$ et $B = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right)$.

En considérant la surface élémentaire $dS = r \cdot dr \cdot d\theta$ autour de M, on obtient :

$$dF = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - r \cdot \sin\theta \right) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

Question 40

$$F_2 = \iint_{\text{surface}} dF$$

$$F_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_b}{2}} K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - r \cdot \sin\theta \right) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$F_2 = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right) \cdot \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^{\frac{d_b}{2}}$$

$$F_2 = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right)$$

Application numérique :

$$F_2 = 27\,800$$
 kN

Question 41

$$F_3 = n_m \cdot F_m + n_c \cdot F_c$$

$$F_3 = 8\,052$$
 kN

Question 42

$$F_p = c_v \cdot (F_1 + F_2 + F_3)$$

Application numérique :

$$F_p = 63\,300$$
 kN

Question 43

On note d_v le diamètre minimal d'un vérin.

$$F_p = 2 \cdot 14 \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot \frac{d_v^2}{4}$$

$$\text{D'où } d_v = \sqrt{\frac{F_p}{7 \cdot \pi \cdot \rho_a}}$$

$$\text{A.N. : } d_v = 280$$
 mm

En assimilant l'arc de cercle occupé par un vérin à son diamètre, les 28 vérins occupent un cercle de périmètre $0,28 \times 28 = 7,8$ m, donc de diamètre environ 2,5 m.

Ce diamètre est très inférieur au diamètre du bouclier $d_b = 9,83$ m. Il n'y a donc pas de difficulté d'implantation.

Étude du système d'alimentation électrique

Question 44

Désignation	Système d'alimentation	Courant par phase I kA	Facteur de puissance F_p	Puissance active P kW	Puissance réactive Q kVAR	Puissance apparente S kVA
Système d'abattage	Triphasé U = 690 V	4,36	0,852	4440	2728	5211
Groupe de refroidissement	Triphasé U = 400 V	0,493	0,7	239	244	342
Système d'évacuation	Triphasé U = 400 V	2,25	0,8	1247	935,4	1559
Groupe pompe à huile, eaux et air	Triphasé U = 400 V	2,08	0,6	867	1151	1441
Eclairage et prises de courant	Monophasé V = 230 V	0,3	0,8	55	42	69

Justifications :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P = S \cdot F_p$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Question 45

Le théorème de Boucherot en régime sinusoïdal permet de déterminer les puissances active et réactive totales :

$$P = \sum_i P_i = 6848 \text{ kW et } Q = \sum_i Q_i = 5100 \text{ kVAR}$$

Et donc :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 8538 \text{ kVA}$$

D'où :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = 246 \text{ kA}$$

Question 46

La chute de tension se faisant dans chacun des trois conducteurs on en déduit que la chute de tension est donnée par $\Delta U = \frac{\rho L_c}{S_c} \cdot I_t = 56 \text{ V}$ et les pertes joules pour l'ensemble des trois conducteurs

$$P_J = 3 \cdot \frac{\rho L_c}{S_c} \cdot I_t^2 = 42,5 \text{ kW.}$$

Question 47

Phase de maintenance : $Q = 41,66 \text{ kVAR} \rightarrow$ pas de gradin

Phase d'attente : $Q = 285,79 \text{ kVAR} \rightarrow$ 2 gradins de 100 kVAR et 1 gradin de 50 kVAR

Phase de pose des voussoirs : $Q = 1436,79 \text{ kVAR} \rightarrow$ 8 gradins de 100 kVAR et 4 gradins de 50 kVAR

Phase d'excavation, tous les postes sont alimentés : $Q = 5100 \text{ kVAR} \rightarrow$ tous les gradins

Question 48

Il faut recalculer la puissance réactive consommée et appliquer le théorème de Boucherot

$Q' = 5100 - 1000 = 4100$ kVAR donc $S = 7982$ kVAR d'où $I_t' = 230,4$ A.

Soit une chute de tension $\Delta U = \frac{\rho L}{S} \cdot I_t' = 52$ V et des pertes joules totales $P_J = 3 \cdot \frac{\rho L}{S} \cdot I_t'^2 = 35,9$ kW

Les condensateurs permettent une baisse de 18% des pertes en ligne.

Question 49

En triphasé 400V, avec un facteur de puissance unitaire, le courant dans les conducteurs aurait été cinquante fois plus élevé qu'en 20 kV, soit de 9900 A. La section des conducteurs aurait été telle qu'ils auraient été très rigides si la chute de tension en ligne restait sous les 3%, avec pour conséquence des problèmes de déroulage/enroulage de câble lors du déplacement du tunnelier.

Question 50

Les études et travaux préalables débutent en 2010 et n'engendrent pratiquement pas d'émission de GES. La construction de l'infrastructure débute vers 2015 et monte progressivement en puissance, générant ainsi de plus en plus de GES, jusqu'à la fin programmée en 2028.

La mise en service débutera vers 2024, ce qui dès le début de l'exploitation engendre une réduction des émissions de GES, d'une part grâce la diminution des véhicules déjà existants circulant en Île-de-France et d'autre part grâce à un développement territorial recentré sur Paris et sa proche couronne.

Le fait de commencer l'exploitation avant la fin des travaux permet d'amorcer plus tôt la compensation des GES générés pendant les travaux et d'atteindre l'équilibre en 2031, soit seulement 3 ans environ après la mise en service complète du GPE.

Le projet permettra en 2070, soit 40 ans environ après le début de son exploitation, de présenter un solde négatif de 27 millions de TeqCO₂.

Le projet GPE est donc très bénéfique par rapport aux GES car il permet très rapidement de compenser les émissions et d'entamer la réduction. Il permet également de limiter l'impact paysager et l'emprise foncière en surface, afin de préserver les espaces naturels.

La seule problématique reste la gestion et l'utilisation des remblais issus des percements des tunnels. Une évacuation par rails est à privilégier et le stockage doit s'assurer de la neutralité des matériaux extraits. Une partie peut éventuellement être valorisée selon la nature des terrains rencontrés.