

Le candidat est invité à formuler toute hypothèse qui lui semblerait nécessaire pour pouvoir répondre aux questions posées.

Sauf indication, vous réponderez sur feuille de copie. Tous les résultats seront encadrés.

CENTRE D'USINAGE 5 AXES A GRANDE VITESSE.

Mise en situation.

L'usinage, opération de transformation d'un produit par enlèvement de matière, est à la base de la fabrication de produits dans les industries mécaniques. On appelle le moyen de production associé à une opération d'usinage une machine outil ou un centre d'usinage.

La génération d'une surface par enlèvement de matière est obtenue grâce à un outil muni d'au moins une arête coupante. L'outil se déplace par rapport à la pièce installée sur la machine outil. C'est le mouvement d'avance.

Le fraisage est un procédé d'usinage particulier dans lequel l'outil doit en plus tourner sur lui-même par rapport au bâti de la machine outil pour pouvoir couper la matière. C'est le mouvement de coupe.

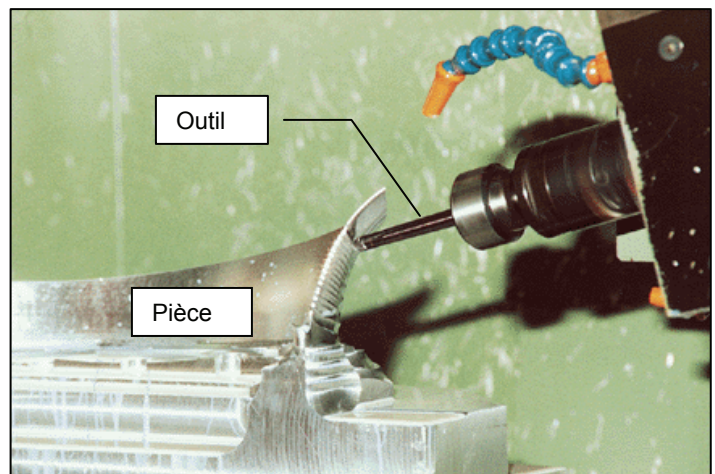


Figure 1 : Opération d'usinage de forme complexe

Les contraintes d'accessibilité pour l'usinage de formes complexes (figures 1 et 2) justifient l'utilisation de machines outils spécifiques capables :

- de translater l'outil par rapport à la pièce dans 3 directions orthogonales
- d'orienter l'axe de l'outil par rapport à la pièce autour de 2 directions.



Figure 2 : Exemple de pièce de forme complexe

Un « **axe** » sur une machine outil est un système qui gère l'un des mouvements d'avance de l'outil par rapport à la pièce. Un « **axe** » est composé d'une partie commande et d'une partie opérative. Cette partie opérative est généralement constituée :

- d'un modulateur d'énergie (c'est le préactionneur)
- d'un moteur (c'est l'actionneur),
- d'un mobile (c'est l'élément dont on veut commander le déplacement),
- d'un système de transformation de mouvement entre le moteur et le mobile,
- de capteurs (généralement un capteur de vitesse et un capteur de position).

Le centre d'usinage « **5 axes** » **HSM 600U** de la société **Mikron**, représenté sur la figure 3, permet l'usinage de formes complexes. Il est constitué d'un bâti supportant :

- 2 « **axes** » pour la mise en mouvement de l'outil par rapport au bâti. Ces 2 translations sont notées « X » et « Z ».
- 3 « **axes** » pour la mise en mouvement de la pièce par rapport au bâti. Une troisième translation est notée « Y » et les 2 rotations sont notées « B » et « C ».
- un dispositif de mise en rotation de l'outil autour de son axe géométrique par rapport au bâti. Cette rotation génère le mouvement de coupe.

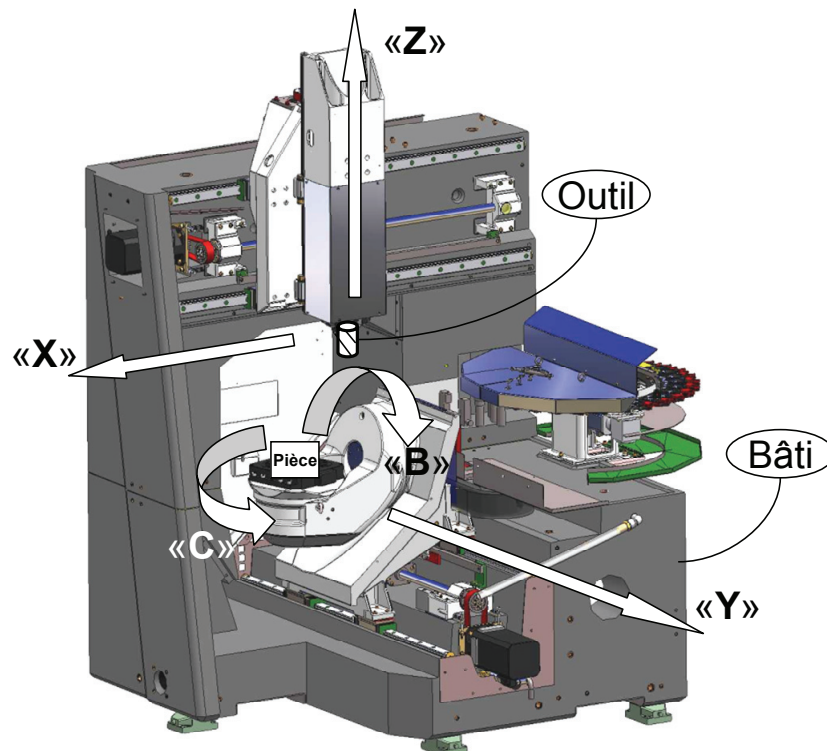
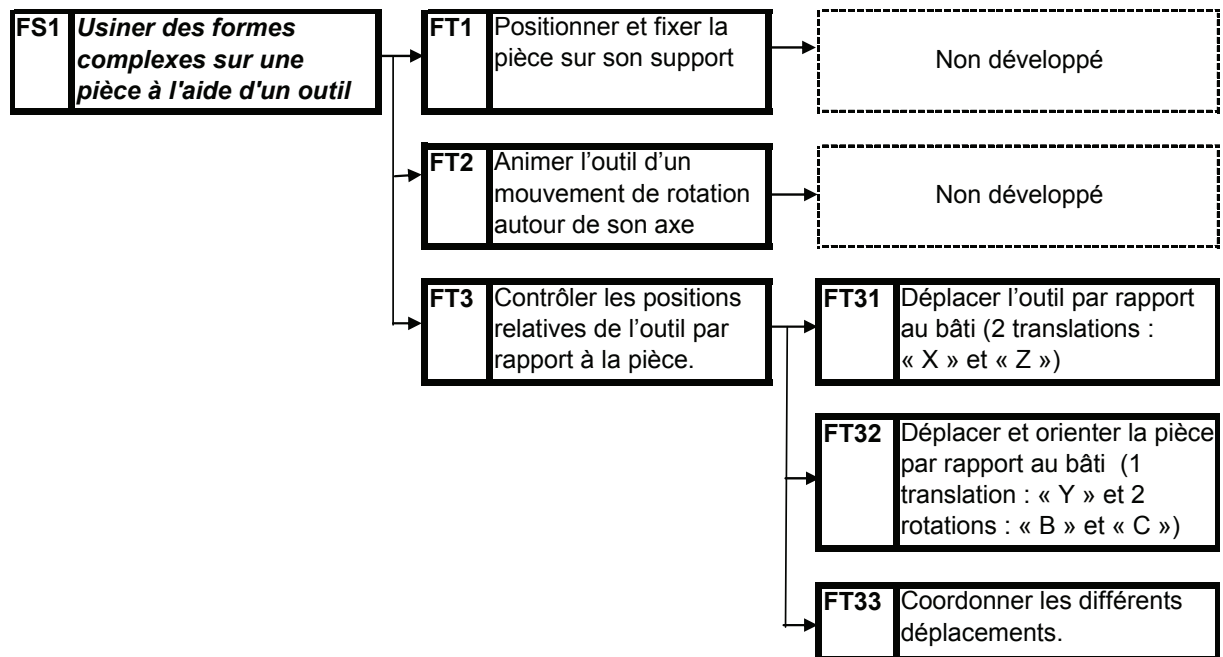


Figure 3 : Vue globale du centre d'usinage avec repérage des « axes »

FAST descriptif partiel du centre d'usinage « 5 axes ».



Partie 1 : Etude de la fonction technique FT3: Contrôler les positions relatives de l'outil par rapport à la pièce.

L'objectif de cette partie est d'exprimer la vitesse de l'extrémité de l'outil par rapport à la pièce en fonction du paramétrage proposé.

Performances des axes « X », « Y » et « Z » du centre d'usinage.

	Variables	Course	Vitesse maximale	Couple moteur
Axe « X » (longitudinal)	$x(t)$	800 mm	40 m/min	42 Nm
Axe « Y » (transversal)	$y(t)$	600 mm	40 m/min	Non communiqué
Axe « Z » (vertical)	$z(t)$	500 mm	40 m/min	Non communiqué

Performances des axes « B » et « C » du centre d'usinage.

	Variables	Course	Vitesse maximale	Accélération angulaire	Couple moteur
Axe « B »	$\theta_1(t)$	+ 30° / - 110°	150 tours/min	50 rd/s ²	680 Nm
Axe « C »	$\theta_0(t)$	360°	250 tours/min	100 rd/s ²	340 Nm

Schéma cinématique et paramétrage

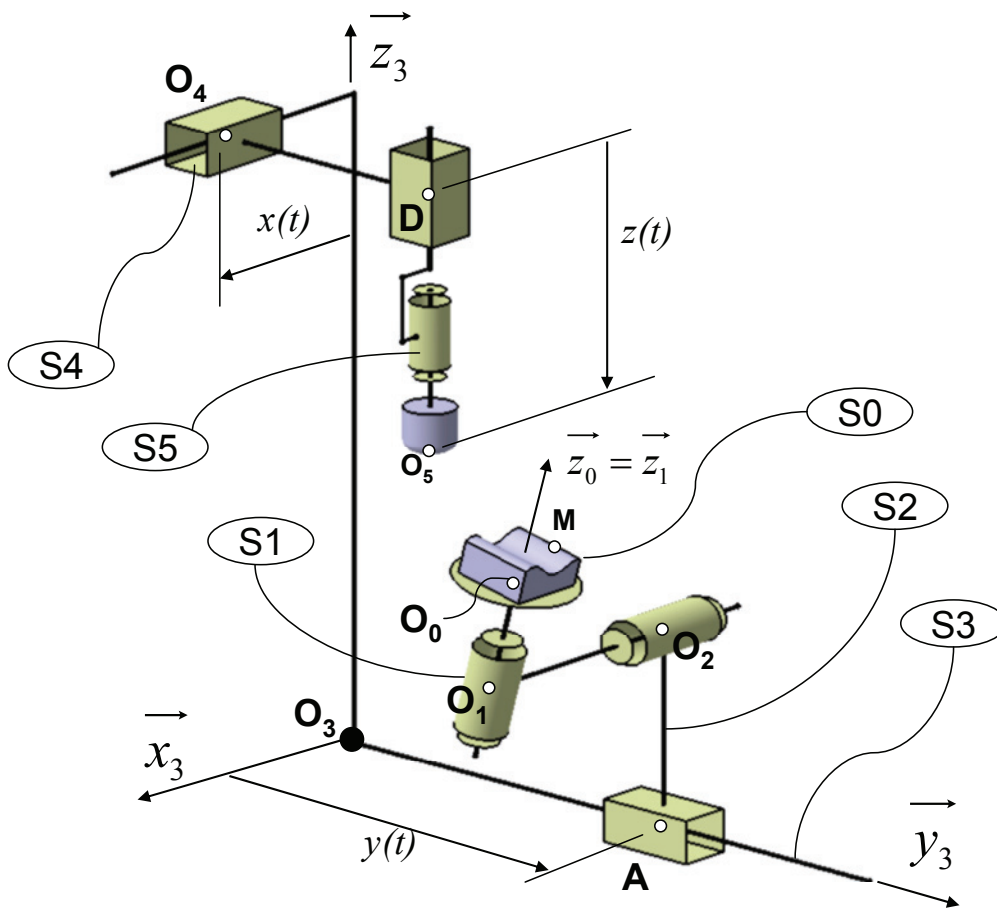


Figure 4 : schéma cinématique

$$\overrightarrow{O_3O_4} = x(t) \cdot \overrightarrow{x_3} + l_3 \cdot \overrightarrow{z_3}$$

$$\overrightarrow{AO_2} = l_2 \cdot \overrightarrow{z_3}$$

$$\overrightarrow{O_4D} = l_4 \cdot \overrightarrow{y_3}$$

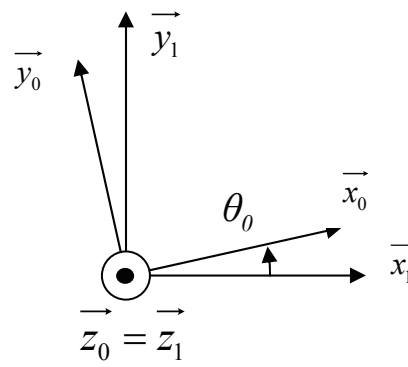
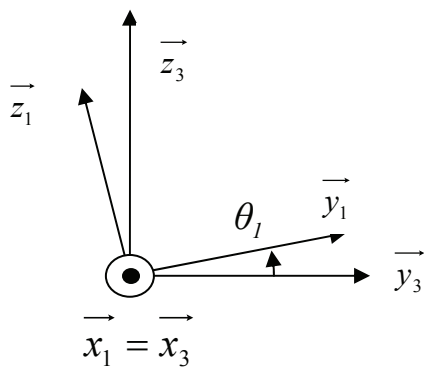
$$\overrightarrow{O_3A} = y(t) \cdot \overrightarrow{y_3}$$

$$\overrightarrow{O_2O_1} = l_1 \cdot \overrightarrow{x_3}$$

$$\overrightarrow{DO_5} = z(t) \cdot \overrightarrow{z_3}$$

$$\overrightarrow{O_1O_0} = l_0 \cdot \overrightarrow{z_0}$$

Où l_0, l_1, l_2, l_3 et l_4 sont des constantes liées à l'architecture de la machine.



	Masse	Centre d'inertie	Repères associés
Solide S0 (pièce usinée et son support)	M_0	G_0	$R_0=(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$
Solide S1	M_1	G_1	$R_1=(O_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$
Solide S2	M_2	G_2	$R_2=(O_2, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$
Solide S3 (le bâti)	M_3	G_3	$R_3=(O_3, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$
Solide S4	M_4	G_4	$R_4=(O_4, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$
Solide S5	M_5	G_5	$R_5=(O_5, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$

1. Exprimer $\overrightarrow{O_3O_5}$ dans la base du référentiel R3.
2. Définir et caractériser le lieu géométrique du point O_5 (extrémité de l'outil) dans son mouvement par rapport au repère R3, lorsque l'on commande les axes « X » et « Z ».
3. Donner l'expression, dans la base du référentiel R3, de la vitesse du point O_5 lié au solide 5, dans son mouvement par rapport à R3, en fonction de \dot{x}, \dot{z} . Cette vitesse sera notée :

$$\overrightarrow{V_{O_5 \in S_5 / R_3}}$$

4. Calculer la valeur maximale de la norme du vecteur vitesse du point O_5 , lié au solide 5, dans son mouvement par rapport à R3.
5. Exprimer $\overrightarrow{O_3O_0}$ dans la base du référentiel R3.
6. Donner l'expression, dans la base du référentiel R3, de la vitesse du point O_0 , lié à S0, dans son mouvement par rapport à R3. Cette vitesse sera notée :

$$\overrightarrow{V_{O_0 \in S_0 / R_3}}$$

7. Exprimer le vecteur rotation de S0 par rapport à S3, noté $\overrightarrow{\Omega_{(S_0/R_3)}}$, dans la base du référentiel R1 en fonction de $\dot{\theta}_0$ et de $\dot{\theta}_1$.

La surface usinée est définie comme un ensemble de points M de coordonnées (x_M, y_M, z_M) dans le repère R0.

On notera $\overrightarrow{V_{M \in S_0 / R_3}}$ le vecteur vitesse du point M lié à S0, dans son mouvement par rapport à R3.

8. Donner la relation entre les vecteurs $\overrightarrow{V_{M \in S_0 / R_3}}$, $\overrightarrow{V_{O_0 \in S_0 / R_3}}$ et $\overrightarrow{\Omega_{(S_0/R_3)}}$.

9. Etablir la relation vectorielle donnant la vitesse de O_5 appartenant à S_5 dans son mouvement par rapport à S_0 , notée $\overrightarrow{V}_{O_5 \in S_5 / R_0}$, en fonction notamment des vecteurs précédemment déterminés : $\overrightarrow{V}_{O_5 \in S_5 / R_3}$, $\overrightarrow{V}_{M \in S_0 / R_3}$ et $\overrightarrow{\Omega}_{(S_0/R_3)}$.

10. Le point O_5 doit se déplacer sur la surface usinée définie comme le lieu des points M . Que devient alors cette relation ?

En phase d'usinage, on va considérer que le point O_5 se déplace sur la surface usinée (lieu des points M). Pour uniformiser la qualité de la forme usinée, la norme du vecteur vitesse de O_5 , dans son mouvement par rapport à R_0 , devra être constante. Cette contrainte participera à la définition des lois de variation de x , y , z , θ_1 et θ_0 .

Partie 2 : Etude de la fonction technique FT2: Animer l'outil d'un mouvement de rotation autour de son axe.

2.1 : Quantification des efforts dans les paliers.

L'objectif de cette partie est de quantifier le chargement des paliers de guidage de l'électrobroche sous l'effet d'un décalage du centre d'inertie de l'outil par rapport à son axe de rotation.

On propose de modéliser le guidage en rotation du rotor de l'électrobroche par une liaison rotule pour le palier avant et par une liaison linéaire annulaire pour le palier arrière. (Voir schéma architectural figure 5)

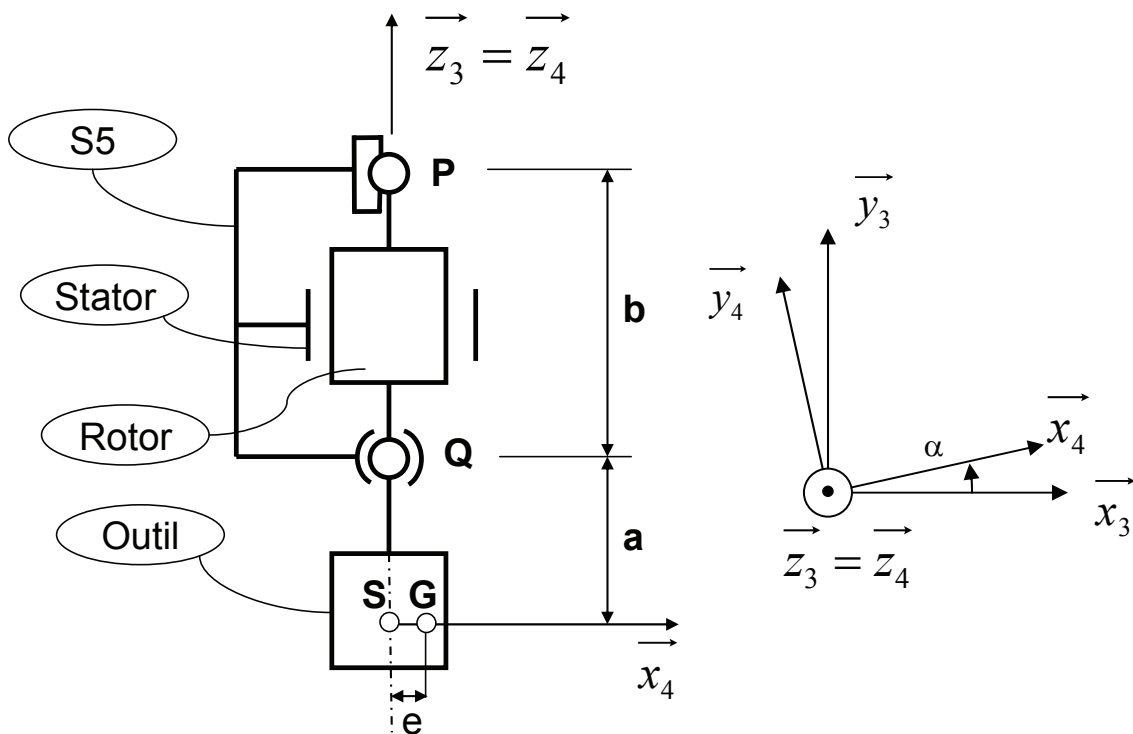


Figure 5 : Schéma architectural de la broche et paramétrage

Données :

- Le repère $(S, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$ est le repère lié à l'outil.
- Le centre d'inertie de l'outil est noté : G
- La position du point G est définie par : $\vec{SG} = e \cdot \vec{x}_4$
- La masse de l'outil est notée : m_O

Hypothèses :

- On considère l'outil comme une masse ponctuelle ramenée en son centre d'inertie.
- Les poids du rotor et de l'outil sont négligés.
- L'équilibrage dynamique du rotor autour de son axe est supposé parfaitement réalisé.

11. Calculer le degré d'hyperstatisme de la modélisation proposée figure 5.

12. Exprimer la matrice d'inertie de l'outil $[I(S, outil)]$ dans la base du repère $(S, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$.

Pour la suite on considérera que la matrice d'inertie de l'outil est de la forme :

$$[I(S, outil)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_0 & 0 \\ 0 & 0 & C_0 \end{bmatrix} \quad \text{exprimée dans la base du repère } (S, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$$

Les axes « X » et « Z » sont supposés bloqués et la broche tourne dans le vide à vitesse constante.

13. Exprimer dans la base du référentiel R4, la résultante dynamique de l'outil dans son mouvement par rapport à R3. Cette résultante sera notée :

$$\overrightarrow{Rd}_{(outil / R3)}$$

14. Exprimer dans la base du référentiel R4, le moment dynamique au point S de l'outil dans son mouvement par rapport à R3. Ce moment dynamique sera noté :

$$\overrightarrow{\delta}^S_{(outil / R3)}$$

Le torseur d'une action mécanique de S5 sur l'ensemble (rotor+outil) en un point I quelconque est noté :

$$\left(\vec{F}_{S5 \rightarrow (rotor+outil)} \right)_I = \left\{ \begin{array}{cc} X_I & L_I \\ Y_I & M_I \\ Z_I & N_I \end{array} \right\}$$

15. Exprimer les torseurs des actions mécaniques, de S5 sur l'ensemble (rotor+outil), des liaisons en P et Q, respectivement exprimés en P et Q dans la base du repère R4.

Données :

- PQ= b= 300 mm
- QS= a= 100 mm
- $m_O = 0,650$ kg

Configuration 1 :

- $N_{broche} = \dot{\alpha} = 20\ 000$ tours/min
- $e = 0,1$ mm

Configuration 2 :

- $N_{broche} = \dot{\alpha} = 40\ 000$ tours/min
- $e = 0,1$ mm

16. Calculer la norme des résultantes des torseurs de ces actions mécaniques dans les configurations 1 et 2. Conclure.

Sur les machines outils d'usinage à grande vitesse, avant le montage dans la broche, on vérifie la qualité de l'équilibrage dynamique de l'outil sur un banc d'équilibrage... et si le déséquilibrage est au dessus du seuil admissible, on enlève de la matière sur le porte outil dans les zones définies par le banc d'équilibrage.

2.2 : Schématisation technologique du guidage de l'électrobroche.

A partir du schéma architectural proposé figure 5, l'objectif de cette partie est de compléter le schéma technologique du palier arrière de l'électrobroche sur le document réponse DR1.

Indications :

- Le palier arrière est constitué de 2 roulements à billes à contact oblique, disposés en O.
- La lubrification du palier arrière est réalisée à la graisse au montage.
- La graisse est confinée à proximité des roulements.
- La partie supérieure de la broche sera fermée par un chapeau.

17. Sur le document réponse DR1, compléter le montage de roulements du palier arrière. Identifier les composants utilisés.

18. Sur le document réponse DR1, proposer les ajustements et conditions fonctionnelles pour le palier arrière.

Partie 3 : Etude de la fonction technique FT311 : Guider et entraîner en translation l'axe « X ».

3.1 : Fonction technique : Guider en translation l'axe « X »

L'objectif de cette partie est de calculer les efforts dans le guidage de l'axe « X ».

Le mobile S4, dans son déplacement sur l'axe « X » est guidée en réalité par 4 patins à rouleaux. Chaque patin est modélisable par une liaison glissière. Le schéma architectural de la liaison de S4 par rapport à S3 est proposé figure 6.

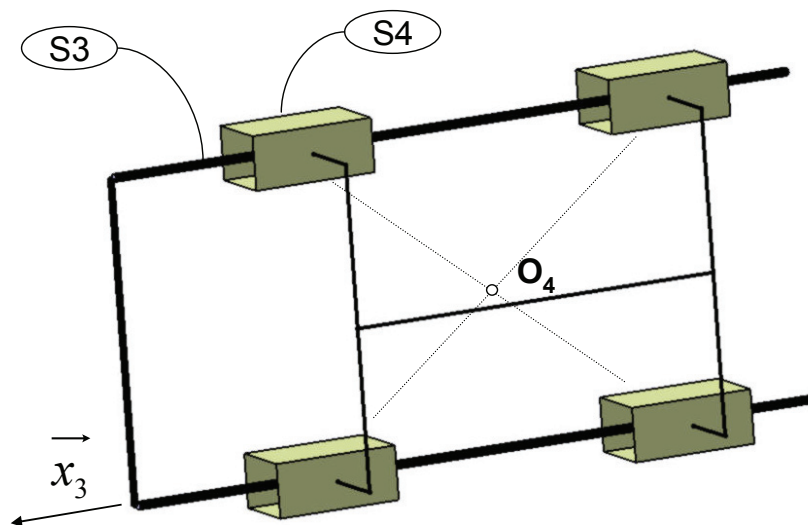


Figure 6 : Schéma architectural du guidage en translation de l'axe « X »

19. Calculer le degré d'hyperstatisme de l'architecture proposée sur la figure 6. Commenter.

20. Quel est le nom de la liaison cinématiquement équivalente à l'association de ces 4 liaisons, entre S3 et S4. Donner la forme générale du torseur des actions transmissibles par cette liaison.

La chaîne cinématique de guidage et de transformation du mouvement de rotation du moteur en mouvement de translation horizontale est proposée figure 7. Le centre d'inertie de l'ensemble (S4 + S5) est noté G_{45} .

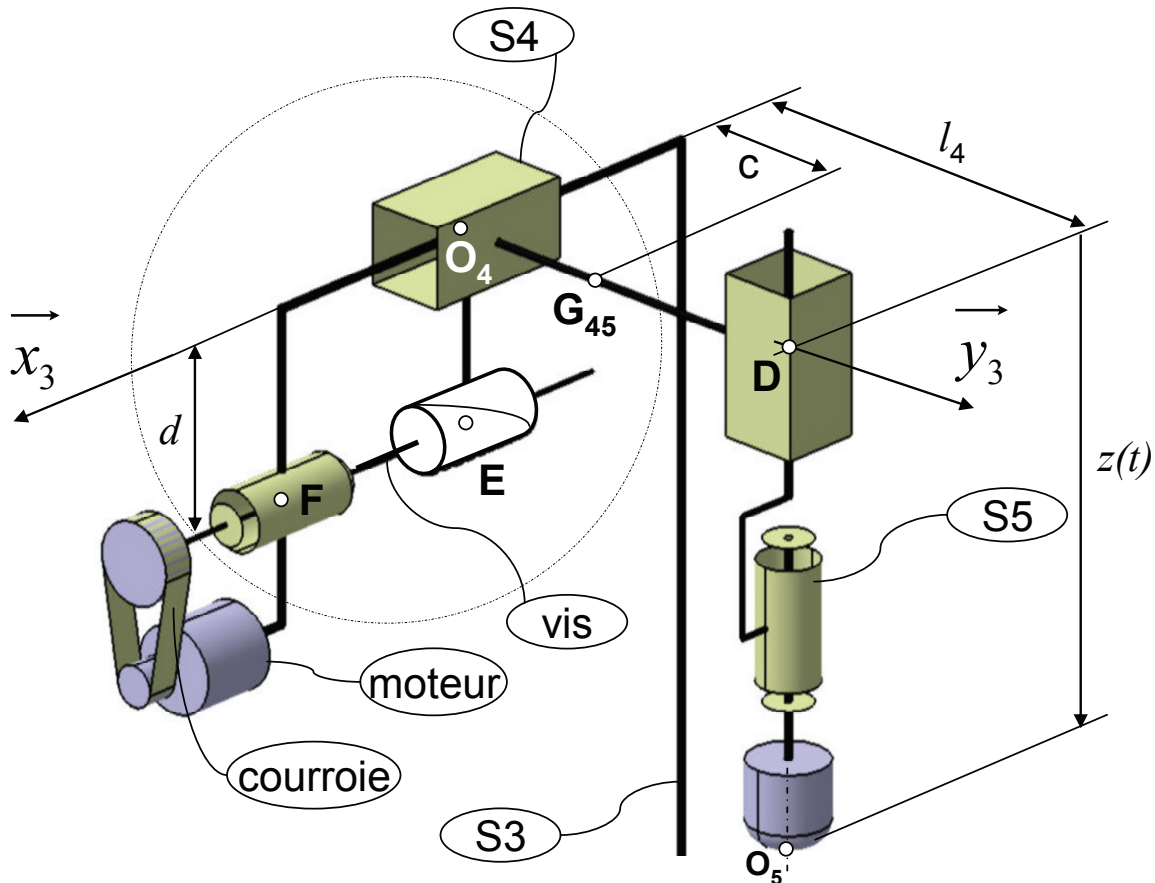


Figure 7 : Schéma cinématique axe « X »

Sauf indication contraire, l'étude porte sur une phase d'usinage, en déplacement sur l'axe « X » uniquement.

21. Calculer le degré d'hyperstatisme de la zone entourée du schéma cinématique de la figure 7. Commenter.

Hypothèse :

On considère pour la suite que les actions mécaniques de la vis sur S4 au niveau de la liaison hélicoïdale en E se limitent à un glisseur d'axe (E, \vec{x}_3) .

Dans le cas d'un usinage d'une surface quelconque, on suppose que le torseur des actions mécaniques au point O_5 , de la pièce sur l'outil, peut s'exprimer par :

$$\left(\vec{F}_{\text{pièce} \rightarrow \text{outil}} \right)_{O_5} = \begin{Bmatrix} Xc & 0 \\ Yc & 0 \\ Zc & 0 \end{Bmatrix} \text{ exprimé dans la base du repère } R_3$$

22. Exprimer dans la base du repère R3, la résultante dynamique de l'ensemble (S4+S5) dans son mouvement par rapport à R3. Cette résultante sera notée :

$$\overrightarrow{Rd}_{(S45/R3)}$$

23. Exprimer dans la base du repère R3, le moment dynamique au point O₄ de l'ensemble (S4+S5) dans son mouvement par rapport à R3. Ce moment dynamique sera noté :

$$\overrightarrow{\delta}^{O_4}_{(S45/R3)}$$

24. Exprimer le torseur des actions mécaniques de S3 sur S4 dans la liaison glissière d'axe « X », exprimé au point O₄ dans la base du repère R3. Ce torseur sera noté :

$$\left(\overrightarrow{F}_{S3 \rightarrow S4} \right)_{O_4} = \left\{ \begin{array}{l} X \quad L \\ Y \quad M \\ Z \quad N \end{array} \right\}$$

Données :

- Masse de S4 : M₄= 170 kg
- Masse de S5 : M₅= 260 kg
- l₄= 250 mm
- d= 50 mm
- c= 200 mm

On considère un instant t, pour lequel les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

- X_c=Y_c=Z_c= -100 N
- DO₅ = 500 mm

25. Calculer les composantes du torseur des actions mécaniques exprimé en question 24, en phase d'accélération maximale sur l'axe « X », $\ddot{x} = 10m/s^2$. Comparer l'incidence des efforts de coupe et des effets dynamiques sur le chargement de la liaison glissière.

3.2 : Fonction technique : Entraîner en translation l'axe « X »

L'objectif de cette partie est de vérifier les performances de la motorisation de l'axe « X ».

Données :

- L'axe de la glissière « X » est parfaitement horizontal,
- La vitesse de rotation du moteur est notée Ω_m,
- La vitesse de rotation de la vis est notée Ω_{vis},
- Le rapport de réduction de la transmission par courroie est noté k= Ω_m / Ω_{vis}
- Le moment d'inertie de l'ensemble (vis + poulie réceptrice), par rapport à son axe de rotation est noté J_{vis},
- Le moment d'inertie du rotor moteur par rapport à son axe de rotation est noté J_m,
- La masse de la courroie est négligeable,
- Le pas de la liaison hélicoïdale est noté p (en m/tour)

26. Exprimer l'inertie équivalente, notée J_{eq}, des masses en mouvement ramenées sur l'arbre moteur par rapport à son axe de rotation.

27. En déduire l'expression du couple moteur noté C_m. Les liaisons sont supposées parfaites.

Pour la suite, on prendra :

- $J_{vis} = 1 \cdot 10^{-2} m^2 kg$
- Masse de S4, $M_4 = 170$ kg
- Masse de S5, $M_5 = 260$ kg
- Pas de la vis : $p = 0,03$ m/tour
- Rapport de réduction de la transmission par courroie : $k = \Omega_m / \Omega_{vis} = 2$
- $J_m = 5 \cdot 10^{-3} m^2 kg$

On considère un instant t , pour lequel les composantes du torseur des actions mécaniques de la pièce sur l'outil sont les suivantes :

- $X_c = Y_c = Z_c = -100$ N

28. En phase d'accélération maximale sur l'axe « X », $\ddot{x} = 10 m / s^2$, calculer le couple, noté C_{mx} , que le moteur d'axe « X » doit développer. Comparer l'incidence des efforts de coupe et des effets dynamiques sur ce couple moteur.

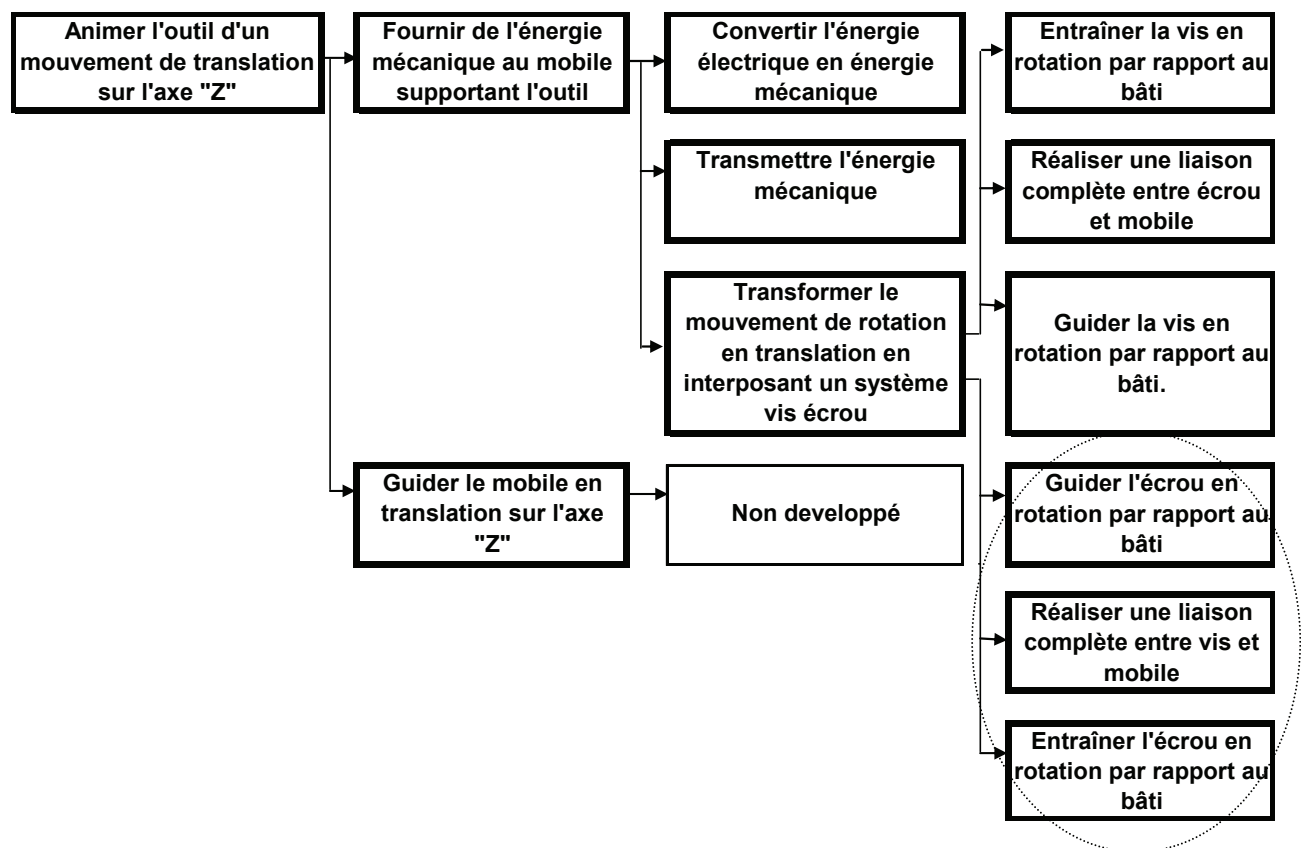
Partie 4 : Etude de la fonction technique FT312 : Animer l'outil d'un mouvement de translation sur l'axe « Z ».

L'objectif de cette partie est de proposer une architecture cinématique de l'axe « Z ».

Pour la suite uniquement :

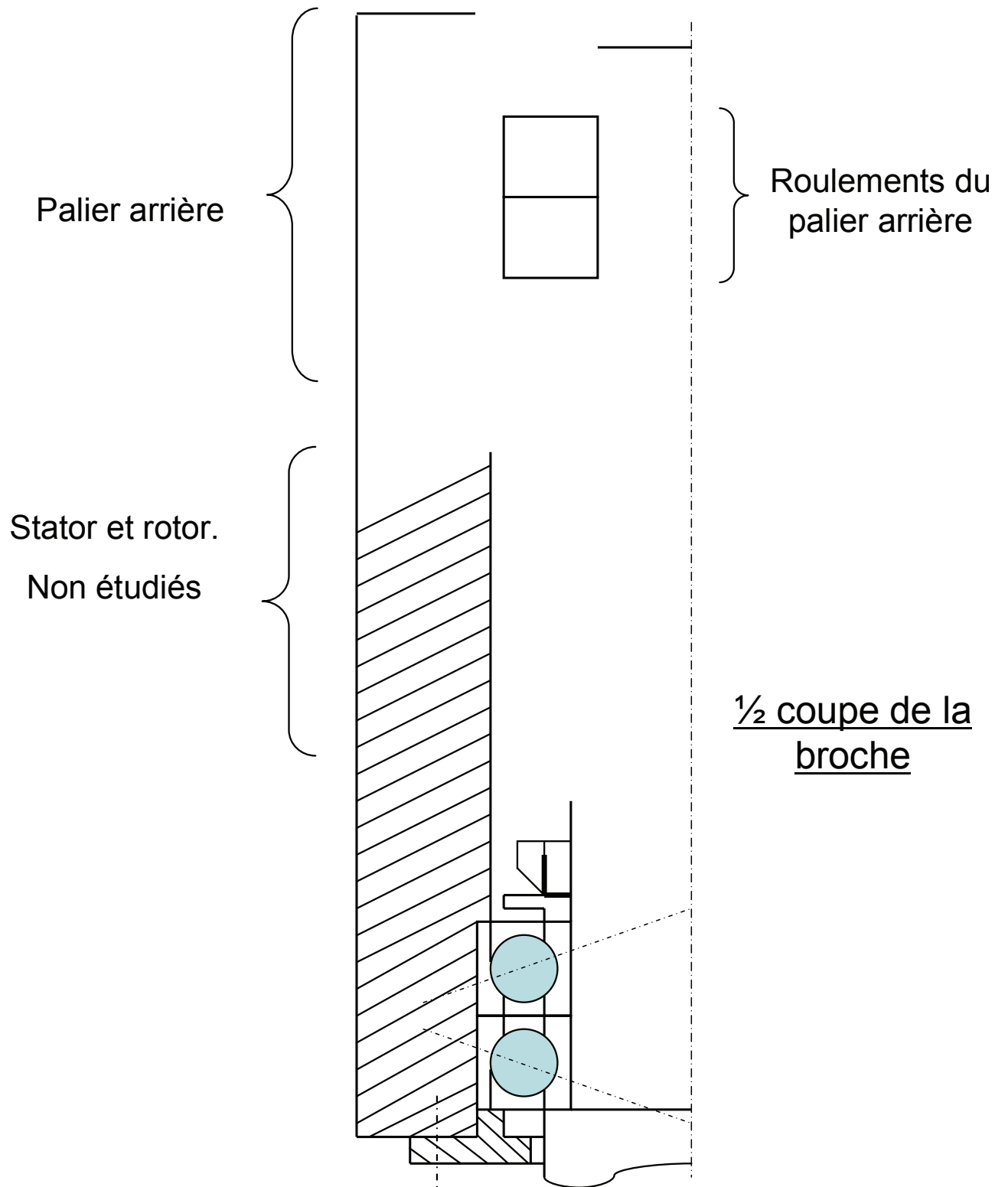
- On appellera mobile le solide S5, ensemble en translation sur l'axe « Z ».
- On appellera bâti le solide 4.

Sur le FAST ci-dessous la fonction technique : Transformer le mouvement... est déclinée en 2 familles de solutions. Elles permettent toutes les deux d'éviter d'embarquer la motorisation sur le mobile de l'axe « Z », donc de limiter les masses en mouvement. Pour minimiser l'encombrement et faciliter l'intégration de l'axe « Z », on souhaite développer la deuxième solution (partie entourée sur le FAST ci-dessous).



29. Sur le document réponse DR2, proposer un schéma cinématique complet de cette solution, si nécessaire en plusieurs vues, en mettant en situation et en identifiant :

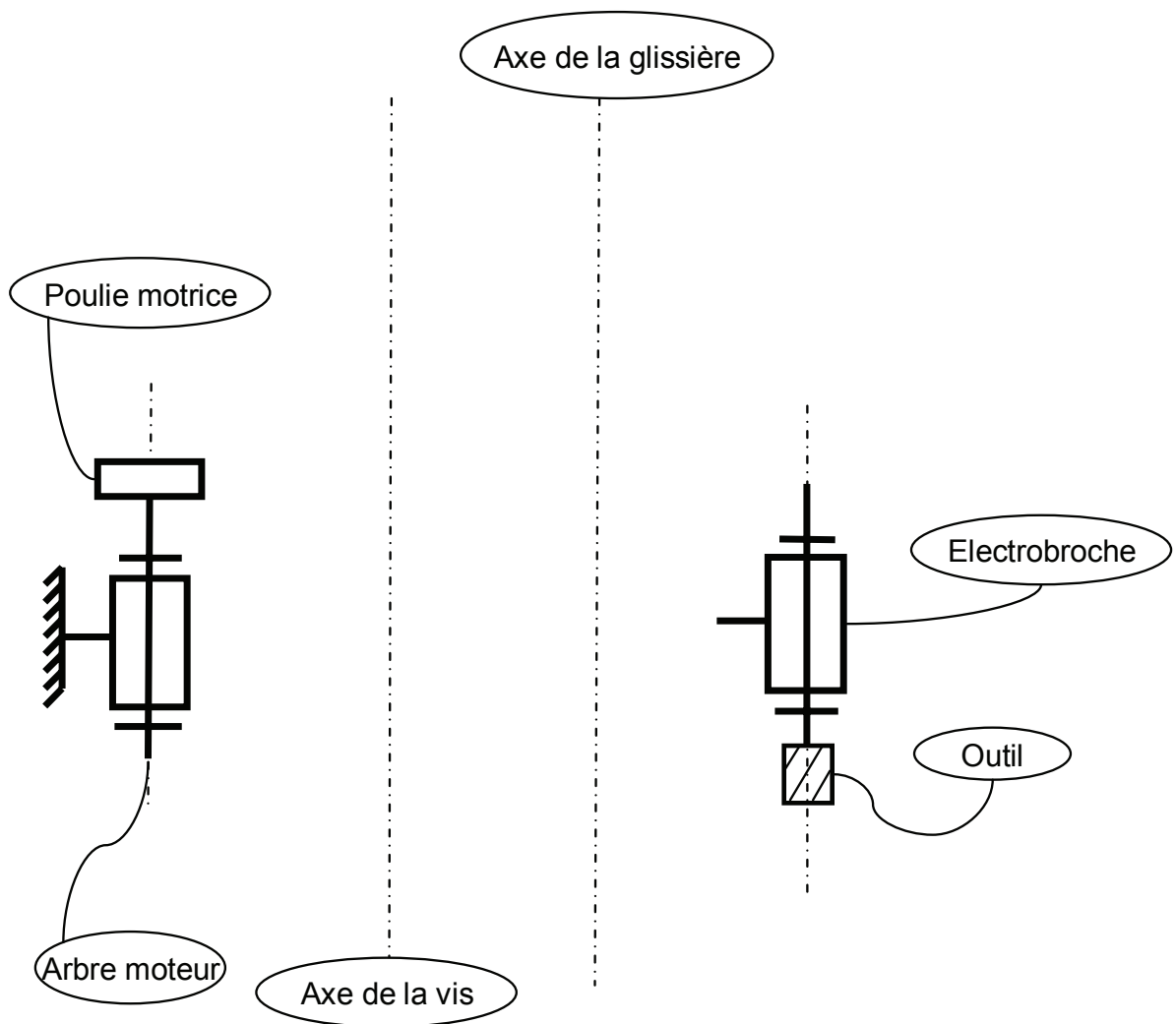
- Le bâti,
- Le mobile,
- Le ou les systèmes de transmission de mouvement,
- Le ou les systèmes de transformation de mouvement,
- Les différentes liaisons cinématiques.



Questions 17 et 18

Document réponse DR1

Vue principale



Question 29

Document réponse DR2