

Instructions générales et liste des documents

Matériel autorisé :

- ☐ Tous les instruments de dessin industriel.
- ☐ Calculatrice de poche sans imprimante et sans document d'accompagnement.

Consignes générales :

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

Le sujet comprend une introduction et 5 parties

- ☐ Partie 1 : Étude du séquençement des opérations de poussée du tablier
- ☐ Partie 2 : Modélisation du pousueur
- ☐ Partie 3 : Dimensionnement des composants
- ☐ Partie 4 : Etude de la fabrication de la cale de levage
- ☐ Partie 5 : Étude de la conception d'un ensemble pousueur de tablier

Liste des documents annexes :

- ☐ Dessin de définition partiel de la cale de levage

Liste des documents réponse à rendre avec la copie :

- ☐ Document réponse 1 : Opération de levage (format A4).
- ☐ Document réponse 2 : Opération de poussée (format A4).
- ☐ Document réponse 3 : Analyse des spécifications (format A3)
- ☐ Document réponse 4 : Gamme d'usinage (format A3)
- ☐ Document réponse 5 : Calque pré-imprimé (format A3)

Recommandations du pourcentage de temps à consacrer à chacune des parties :

- ☐ Partie 1 : 10%
- ☐ Partie 2 : 10%
- ☐ Partie 3 : 25%
- ☐ Partie 4 : 20%
- ☐ Partie 5 : 35%

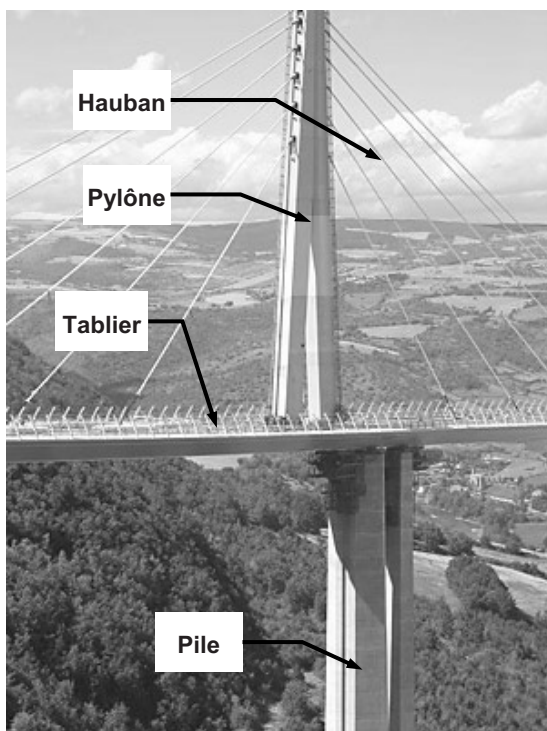
Introduction :

Afin de rejoindre l'autoroute reliant Clermont-Ferrand à Béziers, les pouvoirs publics ont décidé de lancer un vaste chantier de construction, pour ériger un viaduc au-dessus du Tarn, reliant le cosse du Larzac au cosse Rouge, plus connu sous le nom de viaduc de Millau.



Photo 3 : Viaduc de Millau ouvert au public

Quelques chiffres :



Longueur du tablier : 2460 m

Largeur du tablier : 27,40 m

38000 tonnes d'acier assemblées par soudage, ont été nécessaires pour fabriquer le tablier.

Hauteur de la pile la plus haute : 245 m

Nombre de piles de pont : 7

Hauteur des pylônes : 90 m

Masse de chaque pylône : 700 tonnes.

537 personnes ont travaillé pendant 2 ans pour réaliser cet ouvrage.

Photo 4 : Désignation des éléments

Pour construire ce viaduc, il a fallu d'abord ériger les 7 piles définitives en béton et les 7 piles temporaires en acier, puis assembler tronçon par tronçon, les 2 tabliers sur la terre ferme et enfin pousser les deux parties du tablier assemblées sur les piles et réaliser la jonction entre les piles P2 et P3.

Cette opération de poussée est réalisée à l'aide de systèmes hydrauliques nommés « pousseurs de tablier » développés par la société ENERPAC. C'est l'objet de l'étude proposée.

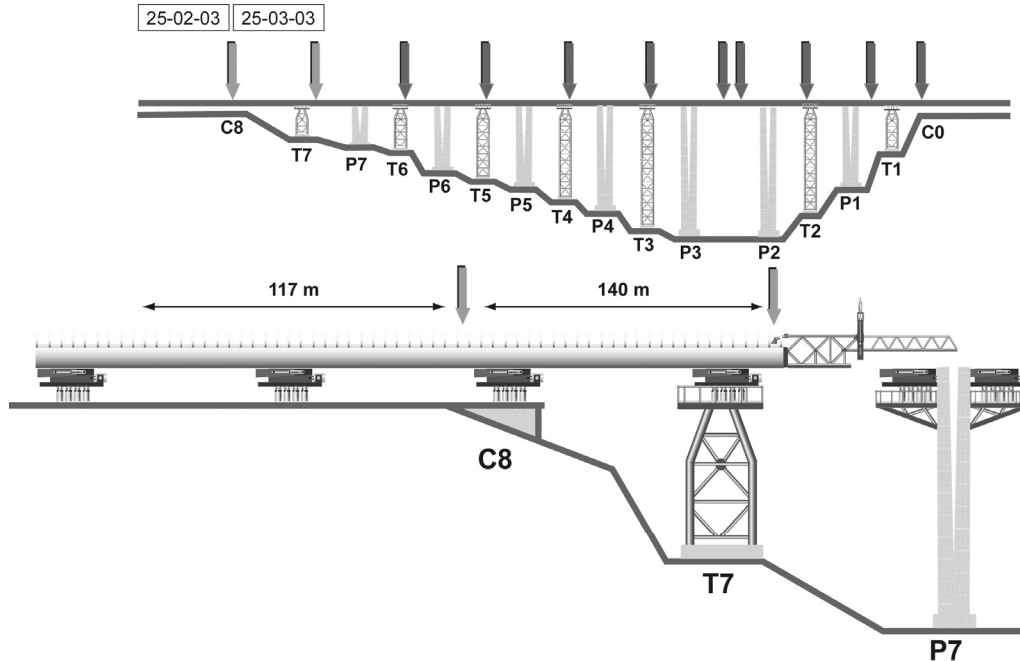


Figure 1 : Piles définitives P_i et piles temporaires T_i avec les pousseurs

Le pousseur de tablier



Figure 2 : Vue d'un pousseur de tablier sur une pile en béton

Le pousseur de tablier est soutenu par plusieurs vérins de balancelle verticaux (non étudiés dans le sujet) qui assurent le positionnement de la semelle afin que la cale de poussée soit parallèle et à bonne distance du plan inférieur du tablier (**figure 3**).

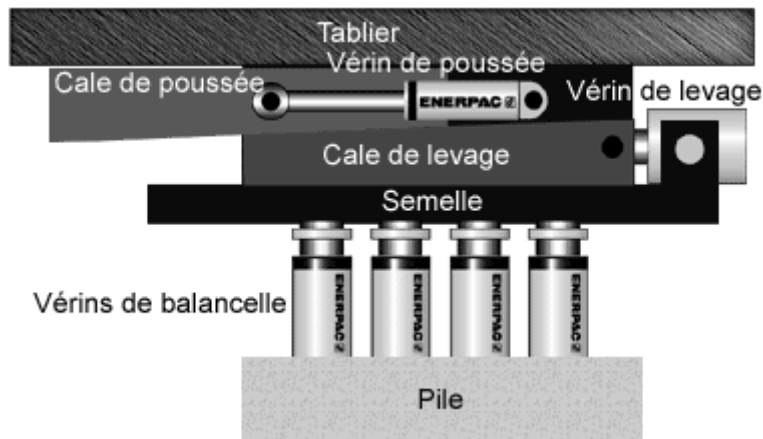


Figure 3 : poussoir en position initiale

Partie 1 : Étude du séquençement des opérations de poussée du tablier

Au démarrage, le système est dans la position initiale de la figure 3. En actionnant la demande de cycle de poussée du tablier (Dcy), le vérin de levage (VL) pousse la cale de levage, ce qui amène la cale de poussée en contact avec le tablier (**figure 4.1**). Une fois cette action terminée, la cale de poussée est déplacée par le vérin de poussée (VP), entraînant le tablier avec elle par adhérence (**figure 4.2**). Puis le vérin de levage ramène la cale de levage en position de départ, ce qui provoque la rupture du contact entre la cale de poussée et le tablier (**figure 4.3**). Enfin le vérin de poussée ramène la cale de poussée dans la position initiale, le système est prêt pour un nouveau cycle (**figure 4.4**).

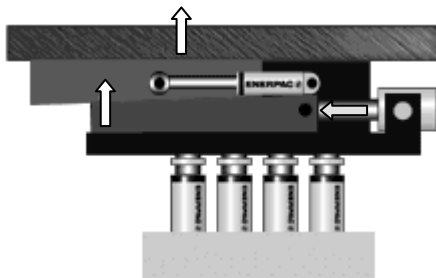


figure 4.1 : levage

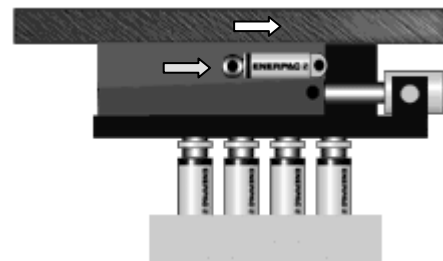


figure 4.2 : poussée du tablier

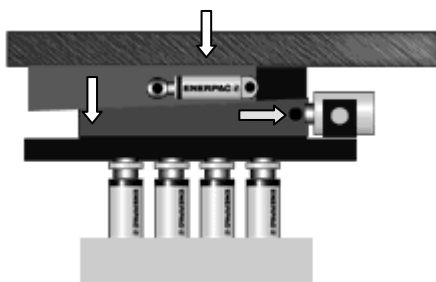
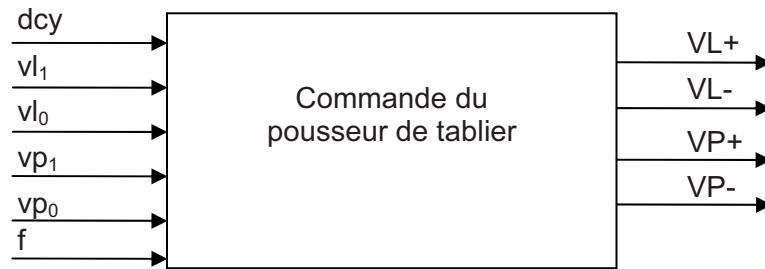


figure 4.3 : descente



figure 4.4 : retour en position initiale

On appelle respectivement (VL+) et (VL-), les actions de sortie et de rentrée de tige du vérin (VL). Les capteurs (vl₁) et (vl₀) détectent respectivement, les positions sortie et rentrée de tige du vérin (VL). On appelle respectivement (VP+) et (VP-), les actions de sortie et de rentrée de tige du vérin (VP). Les capteurs (vp₁) et (vp₀) détectent respectivement, les positions sortie et rentrée de tige du vérin (VP).



Inventaire des entrées/sorties de la commande du poussoir de tablier

Question 1.1 : A partir de la description du séquençement de poussée du tablier et de l'inventaire des entrées/sorties de la commande, proposer un grafcet fonctionnel **GPI** de la commande d'un poussoir de tablier.

Question 1.2 : Proposer un grafcet de coordination **GC** permettant de gérer le démarrage du cycle (dcy) et autorisant le cycle des grafquets de commandes GPI des pousseurs. Modifier éventuellement votre grafcet GPI (*mettre les modifications entre parenthèses*).

Question 1.3 : Lors des opérations de poussée et de levage, les actions mécaniques engendrent des sollicitations sur les piles de ponts. De quels types sont-elles ?

Question 1.4 : La déformation principale de la pile est due à la flexion lors des opérations de poussée. On souhaite ici que cette déformation en haut de pile n'excède pas une longueur f_{max} . Expliquer l'origine de cette flexion et proposer une solution technologique pour mesurer cette valeur.

Question 1.5 : Lorsque la déformation de la pile atteint la valeur f_{max} , une information logique f passe à l'état vrai. On souhaite alors inhiber le comportement du grafcet de commande de la pile. Proposer des modifications de votre grafcet qui tiennent compte de cette contrainte (*utiliser une couleur différente*).

Question 1.6 : Pour éviter tout problème de déformation excessive du tablier et/ou des piles, lors de l'opération de poussée, les déplacements des tiges de tous les vérins de poussée de tous les tabliers doivent être synchronisés durant toute l'opération. La commande tout ou rien des vérins de poussée est-elle satisfaisante ? Justifier et proposer un autre type de commande répondant à cette nouvelle contrainte.

Partie 2 : Modélisation du poussoir

On suppose dans cette partie, que l'angle que fait le plan supérieur de la cale de levage avec l'horizontale est petit. Ce qui revient à considérer que les contacts dans les liaisons planes sont maintenus durant tout le mouvement.

Une première étude conduit à la modélisation suivante :

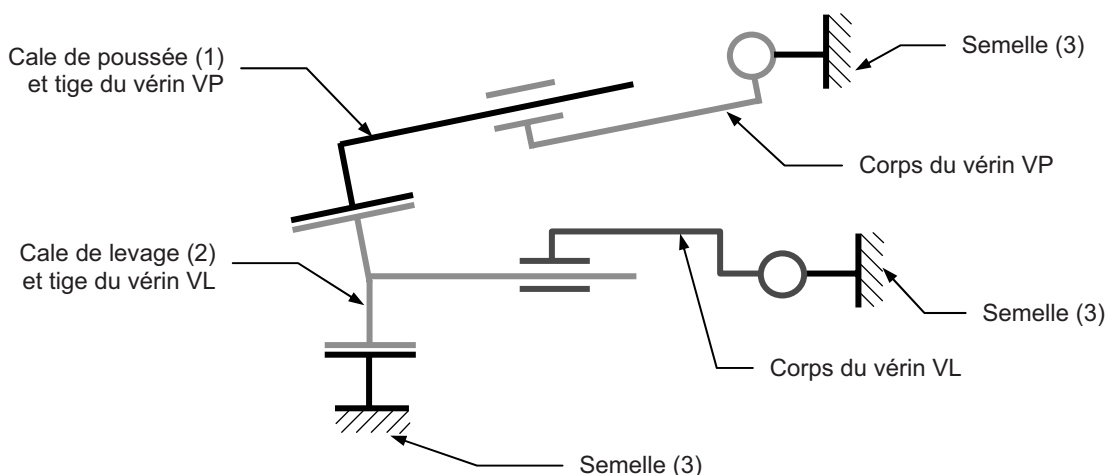


Figure 5 : Schéma cinématique

Question 2.1 : Estimer le degré de mobilité de ce système.

Question 2.2 : Déterminer le degré d'hyperstatisme du système.

Question 2.3 : Proposer des modifications pour rendre le système isostatique. Faire un nouveau schéma cinématique tenant compte de ces modifications.

Question 2.4 : Le constructeur a fait le choix de mettre une liaison glissière de direction horizontale à la place de la liaison plane entre la cale de levage (2) et la semelle (3) (figure 6). Qu'est-ce qui justifie un tel choix ? Comment peut-on rendre ce système isostatique ?

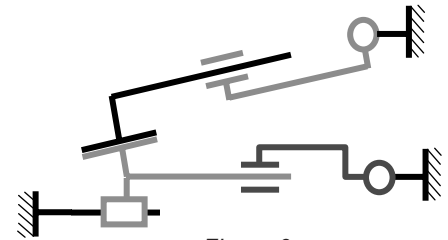


Figure 6

Partie 3 : Dimensionnement des composants.

Question préliminaire : Le tablier avance sur les piles à une vitesse moyenne de 9 m/h. La course de chaque vérin est d'environ 240 mm. Calculer le nombre de cycles par minutes nécessaires pour atteindre cette vitesse moyenne. En déduire la vitesse moyenne de sortie de tige des vérins (on supposera que les quatre phases ont une durée identique).

On se place dans le cadre d'un **problème plan**. Le tablier a une longueur totale de 2460 m et une masse totale de 38000 tonnes. On estime à $P_t = 24000$ kN, l'effort exercé sur chaque pile, dû à la masse du tablier. Comme il y a deux systèmes de poussée par pile, on considèrera que la cale de poussée doit soutenir une partie du poids du tablier égale à 12000 kN. On pose

$$\{F_{Poids}\} = \begin{Bmatrix} \vec{P} = -\frac{P_t}{2} \vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_G, \text{ le torseur des actions de pesanteur exercées sur la portion de tablier au}$$

centre de gravité de cette portion. Le point G et le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ sont définis sur le **document**

réponse 1. On pose $\{F_{i \rightarrow j}\} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_{i \rightarrow j} = X_{ij} \vec{x} + Y_{ij} \vec{y} \\ \vec{M}_{i \rightarrow j}^P = M_{ij} \vec{z} \end{Bmatrix}_P$, le torseur des efforts exercés par le solide (i)

sur le solide (j).

On prendra $f_1 = 0,05$ comme valeur de coefficient de frottement entre la cale de poussée (1) et la cale de levage (2), ainsi qu'entre la cale de levage (2) et la semelle (3). La semelle (3) est considérée comme fixe dans cette partie.

On suppose qu'il y a glissement entre la semelle (3) et la cale de levage (2), ainsi qu'entre la cale de poussée (1) et la cale de levage (2). On suppose enfin qu'il y a adhérence entre le tablier (4) et la cale (1).

On néglige les effets dynamiques devant les forces en présence. Les poids des pièces sont négligés devant le poids du tablier.

On notera, pour un contact linéique rectiligne : $\vec{F}_{i \rightarrow j} = T_{i \rightarrow j} \vec{t} + N_{i \rightarrow j} \vec{n}$, la résultante des efforts du solide (i) sur le solide (j), où $T_{i \rightarrow j}$ et $N_{i \rightarrow j}$ sont les composantes tangentielle et normale de la résultante.

Dimensionnement du vérin de levage (VL).

Question 3.1 : Quelle forme de répartition de pression (linéaire ou uniforme) doit-on choisir, le long de la ligne de contact entre (1) et (2), pour que le moment du torseur $\{F_{2 \rightarrow 1}\}$ s'annule en un point Q de cette ligne ? On pourra étudier deux cas : Q est le milieu du segment et Q est un autre point de la ligne. Justifier succinctement.

Question 3.2 : Seule la tige du vérin VL est mobile. Ecrire une relation liant $T_{2 \rightarrow 1}$ et $N_{2 \rightarrow 1}$. Ecrire également une relation liant $T_{3 \rightarrow 2}$ et $N_{3 \rightarrow 2}$.

Question 3.3 : En prenant comme échelle des forces 1 cm pour 1500 kN, placer sur le **document réponse 1**, la résultante des actions de pesanteur exercées sur la portion du tablier.

Question 3.4 : Rechercher graphiquement une solution permettant d'assurer l'équilibre de la cale de poussée (1) en supposant que les 3 actions extérieures qui s'exercent sur cette pièce sont représentées par 3 glisseurs. Justifier votre réponse ; en particulier la solution trouvée est-elle compatible avec la condition de la question 3.1 ? Donner la valeur numérique de la force exercée par le vérin VP sur la cale de poussée (1) : $\vec{F}_{VP \rightarrow 1}$.

Question 3.5 : En utilisant une démarche similaire à celle proposée à la question 3.4, déterminer graphiquement sur le **document réponse 1**, la force exercée par le vérin VL sur la cale de levage (2) : $\vec{F}_{VL \rightarrow 2}$. Justifier la construction.

Question 3.6 : L'actionneur VL est un vérin hydraulique fonctionnant sous une pression nominale de 400 bars. Calculer la section utile de vérin.

Question 3.7 : En faisant l'hypothèse d'une répartition de pression linéaire et en tenant compte du modèle simplifié (sans frottement) proposé **figure 7**, déterminer et calculer la pression maximale p_{\max} de contact entre la cale de levage (2) et la cale de poussée (1). En déduire la largeur minimale e de la cale de levage, pour que p_{\max} n'excède pas la pression de matage admissible de 200 Mpa.

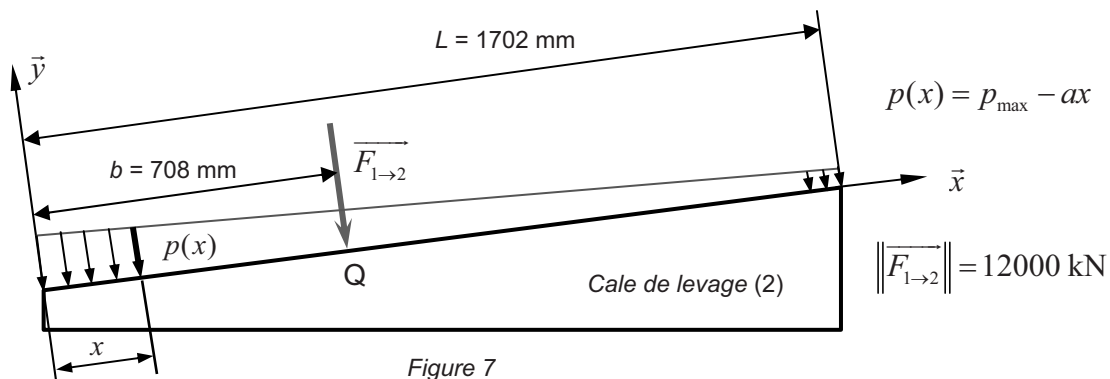


Figure 7

Dimensionnement d'une pile.

Lors de l'opération de poussée, la semelle (3) exerce sur la pile un effort qui se décompose en une composante verticale et une composante horizontale. On ne tiendra compte à la question 3.8, que de la composante horizontale : $F_H = 1600$ kN.

Question 3.8 : En assimilant la pile à une poutre encastrée dans le sol, de section carrée et de hauteur L , déterminer la flèche d à l'extrémité haute de la pile (**figure 8**). Faire une application numérique.

On donne :

- $d = \frac{F_H L^3}{3EI_{Gz}}$: flèche de la pile.
- $E = 27000$ Mpa : module de Young du béton.
- $a = 10$ m : longueur d'arête de la section de la pile.

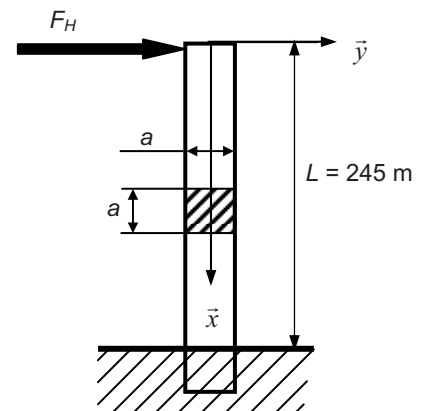


Figure 8

Question 3.9 : Tracer l'évolution du moment fléchissant $M_{fz}(x)$ et calculer ses valeurs minimale et maximale.

Question 3.10 : On tient compte dans cette question du poids de 12000 kN qui s'applique sur la pile. Calculer les contraintes de traction et de compression maximales qui s'exercent dans la pile. On donne : la contrainte admissible du béton en traction : 2,1 MPa, la contrainte admissible du béton en compression : 40 MPa. Comparer et conclure.

Dimensionnement du vérin de poussée (VP).

On se place toujours dans le cadre d'un problème plan. (**document réponse 2**).

Question 3.11 : Seule la tige du vérin VP est mobile. Ecrire une relation liant $T_{2 \rightarrow 1}$ et $N_{2 \rightarrow 1}$, ainsi qu'une relation liant $T_{3 \rightarrow 2}$ et $N_{3 \rightarrow 2}$.

Question 3.12 : En prenant comme échelle des forces 1 cm pour 1500 kN, placer sur le **document réponse 2**, la résultante des actions de pesanteur exercées sur la portion de tablier.

Question 3.13 : En utilisant une démarche similaire à celle proposée à la question 3.4, déterminer graphiquement sur le **document réponse 2**, la force exercée par le vérin VP sur la cale de poussée (1) : $\vec{F}_{VP \rightarrow 1}$. Justifier la construction.

Question 3.14 : L'actionneur VP est considéré comme un vérin hydraulique fonctionnant sous une pression nominale de 400 bars. Calculer la section utile de vérin.

Partie 4 : Etude de la fabrication de la cale de levage

Lors du fonctionnement, la cale de levage est en contact avec la semelle et la cale de poussée.

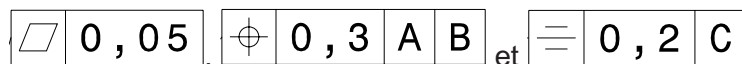
Question 4.1 : Quelles doivent être les propriétés physiques du matériau de la cale de levage, afin d'assurer un fonctionnement correct sans dégradation. En déduire les principales caractéristiques mécaniques du matériau à utiliser.

Question 4.2 : Préciser le % de carbone d'un acier non allié et un ou des traitements permettant d'obtenir les caractéristiques mécaniques désirées pour la cale de levage. Expliquer en quelques lignes le principe du ou des traitements retenus.

Question 4.3 : A partir des informations du dessin de définition partiel de la cale de levage, interpréter la spécification suivante :

$$60 \pm 0,2$$

Question 4.4 : A partir des informations du dessin de définition partiel de la cale de levage, interpréter les 3 spécifications suivantes sur le **document réponse 3** :



La cale de levage est obtenue par usinage sur l'ensemble de ses faces dans un brut découpé dans une plaque d'acier de 70 mm d'épaisseur (surépaisseur sur l'ensemble des faces de 5 mm).

Question 4.5 : Proposer un procédé permettant la découpe précise du brut (intervalle de tolérance de 0,5 mm).

L'atelier de fabrication dispose de fraiseuses à commande numérique de grandes capacités. Deux types de fraiseuses sont disponibles :

- CU 3 axes : fraiseuse 3 axes à broche verticale de capacité X=2000 mm, Y=800 mm et Z=800 mm
- CU 5 axes : fraiseuse 5 axes de capacité X=2000 mm, Y=1000 mm et Z=1000 mm avec une tête orientable A = +/- 100° et B = +/- 100°.

Tous les types d'outils classiques suivant sont disponibles : forets, fraises 2 tailles, fraises à surfacer, outils à aléser, fraises à chanfreiner.

On se propose d'étudier les paramètres de coupe d'une opération de surfacage à l'aide d'une fraise à surfacer. On donne les éléments suivants :

- Caractéristique de la fraise : $\varnothing 80$ mm, nombre de dents $Z=5$, engagement radial 80%
- Puissance nécessaire pour la coupe : $P = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{6 \cdot 10^7} [kW]$
- Puissance disponible pour la coupe : 12 kW
- Pression spécifique de coupe $k_c=2000$ N/mm²
- En ébauche : vitesse de coupe $V_c=250$ m/min et avance par dent $f_z=0,25$ mm
- En finition : vitesse de coupe $V_c=300$ m/min et avance par dent $f_z=0,15$ mm

Question 4.6 : Pour l'ébauche, calculer la vitesse de rotation **N** de la broche, la vitesse d'avance **v_f** de la fraise et la valeur **a_p** maximum correspondant à la profondeur de passe compatible avec la puissance disponible pour la coupe.

Question 4.7 : En déduire les paramètres de coupe (V_c , a_p , f_z) pour chaque passe éventuelle afin de finir la surface. Déterminer la puissance pour chaque passe et commenter ces puissances obtenues.

Question 4.8 : Proposer sur le **document réponse 4**, une gamme d'usinage permettant l'usinage complet de la cale de levage. On demande en particulier de préciser pour chaque phase d'usinage :

- le numéro de la phase,
- le type de la machine,
- un dessin en **3D** de l'allure de la pièce en position d'usinage mettant clairement en évidence les surfaces brutes et les surfaces usinées pour chaque phase,
- l'isostatisme (normales de repérage, on prendra soin aux positions des normales/surfaces usinées et on ne s'intéressera pas aux problématiques de serrage)
- le repère XYZ de la machine,
- la liste des opérations d'usinage avec les surfaces réalisées ainsi que les types d'outils associés (faire un dessin de l'allure de l'outil en travail précisant son orientation).

Question 4.9 : Expliquer la spécification correspondant au symbole $\sqrt{Ra \ 0,2}$ extrait du dessin de définition partiel de la cale de levage.

Question 4.10 : Proposer un procédé permettant d'obtenir cette spécification sur cette pièce. Situer ce procédé dans le processus de fabrication de la cale de levage.

Partie 5 : Etude de la conception d'un ensemble pousseur de tablier

On demande de réaliser sur le **document réponse 5** (calque pré-imprimé A3) la conception d'un ensemble pousseur de tablier.

La semelle qui fait office de bâti sera réalisée en mécano-soudé à partir de plaques découpées dans des épaisseurs de 40, 30 et 10 mm. Une pièce massive nommée « support » en liaison complète démontable avec la semelle permet d'assurer un contact satisfaisant avec le plan inférieur de la cale de levage.

Il est demandé en particulier de définir dans toutes les vues utiles à la compréhension, les formes et les géométries permettant de réaliser :

- La liaison du vérin de levage avec la semelle, les axes sont en liaison complète non démontable avec le vérin de levage, on fera attention au montage et au démontage du vérin par rapport à la semelle.
- Les liaisons du vérin de poussée avec la cale de poussée et la semelle
- La liaison complète démontable du support et de la semelle
- Les liaisons glissières des cales de levage et de poussée par rapport à la semelle
- La forme mécano-soudée de la semelle en faisant apparaître clairement les éléments assemblés.

Une attention particulière sera portée sur la **qualité graphique** et le **montage** des éléments.

