

SESSION 2023

**AGRÉGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

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

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

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.

Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire

Tournez la page S.V.P.

A

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.

| Concours | Section/option | Epreuve | Matière |
|----------|----------------|---------|---------|
| EAE | 1414A | 103 | 1268 |

SOMMAIRE

| | |
|--------------------|-----------|
| Questionnement | p.1 à 20 |
| Annexes | p.21 à 32 |
| Documents réponses | p.33 à 37 |

CELLULE SEMI-AUTOMATISÉE DE SOUDAGE

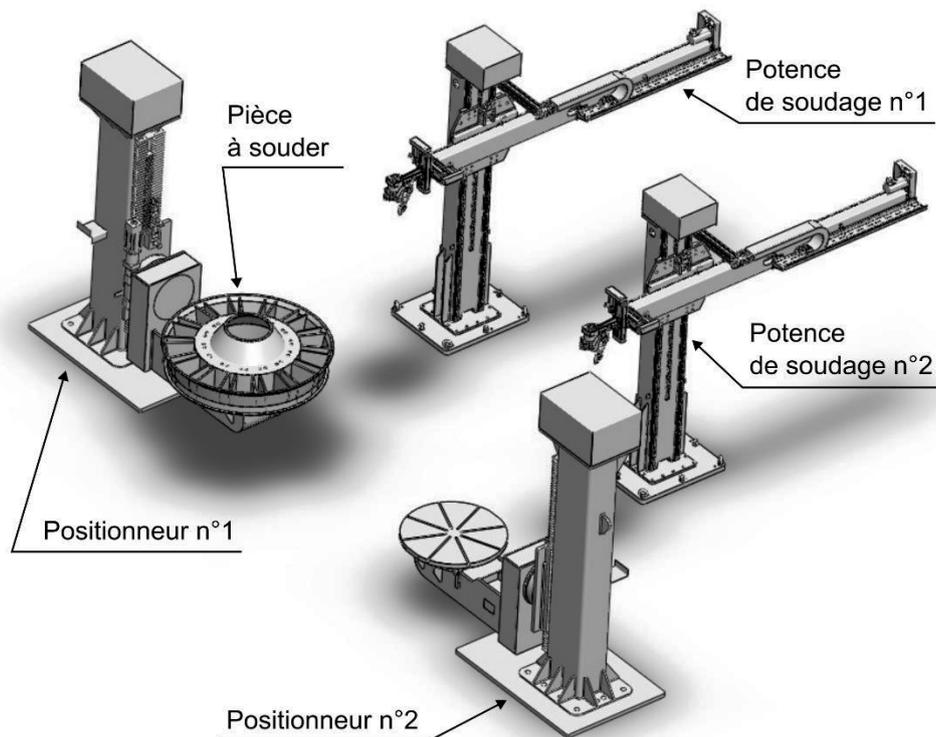


Figure 1 : cellule semi-automatisée de soudage comportant deux postes de travail, chaque poste étant composé d'un positionneur et d'une potence de soudage automatisée

Ce sujet porte sur le développement d'une nouvelle cellule semi-automatisée de soudage TIG et plasma (torche interchangeable) capable de souder des pièces aéronautiques (tubulures de moteur d'avion) en alliages de titane ou en inconel. Cette cellule est l'aboutissement d'un rétrofit (processus d'adaptation d'une machine existante).

Elle est composée de deux postes de soudage comprenant chacun un « positionneur », supportant la pièce à souder et son support, et une « potence » de soudage.

Les opérations de chargement, de déchargement et de réglage des pièces sur l'outillage sont réalisées sur un poste, en parallèle du deuxième en activité. Le positionneur non utilisé est accessible en mode manuel pendant que l'autre fonctionne en automatique avec la potence associée. Les deux postes de soudage étant identiques, la suite de l'étude portera sur le poste n°1.

Plusieurs soudures sont à réaliser, à différentes étapes du processus de fabrication, sur des pièces pouvant atteindre 2200 mm de diamètre et 2,5 t. La Figure 2 ci-après montre des soudures linéaires de type radial ou de type circulaire.

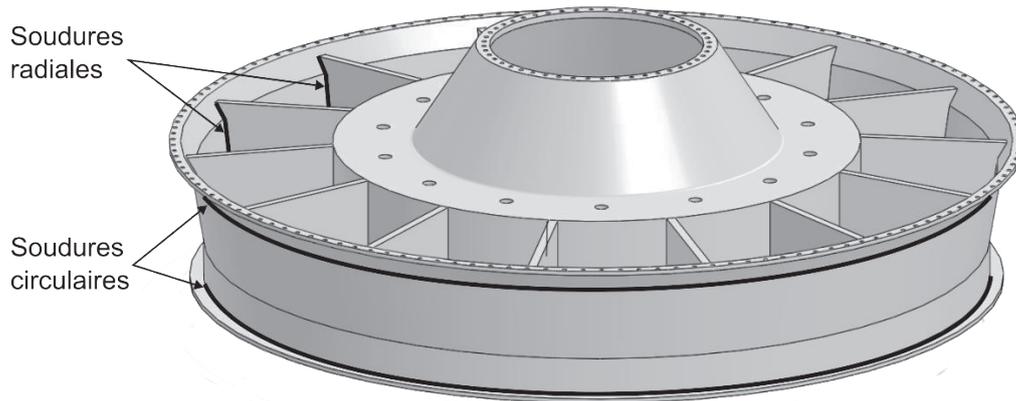


Figure 2 : soudures sur un carter d'échappement

Les deux procédés de soudage utilisés, TIG et plasma, reposent sur le principe de l'élévation de température au point de fusion par l'utilisation d'un arc électrique (Figure 3). C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par le courant qui élève la température au point de soudeur jusqu'à celle requise pour la fusion du métal. Si les deux procédés utilisent une électrode en tungstène non fusible, la différence essentielle se situe au niveau du gaz utilisé qui, lors du soudage plasma, nécessite, en plus du gaz de protection, la projection d'un gaz plasmagène permettant d'obtenir un bain de fusion plus profond. Le procédé de soudage TIG permet de souder des épaisseurs allant de 0,5 à 2,5 mm quand le procédé de soudage plasma permet de souder des épaisseurs de 2 à 12 mm.

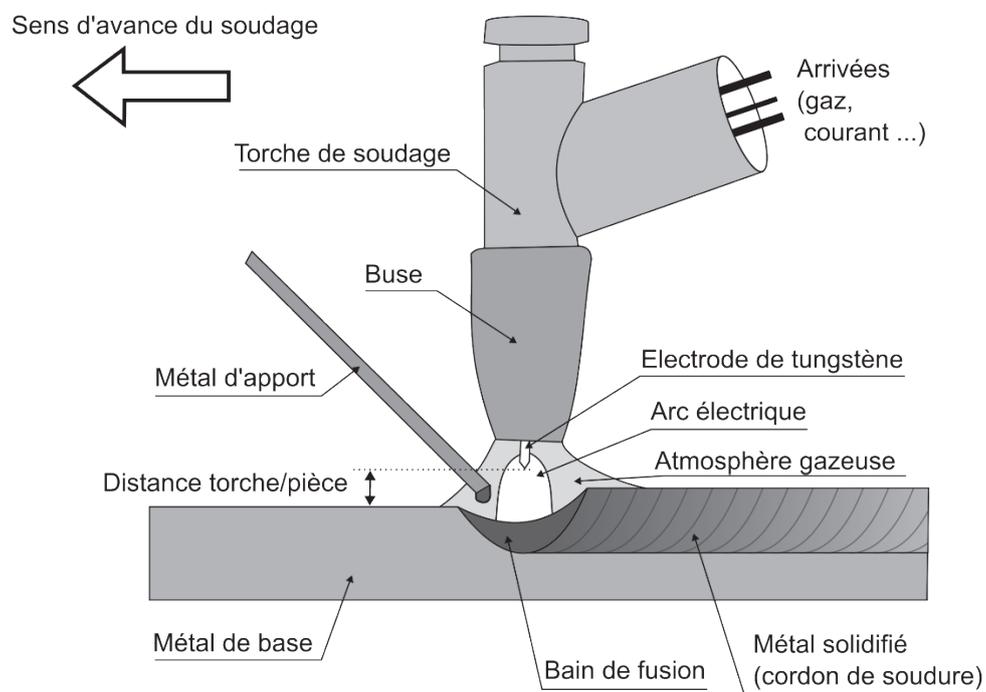


Figure 3 : principe du procédé de soudage à l'arc électrique à électrode non fusible

Les deux contraintes principales liées aux procédés de soudage (TIG ou plasma) concernent :

- l'orientation du bain de fusion qui doit être horizontale, pour éviter tout écoulement de métal liquide avant solidification du métal ;
- l'orientation et la position de la torche de soudage par rapport à la pièce. On définit ainsi les paramètres clés du procédé de soudage :
 - o la distance entre l'extrémité de la torche (pointe de l'électrode) et la pièce avant soudage (Figure 3), qui doit rester dans une plage de $\pm 5\%$ par rapport à la valeur nominale ;
 - o l'orientation de la torche par rapport au cordon de soudure qui est fixée à $90^\circ \pm 5\%$.

Les différentes mobilités qui permettent de répondre à ces contraintes sont référencées sur la Figure 4. Une description plus détaillée est proposée dans les annexes 1 à 9. On notera que, dans la suite, toutes les dimensions sont données en mm.

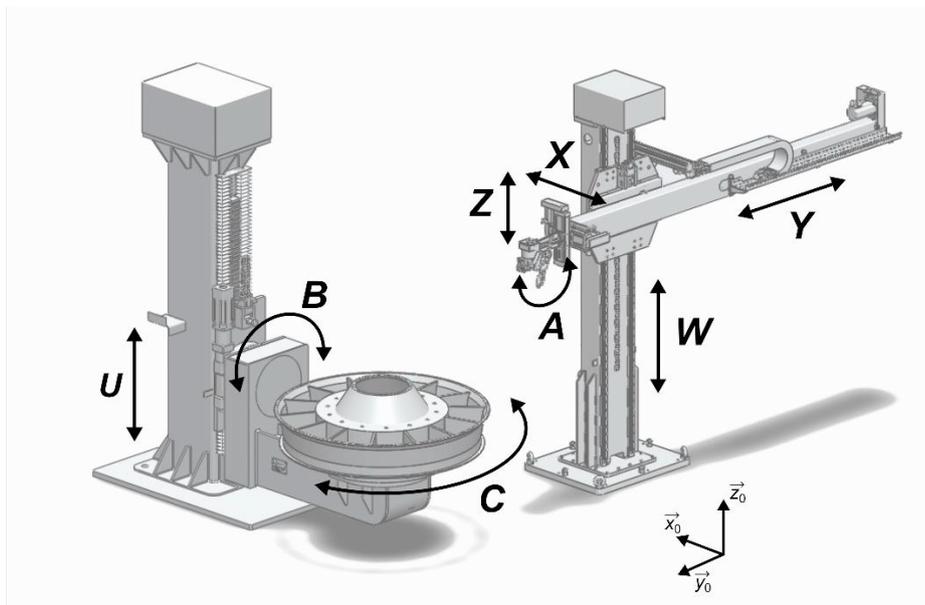


Figure 4 : configuration des axes pilotés du poste de soudage n°1

Les quatre parties composant ce sujet ont pour objectif final la validation de la capacité du système à respecter les paramètres de soudage. Le respect de ces paramètres garantit l'obtention de soudures de qualité.

Chacune des parties vise des objectifs spécifiques :

- la première partie a pour objectif de s'appropriier le processus de soudage ainsi que l'encombrement et les mobilités du système pour conclure sur la possibilité de valider les exigences présentées dans l'Annexe 1 ;
- la deuxième partie concerne l'étude du positionneur, de sa conception à la validation des exigences qui lui sont propres ;
- la troisième partie concerne l'étude de la potence et a pour objectif de vérifier que les solutions technologiques qui la composent permettent de respecter les conditions de soudage ;

- la quatrième partie a pour objectif de valider le processus et le procédé de soudage à partir de l'étude de pièces obtenues.

Les documents réponses DR1 à DR4 sont à rendre avec la copie.

I- Étude globale du système et de l'opération de soudage.

Dans cette partie on se propose de s'approprier le processus de soudage ainsi que l'encombrement et les mobilités du système afin de vérifier leur compatibilité avec les performances attendues.

L'Annexe 1 présente le diagramme des exigences partiel de la cellule semi-automatisée étudiée.

I.1- Processus de soudage

L'objectif de cette partie est de s'approprier le déroulement de l'opération de soudage.

L'opération de soudage prend en compte la mise en place de la pièce relativement à la torche puis le soudage en lui-même.

Pour mener cette opération, certaines étapes sont automatisées, via l'unité de commande numérique. Les autres étapes sont manuelles, l'opérateur déplaçant directement les éléments avec le boîtier de commande manuel de déplacement.

La commande numérique calcule les paramètres de soudage (débit du gaz, vitesse du fil d'apport, intensité...) et envoie les instructions générant l'ensemble des mouvements des axes permettant à la torche de suivre la trajectoire souhaitée.

Un diagramme de processus est donné en Annexe 3. Les étapes sont notées Ei, les conditions sont notées Ci (en bas, à droite ou à gauche, du symbole).

Q1- À partir du diagramme de processus, compléter le tableau du document réponse DR1 pour expliquer succinctement le déroulement de l'opération de soudage. Les deux premières lignes sont déjà renseignées. Préciser par une croix, dans la colonne associée et pour chaque étape, si le pupitre de commande numérique (Num) et/ou le boîtier de commande manuelle (Man) sont utilisés. Préciser, s'il y a lieu, l'identifiant de l'exigence impactée par l'étape considérée.

I.2- Sécurité des opérateurs

L'objectif de cette partie est de définir la zone de stockage, de déterminer les limites de la zone de travail autour d'un positionneur, et l'emplacement du capteur de présence pour sécuriser cette zone.

Le poste de soudage comprend une zone de stockage à proximité des positionneurs (zone hachurée sur la Figure 5). Cette zone permet d'accueillir les pièces en attente

de soudage et celles dont l'opération de soudage est terminée. L'espace se trouvant entre la zone de stockage et les positionneurs sert de zone de chargement et de déchargement lorsque le poste n'est pas utilisé. Cet espace doit constituer une zone dégagée et sécurisée lorsque le poste est utilisé. Pour ceci, il a été choisi d'utiliser un marquage au sol pour délimiter la zone de stockage, complété par des barrières immatérielles constituées de deux capteurs de présence pour délimiter cette zone dégagée et sécurisée. Ces deux capteurs couvrent chaque zone de chargement indépendamment l'une de l'autre.

Les capteurs de présence utilisés sont des scrutateurs laser de sécurité (un par poste de soudage). Ils détectent la présence d'objets étrangers (chariot, autres usagers...) au niveau du sol par rayonnement infrarouge, suivant un angle réglable (autour de \vec{z}_0), pouvant être compris entre 0 et 180°, avec une portée réglable pouvant aller jusqu'à 10 m. Le scrutateur doit permettre de respecter l'exigence id 1.3.1 et ne doit pas détecter l'opérateur travaillant entre la potence et le positionneur, le poteau du positionneur (partie fixe), ni la zone du positionneur n°2.

Ainsi l'objectif est de fixer les limites de la zone à sécuriser, comprise dans la zone de chargement représentée par une ligne pointillée sur la Figure 5.

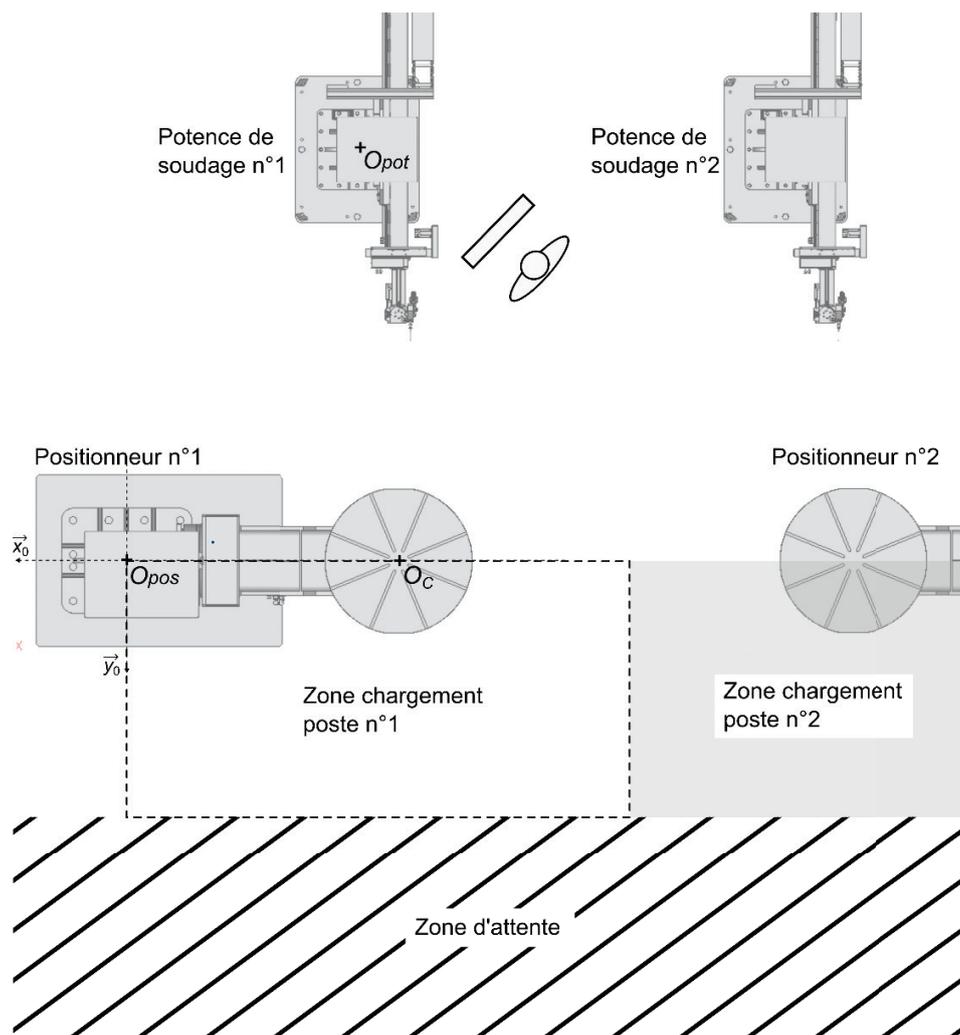


Figure 5 : configuration du poste de soudage

Le paramétrage du poste de soudage est donné dans les Annexes 4 et 5.

Q2- Soit E le point le plus éloigné du plan $(O_{pos}, \vec{x}_0, \vec{z}_0)$ appartenant à l'ensemble {balancier B + plateau C + pièce} dans la configuration la plus encombrante de celui-ci. Réaliser un schéma dans un plan adapté faisant figurer le point E. Exprimer le vecteur position $\overrightarrow{O_B E}$, en fonction des paramètres figurant en Annexes 4 et 5, dans le repère R_B . En déduire son expression dans le repère R_0 .

Q3- Donner l'expression de $\overrightarrow{O_B E} \cdot \vec{y}_0$ et calculer sa valeur maximale. Déterminer les dimensions du rectangle à sécuriser dans la zone de chargement du poste n°1 et les représenter sur le document réponse DR2.

Q4- En déduire la position, l'orientation, l'angle et la portée maximale du scrutateur à installer en représentant la position du scrutateur et son faisceau sur le document réponse DR2.

I.3- Positionnement torche/pièce

L'objectif de cette partie est d'établir la mobilité des effecteurs pour valider l'exigence Id 1.9.3. et de statuer sur le respect de la précision attendue.

Les contraintes principales liées aux procédés de soudage sont l'orientation de la pièce, c'est-à-dire du bain de fusion, et l'orientation et la position de la torche de soudage par rapport à la pièce.

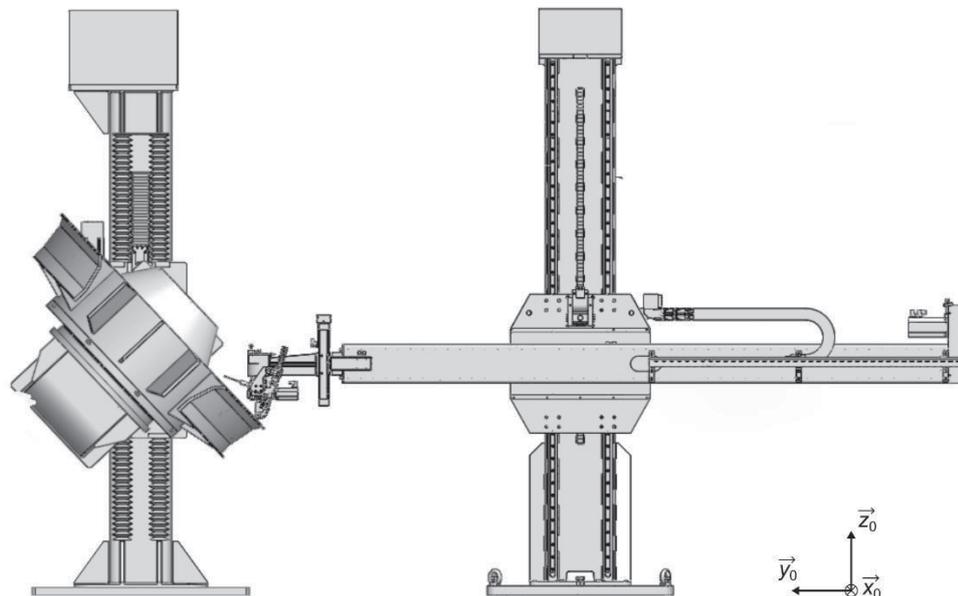


Figure 6 : configuration en mode soudage

Les mobilités présentées précédemment, permettant de répondre à ces contraintes, sont toutes motorisées. Le positionneur comporte trois moteurs de type « brushless » : un pilotant le déplacement linéaire de l'axe U, deux autres pilotant respectivement le déplacement angulaire de l'axe B et de l'axe C.

La potence comporte cinq moteurs brushless, pilotant respectivement les déplacements linéaires des axes X , Y , Z et W , et le déplacement angulaire de l'axe A .

Un capteur angulaire (codeur incrémental) est associé à chaque moteur, permettant d'acquérir la position angulaire des axes moteurs. Les précisions des différents axes, annoncées par le constructeur, sont définies dans la Table 1.

Table 1 : précision des différents axes

| Axe | Précision |
|-----------|-----------|
| U, X, Z | 0,05 mm |
| B | 0,01° |
| C | 0,005° |
| W | 1 mm |
| Y | 0,1 mm |
| A | 0,008° |

La commande numérique permet d'obtenir la trajectoire suivie par la torche (Figure 7).

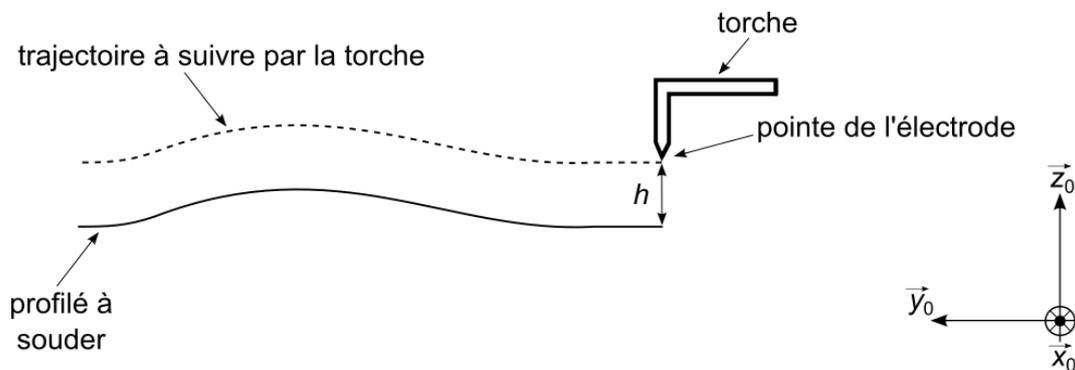


Figure 7 : profil de la soudure dans le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0)

Le diagramme de définition de blocs en Annexe 2 complète cette description.

Q5- À partir des diagrammes SysML (Annexes 1 et 2) et de la description précédente, compléter le document réponse DR3 relatif à la chaîne de puissance et d'information de l'axe Z .

Le schéma cinématique du système se trouve en Annexe 4.

Q6- Tracer le graphe des liaisons du positionneur et le graphe des liaisons de la potence.

Q7- Déterminer les degrés de liberté de l'effecteur du positionneur par rapport au repère R_0 . Déterminer les degrés de liberté de l'effecteur de la potence par rapport au repère R_0 . Conclure quant au respect de l'exigence Id 1.9.3.

Q8- On considère une opération de soudage pour laquelle la distance h entre la pointe de l'électrode et la pièce doit être de 20 mm. À l'aide de la Table 1, déterminer si l'exigence de précision peut être satisfaite. Préciser l'exigence concernée.

Q9- Lister des éléments de l'ensemble {positionneur + potence de soudage + pièce} pouvant altérer la précision de cette cote.

Cette étude a permis d'appréhender le système, de percevoir la multiplicité des éléments à prendre en considération pour obtenir la précision nécessaire à la réalisation d'un soudage de qualité tout en garantissant la sécurité des usagers de l'atelier. Les parties qui suivent ont pour objectif de valider les exigences nécessaires à la qualité de l'opération de soudage. On s'intéresse dans un premier temps au positionneur puis à la potence de soudage.

II- Conception du dispositif - Étude du positionneur

L'objectif est de valider la conception et le dimensionnement de différentes parties du positionneur, dans le contexte de rétrofit.

Le principe de fonctionnement du positionneur est détaillé en Annexe 5.

Dans cette partie, on se propose d'étudier la liaison du positionneur avec le sol, le système d'entraînement et de freinage de l'axe U , le dimensionnement du guidage et de la motorisation de l'axe B .

II.1- Liaison encastrement du positionneur avec le sol

L'objectif de cette partie est de pré-dimensionner les goujons d'ancrage qui maintiennent en position le positionneur sur le sol.

L'ensemble du positionneur repose sur une semelle en acier S235 fixée au sol par l'intermédiaire de quatre boulons identiques, constitués chacun d'un écrou et d'un goujon de classe 5.8 de limite élastique 400 MPa implanté dans un insert métallique scellé chimiquement à la dalle (Figure 8).

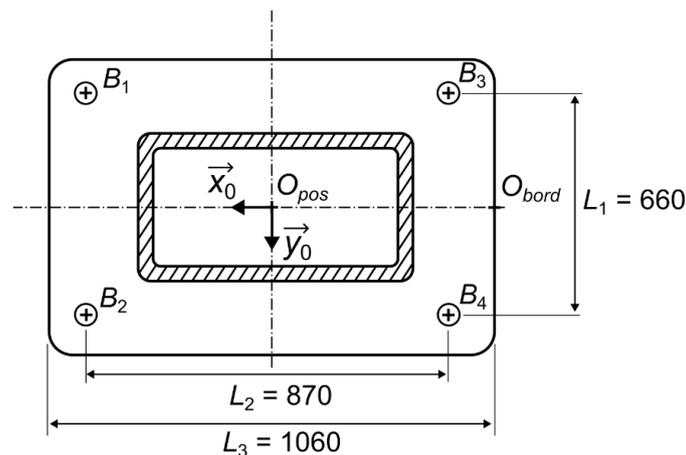


Figure 8 : schéma d'implantation des boulons

Q10- Déterminer la position du positionneur (déterminer les valeurs de u , α , β , paramètres définis en Annexe 4) la plus dimensionnante vis-à-vis de la liaison encastrement avec le sol.

Dans la suite, la configuration considérée sera $\alpha = 0$, $u = u_{min}$ et $\beta = 0$.

Q11- Déterminer le torseur des actions mécaniques du sol sur le positionneur, exprimé au point O_{pos} dans le repère R_0 (le paramétrage est indiqué Annexe 4). Le principe ou théorème utilisé sera clairement cité et la démarche détaillée. Exprimer littéralement le résultat puis faire l'application numérique avec les données de l'Annexe 5.

Q12- Énoncer les risques en cas de sous-dimensionnement et de surdimensionnement des boulons.

Q13- En précisant les hypothèses et la démarche, calculer la sollicitation dans chaque goujon. On se placera à la limite du basculement du positionneur.

Q14- Afin d'assurer un contact plan du positionneur avec le sol, estimer l'effort de serrage à appliquer et proposer un dimensionnement de ces goujons. Le diamètre proposé sera choisi dans la liste des diamètres courants en filetage métrique (Table 2).

Table 2 : filetage métrique à pas gros (extrait)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-----|------|-----|-----|-----|---|------|-----|------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| d (mm) | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 56 | 64 |
| pas | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 |

II.2- Système d'entraînement de l'axe U

L'objectif de cette partie est de dimensionner et de réaliser la conception préliminaire du système d'entraînement de l'axe U .

Le diagramme des exigences indique une vitesse nominale de déplacement du coulisseau U de $V_U = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. On souhaite que cette vitesse soit atteinte quand le moteur de l'axe U tourne à vitesse nominale (Annexe 6). Le coulisseau est entraîné par un système pignon/chaîne décrit Figure 9. Le réducteur combiné roue et vis sans fin possède un rapport de transmission $r = 1/600$ et la chaîne un pas de $p = 25,4 \text{ mm}$. Cet ensemble est situé en haut de la colonne du positionneur. L'Annexe 8 précise les dimensions de chaînes à rouleaux standard. On notera $N_{_}$ les vitesses de rotation des solides, Z le nombre de dents du pignon, d_p son diamètre primitif et m son module.

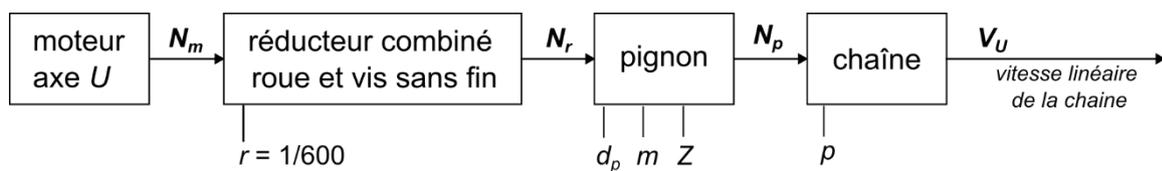


Figure 9 : schéma fonctionnel de la chaîne de transmission de l'axe U

Q15- Déterminer le nombre de dents Z et le diamètre primitif du pignon d_p .

Q16- Expliquer les éléments dimensionnants dans une chaîne à rouleaux. Déterminer la charge que subit la chaîne en régime nominal. Dimensionner la chaîne.

On considérera dans la suite une chaîne triple et le pignon dimensionnés à la question 15.

La Figure 10 représente une vue en perspective de la conception préliminaire partielle du mécanisme d'entraînement de la chaîne de l'axe U . Une coupe suivant le plan

(\vec{y}_0, \vec{z}_0) passant par l'axe de sortie du réducteur est représentée sur le DR4.

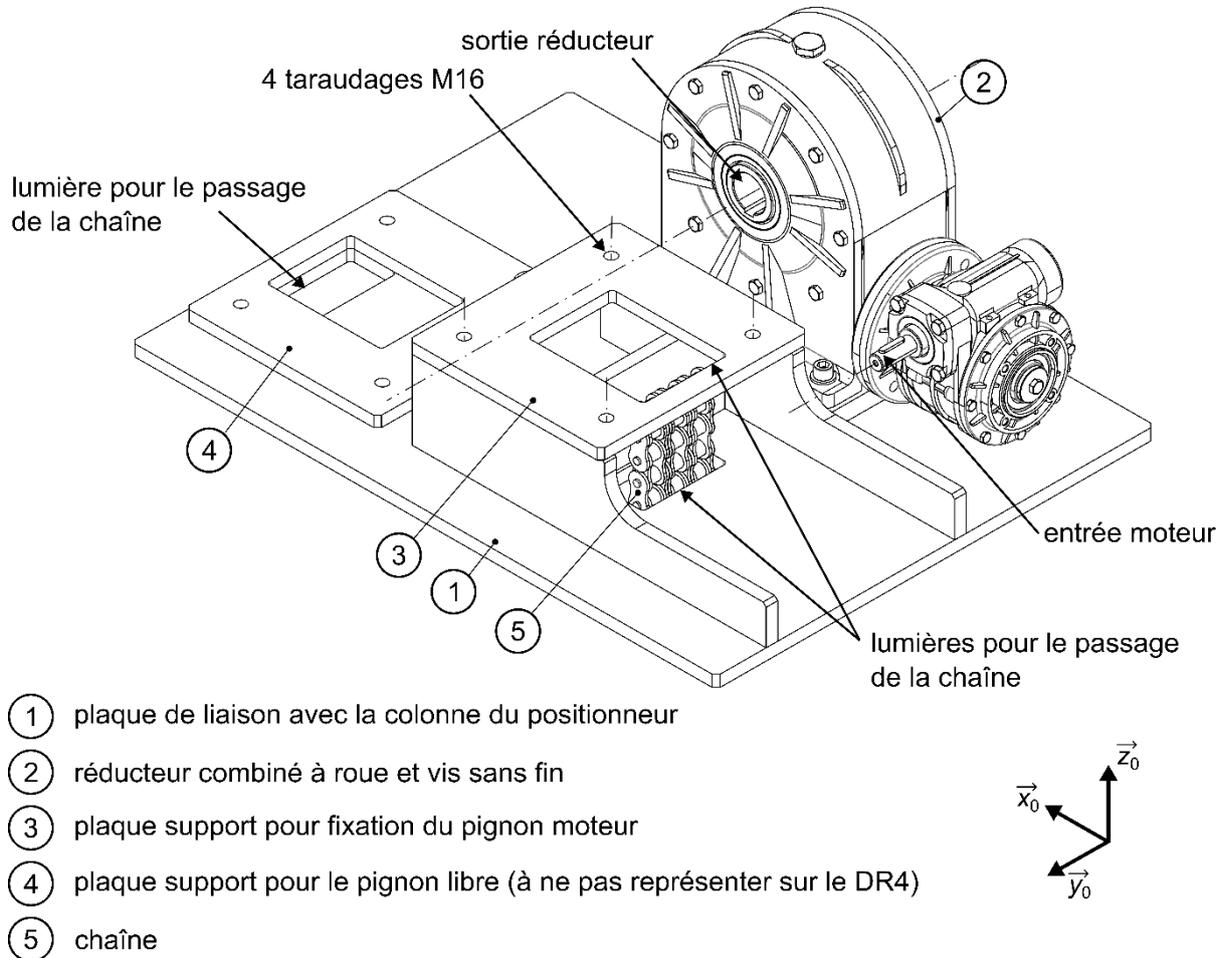


Figure 10 : vue 3D partielle du module d'entraînement de l'axe U

On s'intéresse à la conception des fonctions techniques suivantes :

- guider en rotation l'axe supportant le pignon par rapport à la plaque de liaison 1 ;
- entraîner en rotation le pignon à chaîne.

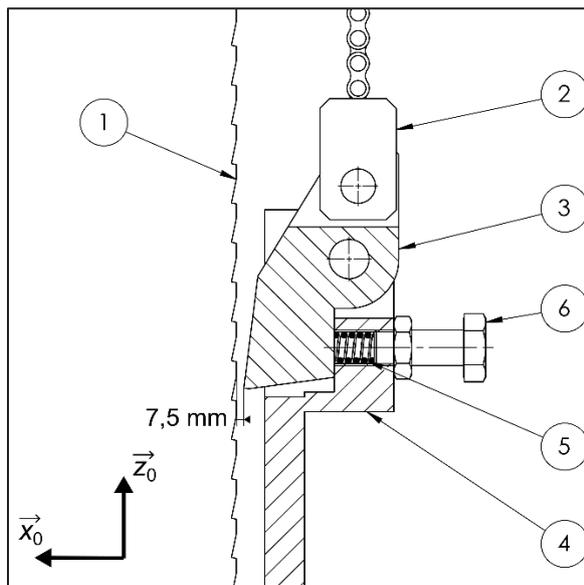
Q17- Proposer sous forme de schémas technologiques et/ou d'explications une solution permettant de satisfaire aux deux fonctions techniques. Préciser, de manière qualitative, les contraintes fonctionnelles garantissant le bon fonctionnement.

Q18- Sur le document DR4, proposer sous forme de croquis à main levée réalisé avec soin, en conformité avec les conventions de représentation, une solution permettant de satisfaire aux deux fonctions techniques précédentes. Proposer toute vue et/ou coupe jugée(s) nécessaires. Toutes les conditions fonctionnelles nécessaires à la compréhension du fonctionnement (jeux, ajustements, ...) seront portées sur le DR4. La numérotation des pièces sur le DR4 est la même que celle sur la Figure 10.

II.3- Système de freinage de l'axe U

L'objectif de cette partie est d'étudier le système antichute pour vérifier l'exigence Id 1.3.2.

En cas de rupture de la chaîne triple, l'axe U possède un système de freinage permettant d'arrêter l'ensemble avant collision avec le sol (Id 1.3.2). Il est composé d'un taquet (numéroté 3 sur la Figure 11) qui est repoussé avec un ressort 5 en cas de rupture de la chaîne. Ce taquet a une masse de 14,2 kg et un moment d'inertie en P_G suivant \vec{y}_0 de $JG_{yy} = 70\ 000\ \text{kg}\cdot\text{mm}^2$. Les différentes dimensions sont indiquées sur la Figure 12.



- 1- Crémaillère (entredent de 40 mm)
- 2- Support de chaîne + chaîne
- 3- Taquet
- 4- Coulisseau U
- 5- Ressort de compression
- 6- Vis de réglage

Figure 11 : schématisation du système antichute de l'axe U

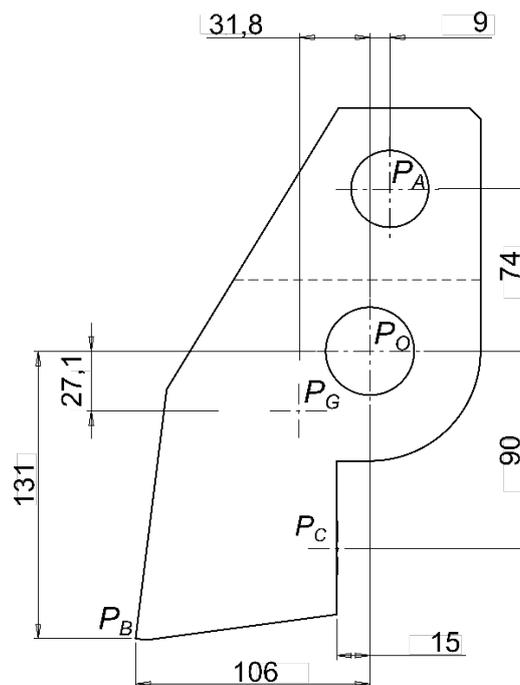


Figure 12 : dimensions du taquet

La chaîne exerce une action verticale en P_A par l'intermédiaire du support de chaîne 2. Le taquet est en liaison pivot avec le coulisseau U en P_O . Enfin, on suppose en position à l'équilibre, un contact ponctuel en P_C entre le coulisseau U et le taquet, d'action mécanique associée $\vec{F}_{4 \rightarrow 3}$, en plus de l'action du ressort $\vec{F}_{5 \rightarrow 3}$, dans ce cas, on pose $\vec{F}_C = \vec{F}_{5 \rightarrow 3} + \vec{F}_{4 \rightarrow 3}$. Les liaisons sont considérées parfaites. On considère $T = 51$ kN, la valeur de la tension dans la chaîne.

Q19- Dans la position décrite précédemment, déterminer la norme de \vec{F}_C . Le principe ou théorème utilisé sera clairement énoncé.

Q20- Sachant que le ressort a une raideur de $k = 200$ N·mm, une longueur à la position d'équilibre $L = 40$ mm et une longueur à vide $L_0 = 60$ mm, calculer $\vec{F}_{5 \rightarrow 3}$ puis $\vec{F}_{4 \rightarrow 3}$. Justifier le signe de $\vec{F}_{4 \rightarrow 3}$.

Une rupture de la chaîne se produit.

Q21- Indiquer ce que cela implique sur la tension T dans la chaîne, $\vec{F}_{4 \rightarrow 3}$, et l'équilibre du taquet.

Q22- Déterminer l'expression de la course horizontale du bout du taquet (P_B) en fonction de la variation de longueur du ressort par rapport à la position d'équilibre ΔL .

Q23- Exprimer le moment d'inertie du taquet 3 autour de P_O .

Q24- Exprimer puis calculer l'accélération angulaire prise par le taquet en P_O . On considère constant l'effort exercé par le ressort, la variation de la position de P_G est négligée.

Q25- Exprimer et calculer le temps pour que le taquet rentre en contact avec la crémaillère.

Q26- Déterminer la distance verticale parcourue par le coulisseau sur cette durée. Conclure par rapport à l'exigence Id 1.3.2.

II.4- Dimensionnement de la motorisation de l'axe B

L'objectif de cette partie est de valider la motorisation choisie pour le balancier B .

On se place dans le cas le plus défavorable du point de vue de la motorisation du balancier B : la pièce fixée sur le plateau C du positionneur est la plus volumineuse et la plus lourde (voir le diagramme des exigences en Annexe 1).

On s'intéresse ici au seul mouvement de l'axe B . Ce mouvement est initié par le couple en sortie du moteur de l'axe B , noté C_{mB} (voir Annexe 5). On note C_B le couple en sortie du réducteur de l'axe B . Le rapport de réduction du réducteur est donné en Annexe 7.

Dimensionnement statique

Q27- Déterminer l'expression de C_B , en fonction de α , permettant de maintenir l'ensemble {balancier B + plateau C + pièce} en équilibre statique par rapport à R_0 . Le principe ou théorème utilisé sera clairement cité et la démarche détaillée.

Q28- Calculer le couple maximal C_{Bmax} . Conclure vis-à-vis des données constructeur (Annexe 6).

Dimensionnement dynamique

Q29- Déterminer le vecteur vitesse de rotation $\overrightarrow{\Omega_{B/R_0}}$ décrivant la vitesse de rotation du solide B par rapport au repère R_0 .

Q30- Déterminer le vecteur accélération $\overrightarrow{\Gamma_{GB,B/R_0}}$, au point G_B , du solide B par rapport au repère R_0 .

Q31- Justifier la forme des matrices d'inertie $I(G_B, B)$ et $I(G_C, C+P)$ données dans l'Annexe 5.

Q32- Appliquer le théorème du moment dynamique à l'ensemble {balancier B + plateau C + pièce}, au point O_B , en projection sur l'axe $\overrightarrow{x_0}$.

Q33- Exprimer le couple C_B en fonction des autres paramètres.

Le balancier est en position initiale ($\alpha = 0$). On se place dans la phase d'accélération constante permettant au moteur de passer de la vitesse nulle à sa vitesse nominale. L'accélération angulaire du balancier B a pour valeur $56 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$. On néglige la variation de α pendant cette phase.

Q34- Calculer le couple C_{Ba} pendant cette phase. Conclure vis-à-vis des données constructeur.

Q35- Conclure sur le choix de la motorisation.

II.5- Dimensionnement du guidage de l'axe B

L'objectif de cette partie est de dimensionner le guidage de l'axe B .

Compte tenu des efforts importants de basculement et des faibles vitesses, le guidage en rotation de l'axe B est assurée par une couronne d'orientation avec roulement à billes à 4 points de contact. Le constructeur a choisi la gamme WD-L de IMO dont des éléments de documentation sont fournis en Annexe 9.

Q36- Calculer la charge axiale F_{ax} subie par le roulement et le couple de renversement maximal M_k .

Q37- À partir des extraits de documentation (Annexe 9), en déduire la référence la plus adaptée.

Dans la suite du questionnement, on s'intéresse au système d'entraînement WD-L478. Dans ces conditions, le système d'entraînement possède une raideur plus importante que la plaque support. Le maximum de flèche au niveau de la pièce est causé par la déformation de cette plaque. La Figure 13 montre les résultats de ces déplacements obtenus par un calcul par éléments finis lorsque l'ensemble du positionneur est soumis à l'action de la pesanteur.

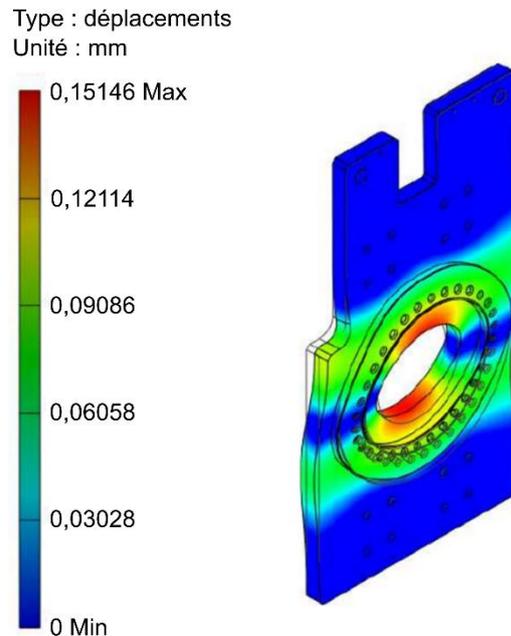


Figure 13 : déformée de la plaque support du coulisseau U, calculée par éléments finis sous la charge maximale de la pièce.

Q38- En se basant sur la déformée de la Figure 13 et en détaillant votre démarche, déterminer la valeur du débattement vertical au niveau du centre de la pièce dans la configuration $\alpha = 0$.

Q39- Conclure quant à la précision souhaitée (Id 1.4) sur la distance pointe de l'électrode/pièce. On se place toujours dans le cas où la valeur de la distance visée vaut $h = 20$ mm.

Les différentes études de cette partie ont validé le dimensionnement de la liaison du positionneur avec le sol, du système d'entraînement et de freinage de l'axe U, et de la motorisation de l'axe B. La dernière étude montre par contre qu'en situation de soudage, la rigidité du positionneur n'est pas suffisante pour assurer la précision nécessaire entre la pointe de l'électrode et la pièce. Une opération d'approche manuelle et de palpage permet de corriger la déformation du positionneur. On se propose d'étudier maintenant la potence de soudage.

III-Préparation de l'opération de soudage – Étude de la potence

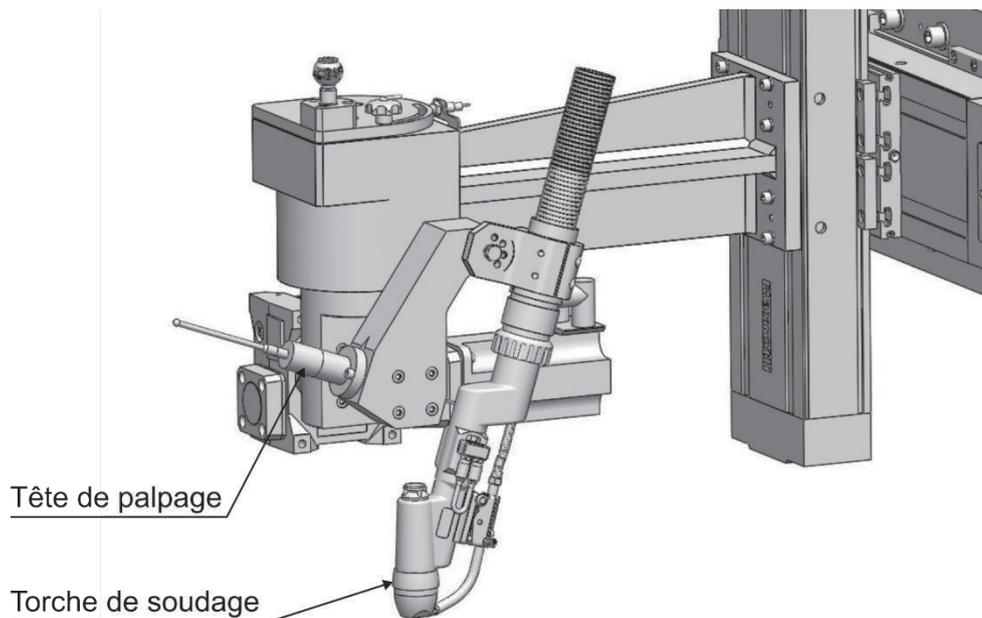


Figure 14 : support outils A supportant la tête de soudage et la tête de palpation.

L'effecteur de la potence comprend :

- un palpeur dont la fonction est de palper la pièce à souder en plusieurs endroits pour définir sa position, relativement à la potence de soudage.
- une torche de soudage, TIG ou plasma, interchangeable par vissage. Sa fonction est de souder, mais aussi de palper la pièce pour la mise en position initiale de la torche (un palpation unique est nécessaire à l'amorçage de l'arc électrique).

L'avance de la torche correspond au déplacement de l'axe Y (cf. Figure 4). La qualité du soudage est donc directement impactée par la précision sur cet axe.

Pour cette partie, seules les soudures radiales sont considérées (cf. Figure 2).

III.1- Étude de la flèche au niveau de la torche – axe Y

L'objectif de cette partie est de quantifier la flèche de l'axe Y en fonction de la position de la torche.

Le guidage de l'axe Y est réalisé par quatre paliers à billes ayant une rigidité radiale de $k = 800 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ espacés deux à deux suivant \vec{y}_0 de $b_Y = 850 \text{ mm}$.

La poutre en acier, de module d'Young 200 GPa, de section tubulaire rectangulaire aux dimensions extérieures $500 \times 280 \text{ mm}^2$, d'épaisseur 5 mm et de longueur $L_{pY} = 3900 \text{ mm}$, supporte un équipement (axes X, Z et A ainsi que la torche et le palpeur) de masse 100 kg supposée à son extrémité qui génère un effort appelé \vec{F}_A . On néglige la masse du rail supportant les paliers à billes. L'ensemble est illustré sur la Figure 15.

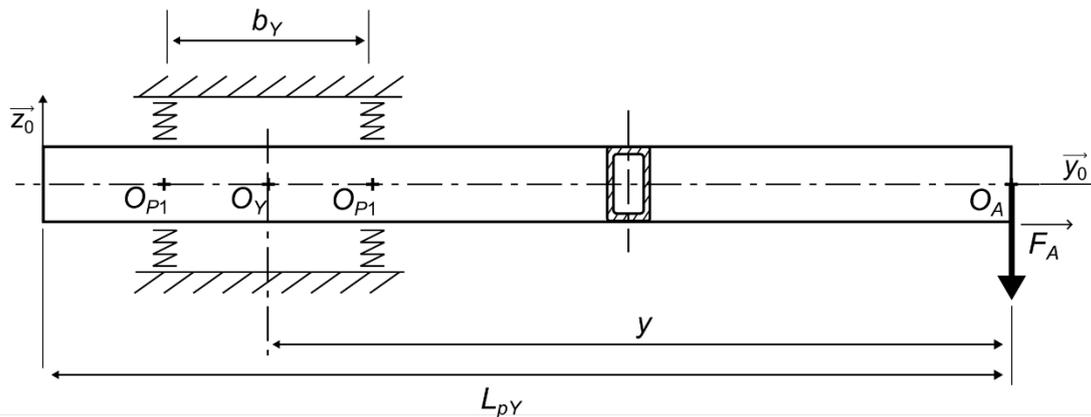


Figure 15 : schématisation axe Y

Q40- Calculer la masse de la poutre. Peut-on négliger son poids devant le poids des équipements ?

Q41- Déterminer l'expression, au point O_A , de la flèche suivant \vec{z}_0 liée à la déformation de la poutre en fonction de la position y . On modélise la liaison entre la poutre et la colonne par une liaison encastrement entre la poutre de l'axe Y et la colonne de la potence en O_Y . Discuter de cette modélisation.

Q42- Déterminer l'expression de la flèche, au point O_A , suivant \vec{z}_0 liée à la déformation des paliers à billes en fonction de la position y .

Q43- Indiquer la valeur de y impliquant une flèche totale maximale au niveau de la torche.

Q44- Calculer la flèche totale et conclure vis-à-vis de l'objectif ($h = 20\text{mm}$ et Id 1.4).

III.2- Asservissement en position de la torche

L'objectif de cette partie est de modéliser et de valider l'automatisation du suivi de trajectoire de la torche pour des soudures radiales.

Nous nous intéressons ici aux soudures radiales (soudures linéaires). Une représentation d'un profilé à souder est proposée Figure 16.

Définition des paramètres de soudage

Le procédé de soudure considéré ici est le TIG. Afin d'avoir une soudure de qualité et homogène sur toute la longueur du cordon, l'énergie de soudure doit être constante au cours de l'opération. On définit l'énergie linéaire de soudage (en $\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$) par : $E_S = \eta \times \frac{U_S \times I_S}{v} \times 60$ avec U_S la tension à l'arc (mesurée le plus près possible de l'arc, en V), I_S le courant de soudage (en A), v la vitesse de soudage ou de déplacement relatif torche/pièce en ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) et η le coefficient de rendement du procédé.

L'intensité de soudage (150 A) et la vitesse de soudage ($2,5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) étant fixées, la tension doit alors être constante pendant la soudure.

U_s et I_s sont liées à la longueur de l'arc : à I_s fixée, U_s est directement proportionnelle à cette longueur. Il est établi que la hauteur entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder doit être de 20 mm. On mesure la distance entre la pointe de l'électrode et la pièce avec un capteur, dont la sortie est une tension de 10,8 V proportionnelle à la distance de 20 mm.

L'enjeu est de conserver cette distance constante pendant le déplacement de la torche le long de l'abscisse curviligne parallèle à la pièce.

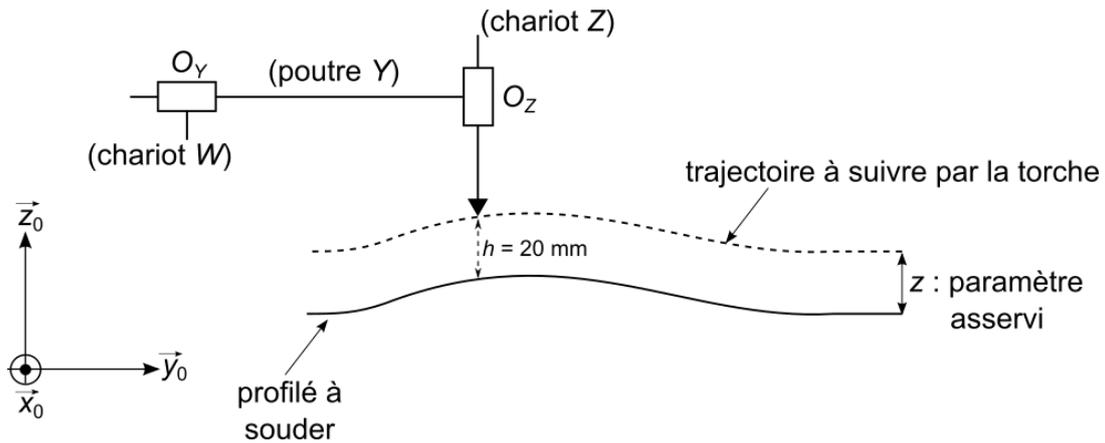


Figure 16 : schéma cinématique partiel de la potence avec torche, et pièce à souder

Deux consignes sont envoyées pendant la soudure radiale :

- une consigne de vitesse au moteur pilotant la poutre Y ;
- une consigne de position au moteur pilotant le chariot Z.

La torche se déplace selon une abscisse curviligne dans le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0) , combinaison de sa consigne d'avance (selon \vec{y}_0 , considérée constante ici) et de sa consigne de cote (selon \vec{z}_0). La distance $h = 20$ mm entre pointe d'électrode et profilé ne doit pas varier. Cependant, le profilé étant curviligne, la consigne de cote selon \vec{z}_0 de la pointe de l'électrode doit s'adapter.

L'enjeu est d'asservir la position de la torche pour conserver l'écart constant. On procède donc à un asservissement en régulation dont une représentation par schéma-blocs est donnée sur la Figure 17.

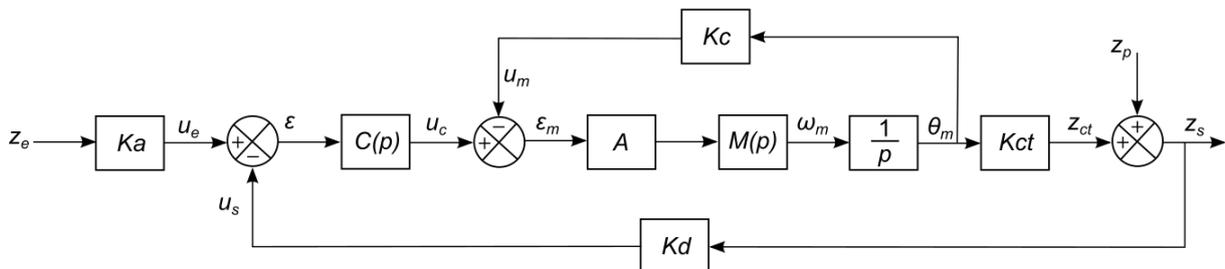


Figure 17 : schéma-bloc de l'asservissement en position de la cote z

Avec :

- z_e : consigne de position de la pointe de l'électrode selon \vec{z}_0 ;
- z_s : position effective de la pointe de l'électrode selon \vec{z}_0 ;
- Ka : gain de l'adaptateur ;
- $C(p)$: fonction de transfert du correcteur ;
- A : gain de l'amplificateur, avec $A = 41$ (sans unité) ;
- $M(p)$: fonction de transfert du moteur pilotant l'axe Z ;
- Kc : gain du codeur incrémental du moteur de l'axe Z, avec $Kc = 0,3 \text{ V}\cdot\text{rad}^{-1}$;
- Kct : gain de la chaîne de transmission (cf. Annexe 7) ;
- Kd : gain du capteur de distance entre le profilé et la pointe de l'électrode.

On suppose que la fonction de transfert du moteur est du premier ordre, de coefficients caractéristiques Km et Tm , respectivement gain statique et constante de temps du moteur. On suppose dans un premier temps que z_p est nul et que $C(p) = 1$.

Q45- Déterminer la relation entre Ka et Kd telle que l'écart ε soit l'image de l'erreur entre l'entrée et la sortie du schéma-bloc ; en particulier ε doit être nul quand $z_e = z_s$.

Q46- Déterminer la valeur de Kd à partir des paramètres de soudage définis précédemment.

Q47- Déterminer la fonction de transfert $H(p) = \frac{Z_s(p)}{Z_e(p)}$ en boucle fermée de l'asservissement.

Q48- Calculer l'écart statique du système ainsi modélisé et conclure vis-à-vis de l'exigence Id 1.4.

Q49- Proposer un correcteur $C(p)$ permettant de respecter l'exigence Id 1.4 et justifier.

On suppose à présent que z_p est non nul. Ce paramètre représente les variations selon \vec{z}_0 du profil à souder. La cote z varie d'une valeur minimale z_{min} à une valeur maximale z_{max} pendant la soudure radiale (Figure 18).

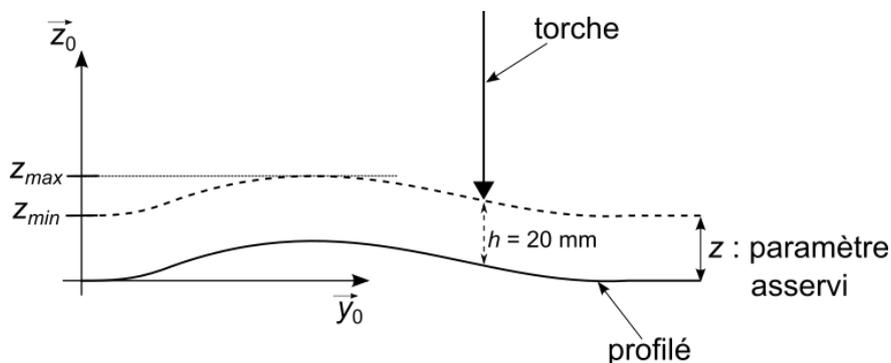


Figure 18 : Variation de hauteur du profilé

Q50- Pour une entrée z_p en échelon et avec le correcteur proposé à la question précédente, déterminer l'écart statique obtenu. Conclure vis-à-vis de l'exigence Id 1.4 puis conclure sur l'objectif de la partie.

IV- Contrôles des pièces

L'objectif de cette partie est d'étudier la qualité des soudures obtenues et de proposer des axes d'amélioration sur le processus et le procédé.

Il est admis que le procédé de soudage TIG conduit à une excellente qualité des soudures. Cependant, des défauts peuvent être rencontrés.

On notera trois types de défauts typiques de ce procédé de soudage :

- les inclusions de tungstène. Le tungstène étant très dense, on le retrouve généralement en partie basse des cordons de soudure (par exemple dans le cas de contact entre l'électrode et la pièce en cours de soudage) ;
- les porosités. Elles sont la conséquence de gaz piégés dans le bain de fusion (par exemple si le diffuseur de gaz de protection est endommagé, ou les pièces insuffisamment propres) ;
- l'arc erratique conduisant à des soudures incorrectes : soufflures, caniveaux, aspects mauvais (par exemple dans le cas d'un arc trop long ou d'une énergie de soudage insuffisante).

Ces défauts de soudure peuvent être à l'origine de graves défaillances lors de la mise en service de la pièce. C'est pourquoi les soudures sont systématiquement contrôlées par deux moyens de contrôle non destructif : le ressuage, permettant de détecter les défauts débouchant en surface et la radiographie X pour les défauts internes.

Dans cette partie, on se propose d'étudier le contrôle par radiographie X.

Ce contrôle consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes (rayons X) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique. Ces modulations d'intensité dépendent de la nature et de l'épaisseur de la matière traversée (Annexe 10). Plus le support est insolé, plus il sera foncé, et inversement moins il est insolé, plus il restera clair. Cette méthode permet d'observer des défauts sur toute l'épaisseur de la pièce, et ici, en l'occurrence sur les soudures effectuées.

La Figure 19 montre le cliché obtenu pour une soudure radiale. On peut observer deux portions de soudures circulaires (verticales, de chaque côté du cliché) opérées dans une étape préalable.

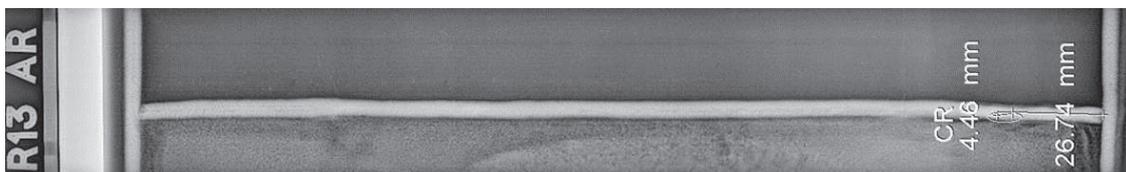


Figure 19 : exemple de cliché radiographique – soudure radiale

Q51- Expliquer pourquoi la soudure apparaît plus claire que le reste de la pièce.

Q52- À épaisseur constante, préciser comment apparaît une inclusion de tungstène ou une porosité sur un cliché radiographique. Déterminer si l'on peut observer un caniveau (creux aux bords de la soudure) sur un cliché radiographique.

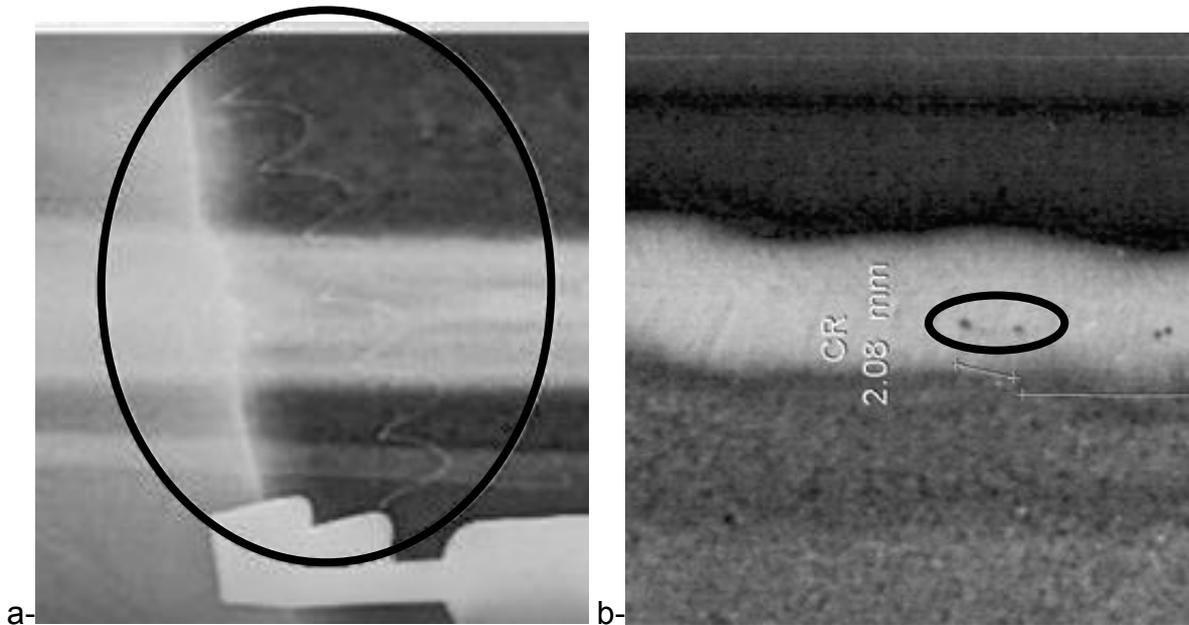


Figure 20 a et b : grossissement de deux soudures

La Figure 20 présente un grossissement de deux zones présentant un défaut.

Q53- Déterminer la nature des défauts entourés sur chaque photographie, et expliquer les causes possibles.

On observe des défauts caractéristiques d'une mauvaise orientation de la torche par rapport à la pièce.

Q54- En reprenant les contraintes sur le processus de soudage, présentées en p.3 du sujet, permettant d'obtenir une soudure de qualité, proposer une ou des piste(s) d'amélioration du processus de soudage étudié dans ce sujet et amenant aux défauts caractéristiques mis en lumière ci-avant.

ANNEXES

Annexe 1 : diagrammes des exigences.

Annexe 2 : diagramme de définition de blocs.

Annexe 3 : diagramme de processus.

Annexe 4 : schéma cinématique et paramétrage.

Annexe 5 : positionneur (principe de fonctionnement, encombrement, données).

Annexe 6 : données moteurs.

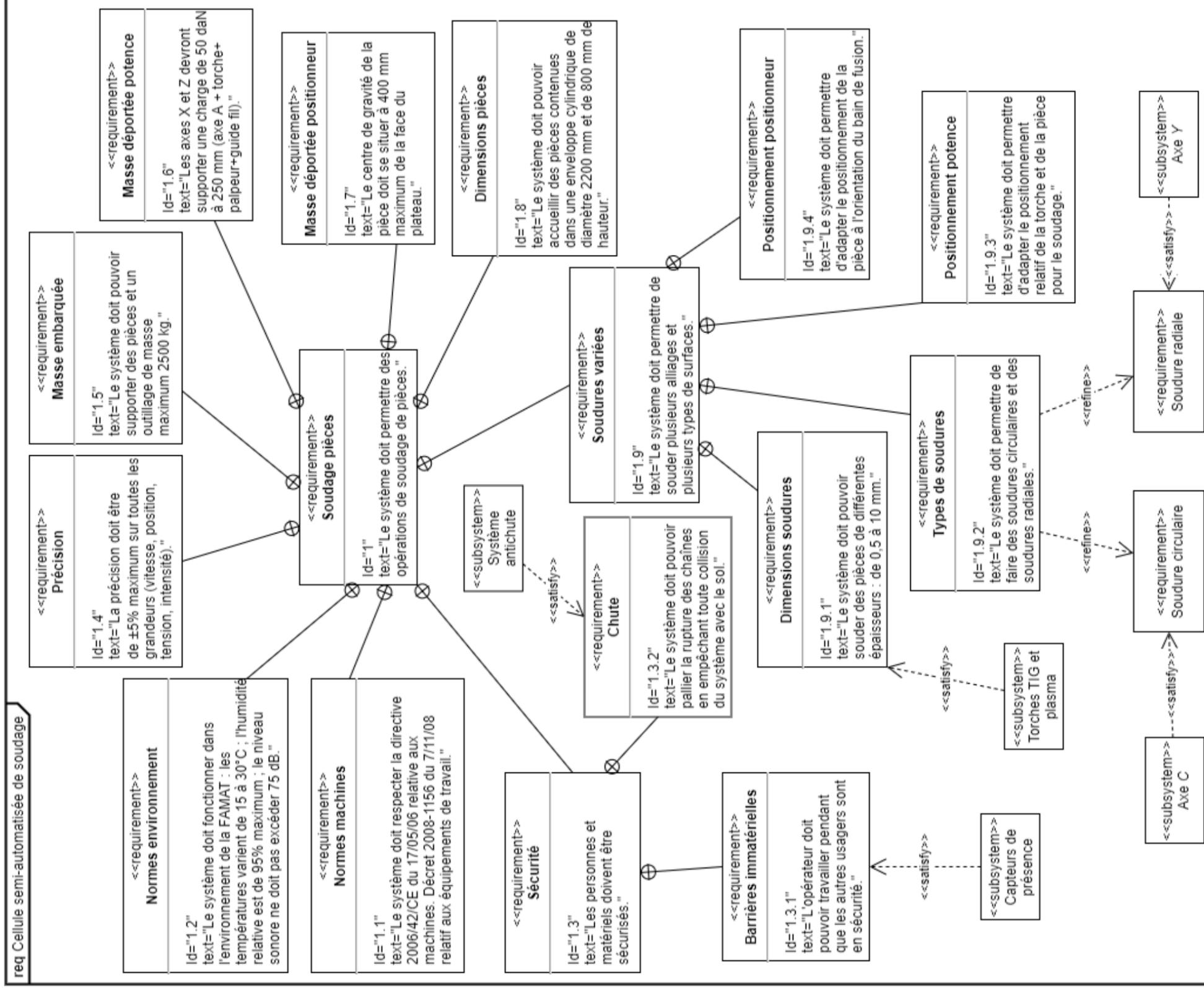
Annexe 7 : rapports de transmission.

Annexe 8 : chaîne à rouleaux.

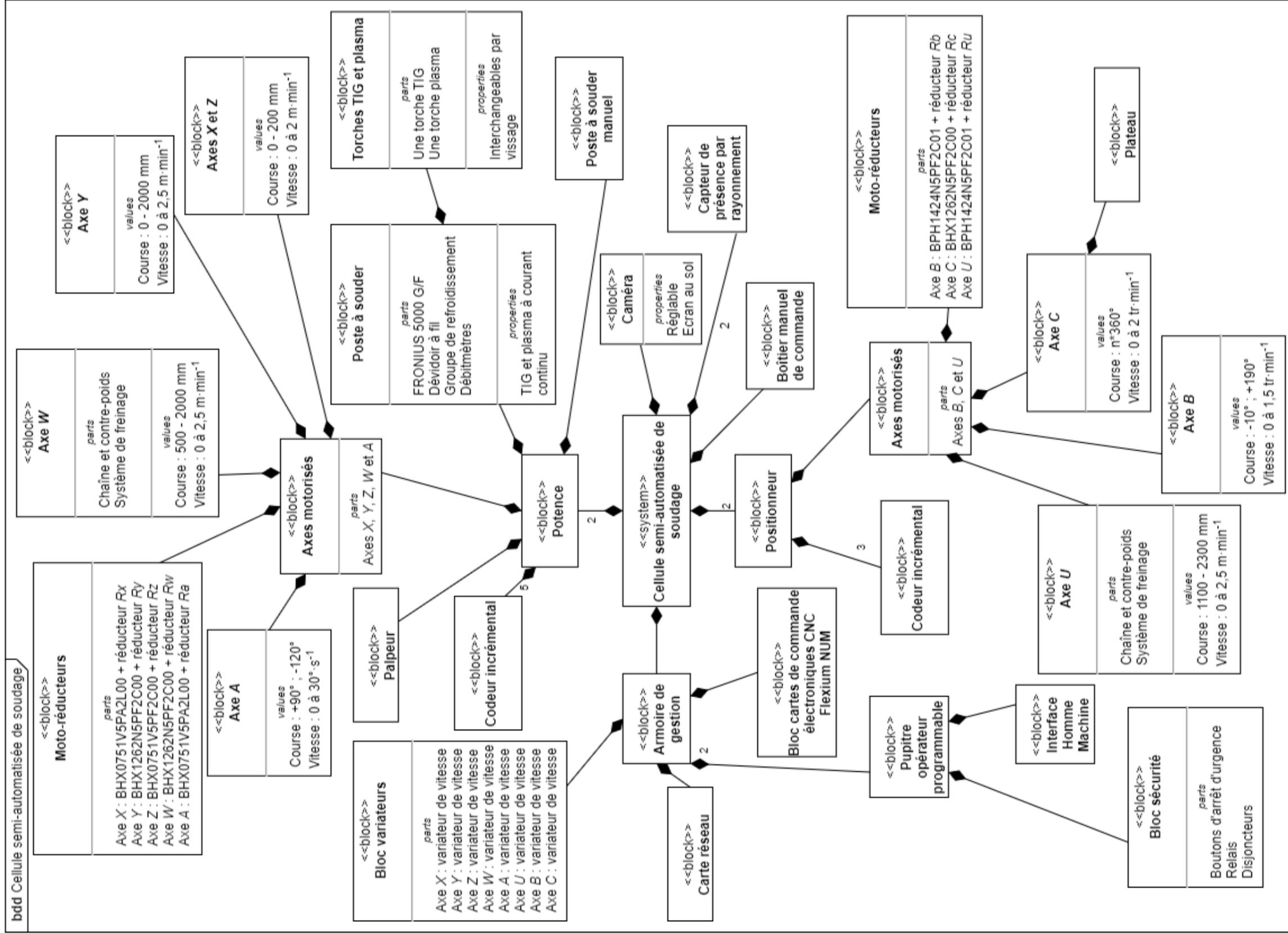
Annexe 9 : système d'entraînement.

Annexe 10 : radiographie X.

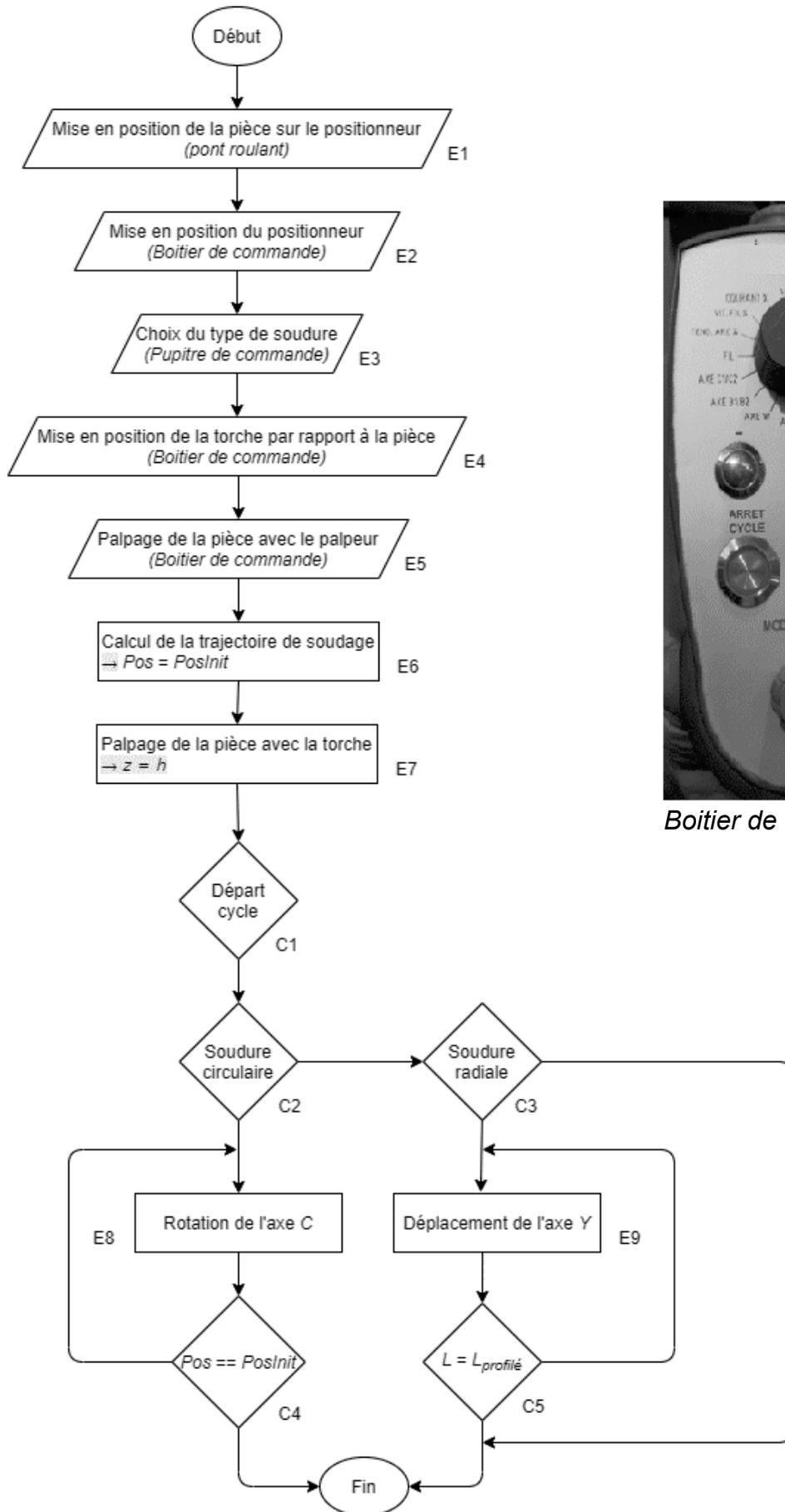
Annexe 1 - Diagramme partiel des exigences du système



Annexe 2 - Diagramme partiel de définition de blocs du système

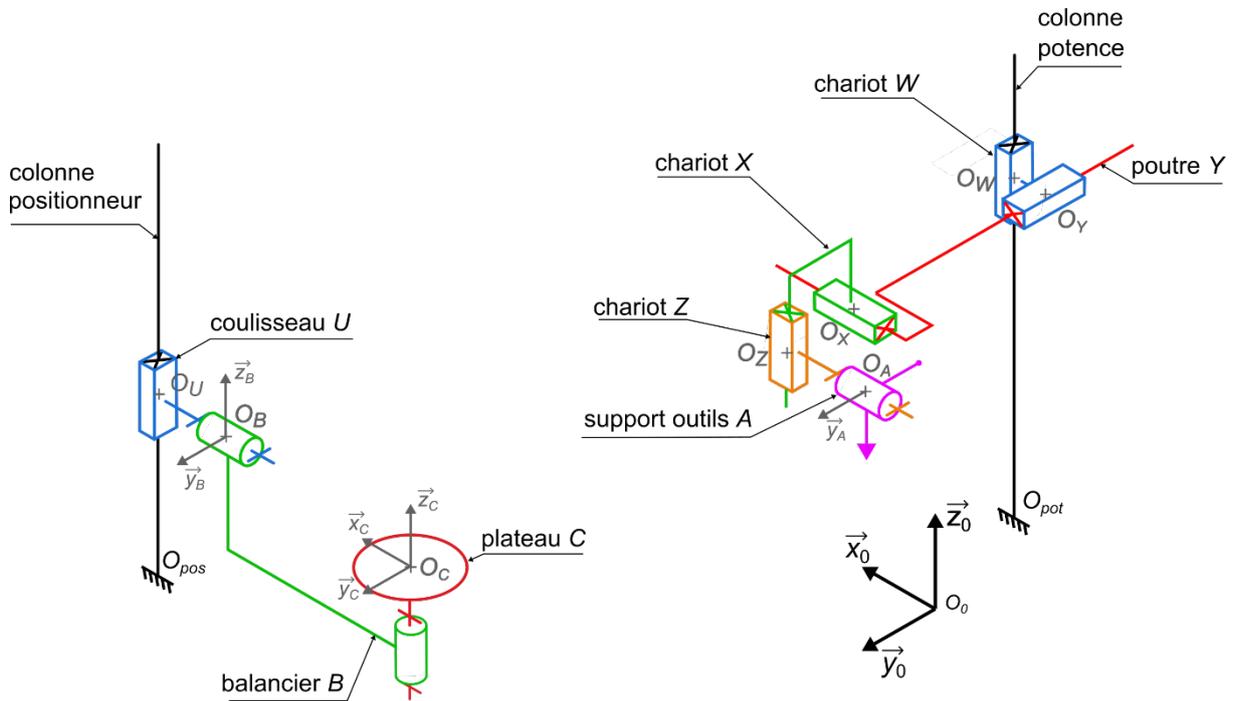


Annexe 3 - Diagramme de processus



Boitier de commande

Annexe 4 - Schéma cinématique et paramétrage



On définit les repères suivants :

$R_0 (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, considéré fixe, $R_B (O_B, \vec{x}_B, \vec{y}_B, \vec{z}_B)$, $R_C (O_C, \vec{x}_C, \vec{y}_C, \vec{z}_C)$ et $R_A (O_A, \vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A)$.

On définit les bases suivantes : $B_0 (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, $B_B (\vec{x}_B, \vec{y}_B, \vec{z}_B)$, $B_C (\vec{x}_C, \vec{y}_C, \vec{z}_C)$ et $B_A (\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A)$.

Les orientations entre les différents repères sont définies par les angles suivants :

$$\alpha = (\vec{y}_0, \vec{y}_B) = (\vec{z}_0, \vec{z}_B) \text{ et } \vec{x}_0 = \vec{x}_B ;$$

$$\beta = (\vec{x}_B, \vec{x}_C) = (\vec{y}_B, \vec{y}_C) \text{ et } \vec{z}_B = \vec{z}_C ;$$

$$\gamma = (\vec{y}_0, \vec{y}_A) = (\vec{z}_0, \vec{z}_A) \text{ et } \vec{x}_0 = \vec{x}_A.$$

On note G_i les centre de gravité des pièces i avec :

$$\overrightarrow{O_{pos}O_U} = u\vec{z}_0 ; \overrightarrow{O_UO_B} = -L_B\vec{x}_0 ; \overrightarrow{O_UO_C} = -L_C\vec{x}_0 - h_C\vec{z}_C ; \overrightarrow{O_UG_U} = -L_{GU}\vec{x}_0 ;$$

$$\overrightarrow{O_BG_B} = -L_{GB}\vec{x}_0 - h_{GB}\vec{z}_B ; \overrightarrow{O_BG_C} = -L_{GC}\vec{x}_0 - h_{GC}\vec{z}_C .$$

Annexe 5 - Positionneur

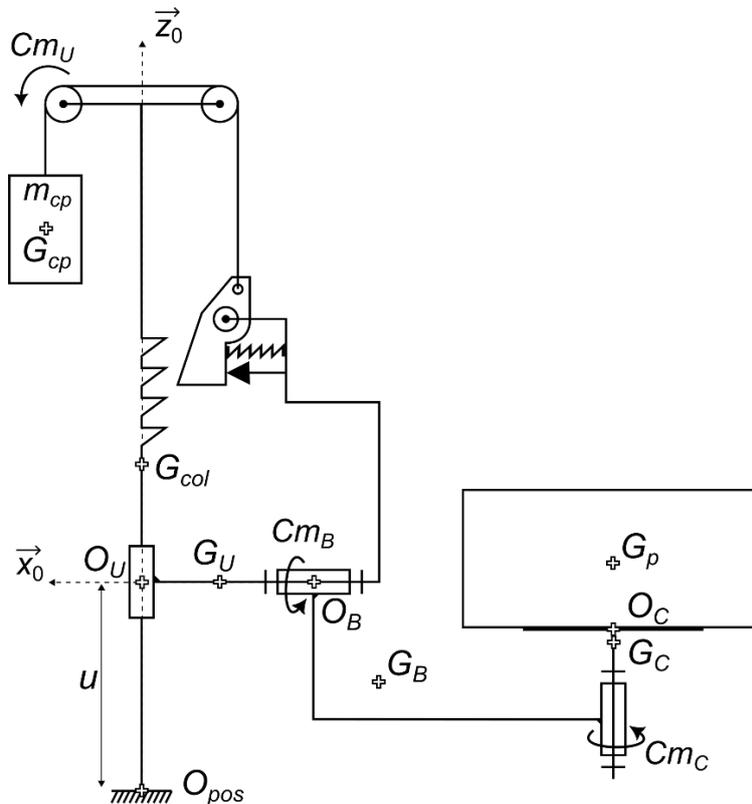
Principe de fonctionnement

Le tableau suivant précise quelques éléments technologiques concernant le positionneur.

Annexe 5.1 : éléments technologiques du positionneur

| Axe concerné | Système de guidage | Système d'entraînement | Système supplémentaire |
|--------------|--|---|---|
| Axe U | 4 paliers à billes | Chaîne + pignon moteur + soutien d'un contrepoids | Système de freinage en cas de rupture du système d'entraînement |
| Axe B | Roulements combinés à rouleaux | Moteur + Vis sans fin / couronne extérieure | |
| Axe C | Roulement pour table de machine outils | Moteur + pignon + couronne à denture intérieure | Système de bridage pneumatique |

Annexe 5.2 : schéma de principe du positionneur (axe U en position u)



On notera que $u_{min} = 1100 \text{ mm}$, $\overrightarrow{O_{pos}G_{col}} = h_{G_{col}}\vec{z}_0$ et $\overrightarrow{O_{pos}G_{cp}} = (H-u)\vec{z}_0$.

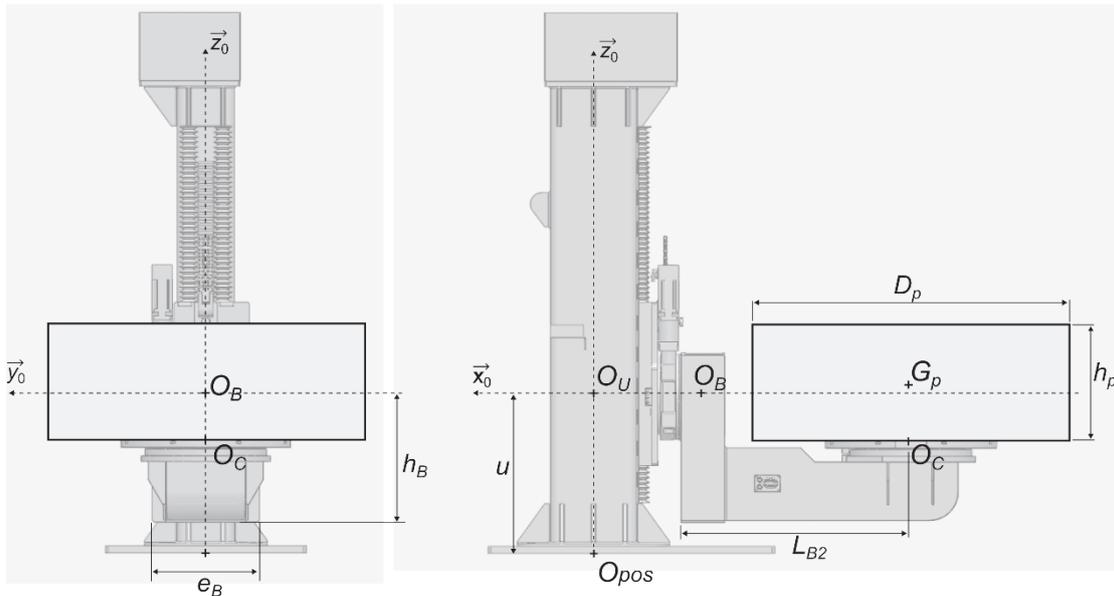
Encombrement

L'encombrement du chargement (carter + support), posé sur le plateau et centré en O_C , est compris dans un cylindre de diamètre $D_p = 2200$ mm et de hauteur $h_p = 800$ mm (cf. exigence id 1.8).

Pour les calculs, le centre de gravité du chargement G_p sera considéré sur l'axe de symétrie à mi-hauteur tel que $\overrightarrow{O_C G_p} = \frac{1}{2} h_p \overrightarrow{z_C}$ dans le repère R_C .

L'encombrement du balancier B est défini d'après la figure ci-dessous par $e_B = 750$ mm, $L_{B2} = 1615$ mm et $h_B = 880$ mm.

Annexe 5.3 : encombrement positionneur avec chargement, pour $\overrightarrow{z_0} = \overrightarrow{z_B}$



Données

Les coordonnées des points suivants sont données dans le repère $(O_{pos}, \overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_0})$ avec l'angle α nul.

Annexe 5.4 : coordonnées des points

| | O_U | O_B | O_C | G_{col} | G_U | G_B | G_C | G_{cp} |
|------------------------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|------------|
| $\overrightarrow{x_0}$ | 0 | - 760 | - 2 210 | 0 | - 400 | - 1 450 | - 2 210 | 0 |
| $\overrightarrow{y_0}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\overrightarrow{z_0}$ | u | u | $u - 300$ | 1820 | u | $u - 500$ | $u - 350$ | $3100 - u$ |

Annexe 5.5 : répartition des masses

| | Masse (kg) |
|----------------------|--------------------|
| Coulisseau U | $m_U = 500$ |
| Balancier B | $m_B = 1\,500$ |
| Plateau C | $m_C = 700$ |
| Pièce (Id 1.5) | $m_p = 2\,500$ |
| Contrepoids | $m_{cp} = 2\,000$ |
| Colonne positionneur | $m_{col} = 2\,400$ |

Accélération de la pesanteur : $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Matrice d'inertie du balancier B (en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$), exprimée au point G_B :

$$I(G_B, B) = \begin{bmatrix} A_B & -F_B & -E_B \\ -F_B & B_B & -D_B \\ -E_B & -D_B & C_B \end{bmatrix}_{B_B} = \begin{bmatrix} 238 & 0 & -94 \\ 0 & 596 & 0 \\ -94 & 0 & 498 \end{bmatrix}_{B_B} .$$

Matrice d'inertie de l'ensemble {plateau C + pièce} (en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$), exprimée au point G_C :

$$I(G_C, C+P) = \begin{bmatrix} A_C & -F_C & -E_C \\ -F_C & B_C & -D_C \\ -E_C & -D_C & C_C \end{bmatrix}_{B_C} = \begin{bmatrix} 2156 & 0 & 0 \\ 0 & 2156 & 0 \\ 0 & 0 & 1614 \end{bmatrix}_{B_C} .$$

Annexe 6 - Données moteurs (extraites de la documentation constructeur)

| | | | | |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Réf. moteur | BHX0751 V5PA2L00 | BHX1262 N5PF2C00 | BHX0751 V5PF2C00 | BPH1424 N5PF2C01 |
| Type | Brushless | Brushless | Brushless | Brushless |
| Axes | X, A | Y, W, C | Z | B, U |
| Intensité nominale | 1,7A | 6A | 1,7A | 15,6A |
| Couple nominal | 1,2Nm | 8,4Nm | 1,2Nm | 22Nm |
| Couple au démarrage | 3,1Nm | 26,8Nm | 3,1Nm | 90,2Nm |
| Vitesse nominale | 6000tr·min ⁻¹ | 3000tr·min ⁻¹ | 6000tr·min ⁻¹ | 3000tr·min ⁻¹ |

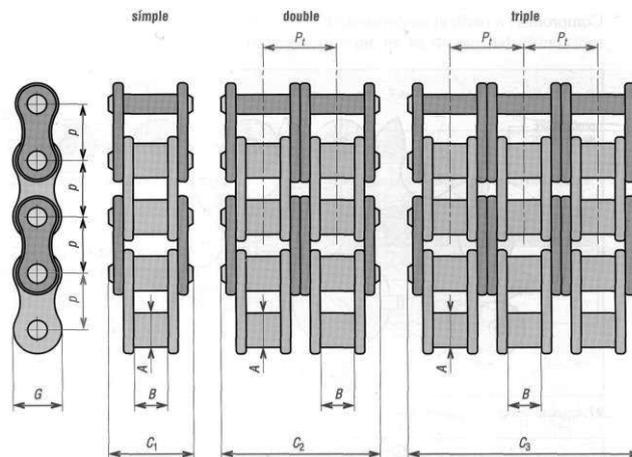
Annexe 7 - Rapports de transmission

Notations d'après le diagramme de définition de blocs.

Rapports de transmission de l'ensemble de la chaîne de transmission pour chaque axe :

| | | | | | |
|----------------|--|----------------|--|----------------|-------------------------|
| Axe X : | R _x = 3000 tr·m ⁻¹ | Axe U : | R _u = 1200 tr·m ⁻¹ | Axe A : | R _a = 1/1200 |
| Axe Y : | R _y = 1200 tr·m ⁻¹ | Axe W : | R _w = 1200 tr·m ⁻¹ | Axe B : | R _b = 1/2000 |
| Axe Z : | R _z = 3000 tr·m ⁻¹ | | | Axe C : | R _c = 1/1500 |

Annexe 8 - Chaîne à rouleaux – dimensions d’après un extrait de la norme NF ISO 606

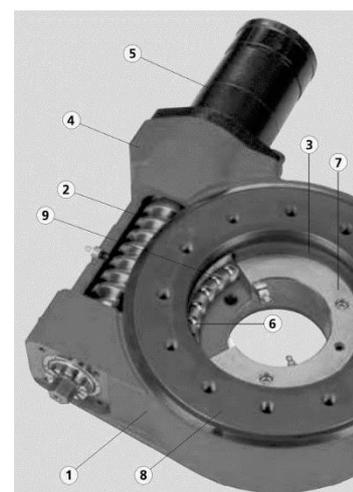


| Caractéristiques des principales chaînes à rouleaux (NF ISO 606) | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------|---------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|--------|--------|
| symbole | pas p mm | A mm | B mm | P_t mm | G mm | C_1 mm | C_2 mm | C_3 mm | rupture en traction (daN) | | |
| | | | | | | | | | simple | double | triple |
| N° 40 ou 08A | 12,7 | 7,92 | 7,85 | 14,38 | 12,07 | 17,8 | 32,3 | 46,7 | 1 380 | 2 760 | 4 140 |
| N° 50 ou 10A | 15,87 | 10,16 | 9,40 | 18,11 | 15,09 | 21,8 | 39,9 | 57,9 | 2 180 | 4 360 | 6 540 |
| N° 60 ou 12A | 19,05 | 11,91 | 12,57 | 22,78 | 18,08 | 26,9 | 49,8 | 72,6 | 3 110 | 6 230 | 9 340 |
| N° 80 ou 16A | 25,4 | 15,88 | 15,75 | 29,29 | 24,13 | 33,5 | 62,7 | 91,9 | 5 560 | 11 120 | 16 680 |
| N° 100 ou 20A | 31,75 | 19,05 | 18,90 | 35,76 | 30,2 | 41,1 | 77,0 | 113,0 | 8 670 | 17 350 | 26 020 |
| N° 120 ou 24A | 38,1 | 22,23 | 25,22 | 45,44 | 36,2 | 50,8 | 96,3 | 141,7 | 12 460 | 24 910 | 37 370 |

Annexe 9 - Système d’entraînement (extrait documentation IMO « système d’entraînement »)

Fonctionnement des systèmes d’entraînement

Les systèmes d’entraînement se composent d’une couronne d’orientation dentée à capacité portante élevée (1), d’un élément d’entraînement denté (2), d’un joint fonctionnel (3), d’un carter (4) et d’un entraînement électrique (5). Dans le système d’entraînement, les éléments de roulement (6) transmettent les charges entre la bague intérieure (7) et la bague extérieure (8).

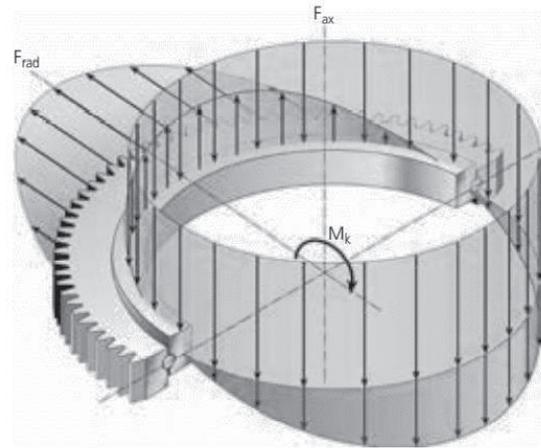


Système d’entraînement WD-L

Répartition des charges

La répartition des charges et les angles de contact s’appliquent différemment sur les éléments de roulement en fonction des charges extérieures :

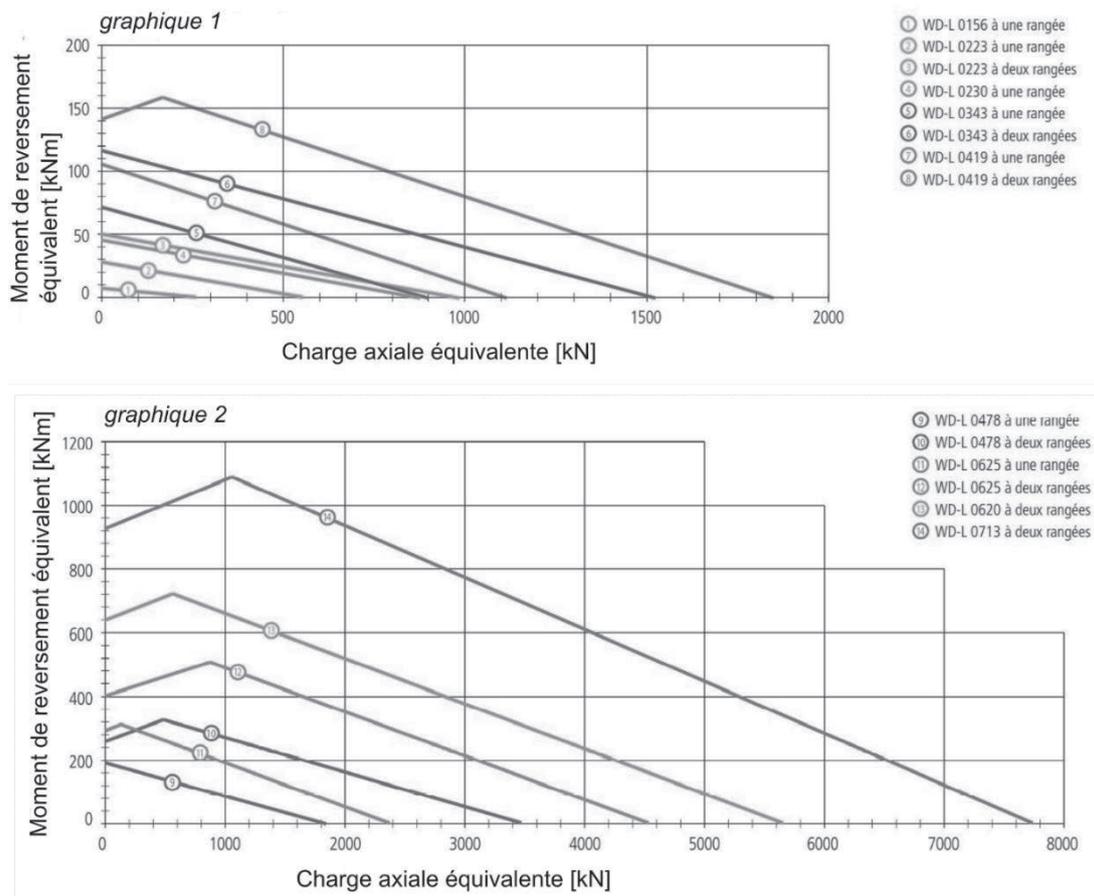
- sous charge axiale F_{ax} , tous les éléments de roulement sont soumis à une charge dans la même direction ;
- sous chargement radiale F_{rad} , seul un segment de la chaîne d'éléments de roulement supporte la charge ;
- en cas de moment de renversement M_k , la charge est supportée par un segment d'un côté et par un autre segment du côté opposé ;
- dans la plupart des cas, les charges axiales, radiales et les moments de renversement sont combinés.



Modes de chargement

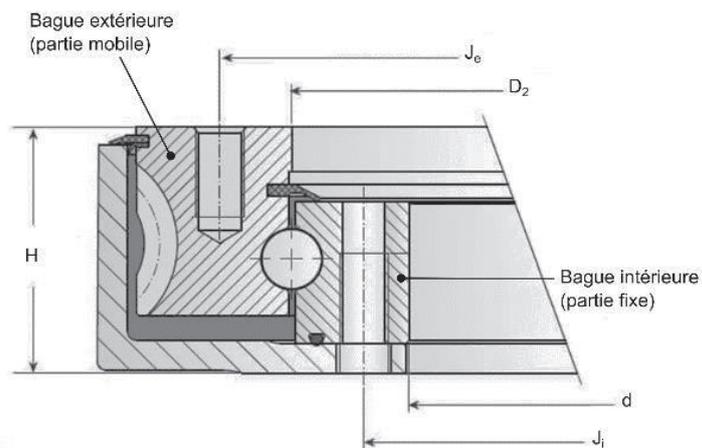
Dimensionnement des systèmes d'entraînement

Grâce aux diagrammes des charges statiques limites, on peut vérifier rapidement la dimension de roulement choisie pour une charge essentiellement statique.



Diagrammes de charges statiques limites pour WD-L de 156 à 713 mm de diamètre (à 1 ou 2 rangées de billes)

Systemes d'entraînement



| Réf. | Nb rangées de bille | H (mm) | D ₂ (mm) | d (mm) | J _i (mm) | Vis BI | J _e (mm) | Vis BE | Couple d'entraînement max (Nm) | Masse (kg) |
|-----------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|--------------------------------|------------|
| WD-L 0156 | 1 | 82 | 159 | 88 | 114 | M12 | 196 | M12 | 3280 | 40 |
| WD-L 0223 | 1 | 82 | 222 | 145 | 175 | M16 | 270 | M16 | 9303 | 50 |
| WD-L 0223 | 2 | 100 | 222 | 145 | 175 | M16 | 270 | M16 | 9303 | 60 |
| WD-L 0230 | 1 | 82 | 224,5 | 145 | 175 | M16 | 270 | M16 | 9303 | 55 |
| WD-L 0343 | 1 | 87 | 342 | 265 | 295 | M16 | 390 | M16 | 12905 | 68 |
| WD-L 0343 | 2 | 100 | 342 | 265 | 295 | M16 | 390 | M16 | 12905 | 82 |
| WD-L 0419 | 1 | 82 | 421 | 324 | 365 | M16 | 479,5 | M16 | 15606 | 92 |
| WD-L 0419 | 2 | 100 | 421 | 324 | 365 | M16 | 479,5 | M16 | 15606 | 112 |
| WD-L 0478 | 1 | 105 | 480 | 380 | 420 | M16 | 520 | M16 | 24288 | 139 |
| WD-L 0478 | 2 | 125 | 480 | 380 | 420 | M16 | 520 | M16 | 24288 | 179 |
| WD-L 0625 | 1 | 130 | 627 | 525 | 565 | M20 | 675 | M20 | 42824 | 246 |
| WD-L 0625 | 2 | 140 | 627 | 525 | 565 | M20 | 675 | M20 | 42824 | 292 |
| WD-L 0620 | 2 | 170 | 625 | 510 | 550 | M20 | 688 | M20 | 137200 | 742 |
| WD-L 0713 | 2 | 205 | 718 | 590 | 630 | M20 | 792 | M20 | 223252 | 1215 |

Annexe 10 - Radiographie X

Le rayonnement électromagnétique X suit les lois de l'optique géométrique et se propage en ligne droite. La loi d'absorption d'un rayonnement monochromatique incident d'intensité I_0 traversant un matériau homogène x exprimé en centimètres est de la forme :

$$I = I_0 \exp(-\kappa \rho x)$$

Avec κ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) le coefficient d'absorption massique dépendant de l'énergie du rayonnement incident et du numéro atomique Z du matériau traversé, et ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) la densité du matériau traversé.

Les conditions de prise de vue doivent être choisies en termes de conditions géométriques, position et orientation relative de la source, de l'objet et du film conduisant à un compromis satisfaisant entre flou géométrique (source non ponctuelle), grandissement des défauts, rayonnement diffusé, éloignement et durée d'exposition.

La détermination du temps de pose se fait en pratique à l'aide d'abaques prenant en compte les paramètres de la source et les conditions de prise de vue. Les principes de base du calcul sont :

- la loi de l'inverse du carré : l'intensité du rayonnement reçu par unité de surface est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source ;
- la loi de réciprocité : une exposition donnée produit un effet photographique constant si le produit de l'intensité du rayonnement par la durée de l'exposition reste constant ;
- le compromis distance-temps : l'augmentation de distance est toujours favorable par la réduction du flou géométrique et celle de la quantité de rayonnement diffusé de basse énergie qu'elle procure, mais peut conduire à des temps de pose prohibitifs. On sera amené à choisir la distance en fonction du plus long temps de pose admissible.

DOCUMENTS RÉPONSES

DR1 : description du processus de soudage.

DR2 : zone à sécuriser.

DR3 : chaîne de puissance et d'information.

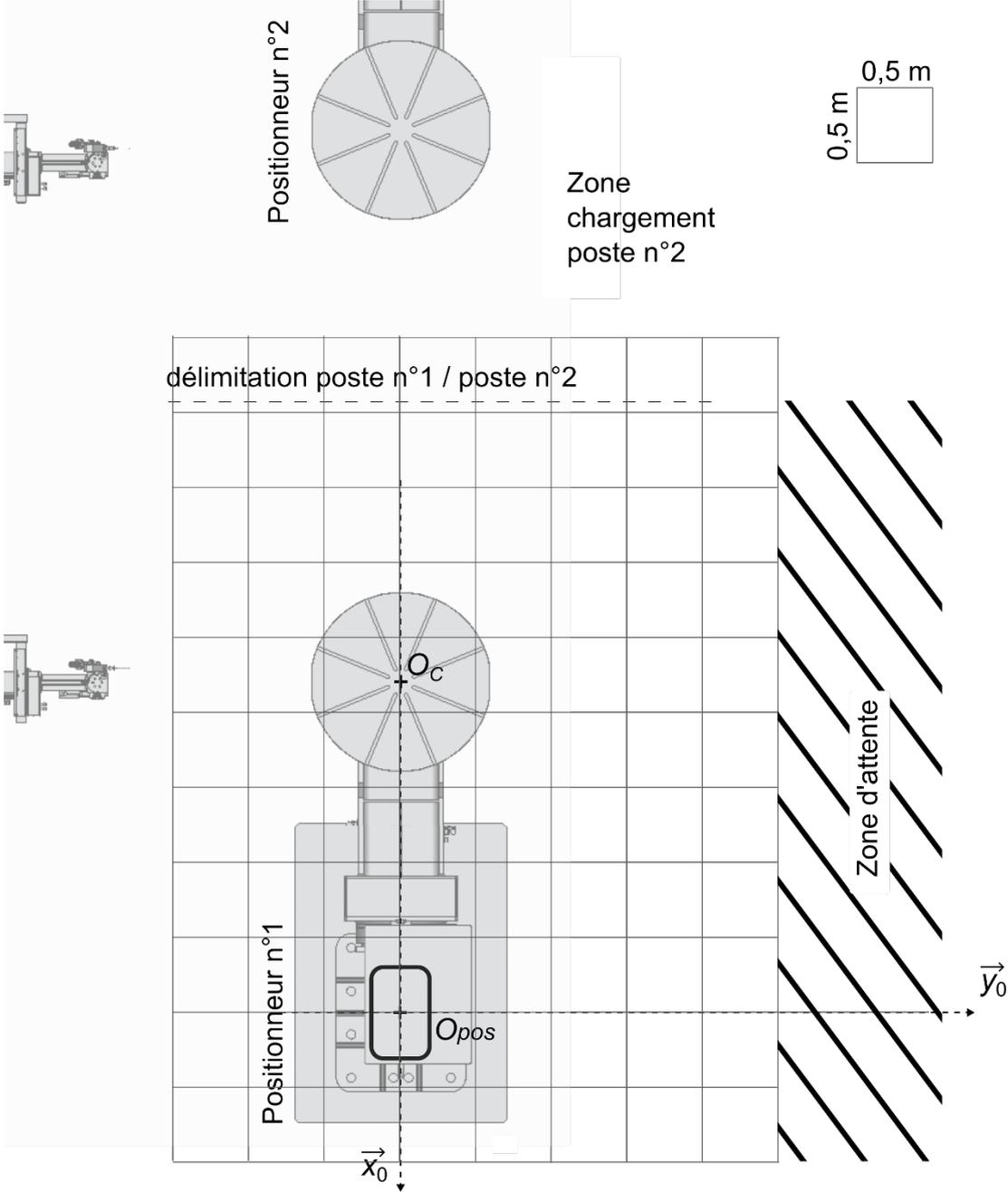
DR4 : plan conception.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

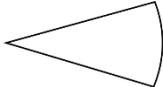
DR1 - Description du processus de soudage

| Étapes | Man | Num | Actions de l'opérateur ou opératrice | Actions automatiques | Id. |
|--------|-----|-----|--|----------------------|-------|
| E1 | X | | <i>Déplace une pièce du pont roulant sur le positionneur.</i> | | |
| E2 | X | | <i>Déplace les axes du positionneur pour orienter le bain de fusion.</i> | | 1.9.4 |
| E3 | | | | | |
| E4 | | | | | |
| E5 | | | | | |
| E6 | | | | | |
| E7 | | | | | |
| E8 | | | | | |
| E9 | | | | | |

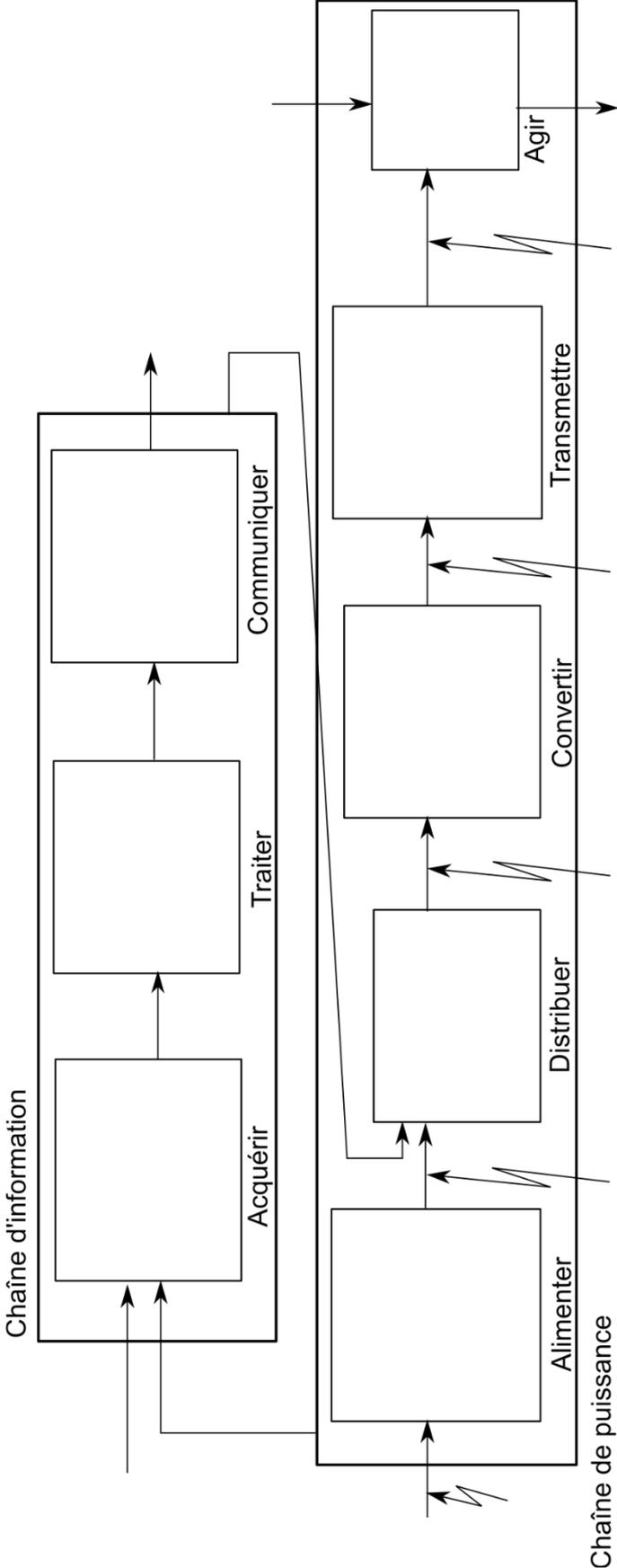
DR2 - Zone à sécuriser



Légende :

-  zone à sécuriser
-  scrutateur
-  faisceau

DR3 - Chaîne de puissance et d'information



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1

F DR4- Représentation plane en coupe selon le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0) F

E E

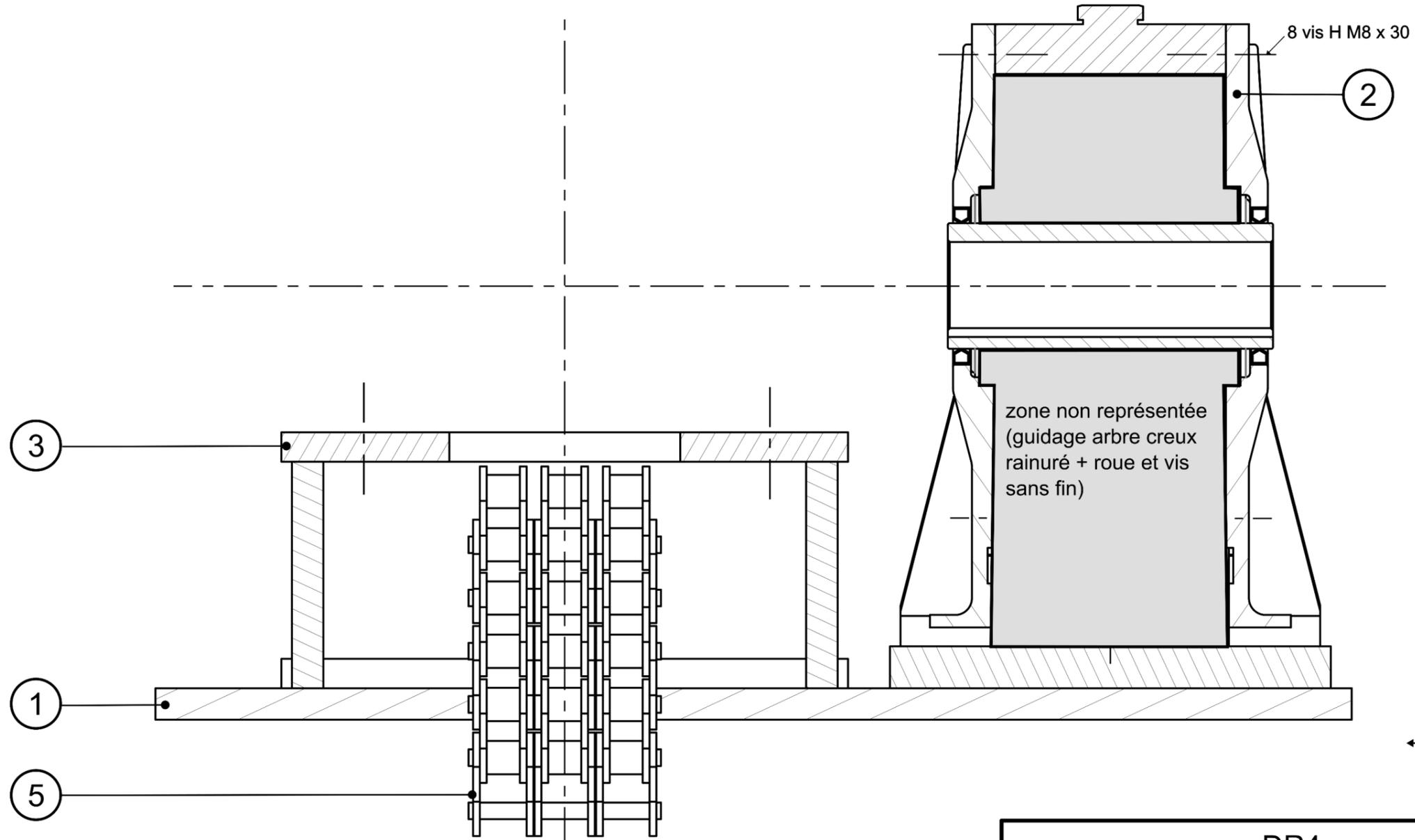
D D

C C

B B

A A

DR4- Représentation plane en coupe selon le plan (\vec{y}_0, \vec{z}_0)



| | |
|-----------------|--------------------|
| DR4 | |
| TITRE: | Entraînement axe U |
| ECHELLE:1:2 | A3 |
| FEUILLE 1 SUR 1 | |

8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1