

EAE STI 1

SESSION 2021

AGREGATION CONCOURS EXTERNE

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
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 6 heures

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

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

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

Ce sujet comporte :

- la présentation ;
- le travail demandé de la page 2 à 21 ;
- les annexes DT1 à DT12 ;
- les documents réponses DR1 à DR6.

TUNNELIER DU GRAND PARIS EXPRESS

Ce sujet est accompagné de documents réponses à rendre avec la copie.



Figure 1 Tunnelier utilisé sur la ligne 16 du Grand Paris Express

1 Contexte et étude préliminaire

Fréquemment présenté dans la presse comme « le chantier du siècle », le Grand Paris Express vise à doter l'Île-de-France d'un métro automatique en rocade pour décongestionner le centre de l'agglomération parisienne, désenclaver les territoires de banlieues, et soutenir le développement économique de la région en mettant en réseau les grands pôles métropolitains.

Le Grand Paris Express va transformer la mobilité au quotidien de millions de franciliens, et redessiner l'ensemble de la géographie du Grand Paris. À terme, 200 km de lignes nouvelles de métro automatique seront mises en service, dont 90 % construites en souterrain. Cela correspond à un doublement du réseau de métro de l'Île-de-France. Soixante-huit nouvelles gares seront implantées dans les territoires desservis.

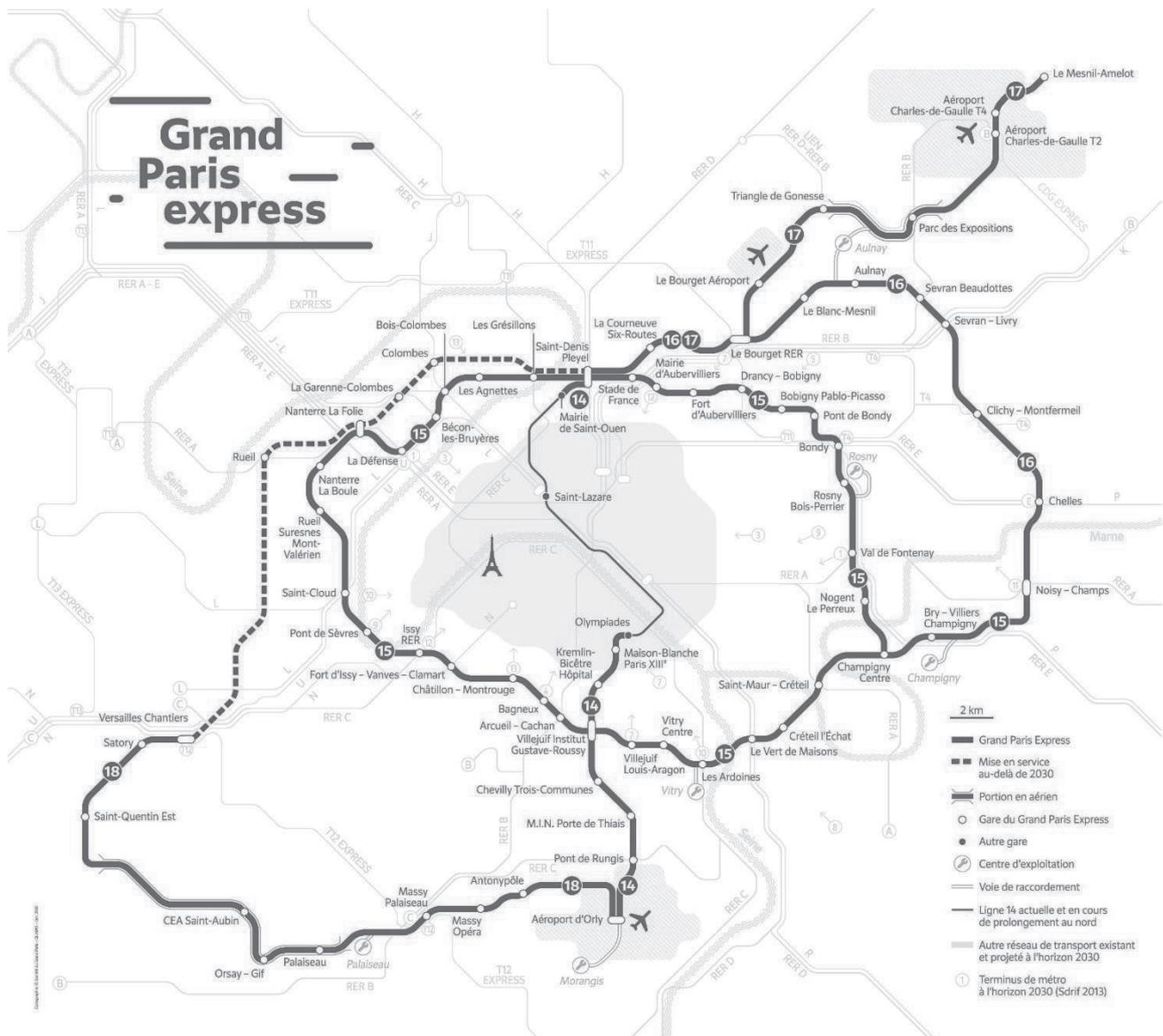


Figure 2 Carte du Grand Paris Express

Abandonnant le modèle radioconcentrique sur lequel le Grand Paris s’est construit, le Grand Paris Express desservira les territoires métropolitains aujourd’hui difficiles d’accès et les grands pôles d’activité comme :

- les aéroports (Orly, Charles de Gaulle, le Bourget) ;
- les centres d’affaires (la Défense, le marché d’intérêt national de Rungis...) ;
- les centres de recherche et universitaires (plateau de Saclay, Versailles-Saint Quentin, Marne-la-Vallée...).

Question 1 Pour chacun des trois piliers du développement durable, donner au moins un argument en faveur de la mise en œuvre d’un tel chantier.

1.1 Choix de la technologie du tunnelier

L’objectif de cette partie est d’analyser l’environnement de l’étude et valider le choix du type de tunnelier, conformément à l’exigence 1.1.

Pour réaliser ce projet, plus de 30 tunneliers seront utilisés, avec des phases au cours desquelles jusqu’à 20 progresseront simultanément.

Plusieurs techniques sont possibles pour réaliser une galerie souterraine :

- le tunnel en tranchée couverte, comme cela a été le cas pour le métro de Rennes (voir figure 3) ;
- le creusement à l'explosif ;
- le tunnelier.



Figure 3 Exemple de tunnel en tranchée couverte

Question 2 Donner deux arguments en faveur du tunnelier vis-à-vis du tunnel à tranchée couverte, et deux autres vis-à-vis du creusement à l'explosif.

Le document technique DT1 présente la structure générale d'un tunnelier.

Le tunnelier est constitué de plusieurs éléments :

- la tête de coupe. Il s'agit d'un disque comportant de nombreux couteaux et/ou molettes eux aussi rotatifs. Ces éléments creusent des sillons dans la roche afin de la fragiliser jusqu'à la rupture. La tête de coupe comporte de nombreuses ouvertures vers l'intérieur du tunnelier qui permettent l'évacuation des roches découpées ;
- le bouclier. C'est un cylindre très rigide, de diamètre proche de celui du tunnel. En plus de soutenir la roche, le bouclier permet de protéger les équipements et les personnels ;
- le système érecteur de voussoirs. Situé juste derrière le bouclier, il permet de déposer des voussoirs (tronçons d'anneaux en béton préfabriqué) qui assurent le soutènement du tunnel ainsi que le revêtement de sa paroi intérieure ;
- le système d'extraction. Une vis d'Archimède permet d'assurer l'évacuation des déblais depuis le front de coupe jusqu'au train suiveur ;
- le système d'avance. Constitué de vérins, il permet à la tête de coupe d'avancer en s'appuyant sur l'anneau de voussoirs. Les vérins sont rétractés lors de la pose des voussoirs ;
- le train suiveur. Il permet l'approvisionnement et la gestion de tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement de la partie avant du tunnelier. Il comporte d'une part un tapis roulant permettant l'extraction des gravats, et d'autre part un système conduisant les voussoirs jusqu'au système d'érection. D'une longueur totale pouvant faire plusieurs centaines de mètres, il permet aussi le lien avec l'extérieur.

L'ensemble des valeurs numériques associées aux constituants sont précisées sur le diagramme de définition des blocs du document technique DT2.

Le document technique DT3 introduit les différentes exigences pour la réalisation du lot 1 de la ligne 16.

Le front du tunnelier peut être pressurisé ou non suivant la présence d'une nappe d'eau et le type de sol traversé. On distingue ainsi deux grandes familles de tunneliers : les tunneliers à pression de terre et les tunneliers à pression de boue. Des techniques mixtes existent également.

Les tunneliers à pression de terre assurent la stabilité du front d'attaque par mise en pression des déblais excavés contenus dans la chambre d'abattage pour équilibrer les pressions des terrains et de la nappe. Les déblais sont rendus, si nécessaires, pâteux à l'aide d'additifs injectés à partir d'orifices situés sur la tête d'abattage et la cloison étanche. L'extraction des terres au travers du bouclier est assurée par la vis d'extraction, vis d'Archimède permettant de réaliser cette extraction tout en maintenant la différence de pression entre la pression du terrain régnant dans la chambre d'abattage et la pression atmosphérique régnant à l'intérieur du tunnelier. C'est la régulation de l'extraction des déblais, en corrélation avec la poussée du tunnelier, qui assure le maintien de la pression du produit excavé dans la chambre d'abattage.

Les tunneliers à pression de boue assurent la stabilité du front d'attaque par l'injection sous pression dans la chambre d'abattage d'une boue spéciale, dite bentonitique, pour contenir la pression hydrostatique et la pression de terrain encaissant. La boue est transportée par des conduites depuis la surface. Elle est mélangée aux déblais creusés par la roue, dans la chambre d'abattage. Puis le mélange déblais/boue est pompé vers la surface. La boue est filtrée pour la séparer des déblais, et elle est réinjectée dans le circuit.

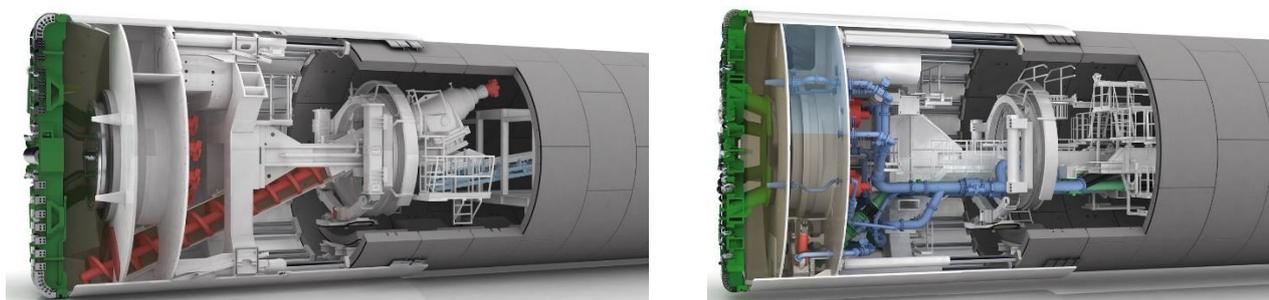


Figure 4 Tunnelier à pression de terre – tunnelier à pression de boue

Dans toute la suite du sujet, on s'intéresse au cas du tunnelier S1191 qui est utilisé sur le lot 1 de la ligne 16.

Question 3 À l'aide du document technique DT4, relever les différentes natures du terrain dans lequel le tunnelier doit creuser entre le puits 3303P et le puits 0100P.

Question 4 À l'aide du document technique DT5, reporter sur le document réponse DR1 le relevé d'analyse granulométrique dans le cas de la marne. Par ailleurs, tracer approximativement la courbe granulométrique du sable de Beauchamp sachant que celui-ci est considéré comme un sable fin devenant argileux. Conclure vis-à-vis de ces deux types de terrain sur le choix de type de tunnelier adapté sur ce tronçon.

Question 6 Exprimer le débit volumique maximal Q_m de remblais que la vis d'Archimède peut évacuer en fonction des différents paramètres du système d'évacuation.

Les roches arrachées au sol par la tête de coupe (diamètre $D = 9,83$ m) perdent leur cohésion naturelle et augmentent en volume. Ce phénomène, appelé foisonnement, est quantifié par le coefficient de foisonnement F , correspondant à l'augmentation de volume en pour cent.

On considère ici un coefficient de foisonnement $F = 50$ %.

Question 7 Exprimer la vitesse d'avance maximale V_m du tunnelier sans saturer la vis d'Archimède, en fonction de Q_m , D et F . Faire l'application numérique, exprimée en m.h^{-1} , en utilisant les valeurs données dans le diagramme de définitions des blocs du document technique DT2.

Question 8 Déduire des questions précédentes la durée d'excavation et de construction de la galerie du lot 1, en comptabilisant toutes les phases du chantier (excavation, pose des voussoirs, maintenance...). Comparer le résultat à l'exigence 1.1.2 et identifier des sources potentielles d'écart.

2 Analyse de la chaîne de puissance du système d'abattage

L'objectif de cette sous-partie est la validation de l'exigence 1.2.1 à partir du graphe couple/vitesse de rotation.

Dans cette partie, le sous-système étudié est le système d'abattage. Une étude énergétique de l'ensemble de la chaîne de transmission de puissance sera réalisée. L'étude porte sur la validation du choix de la motorisation en se concentrant sur le graphe couple/vitesse de rotation proposé par la société Herrenknecht dans le cadre de la ligne 16 du Grand Paris Express.

Le document réponse DR2 propose un diagramme de bloc interne du système d'abattage.

Question 9 Compléter le document réponse DR2 en indiquant les flux et le type de fonction (alimenter, moduler, convertir, transmettre, adapter, agir, acquérir, traiter, communiquer) que réalisent les composants.

Le diagramme du document technique DT6 représente les courbes limites de fonctionnement d'un moteur utilisé sur le tunnelier S1191.

Question 10 À partir du document technique DT6, déterminer, pour chaque mode de fonctionnement, le couple maximal, la vitesse maximale et la puissance maximale pour un moteur.

La transmission de puissance entre les moteurs et la tête de coupe est réalisée par un train d'engrenages. Chaque moteur est équipé d'un réducteur à train épicycloïdal à 3 étages, puis à sa sortie, d'un pignon denté entraînant une couronne liée à la tête de coupe. Le schéma cinématique de cette transmission de puissance est donné sur la figure 6.

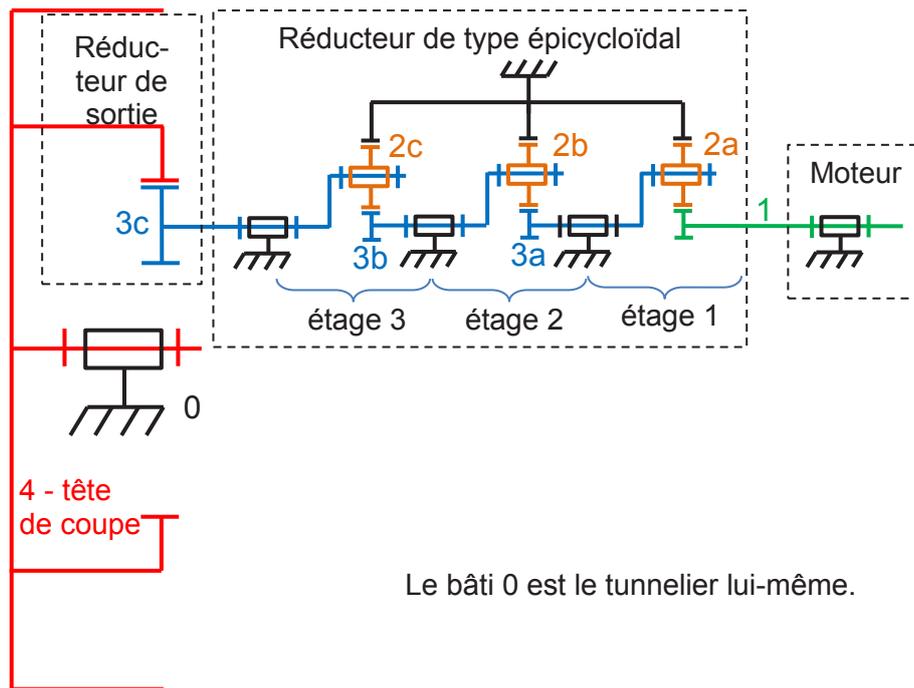


Figure 6 Schéma cinématique du mécanisme de mise en rotation de la tête de coupe

Question 11 Déterminer le rapport de réduction r_c de la vitesse de rotation de la tête de coupe par rapport au bâti $\omega_{4/0}$ sur la vitesse de rotation de la classe d'équivalence $3c$ par rapport au bâti $\omega_{3c/0}$, $r_c = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{3c/0}}$ en fonction des nombres de dents Z_{3c} et Z_4 .

Question 12 Déterminer, en détaillant la démarche, le rapport de réduction r_1 du premier étage de réduction du train épicycloïdal $r_1 = \frac{\omega_{3a/0}}{\omega_{1/0}}$ en fonction du nombre de dents Z_1 et Z_{0a} .

Les rapports de réductions des étages 2 et 3 du train épicycloïdal sont notés r_2 et r_3 .

Question 13 Exprimer les rapports de réductions r_2 et r_3 en fonction des nombres de dents des composants. En déduire le rapport de réduction $r = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{1/0}}$ de la chaîne complète en fonction de r_1 , r_2 , r_3 et r_c puis en fonction du nombre de dents des composants. Réaliser l'application numérique en donnant deux chiffres significatifs.

Dans la suite du sujet et ce quel que soit le résultat déterminé précédemment, on utilisera le rapport de réduction $r = \frac{1}{767}$. Le tunnelier S1191 est équipé de $N_{mot} = 13$ moteurs comme indiqué dans le document technique DT2.

Les phénomènes dissipatifs sont modélisés par les rendements globaux introduits dans le document technique DT2.

Question 14 Établir la relation littérale liant le couple disponible sur la tête de coupe $C_{tête}$ en fonction du couple utile délivré par chaque moteur C_u en régime stationnaire.

Question 15 Tracer les courbes limites de fonctionnement disponibles au niveau de la tête de coupe sur le document réponse DR3.

L'analyse des données sur différents tunneliers à pression de terre conçus a permis de tracer la courbe de couple disponible en fonction du diamètre du tunnel. Le document technique DT7 présente les résultats obtenus.

Question 16 Conclure sur les choix réalisés par le constructeur vis-à-vis de l'exigence 1.2.1.

3 Commande des moteurs

L'objectif de cette partie est de valider l'exigence 1.2.2 par l'analyse du protocole de communication entre l'automate de gestion du tunnelier et les 13 moteurs entraînant la tête de coupe et par l'étude du système de protection.

3.1 Protocole de communication

Le tunnelier est équipé d'un réseau Profibus DP assurant la communication entre l'automate de gestion - paramétré comme maître - et les différents éléments constituant la machine, considérés comme esclaves. Chaque moteur est alimenté par un variateur de vitesse Schneider Electric MX Pro 6L équipé d'une carte de communication Profibus PBO11. Chaque variateur possède une adresse physique sur le réseau paramétré par une série de 8 commutateurs positionnés en usine.

L'automate de gestion doit pouvoir contrôler de manière synchrone la vitesse des moteurs en maîtrisant les phases d'accélération et de décélération.

Le document technique DT8 donne les principales caractéristiques du réseau Profibus DP.

L'automate de gestion est situé dans l'armoire de commande. La longueur du tunnelier implique des segments qui peuvent atteindre 200 m de long. Hormis les 13 variateurs pilotant les moteurs de la tête de coupe, le réseau comporte 50 autres éléments pilotés par le réseau : pompes, moteurs de tapis...

Question 17 Donner un avantage et un inconvénient du réseau Profibus. Vérifier que ce réseau est compatible avec le nombre d'éléments à piloter dans le tunnelier et proposer une segmentation qui permet d'isoler les moteurs de la tête de coupe sur un seul segment.

L'automate contrôle en permanence la vitesse de rotation des moteurs en interrogeant les variateurs par le réseau Profibus. Le document technique DT9 présente le protocole de communication permettant l'échange des données.

Question 18 Déterminer les télégrammes échangés, en binaire naturel et en hexadécimal, entre l'automate et le variateur afin de lire la valeur de la vitesse de rotation d'un moteur et compléter le document réponse DR4 en considérant que le moteur tourne à sa vitesse nominale de 1485 tr.min^{-1} . Justifier que la précision obtenue sur la vitesse des moteurs est de 1 tr.min^{-1} .

La tête de coupe est entraînée par 13 moteurs asynchrones.

Question 19 À l'aide du tableau comparatif du document technique DT10, donner trois raisons qui ont poussé à l'utilisation de moteurs asynchrones.

Le modèle équivalent monophasé d'un moteur asynchrone est donné sur la figure 7 :

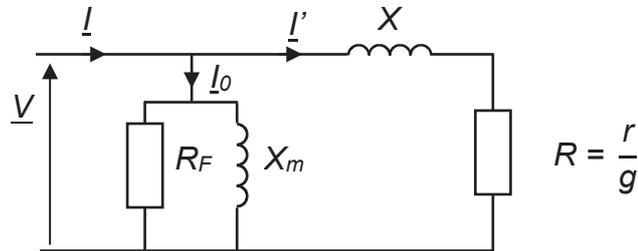


Figure 7 Modèle équivalent monophasé d'un moteur asynchrone

Les paramètres du modèle de la figure 7 sont les suivants :

- $R = \frac{r}{g}$ est la résistance modélisant le transfert de puissance active au rotor ;
- R_F est la résistance modélisant les pertes fer ;
- X_m est la réactance magnétisante ;
- X est la réactance de fuite ;
- g est le glissement du rotor ;
- \underline{V} est la représentation complexe d'une tension simple d'alimentation ;
- \underline{I} est la représentation complexe du courant de ligne statorique ;
- \underline{I}' est la représentation complexe du courant rotorique ramené au stator.

De plus, on néglige les pertes mécaniques ainsi que les pertes par effet Joule au stator. On note p , le nombre de paires de pôles de la machine, f la fréquence des tensions d'alimentation et N_s et Ω_s la vitesse de synchronisme, respectivement en tr.min^{-1} et en rad.s^{-1} .

Question 20 Exprimer la puissance transférée au rotor P_{tr} , en fonction des paramètres de la machine, de la tension efficace d'alimentation V et du glissement g .

Question 21 Simplifier l'expression précédente pour des valeurs de glissement faibles ($g \ll 1$) et en déduire l'expression du couple utile C_u en fonction des paramètres du moteur, de la tension efficace d'alimentation V , du glissement g et de la vitesse de synchronisme Ω_s .

Question 22 En déduire l'expression du couple utile C_u en fonction de la vitesse de rotation du moteur Ω , en rad.s^{-1} , $C_u = f(\Omega)$. Montrer que cette expression peut être mise sous la forme $C_u = a \cdot \Omega + b$ et préciser les expressions de a et b . Réaliser l'application numérique (voir document technique DT2).

Question 23 Déterminer la variation de couple utile engendrée par un différentiel de vitesse correspondant à la précision de mesure de vitesse obtenue grâce au bus Profibus à la question 18.

3.2 Vérification de la résistance de la chaîne de puissance

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier que les défauts d'angle introduits par le protocole de communication sont compatibles avec la résistance mécanique des composants de la chaîne de puissance.

Afin d'éviter les potentielles surcharges mécaniques liées à une désynchronisation des moteurs, des boîtiers de protection, appelés « SafeSet » sont introduits entre la sortie du rotor des moteurs asynchrones entraînant la tête de coupe et les trains d'engrenages étudiées précédemment.

La transmission du couple dans le SafeSet se fait par le frottement généré par l'expansion d'un tube sous l'effet d'une pression hydraulique. Le tube de cisaillement maintient la pression pour garantir un couple maximal transmissible réglable. En cas de surcharge, le SafeSet glisse et le tube cisaille une tête de vis qui laisse échapper la pression installée. Le SafeSet tourne alors sur des roulements sans transmettre de couple. Ses caractéristiques sont données dans le document technique DT11.

Le schéma ci-dessous décrit l'implantation et introduit les notations pour un des 13 moteurs.

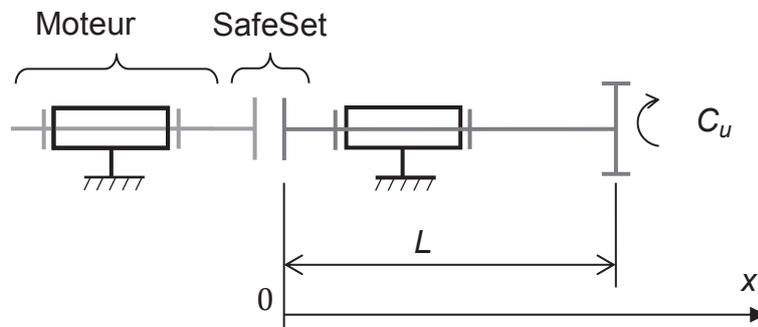


Figure 8 Modèle de la chaîne de puissance pour un moteur

L'arbre de transmission situé entre la sortie du SafeSet et le pignon en entrée du train d'engrenages de la figure 6 a les caractéristiques géométriques suivantes :

- longueur $L = 1\,500$ mm ;
- diamètre $d_1 = 100$ mm.

Il est réalisé dans un acier S235, de résistance pratique au glissement $R_{pg} = 120$ MPa et de module de Coulomb $G = 80\,000$ MPa.

Quel que soit le résultat trouvé dans la partie 2, le couple maximal délivré par le moteur, nécessaire pour la coupe, est donné par $C_u = 3\,000$ N.m. On rappelle l'expression du moment quadratique polaire pour la section donnée : $I_0 = \frac{\pi d_1^4}{32}$.

Question 24 Donner la relation liant la contrainte maximale dans l'arbre de transmission τ_{max} au couple C_u . Donner la valeur numérique correspondante.

Question 25 En déduire le coefficient de sécurité sur la résistance de l'arbre de transmission. Commenter cette valeur.

Avec le réseau Profibus, des retards de consigne peuvent exister entre les différents variateurs. Cela a pour effet un décalage angulaire entre le premier moteur recevant la commande et le dernier moteur.

Pour la suite, l'étude porte sur le cas le plus défavorable où un seul arbre de transmission subit toute la torsion liée à ce retard angulaire. En appelant $\alpha(x)$ la rotation angulaire autour de \vec{x} de la section d'abscisse x de l'arbre de transmission, la relation :

$$\Delta\alpha = \alpha(L) - \alpha(0) = 10^{-3} \text{ °}$$

exprime le décalage angulaire des deux sections extrêmes de l'arbre de transmission. Ce décalage angulaire induit un couple supplémentaire dans l'arbre de transmission noté C_{sup} .

Question 26 Donner l'expression littérale de C_{sup} , puis la valeur numérique correspondante. En comparant avec le couple moteur maximal, conclure sur les risques mécaniques liés au retard dû au protocole de communication.

Question 27 En considérant le réglage du SafeSet permettant de transmettre le couple le plus élevé (pour rappel, le diamètre de l'arbre de transmission vaut $d_1 = 100$ mm), donner la valeur numérique de la contrainte maximale dans l'arbre de transmission lors du déclenchement d'un SafeSet. Conclure sur le risque de rupture d'un arbre de transmission.

3.3 Synthèse

Question 28 Comparer le couple maximal transmissible par un SafeSet avec les variations de couple liée au décalage angulaire maximal entre moteurs ou engendrée par un différentiel de vitesse correspondant à la précision de mesure de vitesse obtenue grâce au bus Profibus. Conclure ainsi sur le respect de l'exigence 1.2.2. En déduire la situation pour laquelle le déclenchement du SafeSet pourrait se produire et l'incidence que cela a sur le fonctionnement du tunnelier.

4 Étude du système d'avance

L'objectif de cette partie est d'analyser le fonctionnement du système d'avance tant dans une logique de compréhension du positionnement et de l'orientation du bouclier, mais également du dimensionnement du système de poussée, afin de valider l'exigence 1.3.

Cette partie se décompose en deux sous-parties :

- la première se concentre sur le positionnement et l'orientation du bouclier ;
- la seconde propose, après modélisation des actions mécaniques, un dimensionnement du système de poussée.

Afin d'appréhender au mieux les différents constituants liés au système d'avance, le document technique DT12 propose les diagrammes d'état de description très partielle du fonctionnement du tunnelier et notamment de son fonctionnement en phase d'excavation.

Question 29 Sur le document réponse DR5, compléter les chronogrammes traduisant les évolutions des états des diagrammes d'état. Par convention, un état actif (inactif) sera associé à la valeur de 1 (respectivement 0).

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

L'objectif de cette sous partie est d'analyser la solution technologique validant l'exigence de positionnement et d'orientation de la tête de coupe (exigence 1.3.1).

Il est essentiel de connaître la position exacte du tunnelier ainsi que l'orientation de la tête de coupe pour percer dans la bonne direction. Les tolérances de positionnement sont faibles dans ce domaine, de l'ordre de ± 5 cm.

Le système de guidage s'appuie sur plusieurs points de repère fixes installés par le géomètre de chantier tous les 100 à 250 mètres. Grâce à une station totale, on peut connaître la position exacte du centre de la tête de coupe et ainsi mesurer l'écart entre la position réelle et la position attendue, en prenant en compte les écarts éventuels avec la position théorique des points de repère.

Les consignes de pilotage sont transmises :

- aux vérins de poussée, qui peuvent alors précisément faire varier leurs courses selon leur position afin d'engager un virage. Ils sont réunis par groupes de 3 ou 4 vérins où la pression hydraulique est identique – le nombre de groupes étant de 4 ;
- aux systèmes de pose des anneaux, pour que soient choisis des voussoirs ayant une allure courbe ou droite.

Afin de déterminer la position de la tête de coupe on utilise donc une station totale. Une polygonisation, à partir d'une référence connue A_0 , permet de déterminer l'ensemble des points $A_i, i \in \{1; \dots; n\}$, de coordonnées (X_i, Y_i, Z_i) dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ associée au repère terrestre. L'axe \vec{z} correspond à la direction de l'accélération de pesanteur. Les angles et la longueur donnés par la station totale (d, β, γ) sont également précisés sur la figure 9, où A'_{n+1} est la projection du point A_{n+1} dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) .

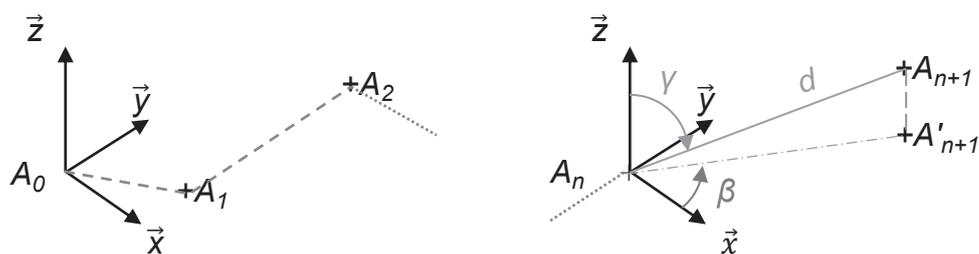


Figure 9 Polygonisation des différents points de guidage du tunnelier – paramétrage de la station totale

Question 30 Donner, dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, les coordonnées du point A_{n+1} notées $(X_{n+1}, Y_{n+1}, Z_{n+1})$ en fonction des coordonnées (X_n, Y_n, Z_n) du point A_n , d , β et γ .

De plus, afin d'assister le pilote du tunnelier, une interface graphique de pilotage existe. Celle-ci propose un graphique équivalent à celui représenté sur la figure 10. L'axe des abscisses (réciproquement ordonnées) représente l'écart entre la position souhaitée du bouclier et sa position réelle suivant l'axe des x (réciproquement y). Le premier cercle à un rayon de 5 cm ; le second de 10 cm.

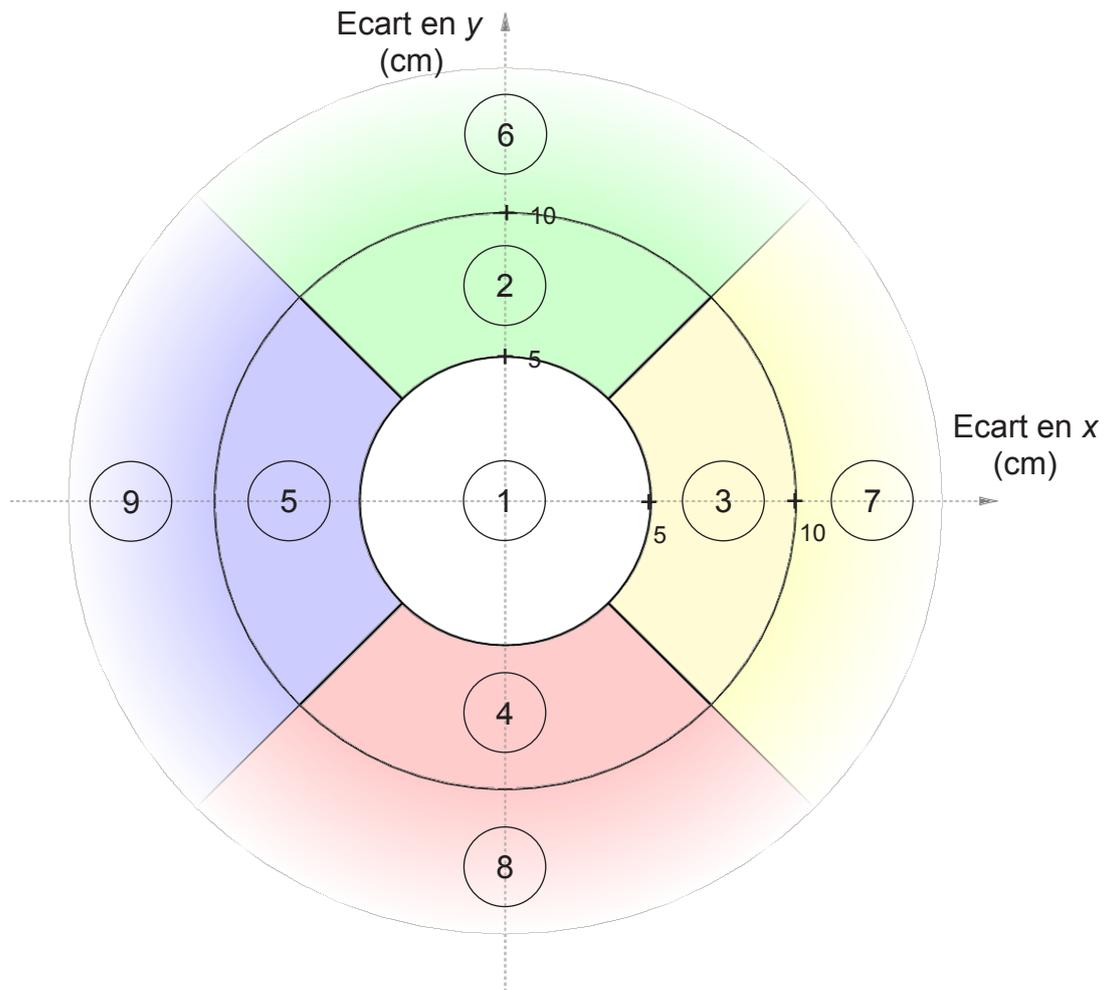


Figure 10 Définition des zones d'erreur

Question 31 Coder une fonction `determinationZone(xv:float, yv:float, xr:float, yr:float) -> numeroZone:int` dans le langage de votre choix (pseudo-code ou Python) qui à partir des coordonnées du point visé (xv, yv) et de celles du point réel (xr, yr) renvoie le numéro de la zone d'erreur définie sur la figure 10. Les coordonnées sont exprimées en mètres.

En fonction de la zone il faut créer une variation de pression. La génération des efforts de poussée est étudiée dans la suite de cette partie. Ces variations vont permettre au bouclier de prendre les courbures nécessaires au réseau souterrain. Elles sont au maximum de 1° . Pour cela, le tunnelier possède un bouclier orientable par rapport à la jupe. Les éléments assurant ces mobilités sont des vérins d'articulations présents entre chaque paire de vérins de poussée.

La figure 11 propose un modèle cinématique entre le bouclier et la jupe par un seul vérin d'articulation. L'ensemble de ces vérins est disposé de manière équitable sur un diamètre donné.

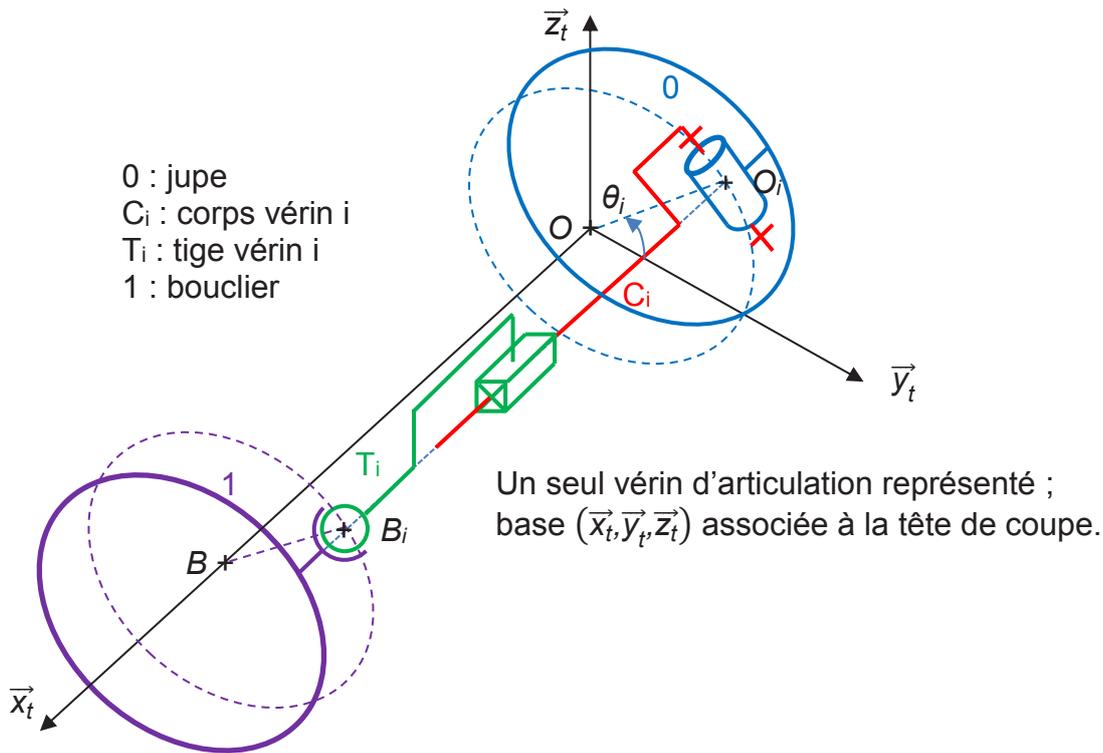


Figure 11 Schéma cinématique de l'articulation entre le bouclier et la jupe

Chaque point O_i et B_i est positionné radialement sur un diamètre D et angulairement par un angle θ_i constant avec $\theta_i = \frac{i-1}{N} 2\pi$ avec le nombre $i = 1, 2, \dots, N$. L'ensemble des paramétrages est proposé sur la figure 12.

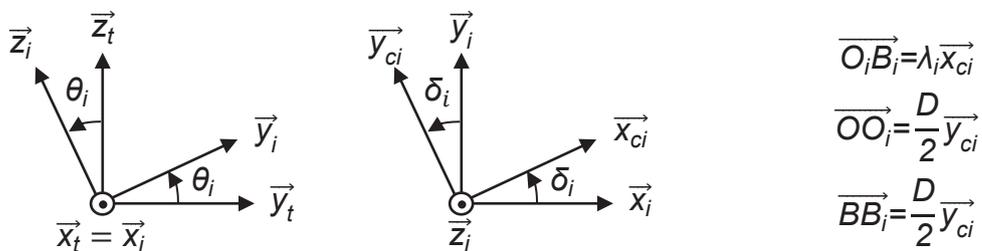


Figure 12 Paramétrage géométrique de l'articulation

Question 32 Donner, en respectant le paramétrage du sujet, les torseurs cinématiques des liaisons : glissière et pivot.

Question 33 Donner la démarche à mettre en œuvre afin de déterminer le torseur cinématique $\{v_{1/0}^{Leq}\}$ équivalent entre 1 et 0. Aucun calcul n'est attendu.

Ce dispositif n'autorise que des très petits déplacements par le fait que les vérins ne possèdent un degré de liberté que par la compressibilité du fluide (circuit fermé). Par conséquent, il est alors possible de linéariser le comportement cinématique. Tous calculs effectués, on obtient le torseur cinématique suivant :

$$\{v_{1/0}^{Leq}\} = \left\{ \begin{array}{l} \dot{s} \cdot \vec{y}_t + \dot{t} \cdot \vec{z}_t \\ u \cdot \vec{x}_t \end{array} \right\}_B$$

Question 34 Donner un nom à cette liaison en indiquant si celle-ci est normalisée. Préciser son intérêt vis-à-vis de l'objectif de l'orientation de la tête de coupe.

Le résultat précédent s'appuie sur une hypothèse de petits déplacements. Malgré le bienfondé de cette hypothèse, elle induit des erreurs. Le constructeur souhaite quantifier les écarts entre ce dernier résultat et un résultat non approximé. Pour cela, on utilise une simulation numérique sollicitant les vérins d'articulation sur le débattement maximal. La figure 13 montre les courbes obtenues en terme de position et d'orientation dans l'espace du bouclier par rapport à la jupe dans la base $(\vec{x}_t, \vec{y}_t, \vec{z}_t)$.

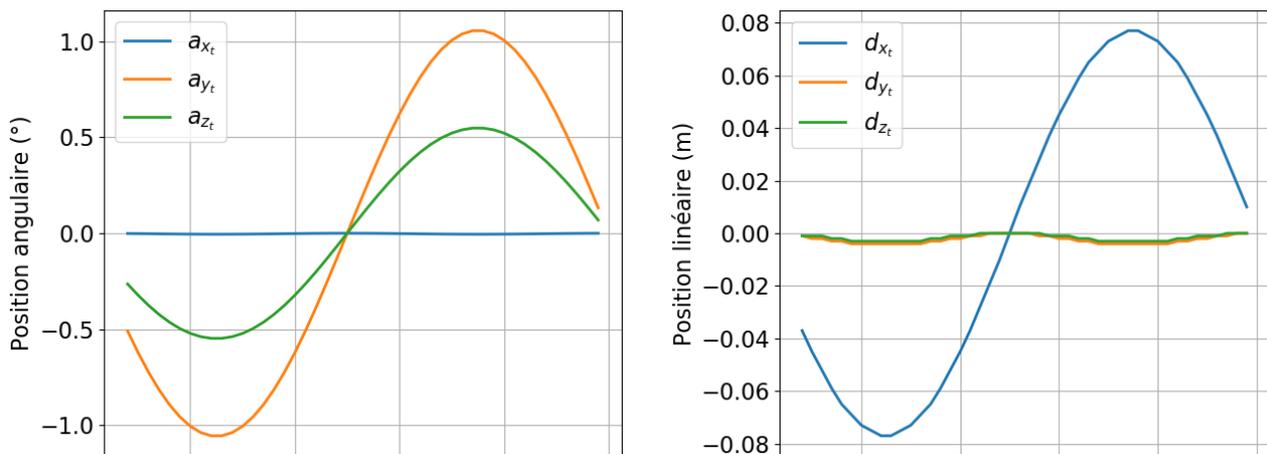


Figure 13 Positions angulaire et linéaire du bouclier par rapport à la jupe en fonction du temps

Question 35 Valider l'hypothèse précédente et la cinématique de la structure.

En plus des trois informations de position, le traitement de données issues de la station totale permet d'obtenir l'angle de lacet autour de l'axe \vec{z}_t . À la vue de la réflexion précédente, il semble intéressant de mesurer les angles de roulis et de tangage définis respectivement autour des axes \vec{x}_t et \vec{y}_t .

Question 36 Proposer une technologie de capteur permettant de mesurer les angles de roulis et tangage.

4.2 Analyse du système de poussée

L'objectif de cette partie est de valider le système de propulsion proposée par la société Herrenknecht sur le tunnelier du lot 1 de la ligne 16 (exigence 1.3.2).

La coupe géologique du tronçon 3 de la ligne 16 est donnée sur le document technique DT4.

Question 37 En justifiant votre démarche, proposer le point pour lequel les forces subies par le tunnelier seront les plus grandes et donc la poussée générée par le système de propulsion la plus grande.

Dans la suite du sujet, en ce point, la répartition entre la marne (30 %) et le sable de Beauchamp (70 %) est imposée. Les poids volumiques sont respectivement 20 kN.m^{-3} et 24 kN.m^{-3} .

Afin de déterminer la poussée nécessaire à l'avancée du tunnelier, on opte pour la modélisation cinématique très simplifiée suivante :

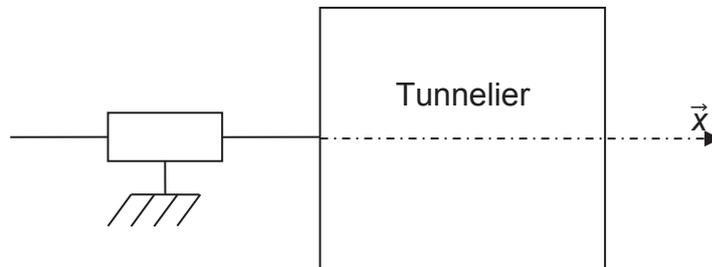


Figure 14 Schéma cinématique du tunnelier

Le constructeur du tunnelier utilise la formule de la « Japan Society of Civil Engineers » qui donne la force de poussée F_p comme étant une somme de composantes :

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

avec les termes :

- F_1 qui représente la composante due aux forces de frottements entre le bouclier et le terrain ;
- F_2 la composante due à la pression frontale ;
- F_3 la composante due aux efforts axiaux des parties coupantes ;
- c_v un coefficient de pondération pour la prise en compte des virages.

Le terme F_1 provient des pressions de terre horizontales p_h et verticales p_v que subit le tunnelier. Ces pressions sont définies sur la figure 15.

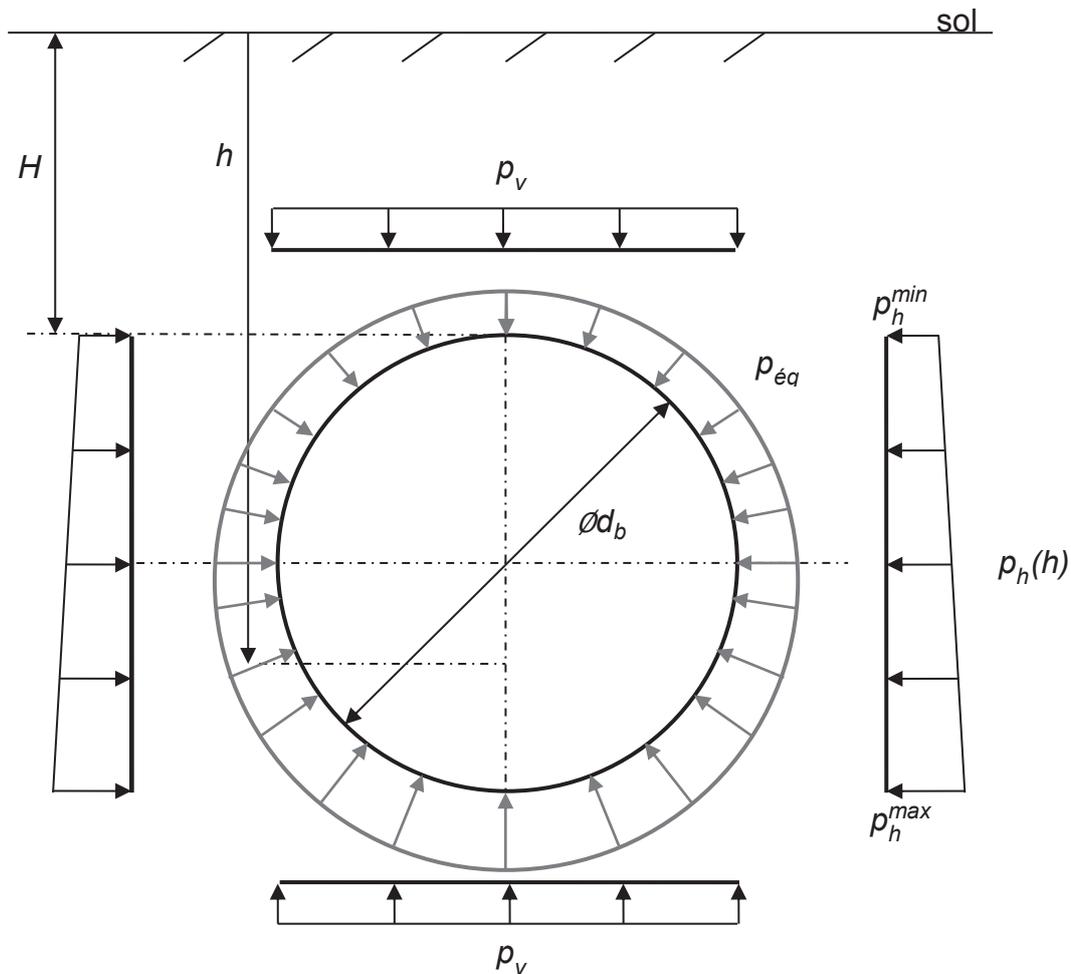


Figure 15 Représentation des pressions de terre horizontale p_h , verticale p_v et pression équivalente $p_{\acute{e}q}$

Les pressions p_h et p_v sont dues au poids du terrain placé au-dessus et se déterminent de la manière suivante :

- p_v est supposée constante ;
- $p_h(h)$ évolue en fonction de la profondeur par rapport au sol du point considéré.

Afin de simplifier l'analyse, l'hypothèse réalisée est que le bouclier ne subit qu'une pression radiale p_r moyenne des pressions horizontale et verticale définie comme suit :

$$p_r = \frac{p_v + \frac{p_h^{max} + p_h^{min}}{2}}{2}$$

Les valeurs estimées dans la situation étudiée sont les suivantes :

- $p_v = 236 \text{ kN.m}^{-2}$;
- $p_h^{min} = 121 \text{ kN.m}^{-2}$;
- $p_h^{max} = 136 \text{ kN.m}^{-2}$.

À cette pression s'ajoute l'effet du poids du bouclier qui vaut $P_b = 9\,800$ kN. On suppose également que le coefficient de frottement moyen noté μ entre le bouclier et le sol vaut $\mu = 0,3$. Enfin, la géométrie cylindrique du bouclier est définie sur la figure 16. La longueur du bouclier est $L_b = 11,1$ m, son diamètre $d_b = 9,83$ m.

Question 38 En proposant un croquis, puis en justifiant les lois utilisées, déterminer l'expression littérale de la résultante axiale de frottement entre la roche et le bouclier F_1 . Réaliser l'application numérique.

Afin de déterminer la force frontale F_2 , le champ de pression frontale est déterminé par la relation $p_f(h) = K_0 \cdot \gamma_{eq} \cdot h$ avec :

- γ_{eq} le poids volumique équivalent des roches présentes au-dessus de l'excavation à une profondeur $H = 30$ m (profondeur du bouclier au point de profondeur maximale) ;
- $K_0 = 0,46$ le coefficient de pression latérale au repos ;
- h la profondeur par rapport au sol en un point du bouclier, tel qu'introduit sur la figure 15.

Ce champ de pression est représenté sur la figure 16. Cette figure propose également un paramétrage polaire de la surface frontale.

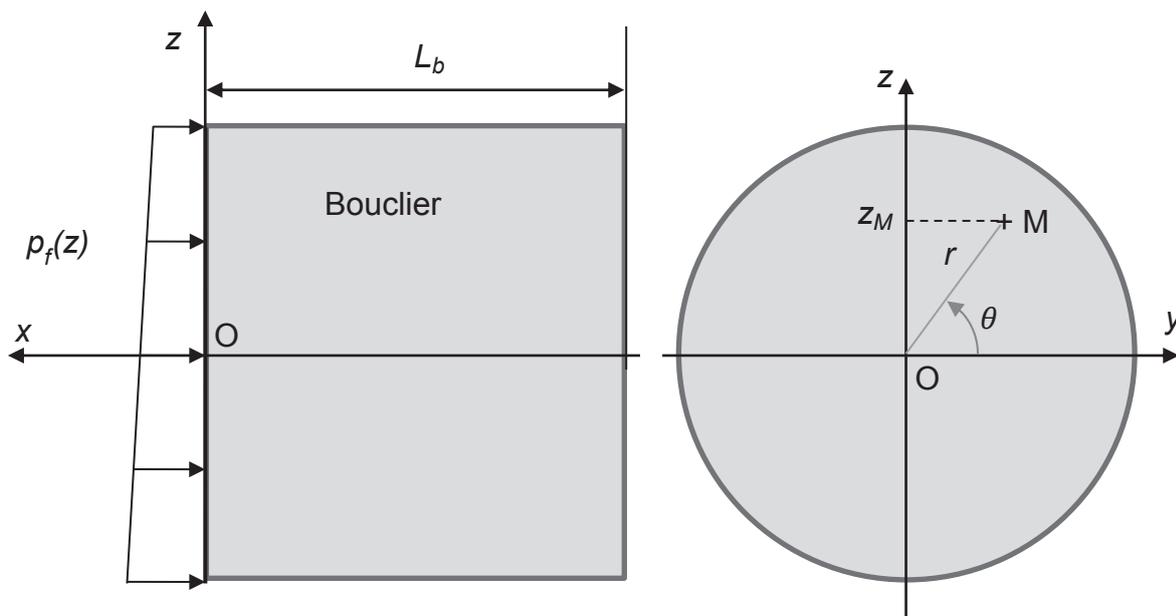


Figure 16 Représentation du champ de pression frontale p_f et paramétrage de la surface frontale

Question 39 Déterminer les variables A et B définissant le champ de pression $p_f(z_M) = A \cdot z_M + B$ en fonction de K_0 , γ_{eq} , H et d_b . Donner l'expression de la force élémentaire de pression au point M en fonction de ses coordonnées polaires et des paramètres précédents.

Question 40 Déterminer l'expression littérale de la résultante axiale de confinement F_2 liée à la pression frontale. Réaliser l'application numérique.

Les outils travaillant génèrent des efforts axiaux. En condition d'utilisation à 100 %, les valeurs associées sont :

- $n_m = 111$ molettes générant chacune une force axiale $F_m = 10$ kN ;
- $n_c = 26$ couteaux générant chacune une force axiale $F_c = 267$ kN.

Question 41 Déterminer l'expression littérale de la composante F_3 due à la coupe. Réaliser l'application numérique.

Le constructeur pondère la force de poussée par un coefficient de $c_v = 1,1$ pour la prise en compte des virages.

Question 42 En déduire la valeur numérique de la force de poussée F_p .

Dans la suite du sujet, on retient une valeur de poussée axiale de $F_p = 60\,000$ kN.

Le constructeur a opté pour 14 paires de vérins comportant chacune à l'extrémité des tiges un sabot s'appuyant sur les voussoirs précédents. Pour rappel, le document technique DT1 donne un aperçu de l'implantation des vérins de poussée. La pression disponible est $p_a = 350$ bar.

Question 43 Déterminer le diamètre minimal de chaque vérin, en supposant que les vérins sont à simple tige. Conclure sur l'occupation circconférentielle des vérins.

5 Étude du système d'alimentation électrique

L'objectif de cette sous-partie est la validation de l'exigence 1.4 portant sur l'alimentation électrique du tunnelier.

Le tunnelier est alimenté en énergie électrique via un réseau triphasé 20 kV. Le câble d'alimentation est déroulé au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier. On supposera dans la suite que les transformateurs permettant de convertir la tension efficace de 20 kV en 230 V, 400 V et 690 V sont parfaits.

Question 44 Compléter le bilan de puissance du système d'abattage du tunnelier en reportant vos résultats dans le document réponse DR6. Préciser sur ce même document les formules utilisées.

Question 45 En déduire le courant I_t au primaire du transformateur triphasé.

Dans la suite de l'étude, pour tenir compte des postes de consommation non comptabilisés, le courant au primaire du transformateur sera pris égal à $I_t = 250$ A. Le câble triphasé en cuivre présente une section par phase $S_c = 150$ mm², sur une longueur de $L_c = 2$ km permettant de réaliser l'ouvrage. On considère la résistivité linéique du cuivre $\rho = 17 \cdot 10^{-9}$ Ω·m.

Question 46 Exprimer la chute de tension par conducteur ΔU et la puissance P_J dissipée dans le câble par effet Joule en fonction des paramètres du câble et du courant consommé. Faire les applications numériques.

Afin de réduire les pertes en ligne, le tunnelier est équipé de gradins de condensateurs permettant de compenser la puissance réactive consommée. Les gradins sont connectés sur le réseau triphasé 400 V et se décomposent de la manière suivante :

- 4 gradins triphasés de 50 kVAR ;
- 8 gradins triphasés de 100 kVAR.

Question 47 À partir des résultats de la question 44, déterminer les gradins à enclencher pour réduire au maximum la puissance réactive consommée dans les cas de figure suivants :

- phase de maintenance : éclairage, prises de courant alimentés ;
- phase d'attente : éclairage, prises de courant et groupe de refroidissement alimentés ;
- phase de pose des voussoirs : éclairage, prises de courant, groupe de refroidissement et groupe pompe à huile, eaux et air alimentés ;
- phase d'excavation : tous les postes sont alimentés.

Question 48 En déduire, en phase d'excavation, le courant I_t consommé ainsi que les nouvelles valeurs de la chute de tension par conducteur $\Delta U'$ et de la puissance P'_J dissipée dans le câble par effet Joule. Conclure sur l'intérêt de la batterie de condensateurs.

Question 49 Justifier le choix du constructeur d'utiliser une liaison haute tension, sachant que le fait de rallonger un câble en haute tension est très contraignant par rapport à l'utilisation d'une liaison basse tension 400 V par exemple.

6 Perspectives

Une étude environnementale a permis de réaliser un bilan prédictif des émissions de gaz à effet de serre (GES), à la fois lors de la phase de réalisation et lors de l'exploitation de l'ouvrage. La figure 17 représente les émissions cumulées de GES année par année, en tonne équivalent CO₂ (t_{éq}CO₂), réparties sur les différents postes d'émission.

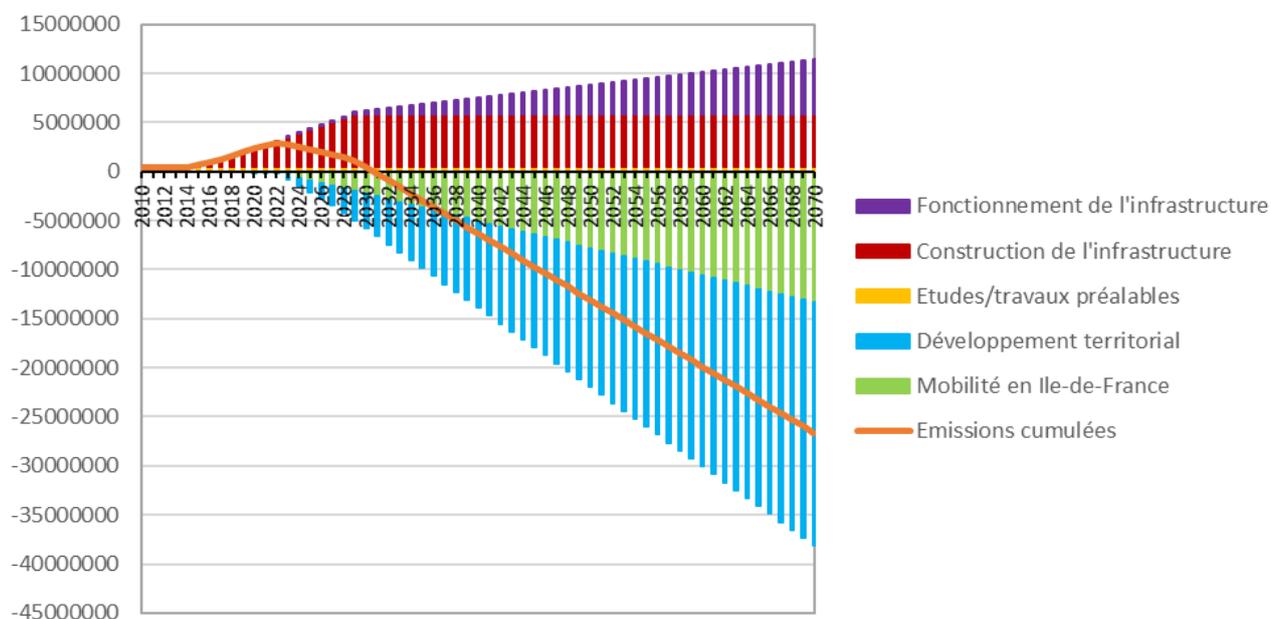
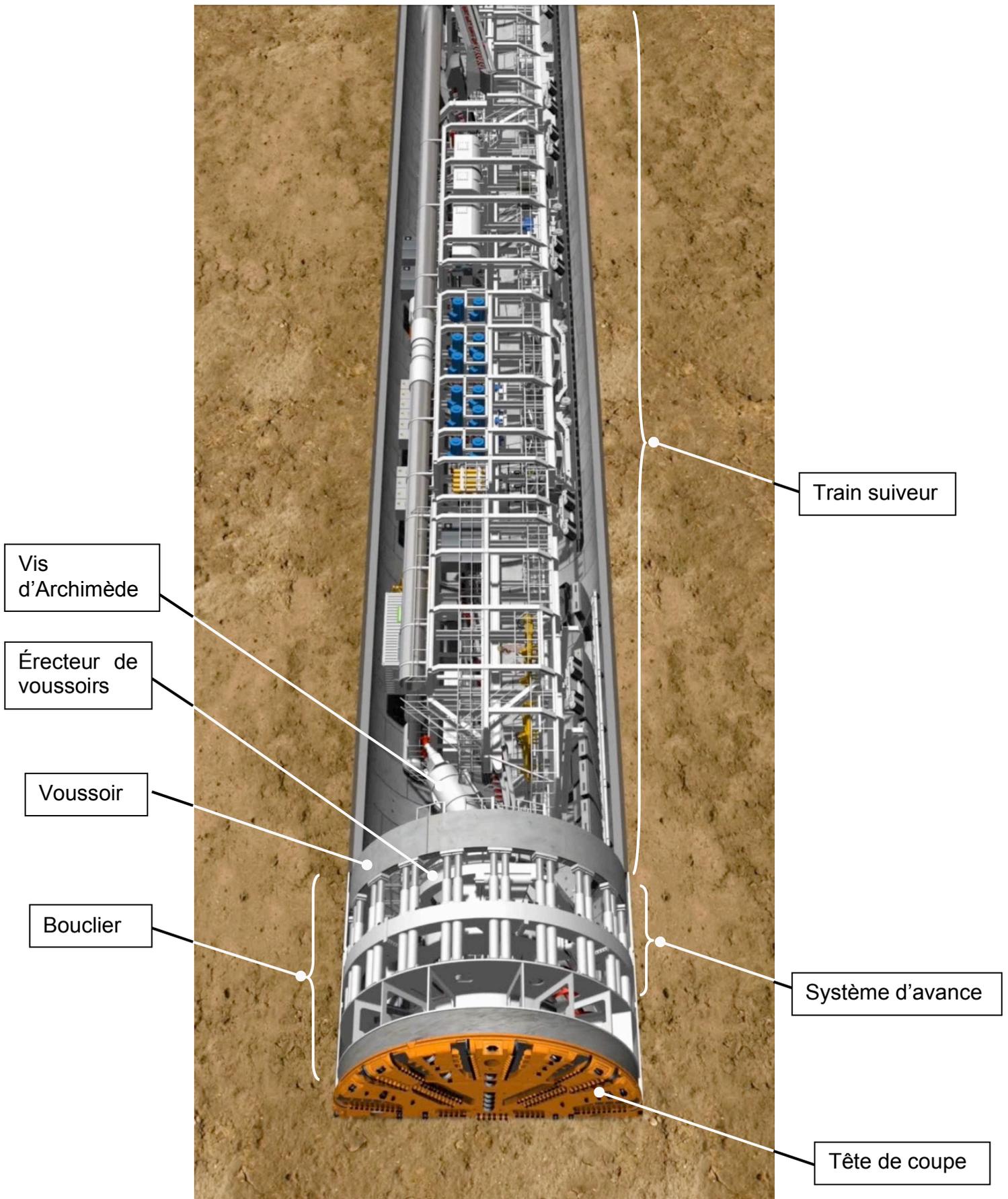


Figure 17 Bilan des émissions de GES du projet du Grand Paris Express, en t_{éq}CO₂

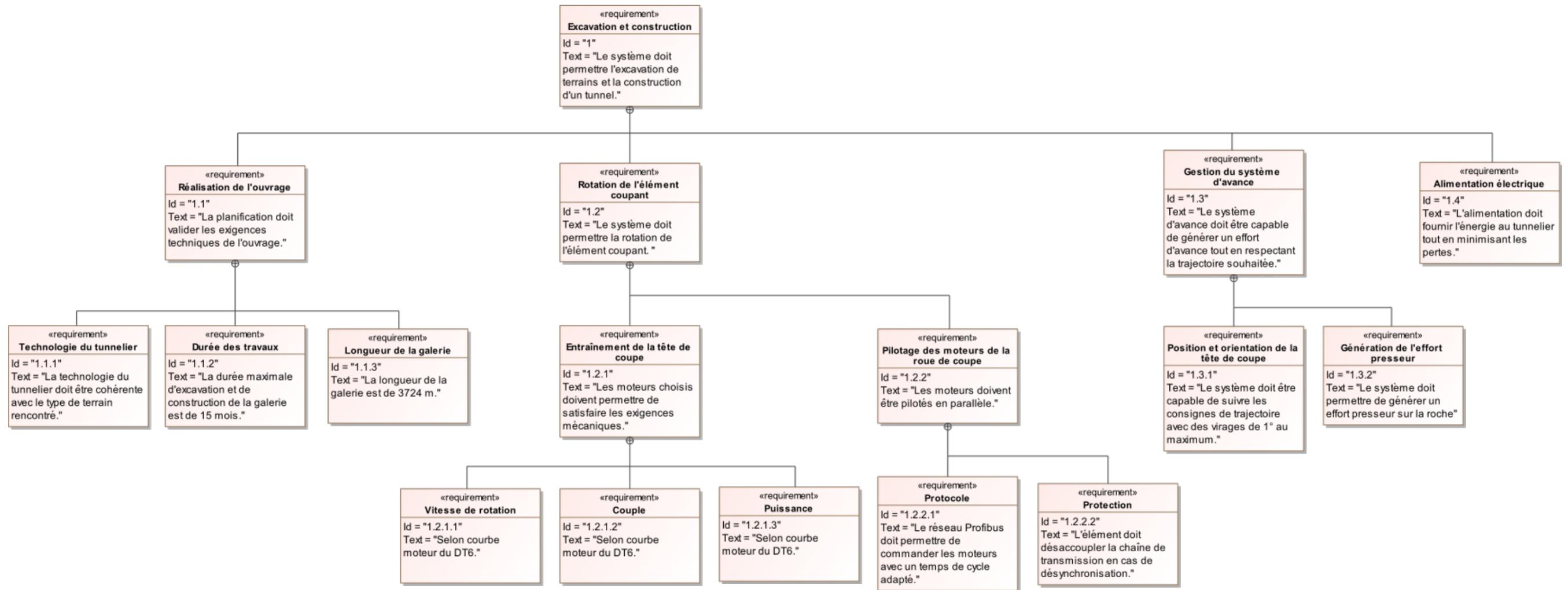
Question 50 Interpréter l'évolution des différents postes d'émission de GES. Rédiger une conclusion environnementale sur le projet en tenant compte de ces émissions mais également d'autres facteurs environnementaux.

Document technique DT1

Principaux éléments d'un tunnelier

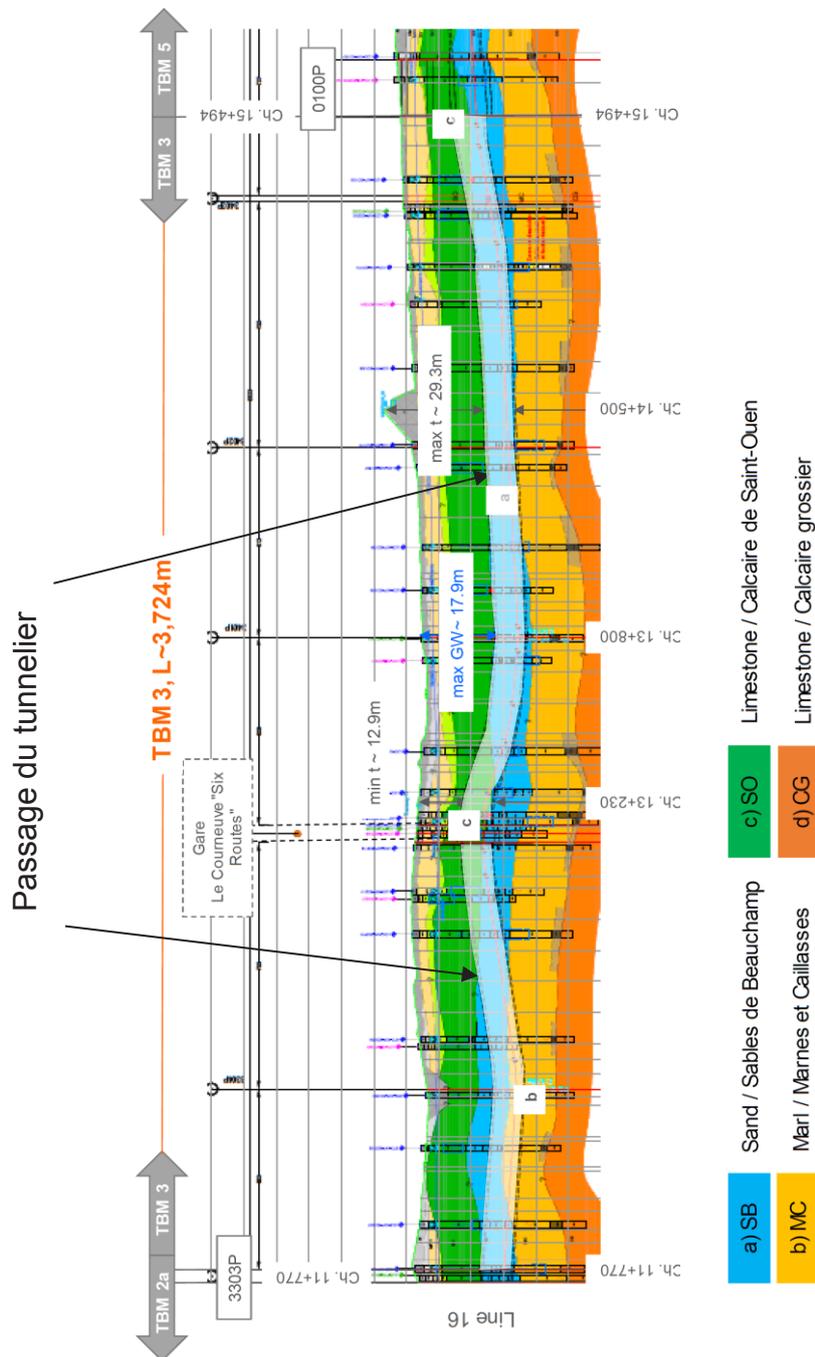


Document technique DT3
Diagramme des exigences



Document technique DT4

Ligne 16 – Lot 1 – Profil géologique



Document technique DT5

Analyse granulométrique

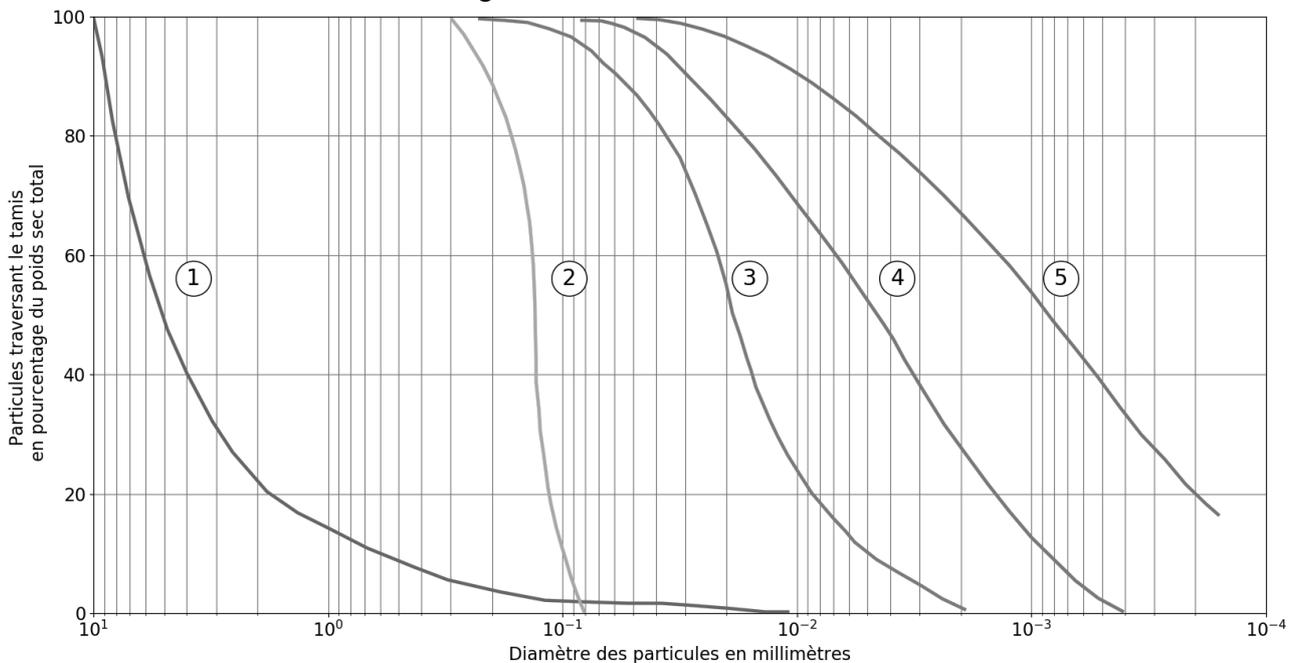
(Extrait Wikipédia)

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille...). Par métonymie, c'est aussi le nom donné au résultat de cette analyse.

Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou cailloux. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

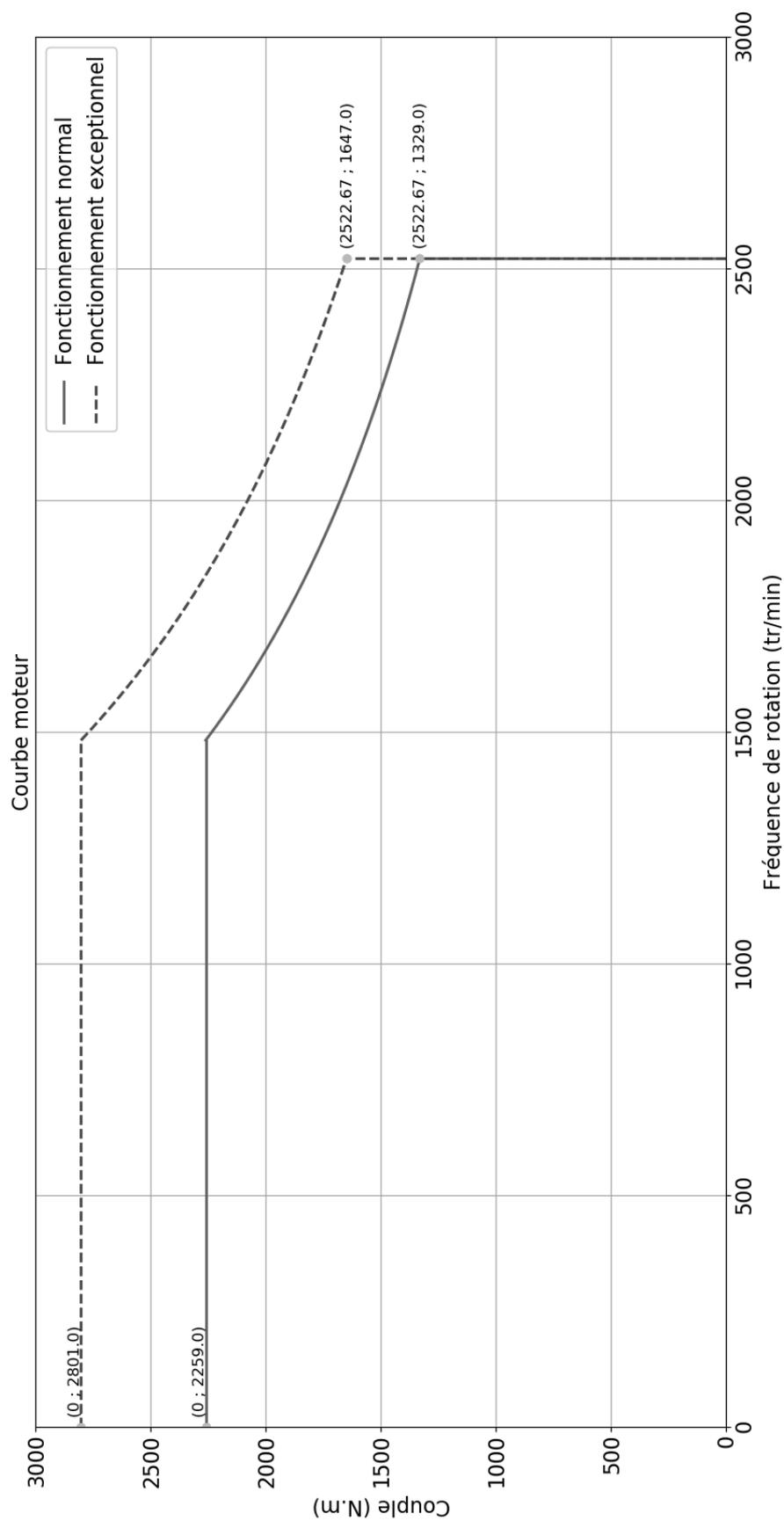


Résultats d'analyse granulométrique de différentes roches

- ① Gravier et sable (alluvions anciennes) ② Sable ③ Limon
④ Sol argileux et calcaire (marne) ⑤ Argile lourde, plastique

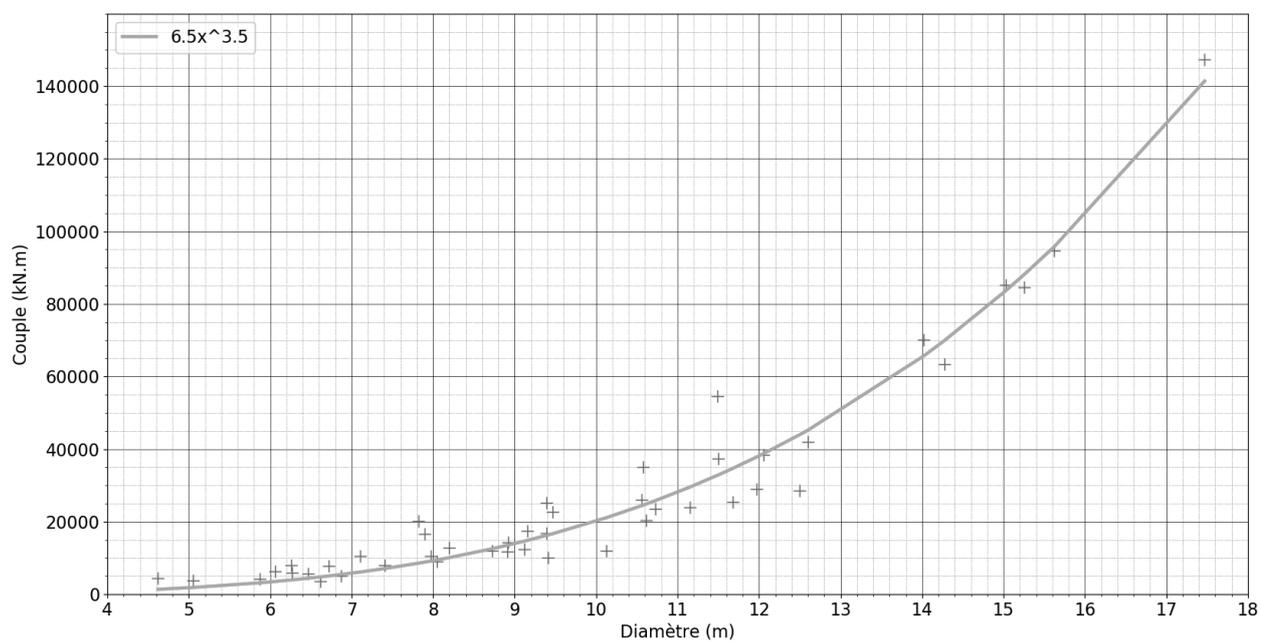
Document technique DT6

Courbes couple/vitesse de rotation du moteur



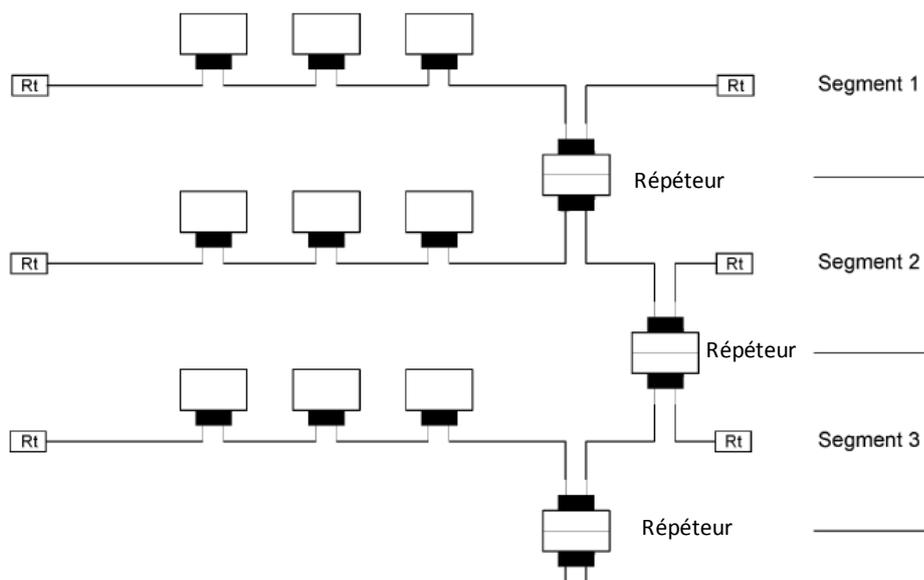
Document technique DT7

Couple disponible pour différents tunneliers à pression de terre – approximation de type puissance ax^b par les moindres carrés



Document technique DT8

Réseau Profibus DP



Rt : Résistance de Terminaison

Données techniques

Participants par réseau	126
Participants par segment	32
Nombre de répéteurs maximum en cascade	7 à 500 kbit.s ⁻¹ 4 à 1,5 Mbit.s ⁻¹
Câble	Impédance caractéristique : 150 Ω ± 15 Ω Capacité répartie : < 30 nF/km Résistance de boucle : < 110 Ω/km Section de fil : > 0,64 mm ²

Document technique DT9
Lecture écriture sur un réseau Profibus DP

L'échange d'information entre le maître et l'esclave nécessite l'envoi de 4 mots de 16 bits :

PKE, IND, PWE-H, PWE-L

Le premier mot (PKE) correspond au paramètre à lire ou écrire selon les extraits de tableau ci-dessous :

Paramètre	Adresse logique (hexa)	Facteur	Plage		Unités	
			min	max		
A2 : paramètres moteur						
A2.01	Vitesse	65	1		tr/min	
A2.02	Sens de rotation	66				
A2.03	Couple	67	1		Nm	
A2.04	Quadrant de fonctionnement	68	1			
A2.05	Courant moteur (A)	69			A	
A2.06	Courant moteur (%)	6A	1		%	
A2.07	Puissance utile (kW)	6B			kW	
A2.08	Puissance utile (Ch)	6C			Ch	
A2.09	Puissance apparente	6D			kVA	
A2.10	Tension moteur	6E	1		V	
C2 : paramètres d'accélération						
C2.05	Rampe d'accélération N°1	293	10	0	6000	s
C2.06	Rampe de décélération N°1	294	10	0	6000	s
C2.07	Rampe d'accélération N°2	295	10	0	6000	s
C2.08	Rampe de décélération N°2	296	10	0	6000	s
C2.09	Basculement 1 ^{ère} /2 ^{nde} accélération	297	10	0	300	Hz
C2.10	Basculement 2 ^{ère} /1 ^{ère} décélération	298	10	0	300	Hz

Le second mot (IND) permet de déterminer le sens de l'échange – lecture ou écriture – selon le tableau ci-dessous (en décimal). Lors du retour, une réponse positive est donnée si le paramètre existe et est lisible ou paramétrable, une réponse négative est donnée dans le cas contraire.

	Sens de l'échange	Réponse positive	Réponse négative
Lecture d'un paramètre	82	82	78
Écriture d'un paramètre	87	87	78

Le 3^{ème} mot (PWE-H) est toujours à 0.

Le 4^{ème} mot (PWE-L) contient la valeur du paramètre à lire dans un télégramme reçu ou la valeur du paramètre à écrire dans un télégramme envoyé, 0 sinon. La valeur physique s'obtient en tenant compte du facteur donné dans les tableaux de paramètres.

Document technique DT10
Critères de choix d'une technologie de moteur électrique

	Moteur à courant continu à aimants	Moteur asynchrone	Moteur synchrone à aimants
Couple au démarrage	Élevé	Moyen	Élevé
Puissance massique	78,7 W/kg	113,4 W/kg	192,3 W/kg
Rapport couple maximal sur couple nominal	1,6	2	3
Risques si blocage du rotor	Démagnétisation du rotor	Néant	Démagnétisation du rotor
Entretien	Charbons et paliers	Paliers	Paliers
Refroidissement direct	Air	Air ou eau	Air ou eau
Prix	Faible	Moyen	Élevé
Variation de vitesse, pilotage en position (avec codeur)	Oui	Oui	Oui
Précision de la régulation en position	Fonction du codeur	Moyenne	Élevé
Mise en parallèle de moteurs	Avec asservissement de position	Sans asservissement	Avec asservissement de position

Document technique DT11
Caractéristiques techniques SafeSet ST-B Series

Taille ST-B	M _A [kNm]	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	L ₁	L ₂	L ₃	M	m [kg]	J [kg.m ²]
60	1.8 – 3.6	60	75	40	132	137	128	83	M6	5	0.01
70	2.7 – 5.4	70	90	50	144	150	140.5	92	M6	6.8	0.02
80	4 – 8	80	100	50	153	166	156.5	108	M6	7.8	0.03
90	5.5– 11	90	110	65	164	184	170	123	M8	9.4	0.04
100	7.5– 15	100	125	70	179	206	191	133	M8	13.5	0.06
110	9– 18	110	140	80	197	208	193	137	M8	17	0.09
120	14– 28	120	150	90	205	237	221	161	M8	20	0.12
130	18– 36	130	160	100	214	250	234	174	M8	22	0.14
140	22– 44	140	170	105	224	261	245	183	M10	24	0.18
150	27– 54	150	180	115	234	275	259	195	M10	27	0.22
160	34– 68	160	200	120	249	300	284	215	M10	37	0.34
170	39– 78	170	210	130	254	300	282	213	M10	38	0.37
180	44– 88	180	225	135	316	300	281	213	M10	45	0.49
190	58 – 116	190	240	145	316	350	332	260	M10	56	0.68
200	65 – 130	200	250	150	316	350	332	260	M10	61	0.81
220	82 – 164	220	270	175	316	350	332	260	M10	65	1

L'accouplement est un produit sur mesure. Le tableau montre quelques exemples.

M_A : couple de relâchement – étendue du réglage

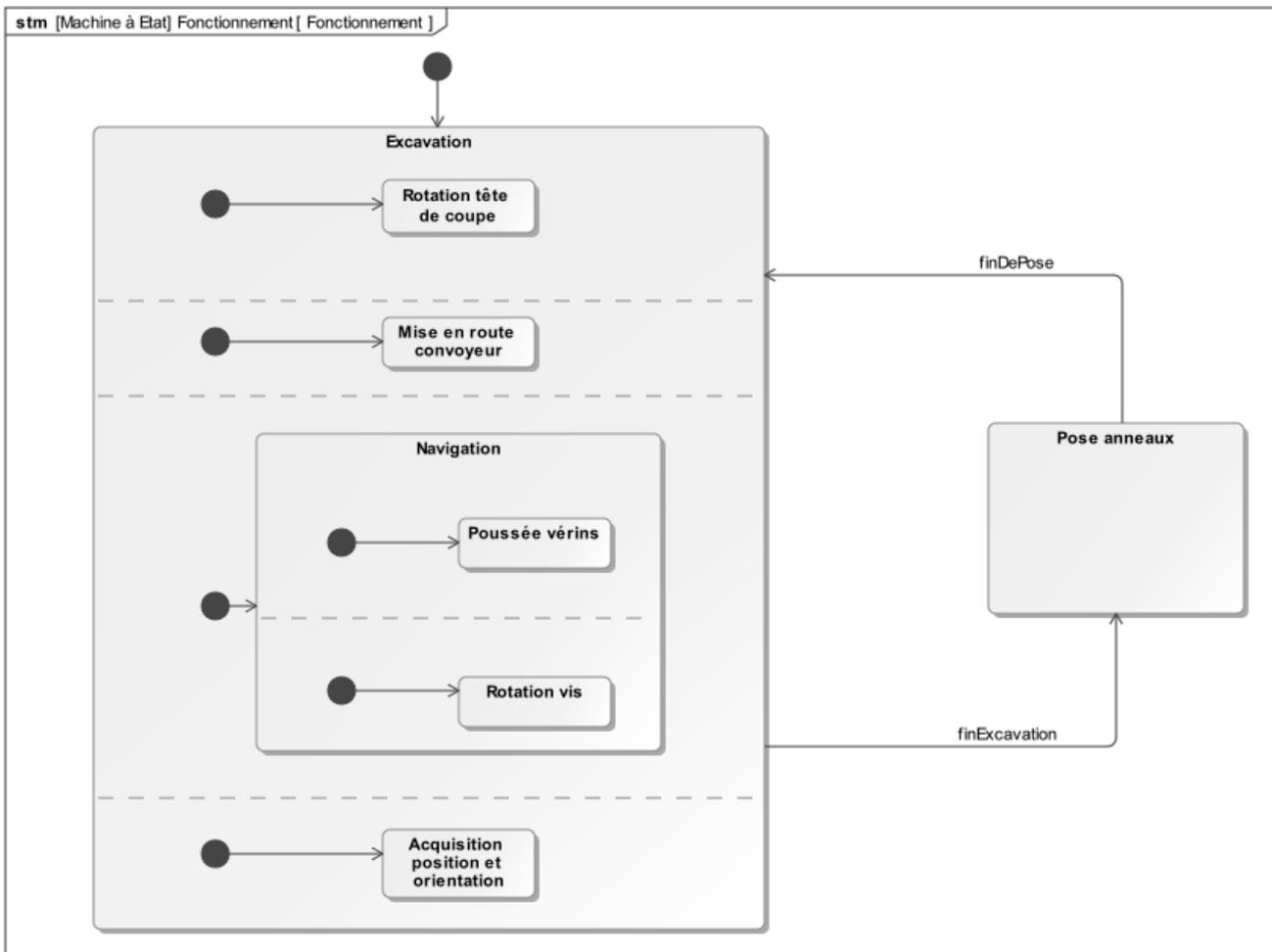
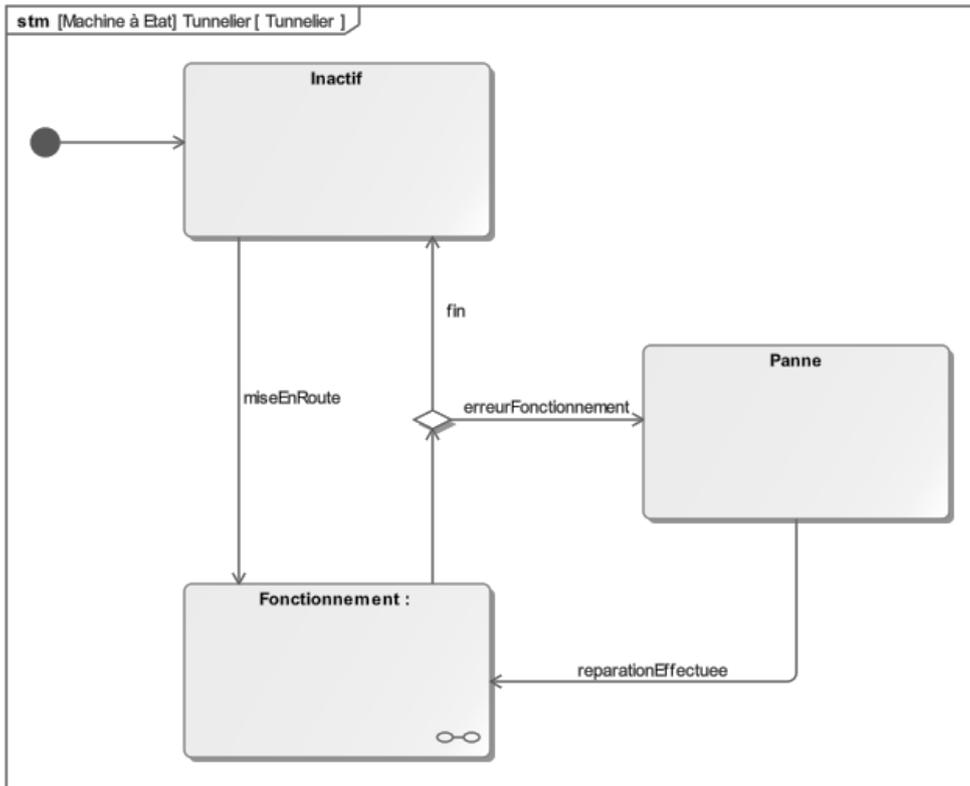
m : masse

J : moment d'inertie

Dimensions en mm.

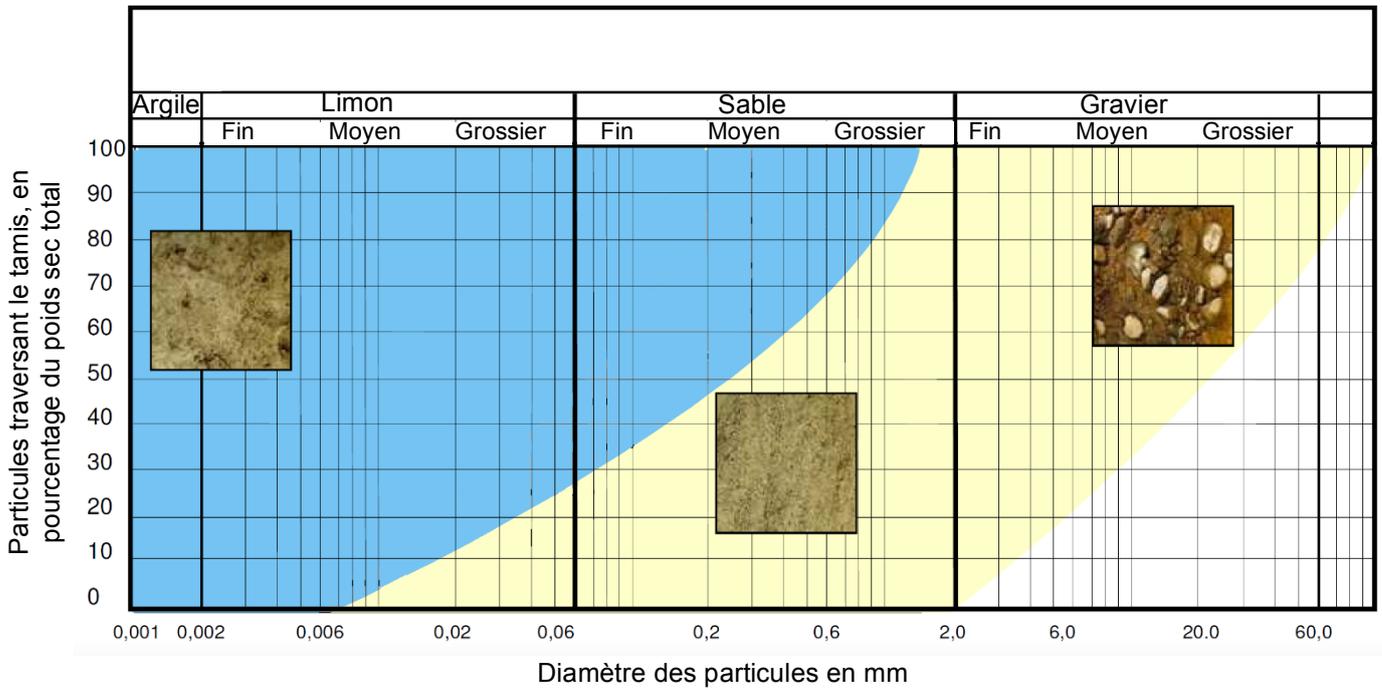
Document technique DT12

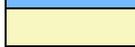
Diagrammes d'états du système d'avance



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

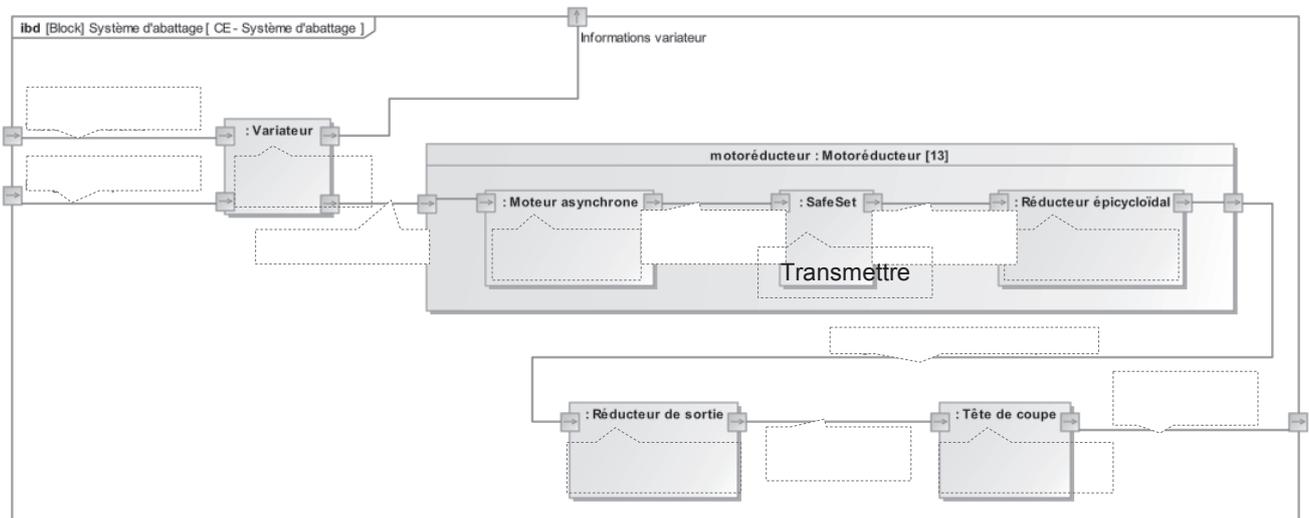
Document réponse DR1
Détermination du type de tunnelier



-  Tunnelier à pression de terre
-  Tunnelier à pression de boue

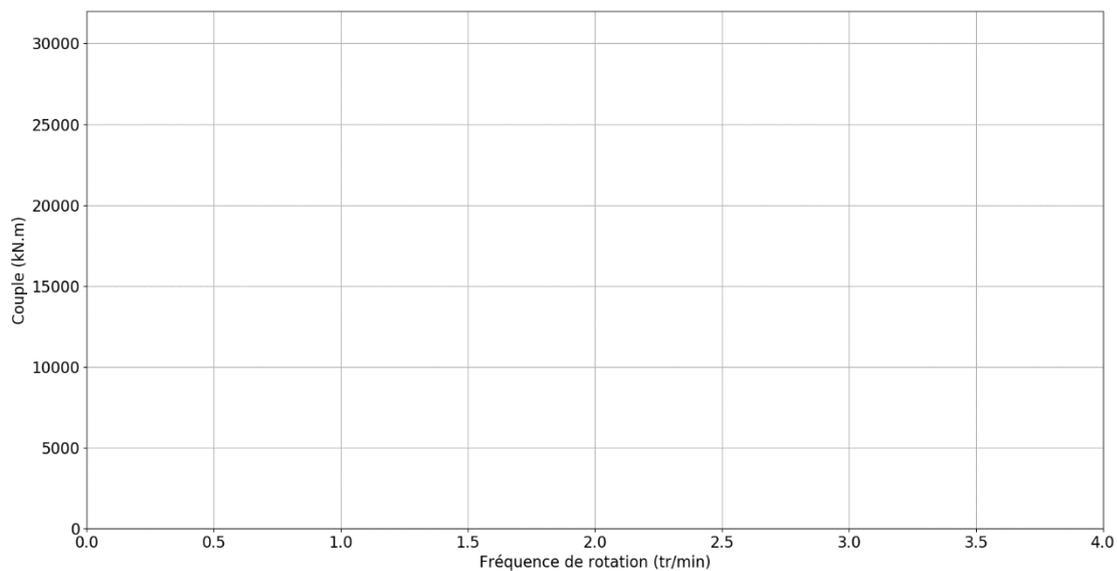
Document réponse DR2

Diagramme de blocs internes du système d'abattage



Document réponse DR3

Courbes limites de fonctionnement ramenées au niveau de la tête de coupe



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR4

Télégramme envoyé :

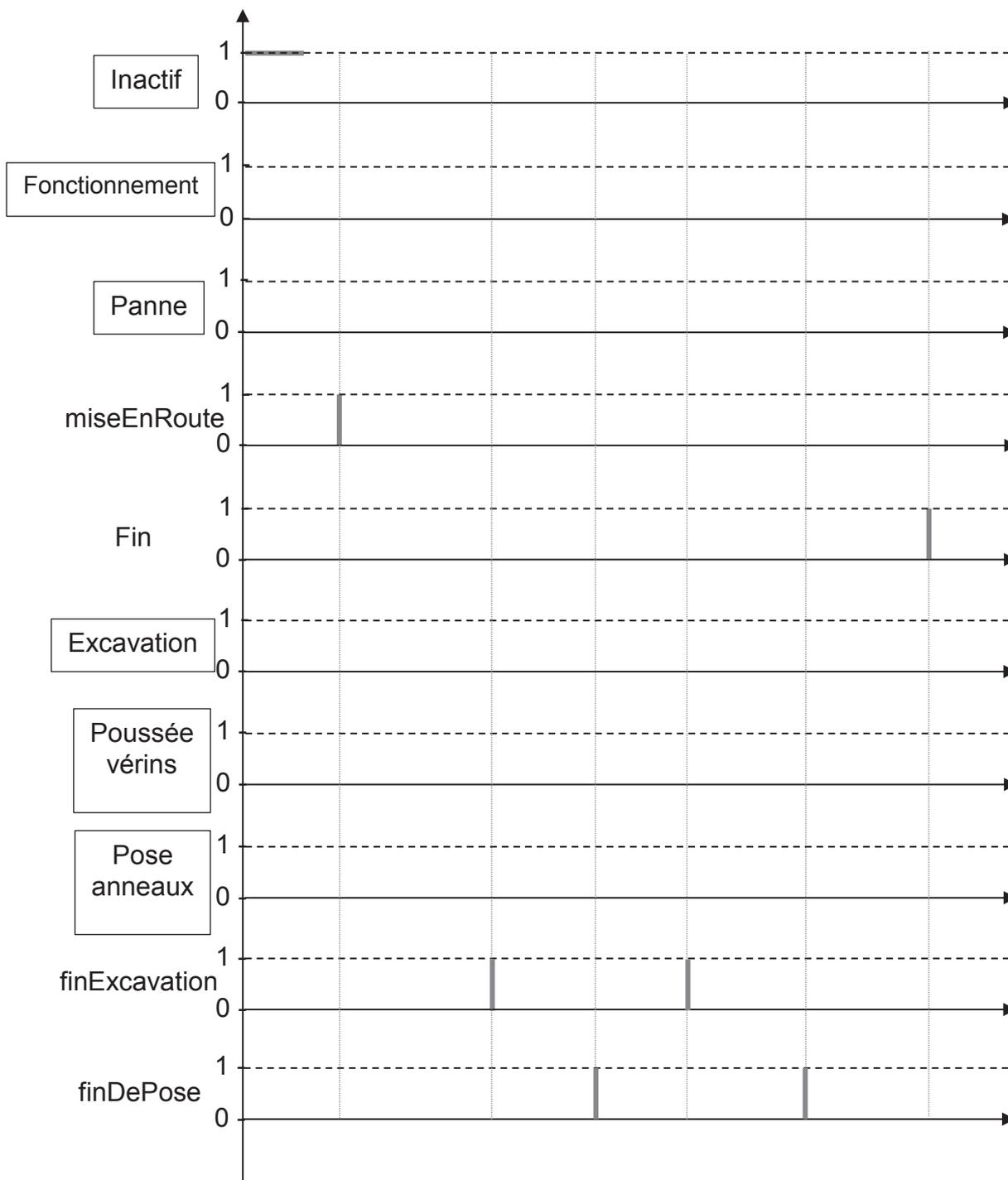
	MSB														LSB		Valeur hexadécimale		
PKE																			
IND																			
PWE-H																			
PWE-L																			

Télégramme reçu :

	MSB														LSB		Valeur hexadécimale		
PKE																			
IND																			
PWE-H																			
PWE-L																			

Document réponse DR5

Chronogrammes



Document réponse DR6

Bilan de puissance

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		0,852			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

Formules utilisées :