

PRESENTATION

Mise en situation :

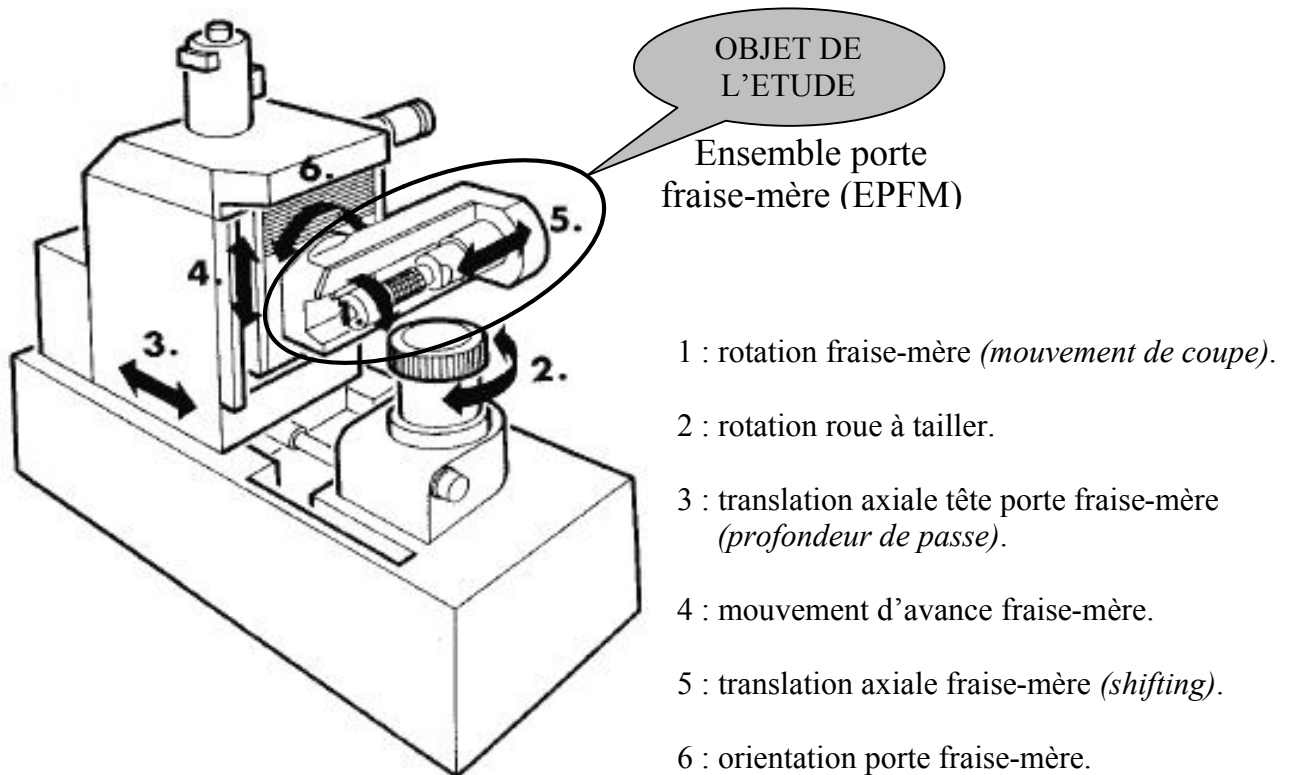


Figure 1 – Cinématique d'une machine de taillage

Cette machine permet de tailler des roues par le procédé de génération (mouvements conjugués d'engrènement de l'outil et de la roue à tailler).

La figure 1 met en évidence les différentes mobilités nécessaires aux réglages et à l'usinage.

La génération s'effectue à partir d'un outil appelé fraise-mère, qui est un pignon cylindrique à denture hélicoïdale dont les flancs de dents sont des hélicoïdes développables (figure 2).

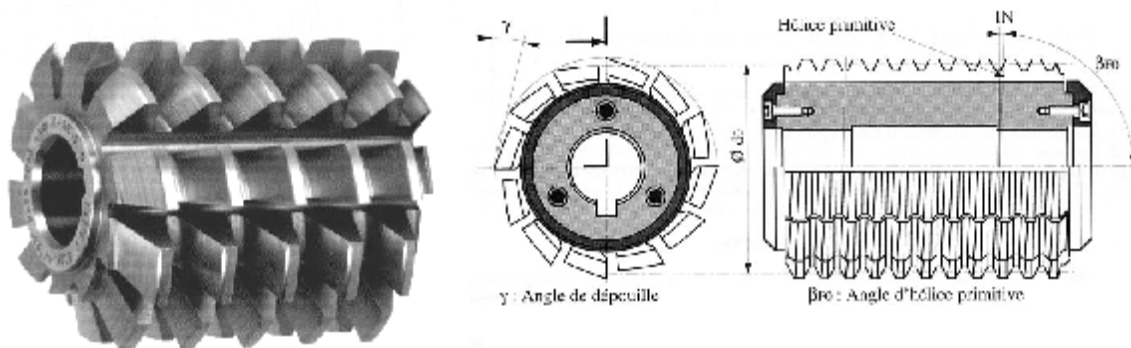


Figure 2 – Outil fraise-mère à 1 filet

Cet outil possède des arêtes coupantes disposées suivant une hélice d'angle primitif β_{F0} (proche de 90°) qui lui donnent plutôt l'aspect d'une vis, d'où le vocabulaire du nombre de filets Z_F pour désigner le nombre de dents de l'outil. Généralement $Z_F = 1$ filet, plus rarement $Z_F = 2, 3$, ou 4 .

Dans ce mode de taillage, l'ensemble outil fraise-mère et roue à tailler constitue un engrenage gauche. Le seul impératif géométrique à respecter est que la tangente à l'hélice primitive de la fraise-mère reste constamment confondue avec la tangente à l'hélice primitive de la roue (figure 3).

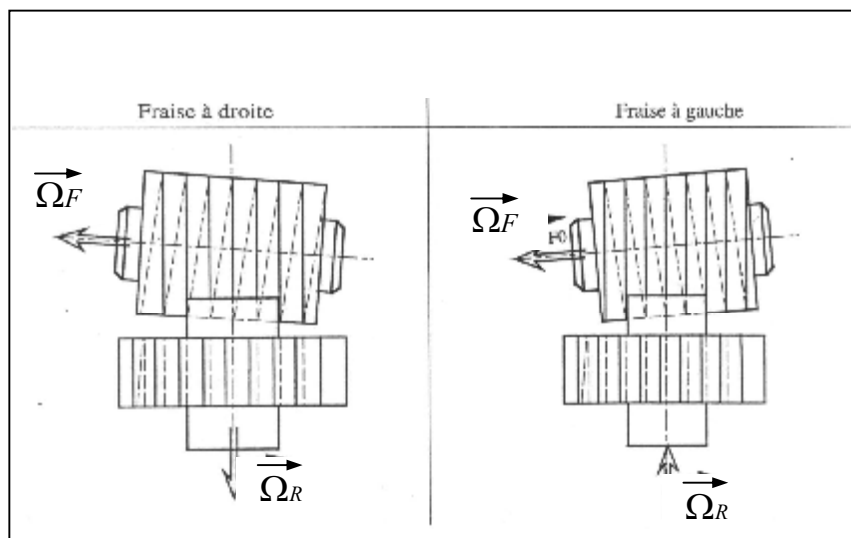


Figure 3 – Principe du taillage d'une roue à denture droite

Le taillage débute en plaçant l'outil au-dessus de la roue, puis on anime la fraise-mère du mouvement de coupe et d'un mouvement d'avance de vitesse faible parallèlement à l'axe de la roue.

L'obtention du mouvement de génération nécessite de lier la rotation de la roue à tailler N_R et la rotation de l'outil fraise-mère N_F .

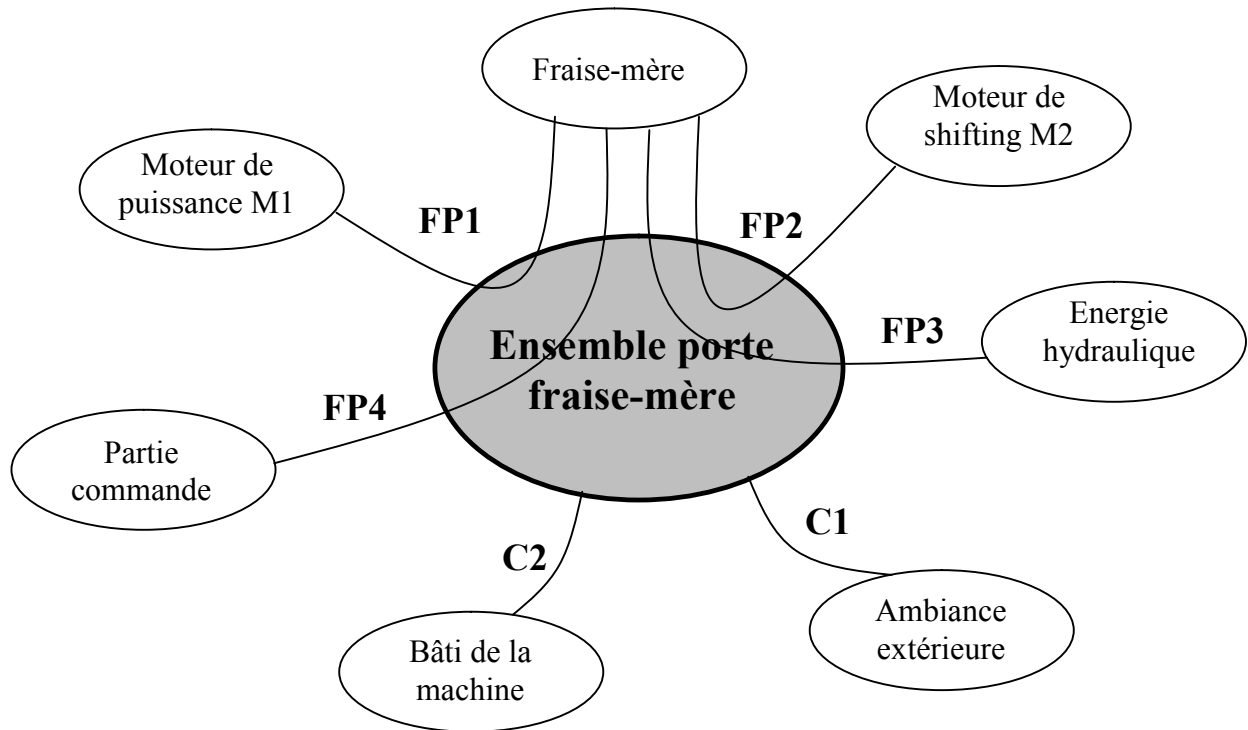
Afin d'accroître la durée de vie de l'outil grâce à une usure uniforme sur toute sa longueur active et lors du taillage d'un grand nombre de pièces identiques, on effectue un déplacement de la fraise-mère le long de son axe. Cette opération, appelée « shifting », permet de compenser l'usure de l'outil après un certain nombre de taillages.

Ensemble porte fraise-mère (E PFM)

Les documents techniques DT1, DT2, DT3 et DT4 présentent l'ensemble porte fraise-mère qui assure :

- Le mouvement de coupe issu de l'arbre (4) entraîné par le moteur Brushless M1 ;
- Le mouvement de « shifting » issu d'une transmission poulie (13)-courroie à partir du moteur M2.

Fonctions de service assurées par l'EPFM



Fonctions principales :

FP1 : Transmettre l'énergie motrice de rotation à la fraise-mère (*mouvement de coupe*).

FP2 : Assurer un déplacement motorisé de la fraise-mère le long de son axe (*shifting*).

FP3 : Désolidariser la fraise-mère par l'intermédiaire d'une énergie hydraulique (*maintenance de l'outil*).

FP4 : Communiquer à la partie commande la fréquence de rotation de la fraise-mère.

Contraintes :

C1 : Fonctionner dans une ambiance d'atelier.

C2 : S'adapter au bâti de la machine.

Problématique :

Actuellement, cette machine est équipée de fraises-mères monoblocs M35 revêtues TIN, de diamètre primitif égal à 120 mm, afin de tailler en série des roues dentées de module 3 mm, de bonne usinabilité et de « dureté moyenne » (70 daN/mm^2). Ces caractéristiques correspondent à des matériaux tels que : 17 Cr Mo 4 , 16 Mn Cr 5 ,..., et nécessitent une vitesse de coupe de 85 m/min pour un effort tangentiel de coupe de l'ordre de 1840 N.

Le responsable de production est sollicité par une commande particulière de taillage d'une série de roues dentées à denture droite de module 3,5 mm dont la matière est du 30 Cr Ni Mo 8 , c'est à dire d'usinabilité difficile et de « dureté » : 120 daN/mm^2 .

Il s'agit de vérifier si la machine est capable d'effectuer ces travaux sans endommager ses constituants (moteurs, engrenages, roulements,...), ou dans le cas contraire, si un investissement dans une machine plus puissante est rentable.

SCENARIO DE L'ETUDE PROPOSEE

Partie 1 : Compréhension du mécanisme

- Analyse fonctionnelle interne de l'ensemble porte fraise-mère, à l'aide de diagrammes FAST.
- Modélisation cinématique du mécanisme (élaboration d'un schéma cinématique plan).
- Dimensionnement du rapport des fréquences de rotation de la fraise mère et de la pièce à tailler.
- Détermination du degré d'hyperstatisme d'une chaîne cinématique et de ses conséquences technologiques.

Partie 2 : Vérification de la capacité de la chaîne de transmission de puissance à répondre aux nouvelles conditions de coupe.

- Calcul de la nouvelle puissance utile et conclusion sur la capacité du moteur M1.
- Dimensionnement des intensités des actions aux paliers et de la nouvelle durée de vie des roulements. Conclusion sur la conformité par rapport au cahier des charges.
- Vérification de la possibilité de transmission du nouveau couple maxi :
 - au niveau de l'emmanchement conique entre l'arbre porte fraise 11 et la broche 9.
 - au niveau du fretage entre la broche 9 et la roue 8.

Partie 3 : Vérification de la capacité du moteur M2 à répondre aux nouvelles exigences de « Shifting » .

- Calcul des accélérations des différents sous ensembles.
- Etude énergétique pour évaluation de la puissance et du couple moteur nécessaires.
- Vérification de la capacité du moteur M2.

PARTIE 1 - Compréhension du mécanisme

Dans un premier temps, nous allons analyser la structure générale de l'ensemble porte fraise-mère.

Question 1-1 :

Compléter (*sur le document réponse DR1*) le diagramme FAST relatif à la fonction principale FP1 « Transmettre l'énergie motrice de rotation à la fraise-mère ».

Question 1-2 :

Compléter (*sur le document réponse DR2*) le diagramme FAST relatif à la fonction principale FP2 « Assurer un déplacement motorisé de la fraise-mère le long de son axe ».

Question 1-3 :

Compléter (*sur le document réponse DR3*) le schéma cinématique plan de l'ensemble porte fraise-mère.

Question 1-4 :

Le procédé de taillage par génération nécessite de lier la fréquence de rotation de la fraise-mère N_F ayant Z_F filets, et la fréquence de rotation de la roue N_R dont sont taillées Z_R dents.

Définir, avec les justifications nécessaires, le rapport : N_F / N_R .

Question 1-5 :

Compléter (*sur le document réponse DR4*) le graphe des liaisons.

Calculer le degré d'hyperstatisme de cette chaîne fermée.

Question 1-6 :

Indiquer (*sur le document réponse DR4*) quelles sont les conséquences technologiques (*avantages et inconvénients*) de cet hyperstatisme.

Proposer, sous forme d'un schéma cinématique et d'un graphe des liaisons (*sur le document réponse DR4*), une modification pour réduire cet hyperstatisme sans dégrader le service que doit rendre cette machine-outil.

Question 1-7 :

Indiquer quelles sont les solutions technologiques permettant l'annulation des jeux dans le cheminement de FP1 ?

PARTIE 2 - Analyse de la fonction principale FP1

Transmettre l'énergie motrice de rotation à la fraise-mère.

Objectif: Le taillage de la nouvelle gamme de roues dentées (30 Cr Ni Mo 8) de module 3,5 mm doit s'effectuer avec une fraise-mère de diamètre primitif égal à 120 mm ; de plus, l'effort tangentiel de coupe est évalué à 13000 N.

Cet accroissement de performance à atteindre nécessite de s'assurer de la capacité de la machine, notamment en ce qui concerne :

- la puissance motrice nécessaire ;
- les liaisons participant à la transmission du couple ;
- les efforts supportés par certains roulements ;
- etc....

Analyse de l'adaptabilité de l'énergie motrice

Question 2-1 :

A partir du document ressource 1, **calculer** la fréquence de rotation en ébauche de la fraise-mère.

Question 2-2 :

Déterminer la puissance motrice nécessaire sachant que le rendement global de la transmission de mouvement est évalué à 0,85.

Le moteur peut fournir une puissance de 9500 W ; quelle conclusion en tirez-vous ?

Analyse de la fonction technique

« Guider la roue (6) »

Objectif: on souhaite vérifier que la durée de vie des roulements à rouleaux coniques ne va pas être fortement réduite, du fait de l'usinage des nouvelles roues dentées.

On donne :

- couple maximum transmis par l'arbre (4) : $C_4 = 155 \text{ N.m}$;
- fréquence de rotation de l'arbre (4) : $N_4 = 550 \text{ trs /min}$;
- largeur de denture des pignons coniques : $b = 20 \text{ mm}$;
- durée de vie minimale des roulements $L_h = 150000 \text{ heures}$.

Question 2-3 :

Après avoir consulté le document ressource 2, **calculer** les intensités des composantes de l'action inter-dentaire exercée par le pignon (5) sur la roue (6).

Question 2-4 :

A partir du document technique DT2 :

Proposer (sur le document réponse DR5) une modélisation de chaque liaison (A et B) constituant le guidage entre la roue (6) et le bâti.

Justifier (sur le document réponse DR5) le choix de ces modélisations en précisant les hypothèses nécessaires.

Question 2-5 :

On donne le torseur relatif à l'action de (5) sur (6) au point C :

$$\left\{ \begin{array}{c} \boldsymbol{\tau} \\ 5 \rightarrow 6 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -1480 & 0 \\ +4900 & 0 \\ -1000 & 0 \end{array} \right\}_{C,R}$$

Unités :
Force en N
Moment en N.m
avec $R \langle \vec{X}; \vec{Y}; \vec{Z} \rangle$

On admet en première hypothèse qu'il n'y a pas de précharge axiale et de plus, que le roulement (A) est modélisé par une rotule et le roulement (B) par une linéaire annulaire.

Effectuer (sur le document réponse DR5) le bilan des actions mécaniques extérieures à (6).

Calculer (sur le document réponse DR5) les intensités des composantes des actions aux paliers (A) et (B).

Question 2-6 :

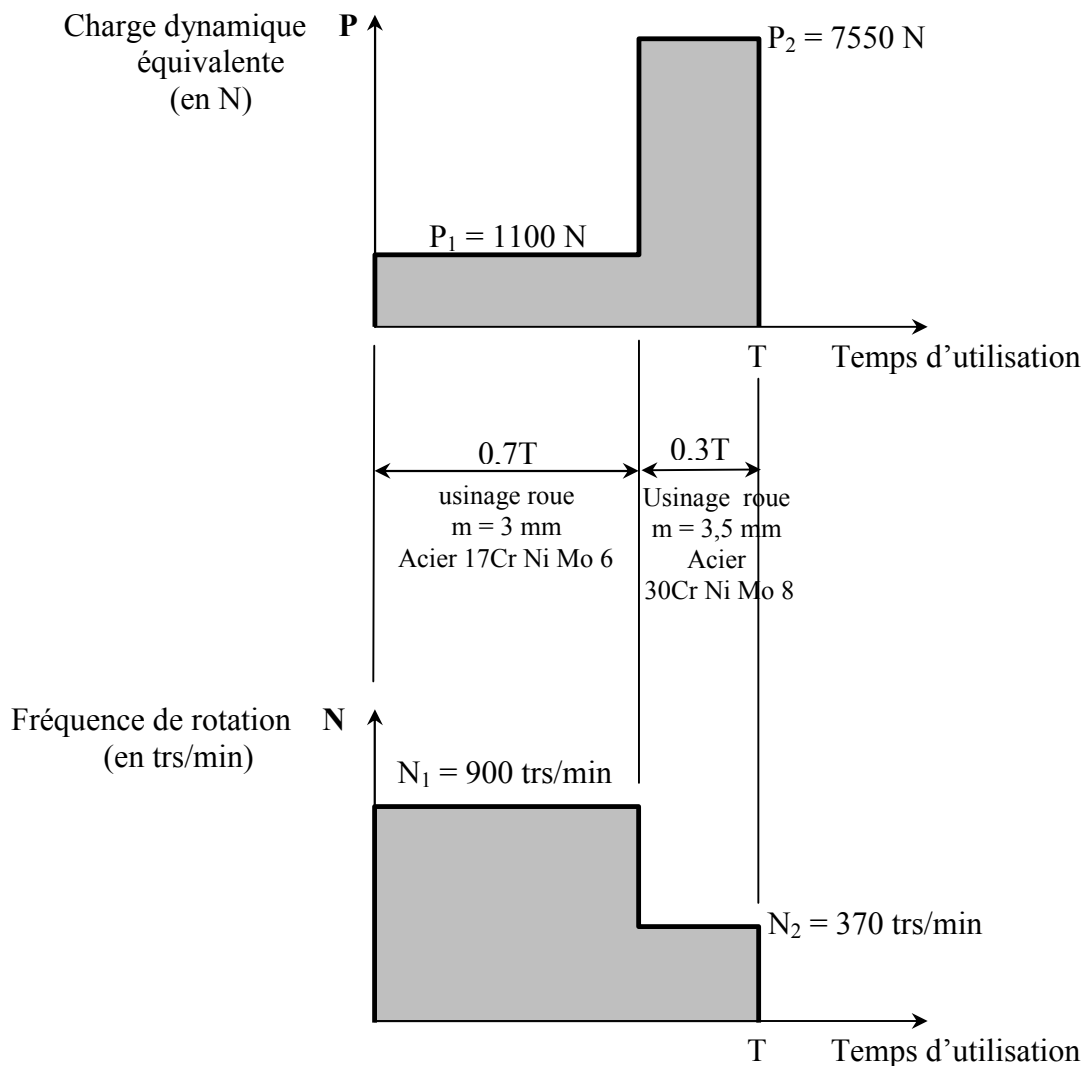
En fait, le fonctionnement sans jeu des roulements à rouleaux coniques nécessite une précharge, ce qui donne pour le roulement (A) les composantes radiales et axiales suivantes :

$$\mathbf{F}_{rA} = 7550 \text{ N} \qquad \mathbf{F}_{aA} = 2700 \text{ N}$$

Calculer la charge dynamique équivalente sur le roulement (A) (voir document ressource 3).

Question 2-7 :

On estime que ce nouvel usinage va occuper environ 30% du temps total d'utilisation de la machine. On donne ci dessous le diagramme présentant les charges dynamiques appliquées sur le roulement (A) en fonction du type d'usinage et du temps d'utilisation.



Calculer la charge dynamique moyenne équivalente.

En déduire la durée de vie du roulement (A).

Conclure.

Question 2-8 :

On décide d'effectuer une maintenance prédictive, et donc de changer les roulements à rouleaux coniques (*voir document technique DT2*).

Indiquer quels sont les moyens ou les composants prévus pour :

- assurer le réglage précis de la précharge des roulements ;
- assurer la coïncidence des sommets des cônes primitifs des pignons (5) et (6).

Question 2-9 : (*sur le document réponse DR6*)

Elaborer la gamme de montage du sous ensemble repéré **A**, puis de l'ensemble dans le boîtier support (3).

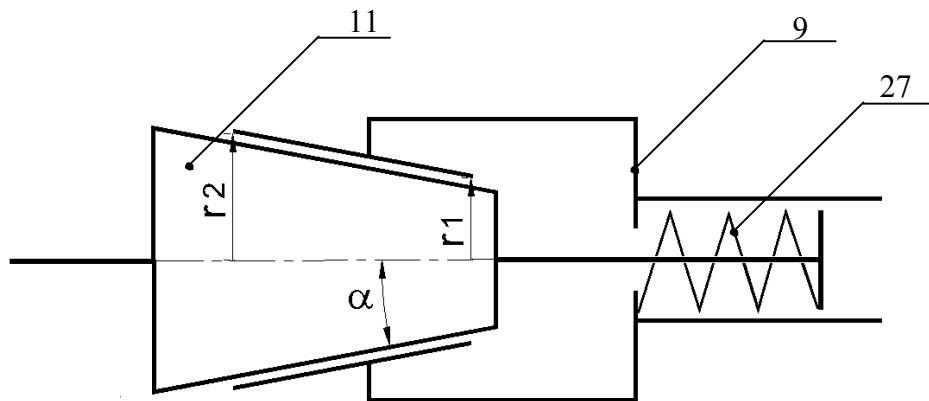
Préciser, si nécessaire, les moyens mis en œuvre.

Analyse de la fonction technique

« Assurer la transmission d'énergie entre (9) et la fraise-mère (12) »

Cette fonction s'effectue au moyen d'un emmanchement conique (SA 40) préchargé axialement par l'intermédiaire de rondelles élastiques, et si nécessaire, par obstacles constitués de deux plots prismatiques (10).

Les caractéristiques géométriques relatives à la zone conique figurent sur le schéma simplifié suivant.



On adopte les hypothèses suivantes :

- la répartition de la pression sur les surfaces de contact coniques est uniforme ;
- le facteur de frottement f est constant ;
- les rondelles élastiques exercent un effort N porté par l'axe des cônes ;
- on se place à l'état d'équilibre limite entre les surfaces de frottement.

On donne l'expression du couple maximum transmissible par cet emmanchement :

$$C_f = \frac{2}{3 \cdot \sin \alpha} \cdot N \cdot f \cdot \left(\frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

Question 2-10 :

La pré-charge axiale N est réalisée par l'intermédiaire de 88 rondelles élastiques. Celles-ci sont assemblées en 22 paquets montés alternés et chaque paquet est constitué de 4 rondelles empilées (*le document ressource 4 fourni les caractéristiques de ces rondelles*).

Sur le même document ressource 4, figure la longueur correspondant à la pré-charge de l'ensemble des rondelles : $L = 182,6 \text{ mm}$.

Après avoir déterminé la flèche d'une rondelle, **en déduire** la valeur de la pré-charge N .

Question 2-11 :

Calculer la valeur du couple maximum transmissible par l'emmanchement conique si :

$$f = 0,1 \quad ; \quad r_1 = 14 \text{ mm} \quad ; \quad r_2 = 20 \text{ mm} \quad ; \quad \text{conicité} = \frac{7}{24} \dots \text{soit } \alpha = 8,297^\circ.$$

Question 2-12 :

Montrer que ce couple était satisfaisant pour tailler des roues de « dureté moyenne » (70 daN/mm²), et qu'il devient insuffisant pour cette nouvelle série de taillage.

Question 2-13 :

En faisant l'hypothèse que les deux plots prismatiques participent au reste de la transmission du couple nécessaire (dans le cas du taillage de cette nouvelle série), **calculer** la pression, supposée uniforme, au niveau du contact entre ces plots et l'arbre porte fraise-mère.

(On relèvera les dimensions utiles sur le document technique DT1).

Quelle conclusion en tirez-vous si l'on tolère une pression maximum de 120 MPa.

Analyse de la fonction technique

« Assurer la transmission d'énergie entre la roue (8) et la broche (9) »

Cette fonction est réalisée par l'intermédiaire d'un frettage hydraulique entre deux surfaces coniques *(de conicité très faible, donc non apparente sur le document technique DT1)*.

Rappel sur les phases essentielles de ce procédé.

1^{ère} phase :

Montage manuel de la roue (8) sur la broche (9) assurant le contact des surfaces coniques.

2^{ème} phase :

Injection progressive de l'huile sous pression (jusqu'à 2900 bars) au niveau des cônes par des injecteurs prévus dans la roue (8) entraînant des déformations élastiques sur (8) et (9).

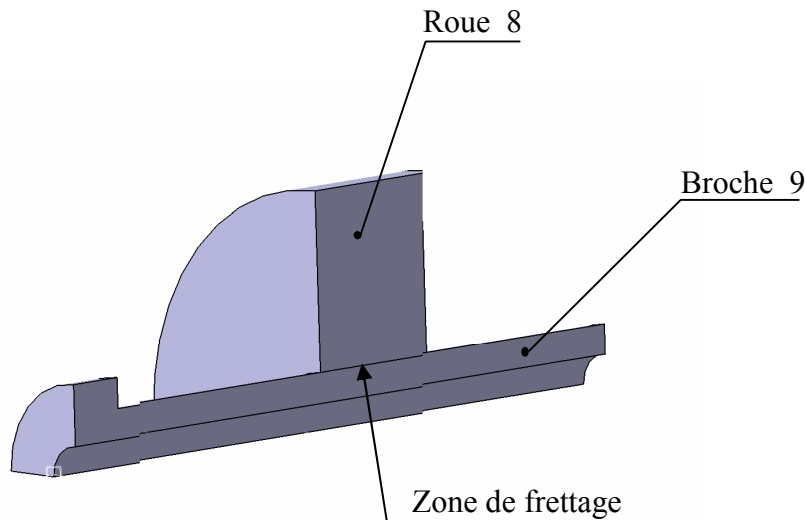
3^{ème} phase :

Poussée sur la roue (8) par l'intermédiaire d'un écrou hydraulique et d'un outillage spécial. Lors de cette opération, la roue (8) se translate sur la broche (9) d'une cote précise définie par l'entretoise (24) dont la longueur est calibrée en fonction des dimensions réelles des pièces qui participent à l'empilage.

D'après le constructeur de cette machine, le serrage radial après frettage est de 2/100 mm au diamètre.

On se propose de vérifier que celui-ci est toujours suffisant pour transmettre le couple nécessaire au taillage de la nouvelle série de roues. Pour cela, il est nécessaire de connaître la pression de contact à l'issue du frettage afin de déduire le couple transmissible.

Une modélisation par éléments finis (*voir document technique DT 5*) présente la répartition des contraintes de Von Mises, au niveau de la roue et de la broche, résultant du frettage. Comme l'indique la figure ci-dessous, les formes des pièces ont été simplifiées et seul un quart de chacune d'elles a été retenu, en raison des symétries, afin d'optimiser l'analyse et d'obtenir une lisibilité correcte.



Sur le document ressource 5, figurent :

- les formules de Lamé relatives à la distribution des contraintes principales σ_r et σ_θ , écrites en coordonnées polaires, dans le cas d'un cylindre soumis à une pression uniforme sur ses deux faces externe et interne ;
- la relation entre la contrainte résultante de Von Mises et σ_r et σ_θ .

Question 2-14 :

En considérant la contrainte maximum de Von Mises sur la broche (9), **calculer** la pression de contact résultant du frettage. On admettra que la très faible conicité de l'emmanchement est négligée, ce qui correspond à un emmanchement cylindrique de diamètre 65 mm, et que le diamètre intérieur de perçage de la broche a pour valeur 32 mm.

Question 2-15 :

En déduire la valeur du couple maximum transmissible par ce frettage en adoptant les hypothèses suivantes :

- l'emmanchement fretté est cylindrique (\varnothing 65 mm) sur une longueur de 78 mm ;
- la pression de contact entre les deux pièces est uniforme ;
- le facteur de frottement au niveau des zones de contact est constant, $f = 0,1$;
- on se place en état d'équilibre limite.

Ce couple est-il suffisant ?

PARTIE 3 - Analyse de la fonction principale FP2

Assurer un déplacement motorisé de la fraise-mère le long de son axe (shifting).

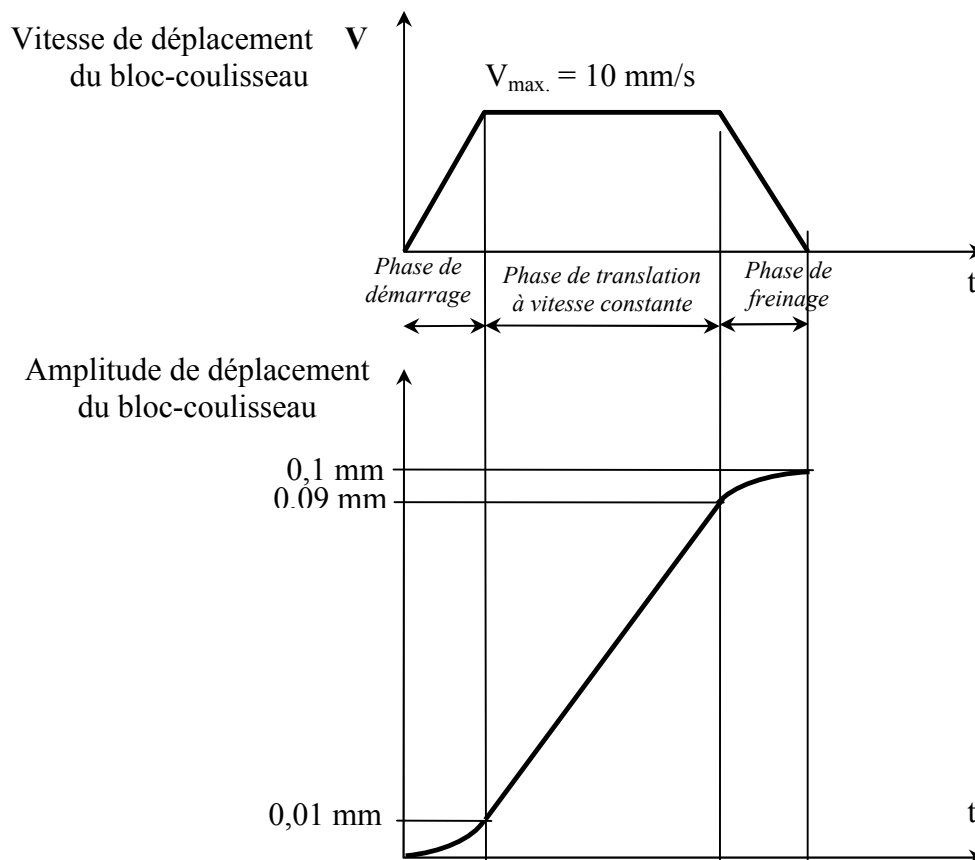
Objectif: La dureté du nouveau matériau à tailler est importante. Afin de limiter l'usure de la fraise-mère, le responsable de production décide de réaliser une opération de « shifting » après chaque roue taillée.

La fraise-mère, toujours en mouvement de rotation, sera donc déplacée de 0,1 mm le long de son axe. De plus, afin de ne pas nuire à la productivité, il est aussi décidé d'augmenter la vitesse nominale de ce déplacement à $V_{\max.} = 10 \text{ mm/s}$.

On souhaite vérifier que le moteur de « shifting » M2 a les capacités pour effectuer cette opération.

On donne :

- ci-dessous, les courbes caractéristiques du mouvement de translation rectiligne du bloc coulisseau ;
- et sur le document ressource 6, les caractéristiques cinétiques des sous-ensembles concernés.



Question 3-1 :

Calculer le temps de démarrage du bloc-coulisseau et son accélération pour répondre au cahier des charges.

Question 3-2 :

En déduire l'accélération angulaire $\dot{\omega}_{16/1}$ (en rad/s^2) de la vis (16), dans son mouvement par rapport au bloc-glissière (1) et lors de la phase de démarrage.

On note :

- $\langle 1 \rangle = \langle O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1 \rangle$: le repère lié au bloc-glissière (1) ;
- $\omega_{i/1}$: le vecteur vitesse angulaire instantanée du solide i en mouvement par rapport au référentiel (1) ;
- $k_1 = \frac{\omega_{6/1}}{\omega_{5/1}}$ le rapport de réduction relatif au couple conique;
- $k_2 = \frac{\omega_{8/1}}{\omega_{7/1}}$ le rapport de réduction entre le pignon (7) et la roue (8) ;
- V : la vitesse de tout point lié au bloc-coulisseau, animé d'un mouvement de translation rectiligne, par rapport au référentiel (1) ;
- $T(i/1) = E_c(i/1)$: l'énergie cinétique du solide i dans son mouvement par rapport au référentiel (1) .

Question 3-3 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(5/1)$, de l'ensemble (5) lié au pignon d'attaque par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles et de $\omega_{5/1}$.

Question 3-4 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(6/1)$, de l'ensemble (6) lié à la roue conique par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles et de $\omega_{5/1}$.

Question 3-5 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(16/1)$, de l'ensemble constitué des pièces (13+14+15+16) par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles et de $\omega_{16/1}$.

Question 3-6 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(20/1)$, de l'ensemble constitué des pièces (18+19+20+contre-pointe) par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles et de $\omega_{16/1}$.

Question 3-7 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(7/1)$, du pignon arbré (7) par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles, de $\omega_{5/1}$ et de $\omega_{16/1}$.

Question 3-8 :

Donner (sur le document réponse DR7) l'expression de l'énergie cinétique, notée $T(9/1)$, de l'ensemble constitué des pièces (8+9+fraise-mère) par rapport au repère (1), en fonction de ses caractéristiques inertielles, de $\omega_{5/1}$ et de $\omega_{16/1}$.

On adopte les hypothèses suivantes :

- Toutes les liaisons sont considérées parfaites ;
- L'accélération de la pesanteur est telle que $\vec{g} = -g \vec{z}_1$, ce qui autorise à négliger l'inclinaison de l'ensemble porte fraise-mère ;
- Le référentiel (1) est galiléen ;
- Le moteur M1 est tel que son stator, lié à (1), exerce sur son rotor, lié à (5), un moment $\vec{M}_{O(1 \rightarrow 5)}$ tel que : $\vec{M}_{O(1 \rightarrow 5)} \cdot \vec{Y}_1 = C_1$
- La courroie exerce sur l'ensemble 16 (par l'intermédiaire de la poulie 13) un moment $\vec{M}_{O(cour. \rightarrow 16)}$ tel que : $\vec{M}_{O(cour. \rightarrow 16)} \cdot \vec{X}_1 = C_2$
- On appelle $(\Sigma) = (5 \cup 6 \cup 7 \cup 9 \cup 16 \cup 20)$ l'ensemble des pièces mobiles par rapport à (1).

Question 3-9 :

Durant l'opération de « shifting », la fraise-mère n'effectue aucun taillage et sa vitesse de rotation est constante.

Que peut-on en déduire sur la valeur de C_1 ?

(Réponse sur le document réponse DR7)

Question 3-10 :

Déterminer (sur le document réponse DR7) la puissance galiléenne des efforts extérieurs à l'ensemble (Σ) .

Question 3-11 :

Déterminer (sur le document réponse DR7) la puissance galiléenne des efforts intérieurs à l'ensemble (Σ) .

Question 3-12 :

Appliquer (sur feuille de copie) le théorème de l'énergie cinétique (ou théorème de l'énergie – puissance) à l'ensemble (Σ) .

En déduire la valeur du couple utile C_2 durant la phase de démarrage de l'opération de « shifting ».

Question 3-13 :

On donne le rapport de réduction relatif à la transmission par poulies/courroie $i = 0,64$.

M2 est un servomoteur de marque STÖBER équipé d'un réducteur planétaire.

La référence constructeur est : **P322_0160 ED303U**

Ses caractéristiques sont données dans l'extrait de catalogue fourni (document ressource 7).

Le rendement de la chaîne de transmission de puissance relative au « shifting », supposé constant durant le régime transitoire, est $\eta_{\text{shifting}} = 0,7$.

Calculer le couple que doit fournir le moteur de « shifting » M2.

Conclure sur la capacité de ce moteur à effectuer cette nouvelle opération de « shifting ».