

PARTIE B – ÉTUDE DU ROBOT DE TRANSFERT (M3)

L'objectif de cette étude consiste à valider ou non les solutions constructives et technologiques retenues par le constructeur pour ce robot de transfert, tout en respectant les exigences de cadence, de flexibilité, de précision et d'impact environnemental imposées par le cahier des charges.

À la sortie de la remplisseuse (M2), les tubes pleins sont positionnés sur le convoyeur n°2 de la ligne de fabrication (figure 2). Ils sont alors transférés jusqu'au robot de transfert (M3). Son rôle consiste à transférer les tubes arrivant du convoyeur n°2 sur le convoyeur n°3, permettant ainsi d'alimenter à la bonne cadence l'étuyeuse (M4). L'architecture de ce poste de transfert est présentée sur la figure 17. Le point O du robot sert de référence pour les dimensions fournies.

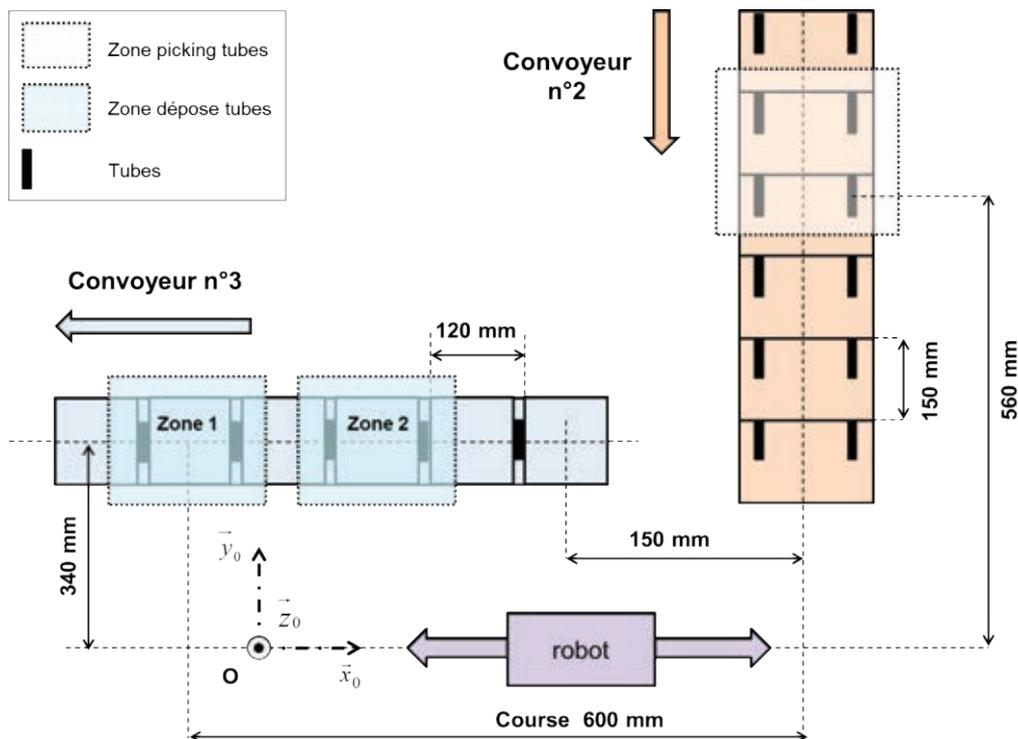


Figure 17. Architecture du poste de transfert

À chaque cycle de transfert, le robot transporte simultanément quatre tubes de crème du convoyeur n°2 vers le convoyeur n°3. Les tubes sont saisis à l'aide d'une dépression de 0,2 bar grâce à des ventouses circulaires de diamètre 6 mm, situées au bout de la tête de prélèvement en P et Q (figures 18 et 19). La position du point P dans le plan $(O, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est définie par $\vec{OP} = Y_p \cdot \vec{y}_0 + Z_p \cdot \vec{z}_0$.

Le cycle de transfert des tubes s'effectue en trois étapes successives (figure 17) :

- **étape 1** ; le robot se dirige vers la zone de picking du convoyeur n°2, où il saisit au vol quatre tubes (sans arrêt du convoyeur). La prise s'effectue en $Y_p = 560 \text{ mm}$ et $Z_p = 0 \text{ mm}$;
- **étape 2** ; le robot se dirige avec les quatre tubes vers la zone de dépose 1 du convoyeur n°3. Les deux tubes tenus au point Q sont déposés à 600 mm de la zone de prise selon \vec{x}_0 ; c'est la première dépose ;
- **étape 3** ; le robot se décale selon \vec{x}_0 et les deux tubes restants, tenus au point P, sont déposés sur la zone de dépose 2. Le cycle repart alors à l'étape 1.

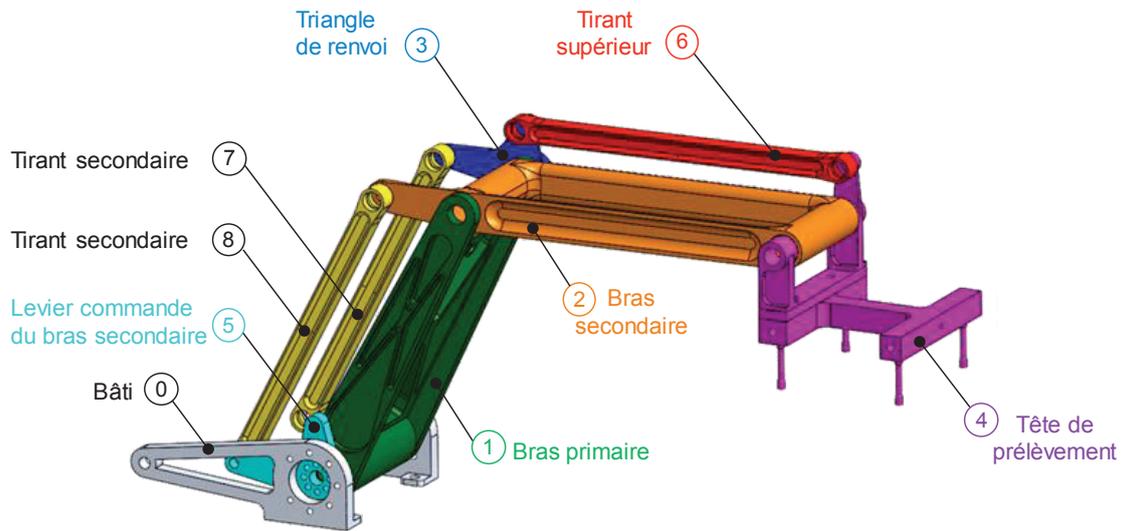


Figure 18. Architecture du robot de transfert

Le convoyeur n°2 et le convoyeur n°3 sont tous les deux situés dans le plan $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$. Le robot de transfert est monté sur un support lui assurant un mouvement de translation suivant \vec{x}_0 . L'étude s'intéressera donc uniquement aux mouvements suivant \vec{y}_0 et \vec{z}_0 : le problème est ainsi ramené dans le plan $(O, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

L'architecture du robot est précisée sur la figure 18, et son paramétrage sur la figure 19. À chaque solide S_i , un repère nommé $R_i = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$ est associé.

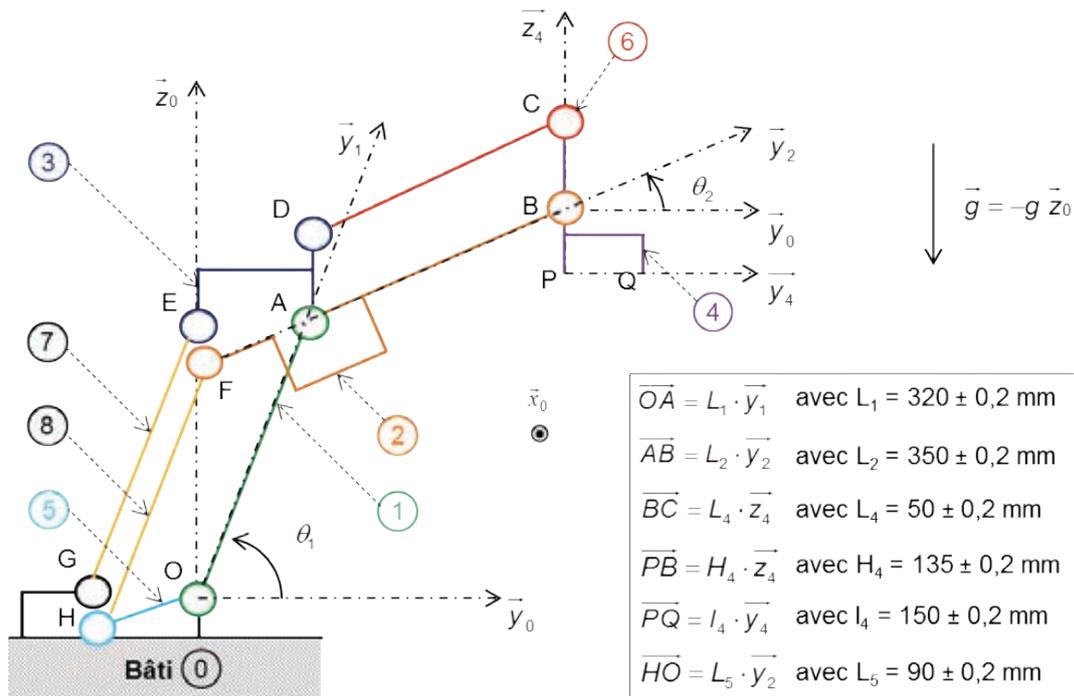


Figure 19. Paramétrage du robot de transfert

Le bras primaire (1) est en liaison pivot d'axe (O, \vec{x}_0) avec le bâti (0). Sa position angulaire est repérée par l'angle $\theta_1 = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$. Il est également en liaison pivot d'axe (A, \vec{x}_0) avec le bras secondaire (2) et avec le triangle de renvoi (3).

Le bras secondaire (2) est en liaison pivot d'axe (B, \vec{x}_0) avec la tête de prélèvement (4). Sa position angulaire est repérée par l'angle $\theta_2 = (\vec{y}_0, \vec{y}_2) = (\vec{z}_0, \vec{z}_2)$.

La tête de prélèvement (4) est en liaison pivot d'axe (C, \vec{x}_0) avec le tirant supérieur (6), lui-même en liaison pivot d'axe (D, \vec{x}_0) avec le triangle de renvoi (3).

Le tirant secondaire (7) est en liaison pivot d'axe $(E, \overline{x_0})$ avec le triangle de renvoi (3), et en liaison pivot d'axe $(G, \overline{x_0})$ avec le bâti (0).

Le tirant secondaire (8) est en liaison pivot d'axe $(F, \overline{x_0})$ avec le bras secondaire (2), et en liaison pivot d'axe $(H, \overline{x_0})$ avec le levier de commande du bras secondaire (5). Ce dernier est lui-même en liaison pivot d'axe $(O, \overline{x_0})$ avec le bâti (0).

Afin de déployer le robot, deux moteurs brushless identiques sont utilisés : M_1 entraînant le bras primaire (1), et M_2 entraînant le levier de commande du bras secondaire (5). Chaque moteur est couplé à un réducteur de rapport 1/70. Leurs caractéristiques sont précisées dans le tableau 3.

Couple maximal C_{\max} (N·m)	0,55
Puissance maximale (kW)	0,18
Inertie de l'arbre moteur (kg·m ²)	$18 \cdot 10^{-3}$
Vitesse de rotation maximale (rad/s)	524

Tableau 3. Caractéristiques techniques des moteurs du robot

Un système de butées, non représenté sur la figure 19, borne les valeurs des angles tels que :

$$\theta_1 \in [40^\circ; 115^\circ] \quad \text{et} \quad \theta_2 \in [-35^\circ; 10^\circ]$$

PARTIE B1. Dimensionnement des actionneurs

L'objectif de cette partie consiste à vérifier que les performances cinématiques et dynamiques du robot de transfert, liées aux caractéristiques techniques des moteurs, sont suffisantes pour répondre à l'exigence de cadence imposée par le cahier des charges.

Question 20 : déterminer les relations liant les coordonnées articulaires (θ_1 et θ_2), aux coordonnées cartésiennes de positionnement du point P (Y_P et Z_P). Compléter le tableau présenté ci-dessous après l'avoir reproduit. Au vu de la position des butées mécaniques, conclure sur la capacité du robot à prélever et à déposer les tubes sur les emplacements définis.

	Prise	Dépose 1	Dépose 2
Y_P (mm)	560		
θ_1 (°)			
θ_2 (°)			

Durant la phase de prise des tubes (étape 1), le robot doit suivre le mouvement du convoyeur n°2 (figure 17). Les vitesses de rotation respectives des moteurs sont alors minimales. *A contrario*, les vitesses les plus importantes, dix fois plus élevées que les vitesses de rotation minimales, sont obtenues durant les phases de transfert.

Question 21 : déterminer les vitesses de rotation à imposer aux moteurs lors de ces deux phases extrêmes. Conclure sur la capacité des moteurs choisis.

Lors d'une phase de production consistant à conditionner des tubes de masse $m = 4,5$ g, l'accélération fournie par le robot au niveau du point P a été mesurée. Le relevé expérimental obtenu est fourni sur la figure 21.

$\overline{\Gamma}_{(P \in 4/0)} \cdot \overline{z_0}$ (m.s⁻²)

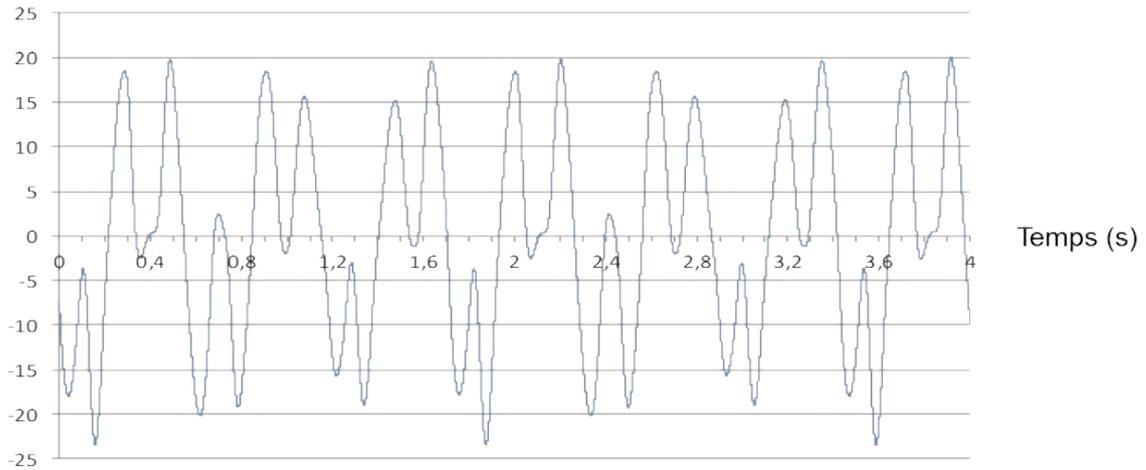


Figure 21. Accélération verticale du point P en fonction du temps

Question 22 : les performances dynamiques du robot de transfert liées aux moteurs sélectionnés sont-elles suffisantes pour répondre à la cadence imposée par le cahier des charges ?

Seule l'accélération maximale à laquelle les tubes sont soumis (afin de répondre à la cadence imposée) sera considérée dans la suite de l'étude.

Question 23 : le dispositif de préhension des tubes proposé est-il correctement dimensionné pour répondre à l'exigence de flexibilité imposée par le cahier des charges concernant la diversité des tubes à conditionner (Id 1.5.1) ? Le cas échéant, proposer des solutions technologiques.

PARTIE B2. Conformité de la cotation fonctionnelle au vu de la précision exigée sur le positionnement des tubes

L'objectif de cette partie consiste à vérifier que la cotation des pièces du robot, notamment celle du triangle de renvoi, permet de garantir la précision de positionnement des tubes sur le convoyeur n°3, imposée par le cahier des charges (Id 1.4.1.1).

Dans un premier temps, la cotation fonctionnelle du triangle de renvoi (3) est étudiée. En effet, ce triangle est une pièce clé dans l'architecture du robot de transfert puisqu'une fabrication non conforme entraîne systématiquement un défaut de positionnement des tubes sur le convoyeur n°3.

Le triangle de renvoi est relié à trois solides par le biais de liaisons pivot, comme l'illustrent les figures 19 et 22 :

- liaison pivot d'axe $(A, \overline{x_0})$ avec le bras primaire (1) ;
- liaison pivot d'axe $(D, \overline{x_0})$ avec le tirant supérieur (6) ;
- liaison pivot d'axe $(E, \overline{x_0})$ avec le tirant secondaire (7).

La liaison pivot d'axe $(A, \overline{x_0})$ est réalisée par le biais de deux roulements à billes (11 et 12) positionnés dans le triangle de renvoi (3), comme l'illustre la figure 22. La conception des liaisons pivot d'axe $(D, \overline{x_0})$ et d'axe $(E, \overline{x_0})$ est similaire. Les roulements à billes sont cependant positionnés respectivement dans le tirant supérieur (6) et secondaire (7).

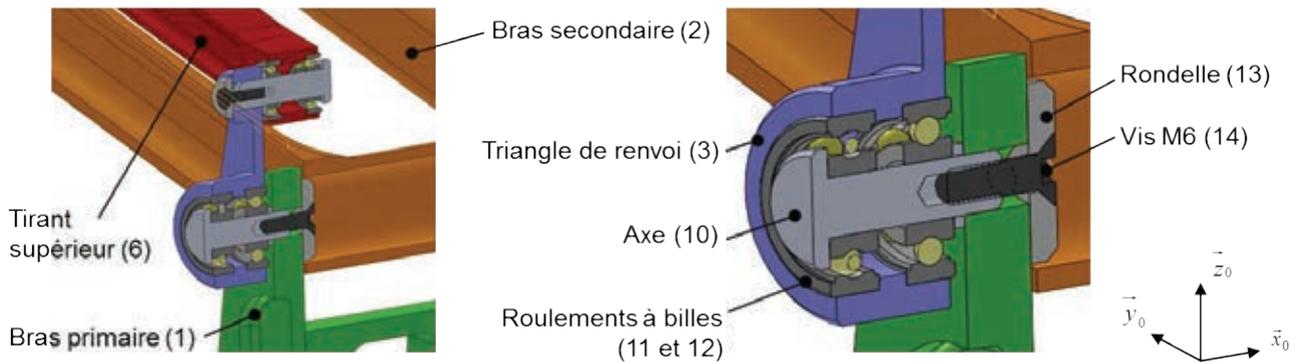


Figure 22. Liaisons entre le triangle de renvoi et les pièces environnantes - Coupe

Le dessin de définition du triangle de renvoi, fabriqué dans un alliage d'aluminium (AlSi7Mg0.3), est fourni dans le document technique DT5. La cadence de fabrication est estimée à 30 pièces/mois pendant 2 ans. Cette pièce est actuellement obtenue par usinage dans la masse sur un centre d'usinage 5 axes.

Question 24 : à partir du document technique DT5, et au vu de la fonctionnalité de l'ensemble, justifier d'un point de vue fonctionnel le choix des références A, B et C et l'utilisation de la spécification 2.

Question 25 : expliquer les spécifications 1 et 2 du dessin de définition au sens de la norme ISO 1101 (Geometrical Product Specifications). Les réponses seront apportées sur le document réponse DR1.

La distance entre les deux roulements à billes (11) et (12) est faible par rapport aux applications courantes de ces composants. Le document constructeur précise que la largeur de ces roulements est de $8^{0}_{-60\mu\text{m}}$ mm, la cote de la bague extérieure est de $\varnothing 30^{-7}_{-23\mu\text{m}}$, et l'angle de rotulage maximal est de 10 minutes d'arc.

Question 26 : vérifier que la tolérance associée à la spécification 1 est suffisante pour assurer le montage de l'axe (10).

Question 27 : rédiger la partie de la gamme de contrôle associée à la vérification des spécifications 1 et 2 sur machine à mesurer tridimensionnelle. Les éléments palpés et les éléments construits seront précisés. Réaliser un schéma permettant de référencer le nom des éléments utilisés dans la gamme.

Dans un premier temps, les longueurs des bras et des tirants constituant le robot sont considérées aux côtes nominales définies sur la figure 19, ce qui signifie qu'aucune dispersion d'usinage n'est prise en compte pour ces pièces. Seul le défaut autorisé par la spécification de localisation du point D appartenant au triangle de renvoi est pris en compte (spécification 2 - DT5). Le point réel de dépose des tubes est alors noté P'.

Dans la suite de l'étude, la seule position du robot étudiée est celle de la phase de dépose dans la zone 2 du convoyeur n°3 (figure 17). Cette configuration correspond à celle de l'étape 3 du cycle de transfert : les valeurs approchées des angles θ_1 et θ_2 sont alors respectivement de 83° et -31° .

Question 28 : dans le cas le plus défavorable, quelle est la valeur de l'angle β formé par les vecteurs \vec{z}_0 et \vec{z}_4 ? En déduire l'impact du défaut considéré sur l'erreur de positionnement des tubes dans la zone de dépose 2. Les coordonnées du vecteur $\overline{PP'}$ dans le repère $R_0 = (O, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ seront précisées (valeurs littérales et numériques).

Afin d'être plus représentatif de la configuration réelle, les tolérances dimensionnelles associées à la tête de prélèvement, aux longueurs des bras et aux longueurs des tirants, sont prises en compte (figure 19). Dans ce cas, l'inclinaison de la tête de prélèvement la plus défavorable est obtenue lorsque les dimensions L_4 et L_6 sont minimales et L_2 est maximale, ce qui correspond à une valeur β de $0,736^\circ$.

Question 29 : déterminer l'impact des défauts considérés sur l'erreur de positionnement des tubes dans la zone de dépose 2. Les dimensions de L_1 et H_4 dans le cas le plus critique seront précisées. Conclure sur la pertinence de la cotation fonctionnelle mise en place au vu de l'erreur de positionnement des tubes tolérée dans les zones de dépose.

PARTIE B3. Industrialisation du triangle de renvoi

Afin de réduire son empreinte environnementale, le groupe LVMH a récemment développé un programme nommé LIFE dans chacune de ses maisons (LVMH Initiatives For the Environment). Recherche de performance environnementale et développement de l'écoconception sont des axes majeurs définissant la stratégie du groupe. De même qu'il a fait appliquer en interne ces principes (constituant sa Charte Environnement), LVMH généralise les clauses environnementales dans ses contrats fournisseurs : respect des réglementations et des normes, utilisation de technologies respectueuses de l'environnement...

Dans cette optique, le fournisseur de la ligne de conditionnement étudiée doit proposer une étude comparative de procédés d'obtention des pièces contenues dans les systèmes vendus à la Maison Dior ; l'objectif étant de minimiser l'impact environnemental, tout en garantissant un coût et un délai de fabrication raisonnable. Actuellement, la totalité des pièces constituant le robot de transfert est usinée dans la masse.

L'objectif de cette partie consiste donc à étudier le procédé de fabrication actuel d'une des pièces du robot de transfert : le triangle de renvoi. Un autre scénario sera ensuite étudié : l'obtention d'un brut par moulage au sable suivi d'un parachèvement sur un centre d'usinage 5 axes. Afin de choisir la gamme optimale, le temps, le coût de fabrication de la pièce et l'impact environnemental seront estimés pour chacune de ces alternatives.

Dans la suite de l'étude, le temps d'occupation machine pour fabriquer une pièce comprendra le temps d'usinage, le temps de changement d'outils et de changement de posages. En première approximation, le coût total de fabrication d'une pièce sera quant à lui estimé en sommant le coût d'occupation machine, celui des outils et de la matière première.

B3.1. Étude du scénario actuel : usinage dans la masse sur un centre d'usinage 5 axes

L'entreprise ayant en charge l'usinage des triangles de renvoi possède trois centres d'usinage capables de produire ces pièces (tableau 4). Leurs caractéristiques techniques détaillées sont fournies dans le document technique DT6.

	Modèle	Nombre d'axes	Puissance broche	Fréquence rotation broche
CU1	DMC 650V	3	14,5 kW	14 000 tr/min
CU2	DMU 65	5	35 kW	14 000 tr/min
CU3	DMU 65	5	Broche de série	

Tableau 4. Caractéristiques des centres d'usinage

Au vu des disponibilités de son parc machine, l'entreprise a fait le choix d'utiliser son centre d'usinage 5 axes équipé d'une motobroche de 35 kW (modèle DMU 65 monoBLOCK®). Le brut d'usinage est un parallélépipède d'aluminium (AlSi7Mg0.3) de dimensions 100 x 160 x 23 mm.

Question 30 : décrire la gamme d'usinage nécessaire à la fabrication du triangle de renvoi. Préciser, pour chaque sous-phase, la mise en position de la pièce, son maintien en position, ainsi que les opérations d'usinage effectuées.

En raison de la faible disponibilité de ses moyens de production, l'industriel souhaite maximiser la productivité.

Question 31 : en s'appuyant sur les documents techniques DT7 à DT9, et en veillant à respecter les limites d'utilisation de la machine, déterminer pour l'ensemble des opérations participant à l'obtention finale des alésages $\varnothing 30_{0}^{+21} \mu\text{m}$:

- la référence des porte-outils et outils utilisés ;
- les conditions de coupe ;
- la puissance de coupe.

Présenter les résultats dans le document réponse DR2. Les calculs effectués seront détaillés.

L'élaboration de la gamme d'usinage a permis de sélectionner une fraise de $\varnothing 50$ mm munies de 7 plaquettes en carbure pour ébaucher les surfaces extérieures (nervures, surface cylindrique de $\varnothing 40$ mm, bossages de $\varnothing 20$ mm). La vitesse de coupe préconisée pour cet outil est de 1 350 m/min, et l'avance de 0,15 mm/dent. Au cours de cette opération, l'engagement radial maximal de la fraise est de 80 %.

Question 32 : déterminer le critère limitant la profondeur de passe maximale pour cette opération d'ébauche. La valeur maximale de cette profondeur de passe sera précisée.

Le temps d'usinage associé à chaque entité géométrique a été déterminé grâce à un logiciel de FAO. Le document technique DT10 présente séparément les deux composantes de cette variable : le temps d'usinage effectif de l'outil dans la matière et le temps passé par l'outil Hors de la Matière (HM : phase d'approche, de retrait...).

Question 33 : à partir des données fournies dans le document technique DT10 et de la gamme établie à la question 30, déterminer le temps d'occupation de la machine pour l'usinage d'un triangle de renvoi. Sachant que les préconisations concernant les conditions de coupe fournies par le fabricant d'outils sont établies pour une durée de vie nominale de 15 minutes, déterminer le coût total de fabrication de la pièce. L'ensemble des résultats sera reporté dans le document réponse DR3.

Le temps et le coût associés à la fabrication du triangle de renvoi sur les deux autres centres d'usinage disponibles dans l'entreprise (CU1 et CU3) ont été déterminés en suivant la même démarche. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 23.

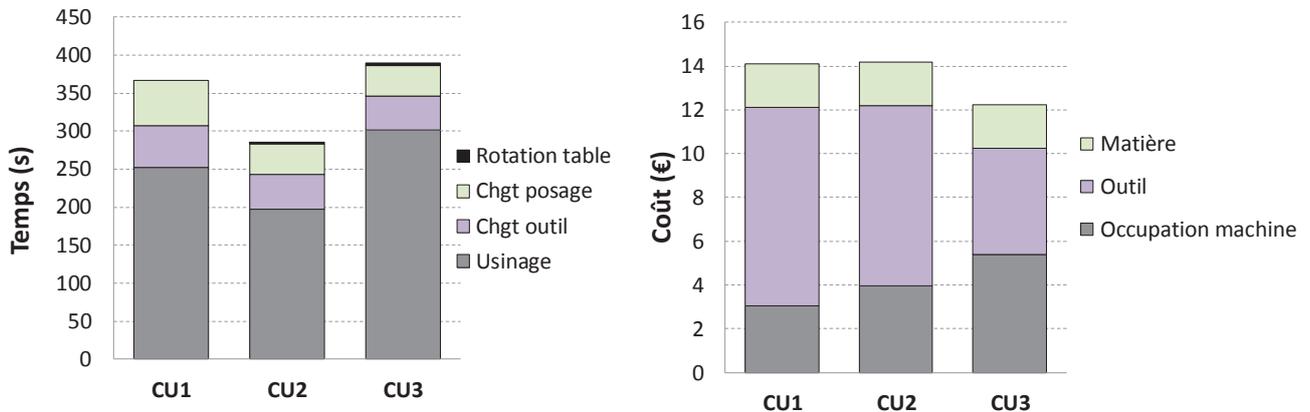


Figure 23. Temps et coût de fabrication en fonction du moyen de production

Question 34 : expliquer les écarts obtenus entre les différents centres d'usinage et conclure sur le choix le plus pertinent à effectuer pour le fabricant.

B3.2. Modification du procédé actuel : obtention du brut par moulage sable

Le procédé « moulage sable à vert - coulée gravité » est envisagé comme procédé d'obtention du brut. Suite à l'étude des surfaces fonctionnelles, des modifications géométriques, validées par le client, ont été apportées sur les nervures (figure 24a). Excepté ce cas particulier, les autres entités géométriques répondent aux mêmes exigences que celles imposées pour les pièces usinées, et définies dans le document technique DT5.

La géométrie du brut de fonderie a été définie suite à une étude de moulage : la position du plan de joint, évident dans le cas de cette pièce, est précisée sur la figure 24b. Des dépouilles de 2 % ont ainsi été appliquées, et des surépaisseurs de 2 mm ont été ajoutées sur les surfaces nécessitant une reprise d'usinage (opération de finition). Le trou de diamètre 26 mm est intégré au brut de fonderie tandis que les deux trous de diamètre 10 mm seront usinés (non intégrés dans le brut).

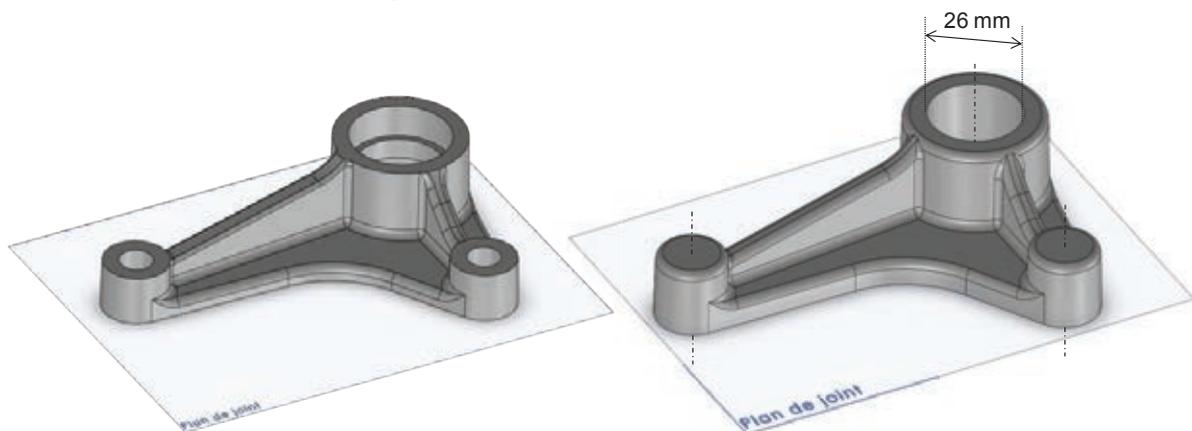


Figure 24. (a) Pièce finale obtenue suite à l'usinage du brut de fonderie (à gauche) (b) Brut de fonderie (à droite)

Question 35 : expliquer les raisons ayant amené le fabricant de ce robot à sélectionner un procédé de fonderie, et plus spécifiquement le « moulage sable à vert - coulée gravité » pour l'obtention du brut de cette pièce. Définir, en vous appuyant sur différents schémas, la géométrie des outillages nécessaires pour la fabrication de ce brut.

Dans un premier temps, le recours à la simulation numérique a lieu afin de déterminer la position des points chauds dans la pièce : seule la phase de solidification est étudiée. Les résultats sont présentés dans le document technique DT11.

Question 36 : quel type de défaut est mis en évidence sur la figure 1 du document technique DT11 ? En vous appuyant sur la figure 2 de ce même document, expliquer la cause de l'apparition de ce défaut, et justifier sa position.

Au vu des dimensions des châssis métalliques disponibles dans l'entreprise et afin d'optimiser la productivité, la coulée de grappes constituées de 3 pièces est envisagée (figure 25). Un système de masselottage est ajouté à cette grappe afin d'éviter le défaut mis en évidence dans la question précédente. L'outil de simulation numérique est alors utilisé pour optimiser la géométrie de ce système de masselottage.

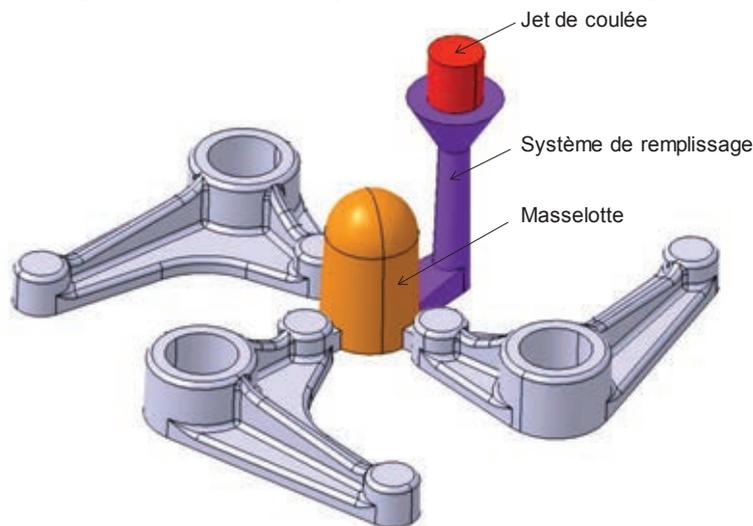


Figure 25. Définition géométrique de la grappe simulée

Question 37 : quelles sont les conditions initiales et les conditions aux limites à définir pour simuler le remplissage de l'empreinte permettant de couler la grappe présentée sur la figure 25 ? Les valeurs numériques de ces paramètres seront précisées.

Deux géométries du système de remplissage sont envisagées. Afin de choisir la plus pertinente, une simulation de la phase de remplissage de l'empreinte a été effectuée dans ces deux configurations (document technique DT11), tout en conservant des conditions initiales et des conditions aux limites identiques. La simulation est stoppée lorsque tous les points de la pièce ont atteint une température inférieure de 10°C à la température du solidus de l'alliage.

Question 38 : analyser les avantages et les inconvénients de la géométrie de chacune des grappes proposées. Déterminer laquelle d'entre elles sera retenue pour l'élaboration du brut de fonderie.

La grappe finale sélectionnée, constituée des trois pièces, du système de remplissage et du système de masselottage, a une masse totale de 600 grammes.

Question 39 : au vu du dessin de définition de la pièce, et en raison du plan de joint sélectionné, quelles surfaces issues du brut de fonderie nécessitent d'être reprises en usinage (opération de finition) ? En envisageant la phase de finition sur le centre d'usinage 5 axes étudié précédemment, déterminer le coût de fabrication du brut de fonderie pour que ce scénario soit économiquement plus intéressant que la solution actuelle (usinage 5 axes dans la masse). Les résultats seront reportés dans le document réponse DR3.

B3.3. Synthèse sur l'industrialisation du triangle de renvoi

Dans le cadre de ses engagements avec Dior, le fabricant du robot de transfert a évalué les impacts environnementaux de la fabrication du triangle de renvoi, en se basant notamment sur la norme ISO14955. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 26.

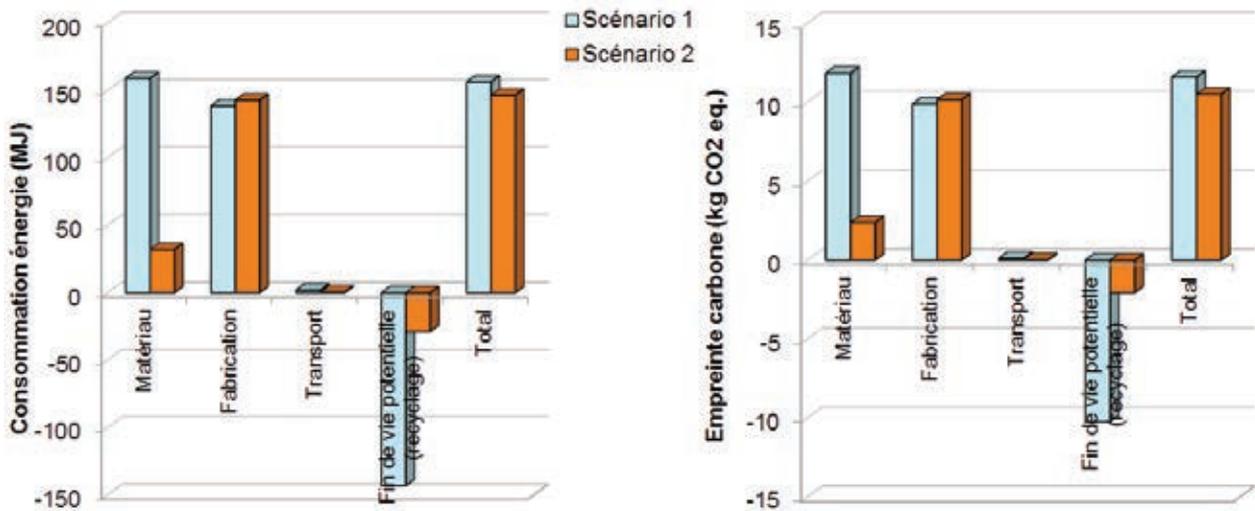


Figure 26. Impact environnemental de la fabrication d'un triangle de renvoi

Question 40 : au vu des résultats obtenus dans les parties précédentes et des nouvelles données fournies, conclure sur la gamme de fabrication à privilégier pour le triangle de renvoi. Cette conclusion est-elle généralisable à toutes les pièces constituant le robot ?

PARTIE C. Synthèse

Question 41 : lister brièvement les changements à effectuer sur le robot de transfert ainsi que sur les postes de travail n°1 et n°2 de la remplisseuse lors d'un changement de production (modification de la hauteur et/ou du diamètre des tubes). Conclure sur le respect ou non de l'exigence de flexibilité imposée par le cahier des charges concernant la diversité dimensionnelle des tubes à conditionner. Quelle méthode pourrait être mise en place afin d'aider l'opérateur dans cette phase complexe ?

Le temps de réalisation des tâches sur chaque poste de travail de la remplisseuse est maximal lorsque les tubes ont un volume important et une hauteur élevée. Le tableau suivant présente le temps nécessaire à la réalisation de ces tâches dans cette configuration.

N° poste	Durée (ms)	N° poste	Durée (ms)
Poste 1	T_1	Poste 5	T_1
Poste 2	525 ms	Poste 6	T_1
Poste 3	500 ms	Poste 7	T_1
Poste 4	475 ms	Poste 8	525 ms

Tableau 5. Durée des tâches par poste de travail

Les postes de travail n°1, n°5, n°6 et n°7 sont actionnés par le même arbre à cames ce qui explique des durées de tâches T_1 similaires.

Question 42 : conclure quant à la capacité de la remplisseuse et du robot de transfert à répondre à l'exigence de cadence imposée par le cahier des charges.