

CORRECTION

Fût de jambe de train d'atterrissage

Mise en situation

Une association de passionnés d'histoire et d'aéronautique souhaite faire revivre un avion de chasse français de 1939, le Dewoitine D551. Son objectif est la fabrication de 4 appareils. Elle sollicite donc un bureau d'études de fonderie pour l'étude et la réalisation de 8 fûts de jambe de train d'atterrissage (4 pour la jambe gauche, 4 pour la jambe droite).

Cette fonderie est spécialisée dans le moulage de pièces en alliages d'aluminium-magnésium, coulées en basse pression.

Le procédé de fabrication du moule initialement retenu est l'impression 3D sable, qui sera ici assimilé au **moulage machine**.



Fût droit de jambe de train

Extrait du cahier des charges :

- pièce : fût de jambe de train d'atterrissage ;
- domaine : aéronautique ;
- alliage : EN AC-42200 S T6 ;
- Rm mini : 270 MPa ;
- Rp0,2 : 220 MPa ;
- masse du brut ébarbé : 6,9 kg ;
- masse volumique : $2\,670\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- pièce noyautée : oui ;
- état de livraison : usiné ;
- tolérances générales de forme du brut : 2 mm ;
- rugosité intérieure et extérieure du brut : maximale Ra 25,4 ;
- nombre de moules : 8 (4 + 4) ;
- nombre d'empreintes par moule : 1.

Travail demandé

PARTIE 1 – Analyse dimensionnelle et géométrique

L'objectif de cette partie est de vérifier que le procédé permet de respecter les caractéristiques dimensionnelles et géométriques du fût de la jambe de train et de proposer une cotation partielle de la pièce brute.

Question 1.1 | Analyser les 3 spécifications suivantes :

DT1 à DT6, DT8
DR1

Ø 86 H7

$\perp$	0.05	A
---------	------	---

$\sqrt{Ra\ max\ 25.4}$

Préciser si ces spécifications peuvent être respectées sur le brut de fonderie.

Justifier votre réponse.

Voir DR1

Question 1.2 | Justifier pourquoi une tolérance H7 peut être nécessaire sur le Ø 86.

DT1, DT8 et DT9
Feuille de copie

La surface considérée participe d'une liaison pivot et nécessite donc un usinage précis.

Question 1.3 | Proposer, compte-tenu de l'usinage possible des surfaces S1 et S2, les surépaisseurs envisageables au regard des normes.

DT1, DT7 et DT8
Feuille de copie

Compte tenu des valeurs des dimensions et des normes, les surépaisseurs d'usinage seront comprises entre 0,7 et 1,4 mm (Ø 86 H7), et 1,1 et 2,2 mm ($145^{0/-0,5}$).

BTS FONDERIE - Corrigé		Session 2025
Épreuve E4 : conception préliminaire	Code : 25FO4CP/COR	Page 2 / 14

Question 1.4 | **Proposer** une cotation partielle de la pièce brute de fonderie (2 cotes Cb1 et Cb2), avec les tolérances attendues. On notera que la classe de tolérance de l'impression 3D correspond au moulage machine.

Voir DR2

Question 1.5 | **Citer** le facteur important à prendre en compte dans le dimensionnement de l'empreinte du moule.

Le retrait qui sera de 1,25 %.

PARTIE 2 – Choix de l'alliage

L'objectif de cette partie est de valider le choix de la nuance proposée par le fournisseur.

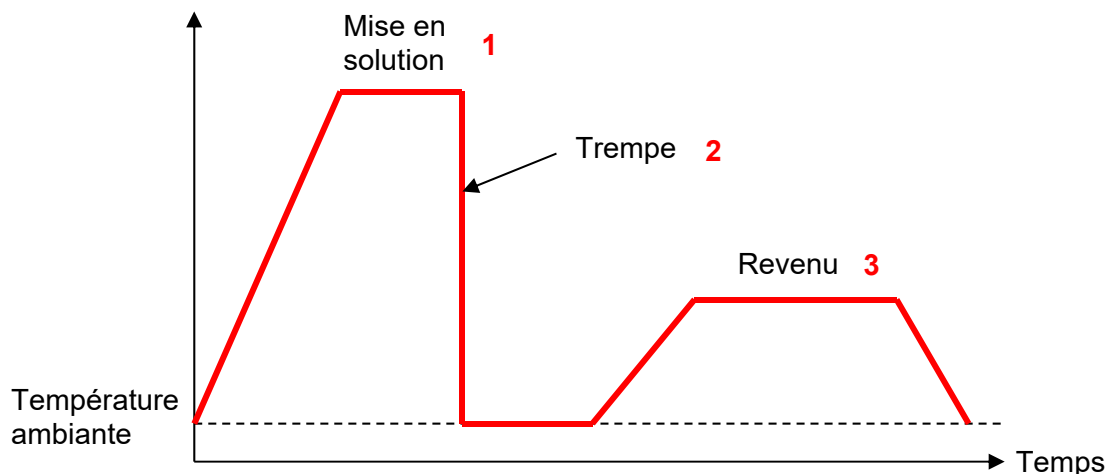
Question 2.1 | **Donner** la désignation chimique de l'alliage EN AC-42200.
Indiquer sa signification complète.
Donner la signification de S T6.

Désignation chimique $AlSi7Mg0,6$

Norme européenne, alliage moulé, alliage à base d'aluminium avec 7 % de silicium et 0,6 % de magnésium

S T6 : S = alliage coulé en sable, T6 = traitement thermique de trempe et revenu

Question 2.2 | **Expliquer**, à l'aide d'un graphique, les différentes étapes du traitement thermique.
Décrire les influences de ce traitement thermique.



1 : mise en solution : 10 h à 540 °C

2 : trempe : eau + polymère en chambre tempérée

3 : revenu : 10 h à 160 °C

Utilité : renforcer les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la pièce

Question 2.3

DT11

Feuille de copie

Citer, parmi celles proposées, la nuance d'alliage d'Aluminium-Silicium adaptée à la coulée basse pression en moule sable.

Préciser les informations techniques associées à cette nuance.

Expliquer leur influence :

- masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) ;
- intervalle de solidification ($^{\circ}\text{C}$) ;
- retrait moyen (‰).

Désignation chimique	Procédé de moulage recommandé	Masse volumique (g/cm^3)	Intervalle de solidification ($^{\circ}\text{C}$)	Retrait moyen (‰)
AlSi7Mg0.3	K	2,67	615 - 555	12,5
AlSi7Mg0.6	S	2,65	600 - 555	12,5
AlSi10Mg	D	2,66	595 - 555	11,5

Masse volumique de $2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$: pièce aéronautique, donc importance d'avoir un alliage léger (masse globale et consommation de carburant).

Intervalle de solidification : 45°C . Les défauts liés au retrait volumique se forment au cours de l'intervalle de solidification, ce qui diminue les caractéristiques mécaniques obtenues. Afin de les garantir, le fondeur devra employer les méthodes de calcul du dispositif d'alimentation.

Retrait moyen $12,5 \text{ ‰}$: pour garantir le respect dimensionnel de toutes les cotes, le fondeur doit connaître la valeur exacte du retrait moyen.

Question 2.4

DT10 et DT14

Feuille de copie

Indiquer, à partir de la nuance d'alliage proposée par le fournisseur, la composition chimique visée.

Expliquer l'importance de contrôler la teneur en fer.

Expliquer le rôle du magnésium.

Conclure sur le choix de cette nuance.

Composition chimique

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	Autres chaque	Autres total	Al
A-S10G	min.	9,00	/	/	/	0,20	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
(43100)	Max.	11,00	0,55	0,10	0,45	0,45	0,10	0,05	/	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	
A-S7G06	min.	6,50	/	/	/	0,45	/	/	/	/	/	0,08	/	/	le reste
(42200)	Max.	7,50	0,19	0,05	0,10	0,70	0,07	/	/	/	/	0,25	0,03	0,10	
A-S5U3G	min.	4,50	/	2,60	/	0,15	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
(45100)	Max.	6,00	0,60	3,60	0,55	0,45	0,20	0,10	/	0,10	0,05	0,25	0,05	0,15	
A-S8U3	min.	7,50	/	2,00	0,15	0,05	/	/	/	/	/	/	/	/	le reste
(46200)	Max.	9,50	0,80	3,50	0,65	0,55	1,20	0,35	/	0,25	0,15	0,25	0,05	0,25	

Teneur en fer : les alliages d'aluminium sont avides de fer, le fondeur devra être vigilant pour éviter le contact direct entre l'alliage d'aluminium et le tube d'injection (poteyage). Risque de baisse des caractéristiques mécaniques.

Rôle du magnésium : pendant le traitement thermique, la présence de magnésium permet le durcissement structural par la formation du composé Mg_2Si . Les caractéristiques mécaniques augmentent.

Cette nuance avec sa faible teneur en fer et sa teneur importante en magnésium est la plus adaptée, d'une part à la coulée basse pression en moule sable, d'autre part au type de pièce au vu des caractéristiques mécaniques demandées.

PARTIE 3 – Étude mécanique

L'objectif de cette partie est de valider le choix de la matière en fonction des contraintes appliquées à la pièce.

Question 3.1 | **Identifier** la sollicitation principale qui s'exerce sur la pièce.

DT15 et DT16

Feuille de copie

Sollicitation de flexion

Question 3.2 | **Calculer** la contrainte maximale admissible par le matériau, en tenant compte du coefficient de sécurité.

DT9 et DT18

Feuille de copie

$$\sigma = 220 / 7 = 31,43 \text{ MPa}$$

Question 3.3 | **Calculer** mf_z , moment fléchissant dans la section (S), sachant que $F_y = 2\,650 \text{ N}$.

DT16

Feuille de copie

$$mf_z = 2\,650 \times 732,5 = 1\,941\,125 \text{ Nmm}$$

Question 3.4 | **Calculer** le moment quadratique de la section (S).

DT16 et DT17

Feuille de copie

$$I(G,z) = \pi / 64 (106^4 - 85^4) = 3\,634\,777 \text{ mm}^4$$

Question 3.5 | **Déterminer** la distance de la fibre la plus éloignée de la fibre neutre.

DT16

Feuille de copie

Justifier votre réponse.

$$y = 106 / 2 = 53 \text{ mm}$$

Pour la suite du calcul, on considérera : $mf_z = 1\,950\text{ N}\cdot\text{m}$ et $y_{\max} = 53\text{ mm}$.

Question 3.6 | **Calculer** la contrainte maximale dans la section (S).

DT17

Feuille de copie

$$\sigma = 1\,941\,125 \times 53 / 3\,634\,777 = 28,3\text{ MPa}$$

Question 3.7 | **Déterminer** si la contrainte maximale permet de valider le choix de la matière.

DT18

Feuille de copie

Justifier votre réponse.

$\sigma < 31,43\text{ MPa}$, la matière choisie résiste donc aux sollicitations et est acceptable.

PARTIE 4 – Moulage et coulée basse pression

L'objectif de cette partie est d'adapter la conception de la pièce au procédé.

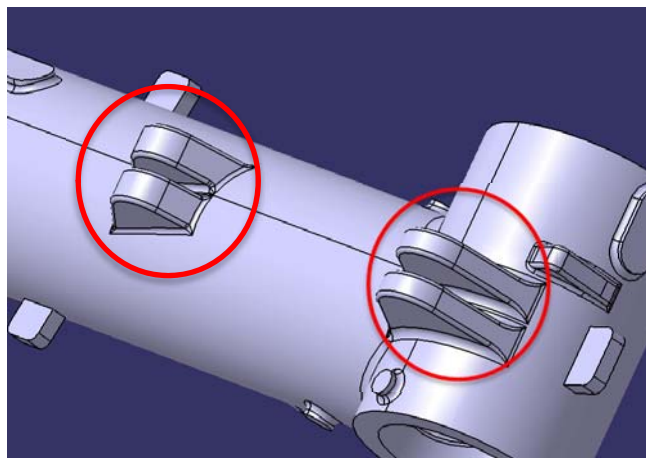
Des simulations numériques de remplissage et de solidification ont été réalisées, des points chauds et des porosités apparaissent. L'expérience de la fonderie montre qu'en dessous d'une épaisseur des lames de sable de 15 mm, le risque de casse de celles-ci à la coulée est élevé.

Question 4.1 | **Déterminer** l'épaisseur des lames de sable moulant les zones entourées sur la figure ci-dessous.

DT20

Feuille de copie

Proposer des modifications sur la pièce et **citer** les incidences possibles.



Incidences possibles = retassures

Aménagements sur la pièce : suppression des lames de sable par ajout de matière

Le bureau d'étude a validé la modification de la pièce. De nouvelles simulations de remplissage et de solidification ont été réalisées. Les images de simulation montrent des défauts sur la pièce et les dernières zones de solidifications

Question 4.2 | **Proposer**, compte tenu des résultats de la simulation, des modifications permettant d'obtenir une pièce saine, sans changer sa forme.

DT19

Feuille de copie

Justifier ces modifications.

BTS FONDERIE - Corrigé		Session 2025
Épreuve E4 : conception préliminaire	Code : 25FO4CP/COR	Page 6 / 14

Masselotage et refroidisseurs : le masselotage permet d'alimenter correctement en métal chaud une zone massive, les refroidisseurs vont permettre de refroidir une zone précise de la pièce.

Question 4.3 | **Citer**, compte tenu des exigences de sécurité et de la géométrie globale de la pièce, les trois avantages de la coulée basse pression.
DT13 et DT14
Feuille de copie

Très bonne précision dimensionnelle
Caractéristiques des alliages améliorées de 10 %
Possibilité de couler en atmosphère neutre

En basse pression, on respecte quelques principes fondamentaux :

- le refroidissement dans le moule (orienté de haut en bas) ;
- le remplissage du moule (rapide et sans turbulences).

Ces deux principes sont satisfaits notamment par la détermination du diamètre du col de la buse d'injection.

Question 4.4 | **Calculer** le diamètre du col d'injection. On considérera que l'épaisseur moyenne de la pièce est $e = 10$ mm et que le poids de la grappe est de 13,8 kg.
Mise en situation
DT21
Feuille de copie

$$13,8 / 2,65 = 5,2 \text{ dm}^3$$
$$\alpha = e + 1 = 11 \text{ mm}$$
$$d = (5\,200\,000 / (120 \times 11))^{0.5} = 62,8 \text{ mm}$$

Question 4.5 | **Citer** le gaz utilisé pour exercer la pression d'injection sur l'alliage. **Justifier** l'utilisation d'un gaz neutre.
DT13
Feuille de copie

Alliage d'aluminium donc azote. Son rôle est d'éviter l'oxydation de l'aluminium.

Question 4.6 | **Conclure** quant au choix retenu du procédé basse pression. **Justifier** votre réponse.
DT14
Feuille de copie

Compte tenu des caractéristiques mécaniques et de la fonction de la pièce, de l'alliage retenu, le procédé coulée basse pression en moulage sable paraît très adapté pour ce type de pièce.

PARTIE 5 – Devis

On souhaite comparer le coût d'un moule obtenu par impression 3D avec un outillage réalisé par un modelleur sur commande numérique et un moulage en sable à prise chimique. Pour la fabrication de l'outillage, il sera nécessaire de prendre en compte un fût droit et un fût gauche. On effectuera le comparatif sur 4 pièces. On rappelle que la masse d'une grappe est de 13,8 kg.

Calcul du coût en impression 3D

BTS FONDERIE - Corrigé		Session 2025
Épreuve E4 : conception préliminaire	Code : 25FO4CP/COR	Page 7 / 14

Question 5.1

DT22, DT24

Feuille de copie

DR3

Calculer le volume de sable, en dm^3 , utilisé pour la réalisation du moule par impression 3D, avant dépoudrage.

En déduire la masse du moule sorti de l'imprimante.

Calculer le coût du sable pour un moule et le **reporter** dans le document réponse.

$$\text{Volume} = 10,8 \times 4,35 \times 1,5 \times 2 = 140,94 \text{ dm}^3$$

$$\text{Masse} = V \times \rho = 140,94 \times 1,5 = 211,4 \text{ kg}$$

$$\text{Coût du sable} = 211,4 \times 0,10 = 21,14 \text{ €}$$

Dès que le moule est sorti de la machine, il doit être dépoudré pour ôter le sable qui n'a pas été durci par le liant.

Question 5.2

DT23, DT24

Feuille de copie

DR3

Identifier, dans le processus de fabrication, le moment correspondant au dépoudrage.

Calculer le coût du dépoudrage et le **reporter** dans le document réponse.

Opération : 60

$$\text{Coût du dépoudrage} = 1,5 \times 25 = 37,5 \text{ €}$$

Question 5.3

DT22, DT24

Feuille de copie

DR3

Estimer le temps de fabrication d'un moule sur l'imprimante 3D.

Calculer la consommation de liant.

En déduire le coût du liant et le **reporter** dans le document réponse.

Épaisseur moule : 300 mm, vitesse d'impression $V = 21.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

$$\text{Donc } t = 300 / 21,6 = 13,88 \text{ h}$$

$$\text{Consommation de liant} = 41.7 \times 13,88 = 579 \text{ l}$$

$$\text{Coût du liant} = 579 \times 2 = 1\,158 \text{ €}$$

Après dépoudrage complet, le moule est passé à l'enduit.

Question 5.4

Feuille de copie

Justifier le passage d'un enduit sur l'empreinte.

Permet d'obtenir un meilleur état de surface sur la pièce et limite le risque d'érosion du sable dans le moule.

Question 5.5

DT24

Feuille de copie

DR3

Calculer la quantité d'enduit nécessaire.

En déduire le coût de l'enduit.

Calculer le coût de main d'œuvre nécessaire au passage du moule à l'enduit.

En déduire le coût de passage à l'enduit et le **reporter** dans le document réponse.

Quantité enduit = $3,3 \times 1,2 = 3,96$ l/moule
 Coût enduit = $3,96 \times 2 = 7,92$ €
 Coût main d'œuvre = $50 \times 25 / 60 = 20,83$ €
 Coût de passage à l'enduit = $7,92 + 20,83 = 28,75$ €

Question 5.6 | **Déterminer** le coût de la fusion pour une pièce.

DT24

Feuille de copie

DR3

Déterminer le coût total pour une pièce.

En déduire le coût pour 4 pièces.

Reporter ces coûts dans le document réponse.

Coût fusion = $13,8 \times 20 = 276$ €
 Coût total pièce brute = coût d'un moule + coût fusion
 Coût total d'un moule = $21,14 + 37,5 + 1\,158 + 28,75 = 1\,245,39$ €
 Coût total pièce brute = $1\,245,39 + 276 = 1\,521,39$ €
 Coût pour 4 pièces = $1\,521,39 \times 4 = 6\,085,56$ €

Calcul du coût des outillages (modèles + boîtes à noyaux) sur commande numérique en résine usinable (LAB) et du coût du moule de fonderie

Question 5.7 | **Déterminer** le coût d'un outillage complet.

DT24

Feuille de copie

DR3

Déterminer le coût du sable pour un moule (on négligera le volume de l'empreinte).

Déterminer le coût de fabrication d'un moule.

Déterminer le coût de fusion d'une pièce.

Reporter ces coûts dans le document réponse.

Coût outillage = coût résine + coût usinage + coût modelage
 Coût résine = $350 \times 20 / 75 = 93,3$ €
 Coût usinage = $20 \times 100 = 2\,000$ €
 Coût modelage = $30 \times 50 = 1\,500$ €
 Donc coût outillage = $93,3 + 1\,500 + 2\,000 = 3\,593,3$ €
 Coût sable = $360 \times 0,07 = 25,2$ €
 Coût de fabrication moule = $4 \times 25 = 100$ €
 Coût fusion = $13,8 \times 20 = 276$ €

Question 5.8 | **Calculer** le coût d'une pièce unitaire brute.

Mise en situation

DT24

Feuille de copie

DR3

Effectuer le calcul pour une série de 4 pièces.

Reporter ces coûts dans le document réponse.

Coût total pièce brute = $3\,593,3 + 25,2 + 100 + 276 = 3\,994,5$ €
 Coût pour 4 pièces = $3\,593,3 + 25,2 \times 4 + 100 \times 4 + 276 \times 4 = 5\,198,1$ €

Question 5.9

DR4

Feuille de copie

Tracer la courbe d'évolution du coût de fabrication en fonction du nombre de pièces réalisées en impression 3D.

Conclure sur l'intérêt ou non de fabriquer les moules en impression 3D.

Justifier votre réponse.

Voir DR4

Nous constatons qu'au-delà de 3 pièces, le coût de l'impression 3D devient plus important que le coût moule fonderie. La technique de l'imprimante 3D est intéressante dans ce cas particulier, pour la souplesse de sa mise en œuvre, et les délais réduits, car la fonderie peut traiter l'ensemble du processus.

Question 1.1

Ø 86 H7

Type de spécification : tolérance dimensionnelle

Élément tolérancé : cylindre de diamètre 86 mm

Dimension minimale : 86 mm

Dimension maximale : 86,035 mm

Condition de conformité : la dimension s'inscrit dans la tolérance

 0.05 A

Type de spécification : perpendicularité (tolérance d'orientation)

Élément tolérancé : surface plane perpendiculaire au cylindre A

Condition de conformité : la perpendicularité est inférieure à 0,05 mm

$\sqrt{Ra \max 25.4}$

Type de spécification : rugosité (état de surface)

Élément tolérancé : toutes surfaces brutes

Condition de conformité : les surfaces brutes présentent une rugosité inférieure ou égale à 25,4 μm

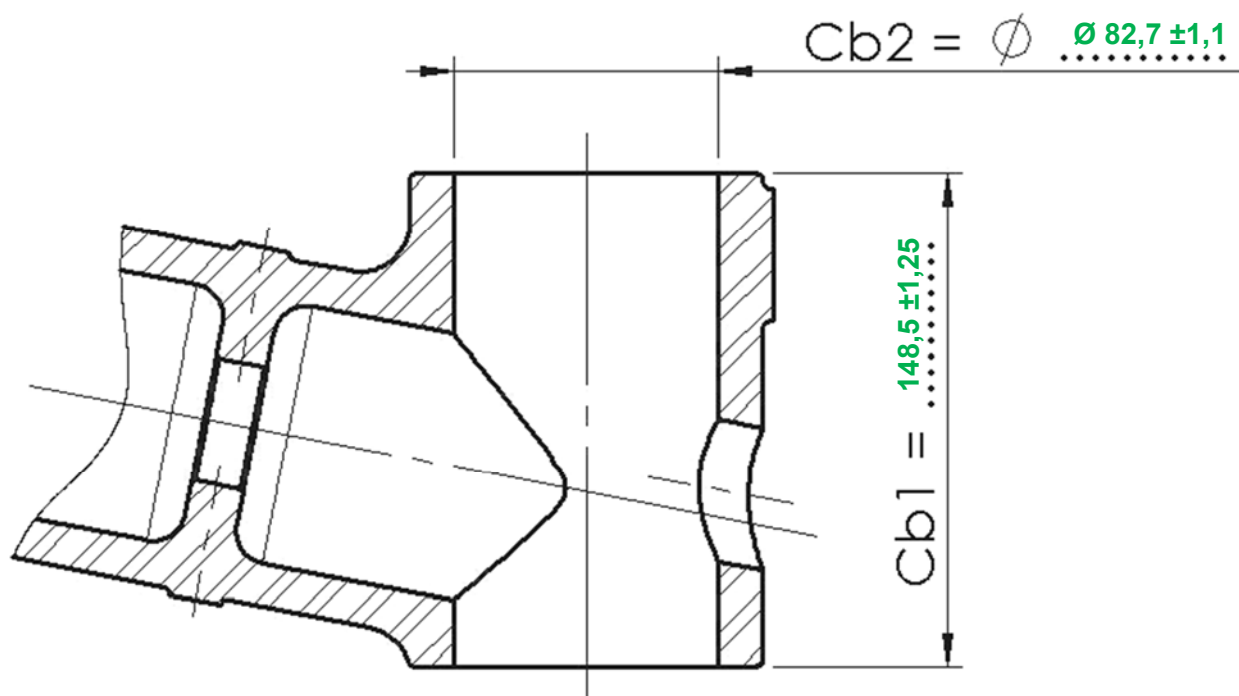
Préciser si ces spécifications peuvent être respectées sur le brut de fonderie. **Justifier** votre réponse.

La spécification Ø 86 H7 est un ajustement précis et ne peut être obtenue que par un usinage.

Le procédé moulage sable autorise une rugosité maximale de 25,4 μm (DT5)

Les tolérances de perpendicularité des pièces moulées étant supérieures à 0,05 (DT4), la condition ne peut être remplie sur le brut.

Question 1.3 | **Proposer** une cotation partielle de la pièce brute de fonderie (2 cotes *Cb1* et *Cb2*), avec les tolérances attendues.



DR3 – Document réponse 3

Questions 5.1 à 5.3 et 5.5 à 5.8

Calcul du coût en impression 3D			
Coût du sable	21,14 €		
Coût du dépoudrage	37,5 €		
Coût de la consommation de liant	1158 €		
Coût du passage de l'enduit	28,75 €		
Coût de la fusion	276 €		
COÛT TOTAL PIÈCE UNITAIRE	1 521,39 €	COÛT TOTAL POUR 4 PIÈCES	6 085,56 €
Calcul du coût des outillages (modèles + boîtes à noyaux), sur commande numérique en résine usinable et du coût du moule de fonderie.			
Coût de l'outillage complet	93,3€	Coût de l'outillage complet	93,3 €
Coût du sable	25,2 €	Coût du sable x 4	100,8 €
Coût de la fabrication du moule	100 €	Coût de la fabrication du moule x 4	400 €
Coût de la fusion	276 €	Coût de la fusion x 4	1 104 €
COÛT TOTAL PIÈCE UNITAIRE	3 994,5 €	COÛT TOTAL POUR 4 PIÈCES	5 198,1 €

DR4 – Document réponse 4

Question 5.9 | **Tracer** la courbe d'évolution du coût en impression 3D.

