



Épreuve de Sciences Industrielles PSI

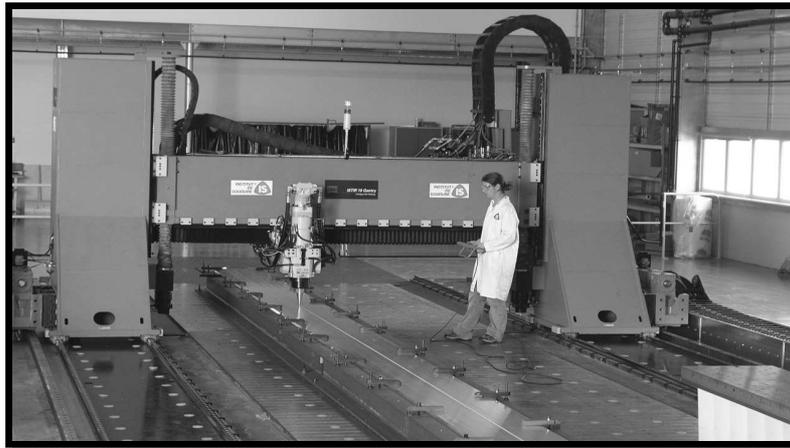
Durée 5 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de la calculatrice est autorisé.

**Etude d'une machine de
soudage par friction – malaxage :
le « *Friction – Stir Welding* » (FSW)**

QUESTIONNAIRE



Le sujet remis aux candidats comprend :

- un questionnaire
- un dossier technique regroupant les annexes
- un cahier de réponses

Le questionnaire est composé de 2 parties indépendantes :

- Préparation de l'assemblage d'éprouvettes
de caractérisation par friction - malaxage pp. 4 - 10
- Réalisation d'un cordon de soudure linéaire
sur l'axe (O_0, \vec{y}_0) de la machine de soudage « FSW » pp. 11 - 18

Chaque partie est décomposée en sous-parties indépendantes les unes des autres pour la plupart des questions.

Il est précisé que le candidat devra porter l'ensemble de ses réponses sur le cahier prévu à cet effet, à l'exclusion de toute autre copie.

Présentation du procédé de soudage par friction - malaxage

Les procédés d'assemblages permanents entrent dans la fabrication de 80% des produits manufacturés. Le soudage représente une grande majorité de ces procédés. Il permet l'obtention d'une liaison complète entre deux pièces.

Les procédés de soudage les plus répandus utilisent l'arc électrique comme source de chaleur. Les matériaux sont localement mis en fusion par cette chaleur et après refroidissement la liaison entre les pièces à assembler est complète. Dans ce cas, les matériaux doivent être compatibles pour que la solidification produise un cordon résistant.

Une solution alternative est le soudage par friction-malaxage, le Friction Stir Welding (FSW), qui met en œuvre la dissipation énergétique par frottement comme source de chaleur. Ce procédé a l'avantage de pouvoir assembler des matériaux qui ne sont pas compatibles pour réaliser un assemblage par fusion : aluminium / acier, acier / titane par exemple.

Développé depuis 1991, le soudage par friction-malaxage a de nombreuses applications dans le secteur aéronautique. Citons par exemple, l'avion Eclipse pour lequel les assemblages par rivetage ont été remplacés à hauteur de 70 % par des joints soudés diminuant ainsi le coût de fabrication (voir figure 1). Il offre alors au concepteur de nouvelles possibilités pour des produits innovants.



Figure 1 : avion Eclipse

Le frottement généré par la rotation d'un outil sur les pièces à souder dégage de la chaleur. Les matériaux à souder deviennent alors semi-solides (point d'équilibre entre le solidus et le liquidus), mais n'entrent pas dans le domaine liquide, avantage de cette technologie. L'outil possède un épaulement pour augmenter la surface de frottement (voir figure 2). Le déplacement du pion dans les matériaux à l'état semi-solide crée alors un cordon de soudure.

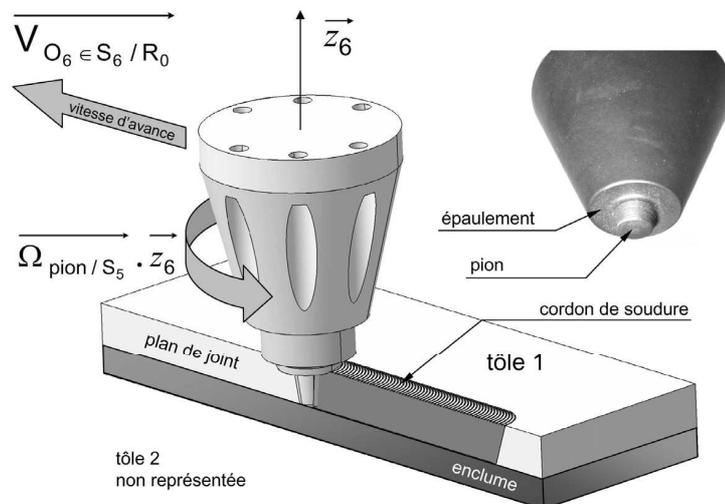


Figure 2 : principe de réalisation d'un cordon de soudure par FSW.

Pour réaliser un cordon de soudure de bonne qualité, il est nécessaire d'appliquer un effort de pression verticale sur l'outil qui maintient le métal semi-solide entre l'enclume et l'épaulement du pion (voir figure 3). Selon l'axe principal de l'outil (O_6, \vec{z}_6) , il y a donc une régulation de pression et non pas un asservissement en position.

Dans son mouvement par rapport au bâti, les tôles à souder exercent des efforts résistants sur l'outil de soudage : un effort résistant au mouvement d'avance, et un effort transversal au mouvement d'avance (voir figure 3).

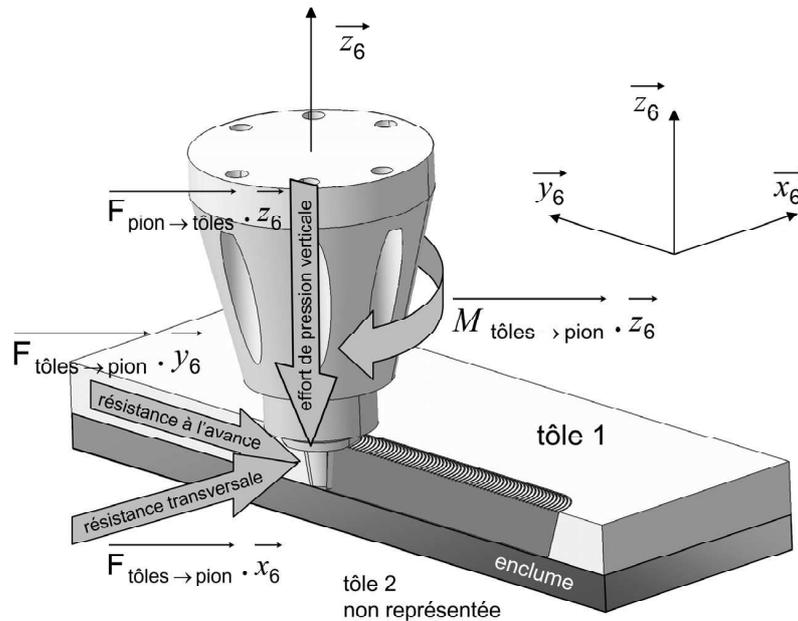


Figure 3 : efforts pilotés et efforts résistants lors de la réalisation d'un cordon de soudure par FSW.

La machine de soudage « FSW » génère la rotation de l'outil et son déplacement. Le sujet propose l'étude d'une machine de soudage « FSW » implantée dans un centre de recherche et de transfert de technologies. Cette installation assure la réalisation d'essais de soudage, de pièces « tests » pour l'aéronautique, mais aussi la production de pièces pour l'industrie.

Une machine de soudage « FSW » est composée essentiellement (voir dossier technique, annexe A, p. 2):

- ✓ d'un portique qui assure les mobilités en translation de la tête par rapport au bâti,
- ✓ d'une tête de soudage qui assure les mobilités complémentaires nécessaires à l'outil de soudage. La mise en rotation de l'outil est assurée par cette tête.
- ✓ d'un outil, souvent composé d'un pion et d'un épaulement. Le frottement généré par le pion et l'épaulement permet le dégagement de chaleur. Sa mise en rotation permet un malaxage des deux matériaux et donc la création d'une zone soudée.
- ✓ d'une plateforme de soudage sur laquelle sont mises en position les pièces à assembler grâce à un montage.

Contrairement aux autres procédés de soudage, le montage de soudage doit assurer non seulement la mise en position de chacune des pièces avant assemblage mais doit également compenser l'effort de pression verticale exercé par l'outil sur les tôles.

----- Fin de la présentation du procédé -----

PARTIE I

Préparation de l'assemblage d'éprouvettes de caractérisation par friction-malaxage

Cette partie est consacrée à l'étude de la préparation de l'assemblage de tôles pour réaliser des éprouvettes de caractérisation en « V » pour l'industrie aéronautique (voir dossier technique, annexe F pp. 6 à 9). Après l'étude de quelques liaisons de la machine de soudage « FSW », les différentes phases de la préparation d'un essai de soudage seront étudiées en utilisant cette éprouvette comme exemple. Ces différentes phases sont :

- ✓ la vérification des limites géométriques de la machine de soudage « FSW » caractérisant les domaines géométriques de soudabilité des éprouvettes,
- ✓ la mise en place d'un montage de soudage,
- ✓ l'étude du système de bridage des tôles,
- ✓ la mise en sécurité de la machine de soudage « FSW »,
- ✓ la programmation de la commande en position et en vitesse du déplacement de la machine de soudage « FSW ».

◆ ETUDE DES LIAISONS, MISE EN MOUVEMENT DES SOLIDES

Une description globale ainsi qu'un schéma cinématique simplifié de la machine de soudage « FSW » sont donnés dans le dossier technique (annexes A, B & C, pp. 2-3). Il est précisé ici que le montant droit S_1 , le montant gauche S_1' et la traverse S_2 constituent un portique repéré Σ_{12} ($\Sigma_{12} = S_1 + S_2 + S_1'$).

Le chariot S_3 est en liaison pivot avec la chape d'orientation S_4 qui est elle-même en liaison pivot avec la tête de soudage S_5 .

Question I.1 (voir dossier technique, annexes A, B et C)

- **Donner le nom de la liaison cinématiquement équivalente entre le chariot S_3 et la tête S_5 . Spécifier les caractéristiques intrinsèques et la forme du torseur cinématique de cette liaison équivalente.**

Pour la question I.2 (et uniquement pour cette question), on pose les hypothèses suivantes :

- ✓ le montant droit S_1 et le montant gauche S_1' sont immobiles par rapport à la plateforme,
- ✓ le chariot S_3 est immobile par rapport à la traverse S_2 ,
- ✓ la traverse S_2 est libre de tout mouvement suivant l'axe (O_0, \vec{z}_0) .

Question I.2 (voir dossier technique, annexes A, B et C)

- **Décrire, dessiner et donner les grandeurs caractéristiques de la frontière du volume au sein de laquelle les assemblages par cette machine de soudage « FSW » sont réalisables.**

Le portique Σ_{12} peut se déplacer en translation par rapport à la plateforme S_0 suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) grâce à une liaison glissière. Le guidage de cette liaison est assuré par des galets qui roulent sur des règles au profil en « queue d'aronde » (voir dossier technique,

annexe D, p. 4). Le déplacement du portique Σ_{12} est quant à lui assuré par une liaison pignon-crémaillère.

Question I.3 (voir dossier technique, annexe D)

- **Proposer deux solutions alternatives au système pignon-crémaillère pour entraîner un solide en translation par rapport à un autre. Préciser les avantages et inconvénients de chaque solution.**

◆ ETUDE DES DOMAINES DE SOUDABILITE D'UNE EPROUVETTE

Un constructeur aéronautique souhaite réaliser une éprouvette en forme de « V » pour tester les cordons de soudure réalisés par ce procédé (voir dossier technique, annexe F, p. 6). Le constructeur impose une soudure dite concave. L'éprouvette est paramétrée par les variables α_e , r_e , λ_e , et e_e qui ne sont pas fixées a priori.

Quatre types de mise en position de l'éprouvette sont envisagés (voir dossier technique, annexe F, pp. 6-9):

- ✓ cas 1 : en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) ,
- ✓ cas 2 : en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0) ,
- ✓ cas 3 : « à plat », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) ,
- ✓ cas 4 : « à plat », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0) .

Il est possible pour chacune de ces mises en position d'établir le domaine des géométries soudables, c'est-à-dire de fixer les limites géométriques de l'éprouvette pour qu'elle soit réalisable sur la machine de soudage « FSW ». Pour exemple, les graphes du domaine des géométries soudables des cas 2, 3 et 4 sont donnés (voir dossier technique, annexe F, pp. 7-9). Dans tous les cas, l'axe du pion de soudage doit rester perpendiculaire aux surfaces à assembler pour réaliser un cordon de qualité.

Question I.4 (voir dossier technique, annexes B et F)

- **Donner les valeurs limites du paramètre α_e des géométries soudables pour la mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) (cas 1).**
- **En se basant sur les exemples fournis (voir dossier technique, annexe F, pp. 7-9), établir le graphe du domaine des géométries soudables pour la mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) (cas 1). Tracer pour cela les limites du domaine pour les 2 valeurs extrêmes du paramètre α_e et au moins 2 courbes intermédiaires significatives.**

Question I.5 (voir dossier technique, annexes B et F)

- **Expliquer les brisures des droites pour $\alpha_e = 157^\circ$ et $\alpha_e = 163^\circ$ dans le domaine des géométries soudables pour la mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0) (cas 2).**

◆ MISE EN PLACE D'UN MONTAGE DE SOUDAGE

La géométrie finale de l'éprouvette à réaliser est maintenant établie, c'est-à-dire que les paramètres α_e , r_e , λ_e , et e_e sont fixés (voir dossier technique, annexe F, p. 6) :

- ✓ $e_e = 5 \text{ mm}$
- ✓ $\lambda_e = 700 \text{ mm}$
- ✓ $r_e = 300 \text{ mm}$
- ✓ $\alpha_e = 120^\circ$
- ✓ mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) (cas 1).

La configuration définie ci-après sera utilisée jusqu'à la fin de la partie I.

Pour réaliser une soudure correcte, les deux plaques en « V » destinées à être assemblées sont positionnées et bridées (maintenues) sur un montage de soudage. La conception de ce montage doit être étudiée pour :

- ✓ mettre en position relative les deux plaques : elles doivent être jointives,
- ✓ maintenir les plaques pendant le soudage avec un système simple, qui peut être mis en œuvre manuellement,
- ✓ compenser les efforts dus à ce procédé (voir description du procédé, pp. 2-3 du questionnaire), en tout point du cordon de soudure, et à chaque instant pendant le soudage.

Question I.6 (voir dossier technique, annexe F)

- **L'expertise d'essais antérieurs conduit à mettre en place un système de bridage exerçant un effort de 10000 N tous les 350 mm sur chaque plaque. Définir le nombre minimal de bridages nécessaires.**

Question I.7 (voir description du procédé et dossier technique, annexe F)

- **Esquisser un montage de soudage permettant la réalisation de l'éprouvette souhaitée en respectant les trois contraintes précédemment citées. Compléter pour cela les vues de face, de dessus et de droite données dans le cahier de réponse RI.7.**

Question I.8

- **Sans aucun calcul et donc par analyse technologique, indiquer si le montage proposé en réponse à la question I.7 est isostatique et les conséquences éventuelles sur la mise en position de l'éprouvette.**

◆ ETUDE D'UN SYSTEME DE BRIDAGE DES TOLES

Afin de réaliser un nombre significatif d'essais, le système de bridage retenu est basé sur le principe d'une genouillère actionnée par un vérin (voir dossier technique, annexe G, pp. 10-11). L'effort de serrage de la tôle est maximal lorsque les points A_b , B_b et C_b sont alignés, position d'équilibre instable du système. Lorsque cette position d'équilibre est franchie, l'effort exercé par la tôle sur la touche suffit à maintenir le système en position verrouillée (contact entre la poignée et le socle en F_b). Le système est irréversible, c'est-à-dire que dans la position verrouillée, un effort sur la touche ne peut en aucun cas ouvrir la pince ; seule une action du vérin le permet. La géométrie du système de bridage permet d'établir l'évolution de l'effort dans le vérin. Cet effort est maximal avant que les points A_b , B_b et C_b ne soient alignés et il devient nul lorsque la position d'équilibre est atteinte.

Pour cette étude, les liaisons sont considérées parfaites et les frottements sont négligés devant les efforts mis en jeu.

Question I.9 (voir dossier technique, annexe G)

- **L'évolution des paramètres géométriques du système de bridage à vide, c'est-à-dire sans présence de tôle, montre que la pince s'ouvre légèrement après le passage de la position d'équilibre (voir dossier technique, annexe G, p. 11). Expliquer pourquoi cette ouverture de la pince n'empêche pas le serrage de la tôle sur le montage de soudage.**

Sur le cahier de réponses R I.10, le système de bridage est représenté dans la position où la course du vérin est égale à 34 mm. L'origine de la course est identique à celle utilisée pour les graphes présentés dans le dossier technique (annexe G, p. 11).

Question I.10 (voir dossier technique, annexe G)

- **Pour la configuration représentée sur le cahier de réponses R I.10 :**
 - ✓ **Déterminer la valeur numérique de l'effort de la tôle sur la touche.**
 - ✓ **Par une méthode graphique, déterminer l'effort que le vérin doit exercer pour effectuer le bridage de la tôle sur le montage de soudage.**
 - ✓ **Evaluer l'erreur commise entre la résolution graphique et la valeur théorique associée donnée par les graphes du dossier technique (annexe G, p. 11). Commenter ce résultat.**

◆ ETUDE DE LA SECURITE DE LA MACHINE DE SOUDAGE « FSW »

La machine de soudage « FSW » est entourée de barrières immatérielles à 3 faisceaux afin d'assurer la sécurité des personnes. La description du fonctionnement de ce système de sécurité est donnée dans le dossier technique (annexe J, pp. 16-17). Compte tenu de la grande périphérie de la machine, plusieurs barrières de ce type sont nécessaires. Seule une barrière est étudiée ici.

La gestion de la sécurité de la machine de soudage « FSW » peut être décrite par plusieurs grafctet :

- ✓ un grafctet « état de réception » à deux étapes pour chaque faisceau de la barrière immatérielle. L'étape i01 indique une « bonne réception du faisceau », tandis que l'étape i00 indique une « non réception du faisceau », où $i \in \{1,2,3\}$ repère le faisceau géré,
- ✓ un grafctet de coordination de la sécurité, partiellement fourni dans le cahier de réponses R I.13.

Il est rappelé que par convention, la variable interne liée à l'état de l'étape j est notée Xj.

Dans un premier temps, on souhaite que l'arrêt de la machine soit déclenché dès qu'un faisceau infrarouge de la barrière immatérielle est coupé. Le sélecteur de sensibilité n'est pas pris en compte ici ; il est ignoré pour les questions I.11 à I.13.

Question I.11 (voir dossier technique, annexe J)

- **Proposer un grafcet « état de réception » pour la gestion du faisceau 1. Veiller à bien préciser les réceptivités associées aux transitions en utilisant le codage du dossier technique (annexe J, pp.16-17).**

Question I.12 (voir dossier technique, annexe J)

- **Compléter l'équation booléenne qui doit déclencher la mise en sécurité de la machine de soudage « FSW » en fonction des variables internes des grafcet « état de réception » de chaque faisceau.**

Question I.13 (voir dossier technique, annexe J)

- **A partir du dossier technique (annexe J, pp.16-17), reporter les commentaires ci-dessous dans les emplacements grisés du grafcet « coordination de la sécurité » pour aider à sa compréhension :**
 - ✓ « Mise en sécurité du système »
 - ✓ « Soudage autorisé »
 - ✓ « Défaut de la barrière immatérielle. Vérification nécessaire »
 - ✓ « Déplacements autorisés à vitesses limitées sans souder »
 - ✓ « Mise en service de la barrière immatérielle »
- **Compléter les actions associées aux étapes 0, 2, 4, 5 et 6 en indiquant le voyant du signal tricolore qui doit être allumé.**
- **Compléter les réceptivités associées aux transitions 4, 6, 8 et 9 en utilisant le codage défini dans le dossier technique (annexe J, pp.16-17).**

Dans un second temps, on souhaite pouvoir régler la sensibilité de détection d'un objet traversant la barrière immatérielle à l'aide d'un sélecteur à deux positions :

- ✓ Dans la position **sel₁** du sélecteur, on souhaite que l'arrêt de la machine soit déclenché dès qu'au moins un faisceau infrarouge de la barrière immatérielle est coupé.
- ✓ Dans la position **sel₂** du sélecteur, on souhaite que l'arrêt de la machine soit déclenché dès qu'au moins 2 faisceaux infrarouges de la barrière immatérielle sont coupés :
 - soit simultanément
 - soit quand un deuxième faisceau est coupé moins d'une seconde après la coupure d'un premier faisceau.

Question I.14 (voir dossier technique, annexe J)

- **Modifier le grafcet « état de réception » de la gestion du faisceau 1 établi à la question I.11 pour qu'il réponde au nouveau cahier des charges.**
- **Compléter l'équation booléenne la plus réduite possible qui doit déclencher la mise en sécurité de la machine selon le nouveau cahier des charges.**

◆ PILOTAGE DE LA MACHINE POUR LE SOUDAGE D'UNE EPROUVETTE

Cette partie du sujet s'intéresse à la préparation de la programmation en position et en vitesse de la machine pour souder l'éprouvette en « V ». On rappelle la géométrie finale de l'éprouvette à réaliser (voir paramétrage dans le dossier technique, annexe F, p. 6) :

- ✓ $e_e = 5 \text{ mm}$
- ✓ $\lambda_e = 700 \text{ mm}$
- ✓ $r_e = 300 \text{ mm}$
- ✓ $\alpha_e = 120^\circ$
- ✓ mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan (\vec{x}_0, \vec{z}_0) (cas 1).

Il est précisé ici que :

- ✓ pour faciliter la programmation (utilisation de la symétrie), un décalage d'origine de la machine a été effectué : le centre du repère de programmation O_P est positionné au centre de l'arc de cercle de rayon r_e .
- ✓ dans la mesure du possible, le cordon de soudure doit être réalisé à la vitesse constante de 400 mm/min (vitesse linéaire du point O_6 au niveau du cordon de soudure). En cas d'impossibilité, comme en phase du début et de la fin du cordon, les accélérations et décélérations constantes sont autorisées sur une distance de cordon de 40 mm.
- ✓ l'axe principal du pion de soudage doit rester orthogonal à la surface sur laquelle le cordon de soudure est réalisé.
- ✓ la longueur O_5O_6 est considérée constante (voir dossier technique, annexe B, p. 3) : le pilotage des déplacements s'effectue sur le portique et le chariot, la liaison pivot glissant entre la tête de soudage S_5 et le pion de soudage S_6 ne sert qu'à asservir l'effort de pression verticale sur les tôles.

Question I.15

- **Déterminer les temps nécessaires aux phases d'accélération et de décélération pour passer de la vitesse de 400 mm/min à la vitesse nulle sur une longueur de cordon de 40 mm.**

Dans le cahier de réponses R I.16, l'éprouvette à réaliser est représentée à l'échelle 1/8.

Question I.16 (voir dossier technique, annexe B et F)

- **Définir la trajectoire du point O_5 lors du soudage de l'éprouvette. Préciser les points C'_e et E'_e passage du point O_5 lorsque le point générateur du cordon de soudure O_6 est respectivement en C_e et E_e .**
- **En déduire s'il est possible de réaliser le cordon de soudure à vitesse constante. Justifier la réponse.**

Question I.17 (voir dossier technique, annexe B et F)

- **Compléter le chronogramme de la vitesse linéaire $\|V_{O_6 \in S_6 / R_0}\|$ de la réalisation du cordon de soudure entre les points B_e et F_e .**

Question I.18 (voir dossier technique, annexe B et F)

- **Compléter le chronogramme de la position z en altitude du point O_5 qui sera utilisée pour piloter le déplacement suivant l'axe \vec{z}_0 de la machine de soudage « FSW ». Précisez pour chaque domaine le type de loi (sinusoïdal, parabolique, linéaire, ...) qui régit le tracé.**

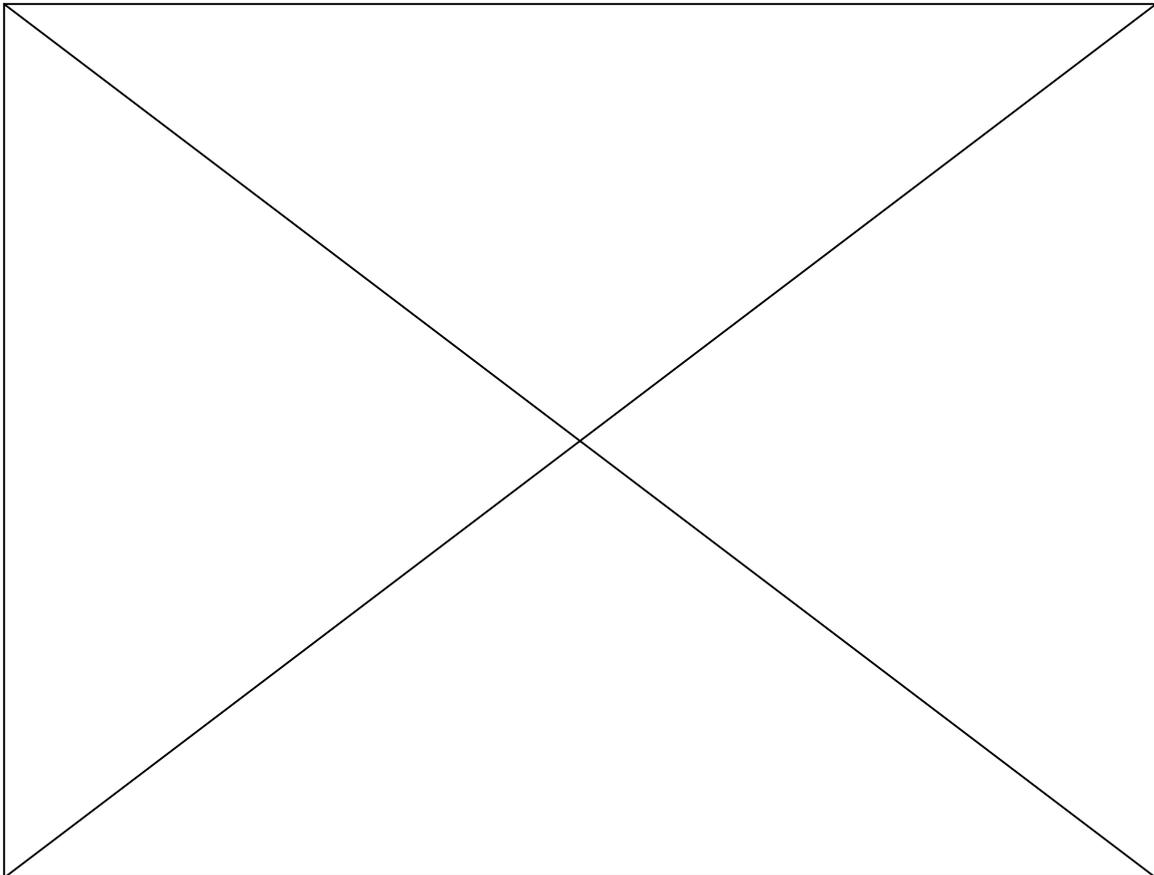
Les conventions suivantes sont adoptées :

- ✓ $\overrightarrow{Vz_{O_5 \in S_5 / R_0}}$ est la vitesse du point O_5 par rapport au repère R_0 en projection sur l'axe \vec{z}_0 .
- ✓ $\|\overrightarrow{Vz_{O_5 \in S_5 / R_0}}\| > 0$ lorsque le point O_5 se déplace dans le sens des coordonnées z croissantes.
- ✓ $\|\overrightarrow{Vz_{O_5 \in S_5 / R_0}}\| < 0$ lorsque le point O_5 se déplace dans le sens des coordonnées z décroissantes.

Question I.19 (voir dossier technique, annexe B et F)

- **Compléter le chronogramme de la vitesse $\overrightarrow{Vz_{O_5 \in S_5 / R_0}}$ qui devra être programmé pour réaliser le cordon de soudure. Précisez pour chaque domaine le type de loi (sinusoïdal, parabolique, linéaire, ...) qui régit le tracé.**

----- Fin de la partie I -----



PARTIE II

Réalisation d'un cordon de soudure linéaire sur l'axe (O_0, \vec{y}_0) de la machine de soudage « FSW »

Une présentation de la machine de soudage « FSW » et un schéma cinématique simplifié sont donnés dans le dossier technique (annexes A, B et C, pp. 2-3). Les montants S_1 - S_1' et la traverse S_2 constituent un portique Σ_{12} qui peut se déplacer en translation suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) grâce à la liaison glissière entre les montants S_1 - S_1' et la plateforme S_0 . Le guidage est assuré par des galets qui roulent sur des règles au profil en « queue d'aronde ». Le déplacement du portique est quant à lui assuré par deux liaisons pignon-crémaillère, chaque pignon étant entraîné par un motoréducteur hydraulique (voir dossier technique, annexes D et E, pp. 4-5).

Cette partie est consacrée à l'évaluation des performances de la machine de soudage « FSW » pour réaliser un cordon linéaire sur l'axe (O_0, \vec{y}_0) . Seront étudiés :

- ✓ les courbes des paramètres relevés au cours d'un essai de soudage,
- ✓ le dimensionnement d'un moteur d'entraînement pour répondre au cahier des charges en régime permanent,
- ✓ la synchronisation des moteurs d'entraînement,
- ✓ le comportement d'un moteur d'entraînement en phase de démarrage,
- ✓ la maîtrise de l'effort de pression verticale pour garantir un cordon de qualité.

Pour ces différentes études de la partie II, tous les autres axes sont figés :

$$l_x = \text{cte}, l_z = \text{cte}, \psi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$$

◆ ETUDE DE RELEVÉS DE VITESSES ET D'EFFORTS LORS D'UN SOUDAGE

Un essai de soudage par friction malaxage a été réalisé suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) pour certaines conditions opératoires. Le cordon de soudure est réalisé dans la configuration où la tête est au milieu du portique. Ainsi les moteurs d'entraînement du portique à droite et à gauche développent la même puissance. Les courbes de vitesses, de couple, et d'efforts de cet essai, relevés à l'aide de capteurs situés dans la tête de soudage S_5 et la chape d'orientation S_4 , sont données dans le dossier technique (annexe H, pp. 12-13).

Question II.1 (voir dossier technique, annexe H)

- Expliquer d'où proviennent les oscillations de fréquence élevée qui existent sur les différentes courbes.

Question II.2 (voir dossier technique, annexe H)

- A l'aide de la description du procédé de soudage par friction – malaxage (pp. 2-3 du questionnaire) et du dossier technique (annexe H, p.12), expliquer les différentes phases du processus de soudage. Pour cela, remplir le tableau du cahier de réponses selon le modèle donné en précisant pour chaque phase :
 - ✓ les dates des temps de début et de fin
 - ✓ l'action effectuée par la machine de soudage « FSW »
 - ✓ une explication de l'évolution de l'effort vertical de pression, en précisant les phénomènes physiques mis en jeu.

Question II.3 (voir dossier technique, annexe H)

- Relever les valeurs des différentes consignes visées en régime permanent pour cet essai. Préciser les unités pour chaque valeur.

Question II.4 (voir dossier technique, annexe H)

- En régime permanent, estimer la puissance mécanique nécessaire lors de cet essai pour :
 - ✓ déplacer le portique suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) ,
 - ✓ malaxer la matière afin de réaliser le cordon de soudure.

◆ DIMENSIONNEMENT D'UN MOTEUR D'ENTRAÎNEMENT EN RÉGIME PERMANENT

L'essai précédent n'étant qu'un exemple, il est maintenant proposé de dimensionner un moteur d'entraînement selon le cahier des charges. Le schéma technologique détaillé d'un motoréducteur d'entraînement du portique suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) est donné dans le dossier technique (annexes D et E, pp. 4-5). Les caractéristiques nécessaires (paramètres des engrenages et rendements) y sont précisées.

Le cahier des charges concernant les déplacements suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) impose :

- ✓ une vitesse maximale de $\left| \overrightarrow{V_{O_1 \in S_1 / S_0}} \cdot \vec{y}_0 \right| = 5 \text{ m/min}$.
- ✓ en régime permanent à la vitesse maximale, la machine de soudage « FSW » doit vaincre les efforts résistants au mouvement d'avance $F_{\text{rav}} = \left| \overrightarrow{F_{\text{tôles} \rightarrow \text{pion}}} \cdot \vec{y}_0 \right|$ jusqu'à 4000 N.

On supposera, pour les questions II.5 à II.9, que les deux systèmes d'entraînement symétriques du portique se répartissent l'effort résistant à parts égales.

Question II.5 (voir dossier technique, annexe D)

- Exprimer la condition de roulement sans glissement en I entre S_0 et S_{12} .
- En déduire la relation entre la vitesse de translation du portique $\overrightarrow{V_{O_1 \in S_1 / S_0}}$ et la vitesse de rotation de l'arbre S_{12} ($\overrightarrow{\Omega_{S_{12} / S_1}}$) en fonction de m et z_{13} .
- En déduire la relation entre la vitesse de translation du portique $\overrightarrow{V_{O_1 \in S_1 / S_0}}$ et la vitesse de rotation du moteur ($\overrightarrow{\Omega_{S_{11} / S_1}}$) en fonction de m , z_{11} , z_{12} et z_{13} .

Question II.6 (voir dossier technique, annexe D)

- Déterminer la vitesse maximale de l'arbre d'un moteur hydraulique $\left\| \overrightarrow{\Omega_{S_{11} / S_1}} \right\|$ en tours par minute (tr/min) pour que le portique puisse atteindre la vitesse maximale imposée par le cahier des charges.
- Sachant que la cylindrée du moteur est $C_y = 125 \text{ cm}^3/\text{tr}$, et en supposant que le rendement volumétrique du moteur est égal à 1, calculer le débit d'alimentation « q » en litres par minute (L/min) d'un moteur hydraulique pour que le portique puisse atteindre sa vitesse maximale.

Question II.7 (voir dossier technique, annexe D)

- Exprimer la relation du moment du couple mécanique nécessaire sur l'arbre d'un moteur hydraulique d'entraînement pour vaincre les efforts résistants au mouvement d'avance ($F_{rav} = \left| \overrightarrow{F_{tôles \rightarrow pion}} \cdot \overrightarrow{y_0} \right|$) en régime permanent.
- Effectuer l'application numérique dans les conditions maximales imposées par le cahier des charges (voir page précédente).

Question II.8 (voir dossier technique, annexes D et H)

- Sachant que les moteurs hydrauliques d'entraînement satisfont simultanément aux conditions extrêmes imposées par le cahier des charges en régime permanent (voir page précédente), déterminer la puissance mécanique disponible sur l'arbre de chaque moteur en régime permanent.
- Vérifier que la puissance disponible ainsi déterminée est compatible avec la puissance nécessaire à la réalisation de l'essai expérimental mené pour les questions II.1 à II.4.

Question II.9 (voir dossier technique, annexe D)

- Sachant que les moteurs hydrauliques d'entraînement satisfont simultanément aux conditions extrêmes imposées par le cahier des charges en régime permanent (voir page précédente), calculer la puissance hydraulique de chaque moteur en régime permanent.
- En déduire la pression d'alimentation en mégapascals (MPa) des moteurs hydrauliques pour respecter le cahier des charges en régime permanent.

◆ **ETUDE DE LA SYNCHRONISATION DES MOTEURS D'ENTRAÎNEMENT**

Pour éviter l'arc-boutement entre le portique et la plateforme sur les guidages en translation, les moteurs hydrauliques de gauche et de droite sont asservis en position relative. Le portique est, quant à lui, asservi en vitesse et en position pour la réalisation des cordons de soudure. Pour cela, chaque moteur est équipé d'un codeur incrémental de 3600 points par tour. Après une prise d'origine des deux codeurs non étudiée ici, les codeurs incrémentaux permettent de relever les positions Y_g et Y_d en temps réel. L'asservissement en vitesse ne sera pas étudié ici.

Question II.10

- Expliquez simplement l'arc-boutement, et indiquer les effets de ce phénomène. Donner un exemple de mécanisme qui fonctionne grâce à l'arc-boutement.

Le schéma bloc de l'asservissement en position sur l'axe $(O_0, \overline{y_0})$ est présenté et commenté dans le dossier technique (annexe K, p. 18). Par convention, on note $F(p)$ la transformée de Laplace de $f(t)$.

Question II.11 (voir dossier technique, annexes D et K)

- Etablir l'équation temporelle qui relie $\omega_g(t)$ à $\delta_g(t)$ - ou $\omega_d(t)$ à $\delta_d(t)$ - et expliciter la fonction de transfert $G(p)$.
- A l'aide de la question II.5, déterminer la constante T en fonction de m, z_{11} , z_{12} , et z_{13} . Préciser son unité.
- Sachant que le codeur incrémental dispose de 3600 points par tour, déterminer la constante K_c . Préciser son unité.

Question II.12 (voir dossier technique, annexe K)

- Exprimer $\varepsilon'_g(p)$ et $\varepsilon'_d(p)$ en fonction de $\Delta_g(p)$, $\Delta_d(p)$, $C(p)$, K_c , Y_c , et T.
- Exprimer $\Delta_g(p)$ et $\Delta_d(p)$ en fonction de $\varepsilon'_g(p)$, $\varepsilon'_d(p)$, $V(p)$, $G(p)$, et C_y .

$$\text{On pose } M(p) = \frac{C_y}{V(p) \cdot G(p)} + K_c \cdot C(p) + \frac{1}{2} K_c$$

- A partir des relations précédentes, exprimer le système de 2 équations liant $\Delta_g(p)$ et $\Delta_d(p)$ à $C(p)$, $M(p)$, K_c , T, et Y_c .
- Exprimer les fonctions de transfert $H_d(p) = \frac{Y_d(p)}{Y_c(p)}$ et $H_g(p) = \frac{Y_g(p)}{Y_c(p)}$ en fonction de $C(p)$, $V(p)$, $G(p)$, C_y et K_c .
- En déduire les fonctions de transfert $H_d(p)$ et $H_g(p)$ en fonction de $C(p)$, K_c , C_y , τ , et p.

Le cahier des charges du constructeur de la machine de soudage « FSW » impose une erreur statique (écart stationnaire entre la valeur réelle et la consigne de type échelon) et une erreur de trainage (écart stationnaire entre la valeur réelle et la consigne de type rampe) nulles au niveau du point générateur du cordon de soudage (O_6). L'échelon de consigne imposé a pour valeur $y_c(t) = b$ et la rampe de consigne imposée a pour équation $y_c(t) = a \cdot t$

Question II.13 (voir dossier technique, annexe D)

- Compte tenu du cahier des charges, l'emplacement du codeur incrémental est-il judicieux ? Justifier la réponse. Dans le cas d'une réponse négative, proposer une solution alternative.

Question II.14 (voir dossier technique, annexe K)

- Exprimer l'erreur statique ε_s en fonction de $C(p)$, K_c , C_y , τ , b et p.
- Exprimer l'erreur de trainage ε_t en fonction de $C(p)$, K_c , C_y , τ , a et p.

Question II.15 (voir dossier technique, annexe K)

- De quel type doit être le correcteur pour répondre au cahier des charges. Justifier votre réponse. Donner la forme générale de la fonction de transfert $C(p)$ de ce correcteur.

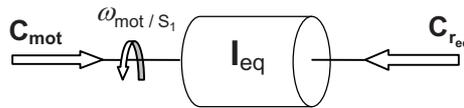
◆ ETUDE D'UN MOTEUR D'ENTRAÎNEMENT EN PHASE DE DEMARRAGE

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier la capacité des moteurs hydrauliques d'entraînement pour réaliser des essais avec de fortes accélérations en début de soudage. Les cordons de soudure sont à réaliser suivant l'axe (O_0, \vec{y}_0) dans des conditions similaires à l'essai réalisé pour les questions II.1 à II.4.

Dans la phase transitoire en début de cordon, l'accélération programmée pour atteindre la vitesse de déplacement donnée en consigne (régime permanent) est constante. Dans une phase de pré-dimensionnement, on peut faire l'approximation grossière que l'effort résistant au mouvement d'avance croît linéairement, jusqu'à un seuil qui dépend de la nature des matériaux et de la vitesse d'avance du portique. Les conditions opératoires souhaitées et estimées sont définies dans le dossier technique (annexe I, p. 14).

Les notations adoptées sont celles définies dans le dossier technique (annexes D et E, pp. 4 et 5). On supposera, pour les questions II.16 à II.23, que les deux systèmes d'entraînement symétriques du portique se répartissent l'effort résistant à parts égales et que les rendements sont constants pendant la phase d'accélération.

Afin de réaliser cette étude, on propose de définir un système équivalent à l'ensemble réducteur, portique, et tête de soudage ramené sur l'arbre moteur. Il s'exerce sur ce système équivalent, d'une inertie équivalente I_{eq} , le couple moteur C_{mot} et un couple résistant équivalent C_{req} ramenés sur l'arbre moteur. Le système équivalent peut être schématisé par la figure suivante :



Question II.16

- **Exprimer, en phase d'accélération, la relation liant C_{mot} , C_{req} , I_{eq} et ω_{mot/S_1} . Nommer le (ou les) théorème(s) utilisé(s).**

Question II.17 (voir dossier technique, annexe I)

- **A l'aide de la question II.5 et du dossier technique (annexe I, p. 14), déterminer l'accélération angulaire du moteur $\gamma = \frac{d\omega_{mot/S_1}}{dt}$ en radians par seconde (rad/s) pendant la phase transitoire de démarrage pour réaliser l'essai souhaité. Donner sa valeur numérique.**

La question II.18 propose une démarche pour établir le modèle équivalent par identification. Il est rappelé qu'on supposera que le portique est entraîné par deux systèmes symétriques qui se répartissent les efforts à parts égales et que les rendements sont constants pendant la phase d'accélération.

Question II.18 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- **Exprimer la relation liant l'effort d'entraînement du portique de la machine de soudage « FSW » $F_{em} = \left| \overrightarrow{F_{ext \rightarrow \Sigma_{12}}} \cdot \vec{y}_0 \right|$ à l'effort résistant au mouvement d'avance exercé par les tôles sur le pion $F_{rav} = \left| \overrightarrow{F_{tôles \rightarrow pion}} \cdot \vec{y}_0 \right|$ en fonction de γ , m , z_{11} , z_{12} , z_{13} et des différents paramètres inertiels et de masses. Nommer le (ou les) théorème(s) utilisé(s).**

Question II.18 (suite)

- Exprimer la relation liant le moment du couple d'entraînement de l'arbre intermédiaire S_{12} $C_{eS_{12}} = \left| \overrightarrow{C_{S_{11} \rightarrow S_{12}}^{A_{12}}} \cdot \vec{z}_0 \right|$ au moment du couple résistant dû aux efforts de la crémaillère sur le pignon $C_{rc} = \left| \overrightarrow{C_{S_0 \rightarrow S_{12}}^{A_{13}}} \cdot \vec{z}_0 \right|$ en fonction de γ , z_{11} , z_{12} et des différents paramètres inertiels et de masses. Nommer le (ou les) théorème(s) utilisé(s).
- Exprimer la relation liant le moment du couple d'entraînement de l'arbre moteur S_{11} $C_{mot} = \left| \overrightarrow{C_{ext \rightarrow S_{11}}^{A_{11}}} \cdot \vec{z}_0 \right|$ au moment du couple résistant dû à l'arbre intermédiaire $C_{rS_{12}} = \left| \overrightarrow{C_{S_{12} \rightarrow S_{11}}^{A_{11}}} \cdot \vec{z}_0 \right|$ en fonction de γ et des différents paramètres inertiels et de masses.
- A partir d'un bilan de puissance, déterminer la relation entre η_{eng} , $C_{rS_{12}}$, $C_{eS_{12}}$, z_{11} et z_{12} . Le rendement η_{eng} est supposé constant pendant la phase d'accélération.
- A partir d'un bilan de puissance, déterminer la relation entre η_{pc} , F_{em} , C_{rc} , m , et z_{13} . Il est rappelé que le portique est entraîné par 2 motoréducteurs qui se partagent la charge à parts égales et que le rendement η_{pc} est supposé constant pendant la phase d'accélération.
- A partir des 5 relations établies précédemment, exprimer la relation entre C_{mot} , F_{rav} et γ en fonction de η_{pc} , η_{eng} , m , z_{11} , z_{12} , z_{13} et des différents paramètres inertiels et de masses de la machine de soudage « FSW ». La relation devra posséder un arrangement semblable à la relation trouvée à la question II.16.

Question II.19 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- Par identification du résultat précédent au résultat de la question II.16, exprimer :
 - ✓ le moment du couple résistant équivalent C_{req} ramené sur l'arbre moteur
 - ✓ l'inertie équivalente I_{eq} ramenée sur l'arbre moteuren fonction de F_{rav} , η_{pc} , η_{eng} , m , z_{11} , z_{12} , z_{13} et des différents paramètres inertiels et de masses de la machine de soudage « FSW ».

Question II.20 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- Evaluer numériquement l'inertie équivalente I_{eq} ramenée sur l'arbre moteur. Indiquer son unité.
- Que peut-on dire de C_{11} et C_{12} ?

Question II.21 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- Exprimer la relation entre le moment du couple résistant équivalent C_{req} ramené sur l'arbre moteur et le temps t en fonction des différentes valeurs numériques fournies dans le dossier technique (annexes D, E et I, pp. 4-5, 16) pour réaliser un essai avec de fortes accélérations en début de soudage.

Question II.22 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- **Evaluer le moment du couple d'un moteur hydraulique d'entraînement en régime permanent pour réaliser le cordon de soudure dans les conditions définies dans le dossier technique (annexe I, p. 16).**

Le moment du couple moteur délivré par les moteurs hydrauliques d'entraînement est au maximum de 30 Nm.

Question II.23 (voir dossier technique, annexes D, E et I)

- **Compléter le chronogramme du moment du couple d'un moteur d'entraînement C_{mot} pour réaliser l'essai voulu (annexe I, p. 16).**
- **Les moteurs d'entraînement sont-ils suffisamment dimensionnés pour réaliser l'essai voulu ? Justifier la réponse.**

◆ MAITRISE DE L'EFFORT DE PRESSION VERTICALE

Afin de réaliser un cordon de soudure de qualité, il faut réguler précisément la vitesse de rotation du pion et l'effort de pression verticale. Tous les actionneurs sont hydrauliques. Un schéma simplifié de la tête de soudage est fourni dans le cahier de réponses R II.24.

L'effort de pression verticale est exercé par un vérin différentiel. Le principe de ce type de vérin, ses caractéristiques principales ainsi que le schéma bloc de l'asservissement en pression du vérin sont donnés dans le dossier technique (annexe L, p. 19).

L'objectif de cette sous-partie est de vérifier la stabilité de l'asservissement en pression.

Question II.24 (voir dossier technique, annexe L)

- **Colorier en rouge le fluide hydraulique contenu dans le circuit d'alimentation et la chambre, pour la chambre cylindrique (*chambre 1*) du vérin.**
- **Colorier en vert le fluide hydraulique contenu dans le circuit d'alimentation et la chambre, pour la chambre annulaire (*chambre 2*) du vérin.**
- **A partir du schéma fourni dans le cahier de réponses R II.24, expliquer brièvement comment un effort de pression verticale du pion de soudage sur les tôles peut être exercé pendant que ce même pion est entraîné en rotation.**

Question II.25 (voir dossier technique, annexe L)

- **Compte-tenu du principe du montage différentiel du vérin, et des caractéristiques géométriques du vérin fournies dans le dossier technique (annexe L, p. 19), déterminer la pression de consigne p_c en Pascal (Pa) pour que le pion exerce un effort de pression verticale sur les tôles de**

$$F_{pv} = \left| \vec{F}_{\text{tôles} \rightarrow \text{pion}} \cdot \vec{z}_0 \right| = 12\,000 \text{ N} \text{ lorsque le vérin est dans sa position d'équilibre.}$$

Question II.26

- **Justifier l'utilisation de la technologie hydraulique par rapport aux autres technologies (électrique, pneumatique) pour la machine de soudage « FSW ».**

Question II.27 (voir dossier technique, annexe L)

- Exprimer numériquement la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement en pression : $H(p) = \frac{U_{\text{cap}}(p)}{p_c(p)}$.

Question II.28 (voir dossier technique, annexe L)

- Donner l'expression $G_{\text{db}}(\omega)$ du gain en décibels de la fonction de transfert en boucle ouverte en fonction des différentes valeurs numériques.
- Donner l'expression $\varphi(\omega)$ de l'argument de la fonction de transfert en boucle ouverte en fonction des différentes valeurs numériques.
- Tracer le diagramme asymptotique de Bode de la fonction de transfert $H(p)$.

Question II.29 (voir dossier technique, annexe L)

- Evaluer numériquement la marge de gain et la marge de phase de la fonction de transfert. Vérifier la cohérence du résultat sur le diagramme de Bode.
- Conclure quant à la stabilité du système en boucle fermée et proposer une solution si celui-ci est instable.

----- Fin de la partie II -----

