

SESSION 2017

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

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

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

COMPOSITION DU SUJET

- **TEXTE DU SUJET** : description du contexte et de la situation industrielle, problématique industrielle, parties et questions à traiter par le candidat, 18 pages (y compris celle-ci)
- **DT : DOCUMENTS TECHNIQUES** : documents spécifiques et relatifs au support de l'étude, données techniques.

DT1 : dessin d'ensemble de l'arbre récupérateur de polyane, 2 pages

DT2 : dessin d'ensemble de l'arbre récupérateur de polyane avec grandeurs indicatives, 1 page

DT3 : description du Roulement SKF 6013-RS et formulaire de calcul, 2 pages

DT4 : dessin d'ensemble de la solution à cames, 2 pages

DT5 : pression de contact (théorie de Hertz), 1 page

DT6 : dessin de définition du corps de guidage (solution à cames), 1 page

- **DR : DOCUMENTS RÉPONSES** : documents qui seront à compléter et à rendre par le candidat (tous les documents réponses sont à rendre, même non complétés).

DR1 : schéma cinématique de l'arbre de récupérateur de polyane, 1 page

DR2 : détermination graphique de grandeurs caractéristiques du fonctionnement de l'arbre récupérateur de polyane, 1 page

DR3 : diagrammes d'aide au choix de matériau, 1 page

DR4 : proposition de conception ensemble volant, 1 page

DR5 : analyse des surfaces fonctionnelles, 1 page

DR6 : analyse des antériorités fonctionnelles, 1 page

DR7 : analyse de spécification, 1 page

Les feuilles de copie remises au (à la) candidat(e) viendront compléter ces documents et permettront au (à la) candidat(e) de répondre au questionnement.

Après avoir complété les en-têtes, le (ou la) candidat(e) remettra en fin d'épreuve ses copies paginées et les documents réponses aux questions.

Le sujet comporte 3 parties distinctes :

- **Partie 1** : analyse de la solution actuelle ;
- **Partie 2** : conception de la solution à cames ;
- **Partie 3** : industrialisation du corps de guidage ;

Les questions dans chaque partie peuvent être traitées de façon indépendante.

Présentation de l'arbre récupérateur de polyane

Contexte et situation industriels

Trelleborg Tuyaux Industriels, dont le siège est à Clermont-Ferrand, emploie 700 collaborateurs. Cette société se positionne en leader européen du tuyau industriel basse et moyenne pression à base de polymères et propose une très large gamme de produits répondant aux différents segments d'applications. Trelleborg Tuyaux Industriels fait partie intégrante de la division Trelleborg Engineered System.



Figure 1: Le groupe TRELLEBORG

Ces tuyaux, pour les transferts de fluides (air comprimé, gaz, liquides, vapeur, hydraulique, ...) sont principalement fabriqués à base de caoutchouc. Le tube est au contact du produit véhiculé, et doit donc répondre à certaines exigences en termes de perméabilité, résistance au fluide, résistance aux hautes et basses températures, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, alimentaire, ...

Le tube est fabriqué à partir d'un mélange propre à chaque tuyau selon deux procédés de fabrication :

- fabrication sans tringle, diamètres de 4 à 28 mm ;
- fabrication sur tringle, diamètres de 10 à 1200 mm, longueur max. de 40 m.

Pour les diamètres importants l'utilisation d'une tringle permet de garantir la tenue des formes avant et pendant la cuisson. Les tringles sont ensuite extraites.



Fabrication sur tringle



Figure 2 : Tuyaux en caoutchouc fabriqué par la société Trelleborg

Pour ce type de fabrication, le caoutchouc est conditionné en rouleau. Les différentes couches de caoutchouc sont séparées par un film de polyane. Lors de l'élaboration des tuyaux de caoutchouc, le film polyane doit être séparé du caoutchouc avant que ce dernier soit enroulé sur une tringle (Figure 2). Le polyane est alors enroulé sur un cylindre de révolution : l'arbre extracteur de polyane (Figure 3).

L'étude porte sur l'amélioration du fonctionnement de l'arbre extracteur de polyane.

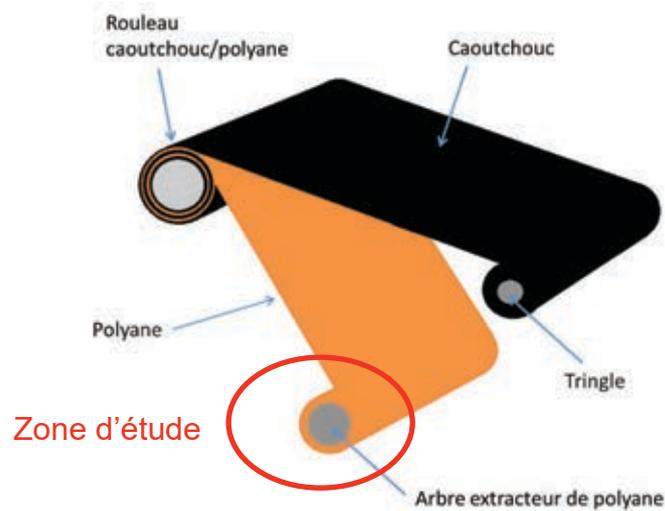
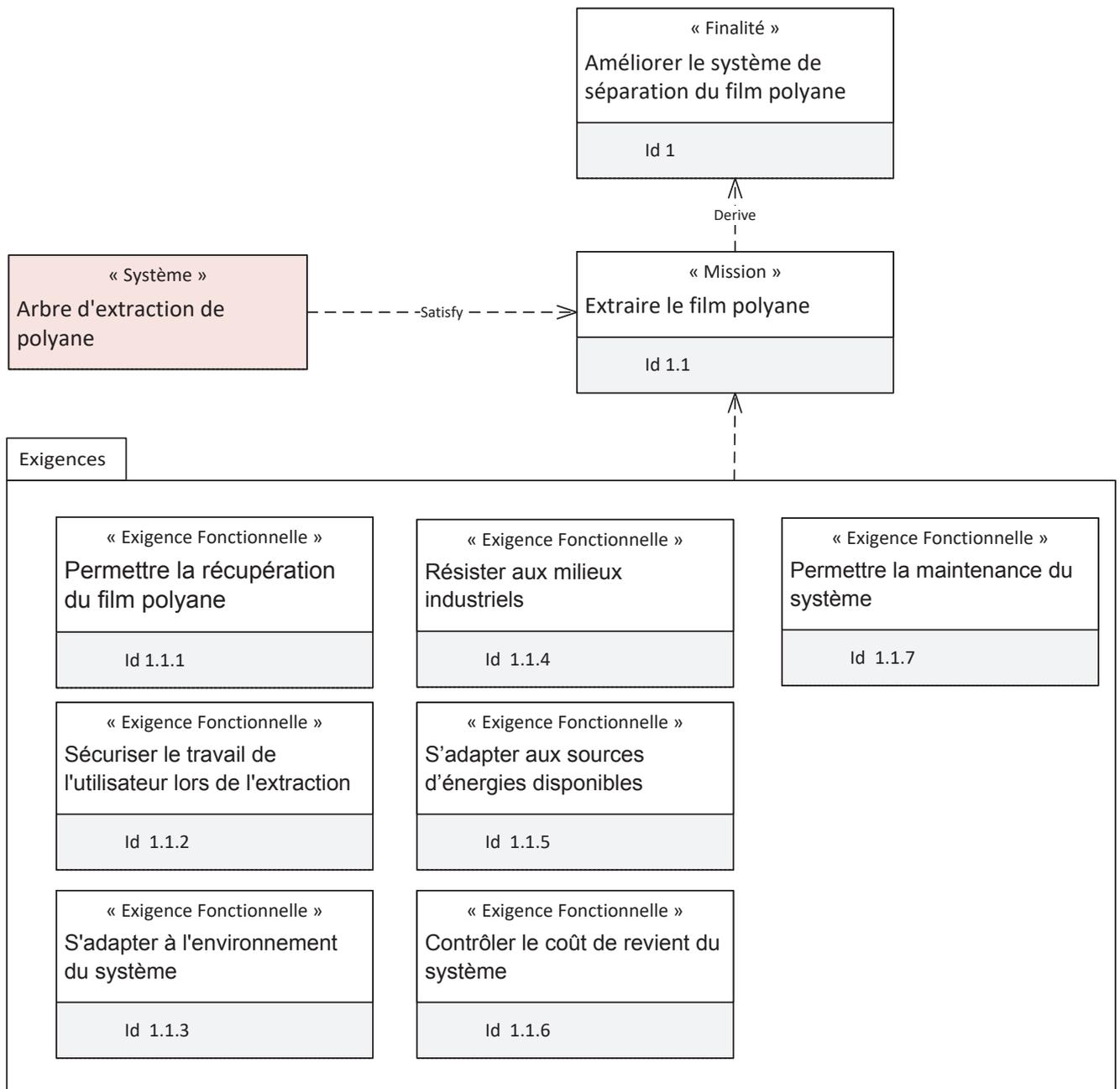


Figure 3 : Principe de mise en forme des tuyaux à partir de rouleaux de caoutchouc

Problématique industrielle

L'objectif de l'étude est de proposer et de comparer différentes solutions concurrentes répondant au cahier des charges fonctionnel afin d'améliorer le système d'extraction de polyane.

Extrait du cahier des charges



Caractérisation des exigences

Exigence	Libellé	Critère	Niveau
1.1.1	Permettre la récupération du film polyane	Effort d'extraction produit par l'utilisateur.	100 N maxi
		Temps d'extraction.	2 minutes maxi
		Epaisseur du rouleau polyane.	30 mm maxi
		Largeur du film polyane.	150 mm mini
			450 mm maxi
		Masse des rouleaux polyane.	8 Kg maxi
		Réduction du rayon souhaitée	20 mm mini
25 mm maxi			
1.1.2	Sécuriser le travail de l'utilisateur lors de l'extraction	Outils coupants.	0
		Nombre de parties saillantes.	0
1.1.3	S'adapter à l'environnement du système	Longueur d'encombrement.	550 mm maxi
		Diamètre d'encombrement.	150 mm maxi
		S'adapter à la motorisation existante.	150 tr/min mini
300 tr/min maxi			
1.1.4	Résister aux milieux industriels	Température de l'environnement.	10 à 60C°
		Humidité du local.	90% maxi
1.1.5	S'adapter aux sources d'énergies disponibles.	Énergie électrique.	400V triphasé 50Hz
1.1.6	Contrôler le coût de revient du système	Prix de revient.	5 000 € maxi
1.1.7	Permettre la maintenance du système	Durée entre deux interventions.	600 heures mini
		Temps de démontage de l'ensemble du système.	8 minutes maxi

1^{ère} partie : analyse de la solution actuelle

Temps conseillé : 1 heure 30

L'objectif de cette partie est d'évaluer la solution actuelle et d'identifier la cause des défauts constatés (voir ci-dessous) lors de la mise en service du système.

Actuellement, l'arbre de récupération fonctionne telle une solution parapluie afin de permettre l'extraction du film de polyane une fois le rouleau terminé (Figure 4). Le polyane est alors recyclé via une filière de gestion des déchets.

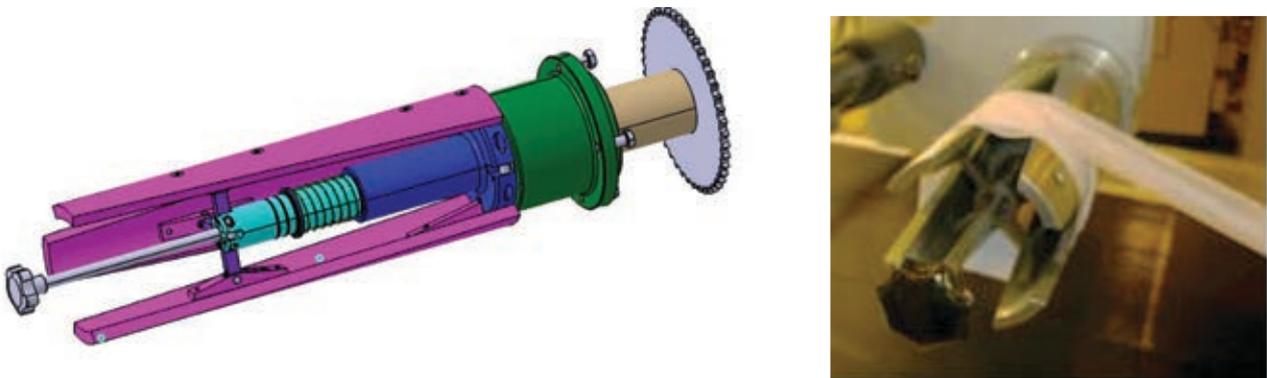


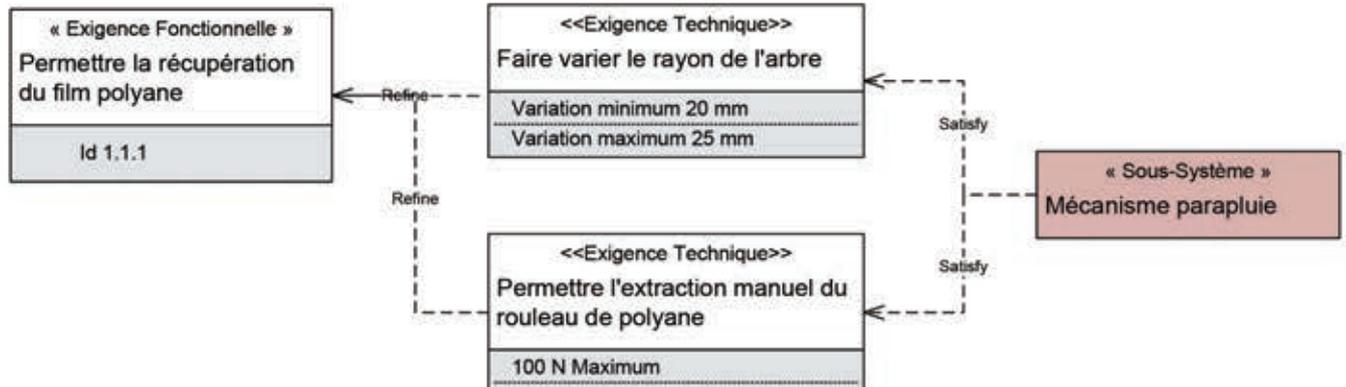
Figure 4 : arbre de récupération de polyane

Pour extraire le film de polyane enroulé, les pièces extérieures de l'arbre se rabattent sous une forme conique. Lorsque le polyane est de faible largeur (environ la moitié de l'arbre), l'enroulement se fait à l'extrémité de l'arbre. Lors de la phase d'extraction, la réduction de diamètre au niveau du film de polyane est suffisamment importante pour permettre son retrait aisé.

Par contre, lorsque la largeur du film de polyane est plus importante, la réduction du diamètre n'est pas suffisante pour l'extraire sans assistance. En effet, du fait de l'importante élasticité du polyane, le film reste en contact avec l'arbre dans certaines zones malgré la réduction de diamètre. Afin de pouvoir effectuer l'extraction, les opérateurs utilisent alors un maillet pour déverrouiller le système et un cutter pour couper le polyane.

Un plan d'ensemble associé à une nomenclature est fourni sur le document **DT-1**.

Analyse de la variation de diamètre



Question 1-1 Sur le document réponse **DR-1**, proposer un schéma cinématique minimal du système actuel lors de la phase de diminution du diamètre. On ne représentera qu'une seule pale afin d'avoir un schéma plan. A noter que les pièces (8) et (10) sont fixes. Justifier la modélisation des liaisons que vous proposez.

Question 1-2 Combien de degrés de mobilité et d'hyperstatisme possède le modèle du mécanisme que vous avez proposé sur le document **DR-1** ? Quel impact ces degrés ont sur la conception du système ?

Question 1-3 Sur le document réponse **DR-2**, déterminer graphiquement la course de l'axe mobile et la variation de diamètre minimum et maximum (c'est-à-dire aux deux extrémités du système « parapluie ») lorsque que le système est replié (pale inclinée de $2,5^\circ$). Conclure sur ces 3 valeurs.

Question 1-4 Expliquer comment le système se verrouille au niveau de la bielle (2) pour permettre l'enroulement du polyane. Quelles contraintes de conception et d'assemblage cela impose au niveau du système ?

Question 1-5 Expliquer comment le système se déverrouille pour permettre la réduction de diamètre afin d'extraire le polyane. Quelles contraintes de conception et d'assemblage cela impose ?

Nous considérons que lorsque l'épaisseur de polyane est maximale, une pression maximale de 1 N/mm^2 est exercée sur les pales de l'arbre de récupération de polyane. La largeur maximale du rouleau est de 450 mm.

Question 1-6 La forme de la surface projetée dans la direction de la bielle de la pôle considérée est fournie sur la Figure 5 (ci-dessous). Calculer l'effort appliqué sur la pale dans la direction de la bielle et la position de son point d'application (le représenter sur un schéma).

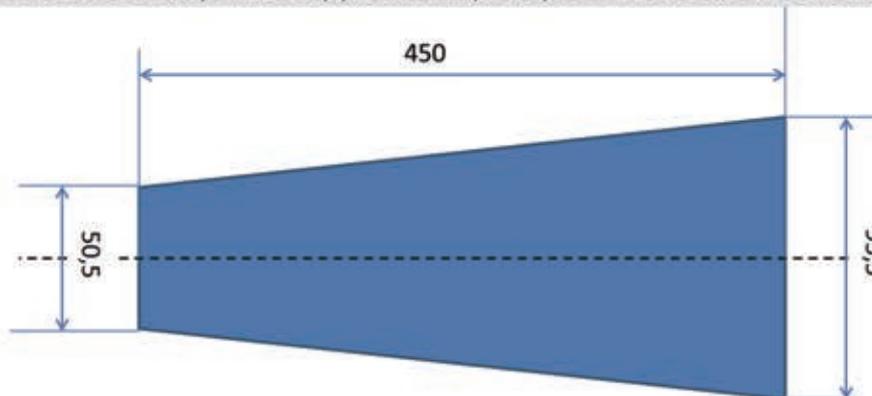


Figure 5 : surface projetée de la pale étudiée dans la direction de la bielle

Question 1-7 A partir des dimensions données sur le document DT-2, calculer l'effort sollicitant la bielle lorsque l'épaisseur de polyane est maximale et que les pales sont horizontales. On prendra soin de préciser les notations adoptées et les hypothèses faites.

Question 1-8 Nous considérons que la bielle est uniquement sollicitée en compression lorsque le polyane s'enroule sur l'arbre. Justifier cette affirmation.

Question 1-9 En considérant les données ci-dessous et en sachant que la section de la bielle, réalisée en acier, est rectangulaire, calculer son épaisseur minimale à partir des données du document DT-2 et de l'effort supporté. Conclure

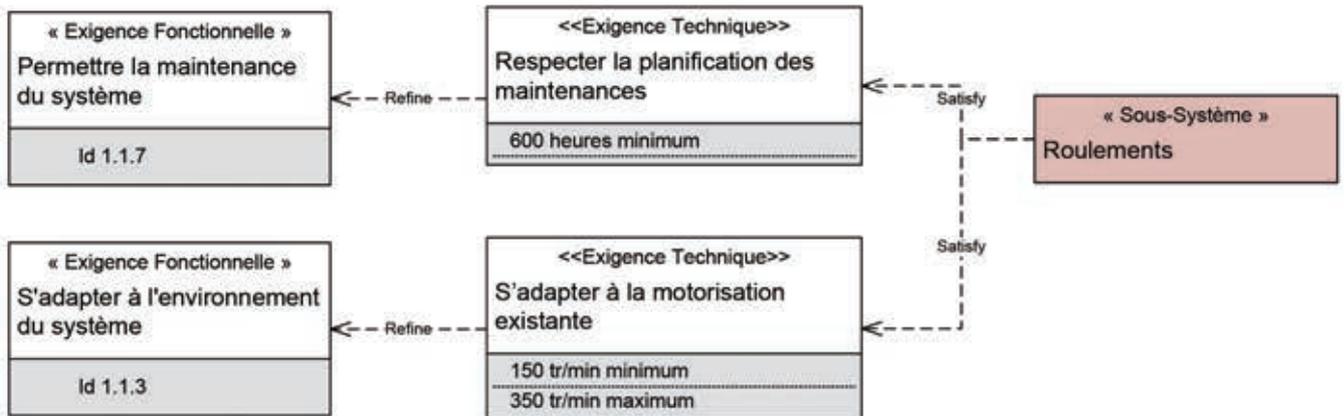
Données :

Acier : $E = 205 \text{ MPa}$, $R_{pe} = 235 \text{ N/mm}^2$

Effort appliqué sur la bielle = $23\,000 \text{ N}$

Poids des pièces : négligé devant les efforts mis en œuvre

Analyse de la liaison par roulements à billes



Question 1-10 Proposer un schéma cinématique du montage de roulement réalisant la liaison pivot de l'arbre de récupération de polyane avec le bâti. Justifier le choix de ce type de montage.

Nous considérons que l'arbre de récupérateur de polyane pèse 40 kg lorsque le rouleau de polyane atteint sa largeur et son épaisseur maximales. Son centre de masse est alors à 200 mm du centre du premier roulement comme le montre la Figure 6. L'effort de traction du polyane lors de la phase d'enroulement est de 25 N.

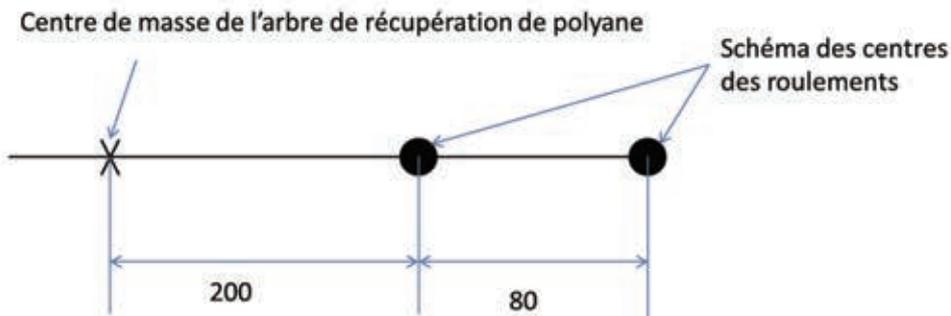


Figure 6 : position du centre de masse de l'arbre de récupération de polyane

Question 1-11 A l'aide du document DT-3, calculer la durée de vie du montage de roulements pour une vitesse de rotation de 350 tr/min.

Question 1-12 Lors de la phase d'extraction du polyane, un effort axial de 100 N est toléré. Vérifier le choix des roulements.

Question 1-13 Conclure quant à la capacité du système parapluie de satisfaire aux exigences du cahier des charges

2^{ème} partie : Etude d'une nouvelle solution

Temps conseillé : 1 heure

L'objectif de cette étude est d'étudier et d'optimiser une nouvelle solution répondant au cahier des charges et permettant une récupération aisée du rouleau de polyane quelle que soit sa largeur. La solution retenue utilise un système de cames et de poussoirs permettant la variation de diamètre (Figure 7).

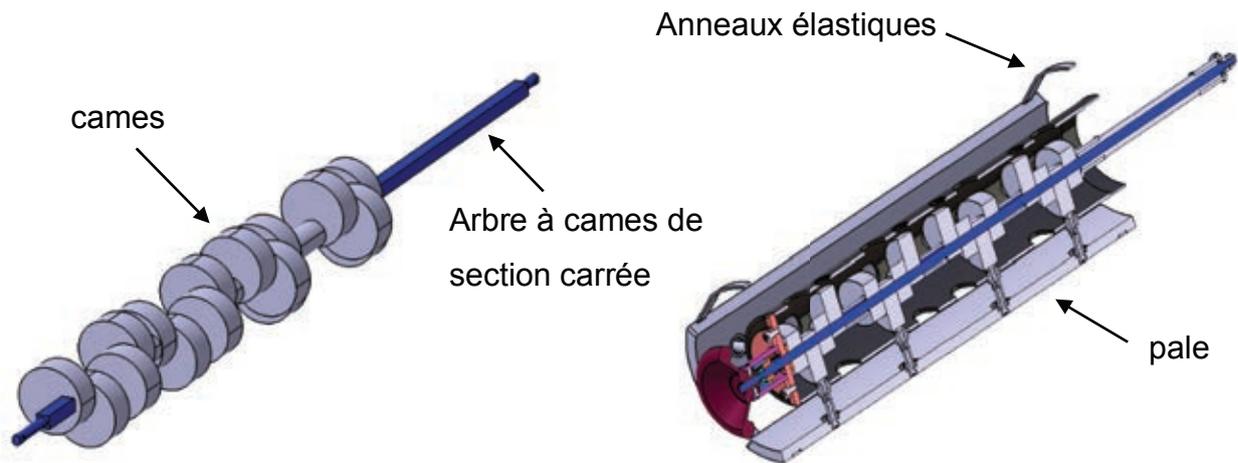
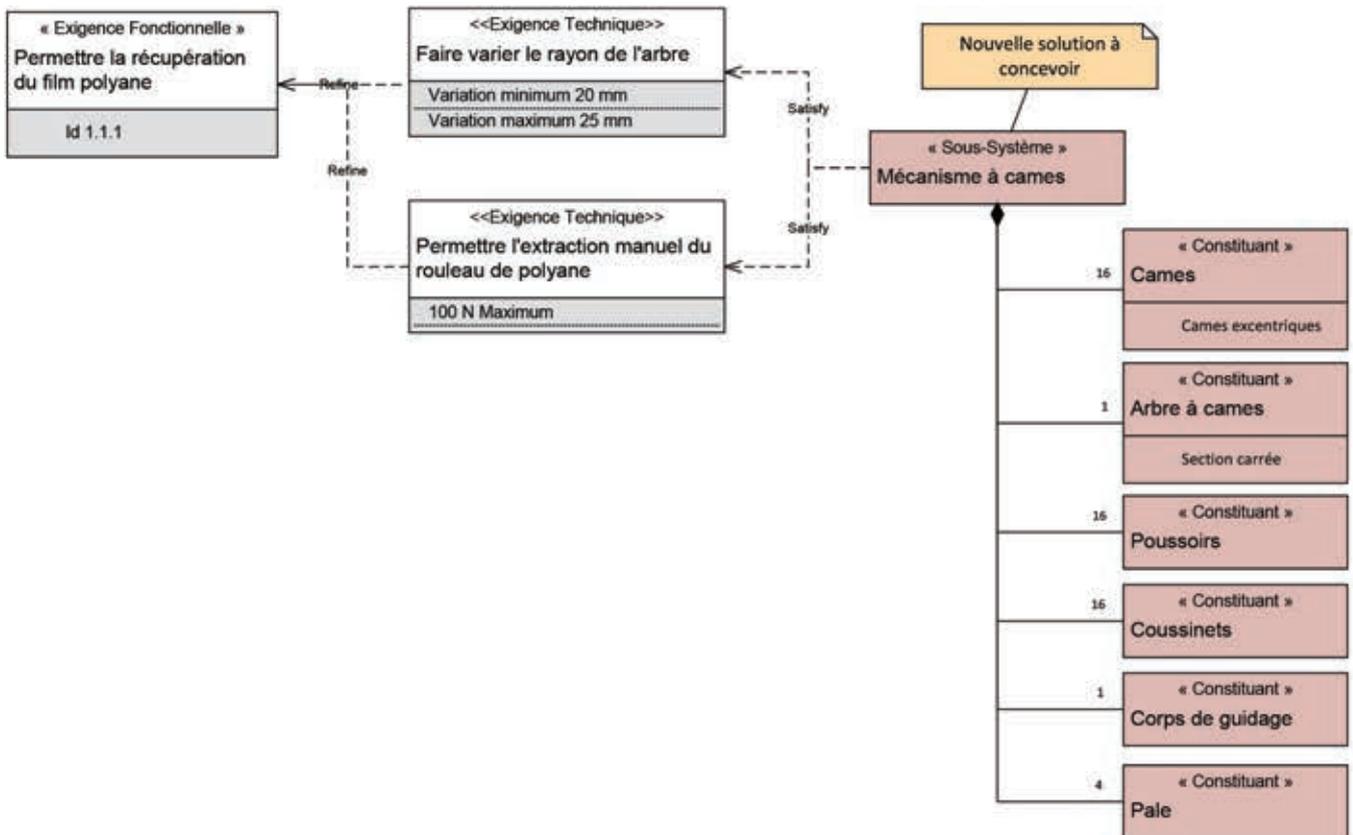


Figure 7 : arbre extracteur de polyane à cames

Le système est composé de 4 pales formant une géométrie cylindrique au diamètre maximum et permettant une réduction de diamètre sur toute la longueur. Chaque pale est soutenue par 4 poussoirs en contact avec les cames et maintenue grâce à des anneaux élastiques extérieurs. Ces poussoirs sont guidés par des coussinets solidaires du corps de guidage qui permettent la translation des poussoirs (Cf. Document technique DT4)



Conception du poussoir

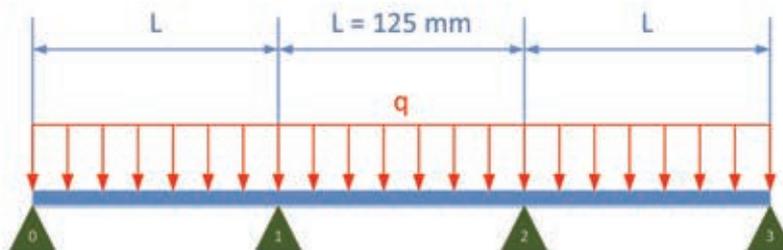


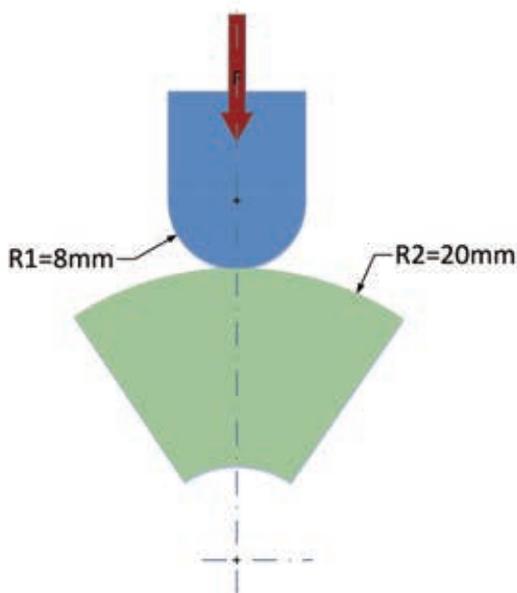
Figure 8: Modèle poutre associé à une pale

Question 2-1 Justifier le modèle poutre proposé exprimant le comportement d'une pale en appui sur les poussoirs puis proposer une démarche de résolution permettant de déterminer les efforts aux appuis.

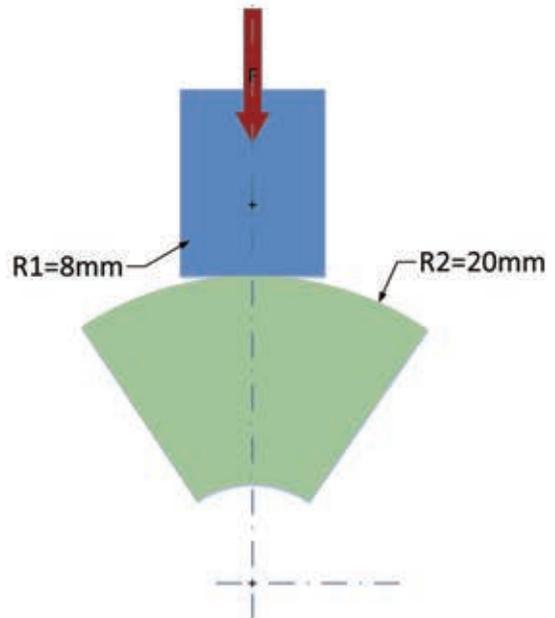
Question 2-2 En considérant que la surface projetée d'une pale est de 30513 mm^2 , déterminer l'effort maximal de la tête de poussoir sur l'excentrique, dû à l'enroulement du polyane sachant que ce dernier exerce une pression maximale de 1 N/mm^2 .

Question 2-3 Décrire une méthodologie et les critères associés permettant la sélection d'un matériau pour le poussoir. (Pour des raisons d'encombrement le diamètre du poussoir est limité à 8mm)

Question 2-4 Identifier sur le document DR-3 un matériau pour le poussoir puis vérifier son comportement mécanique au niveau global.



Contact sphère / cylindre



Contact plan / cylindre

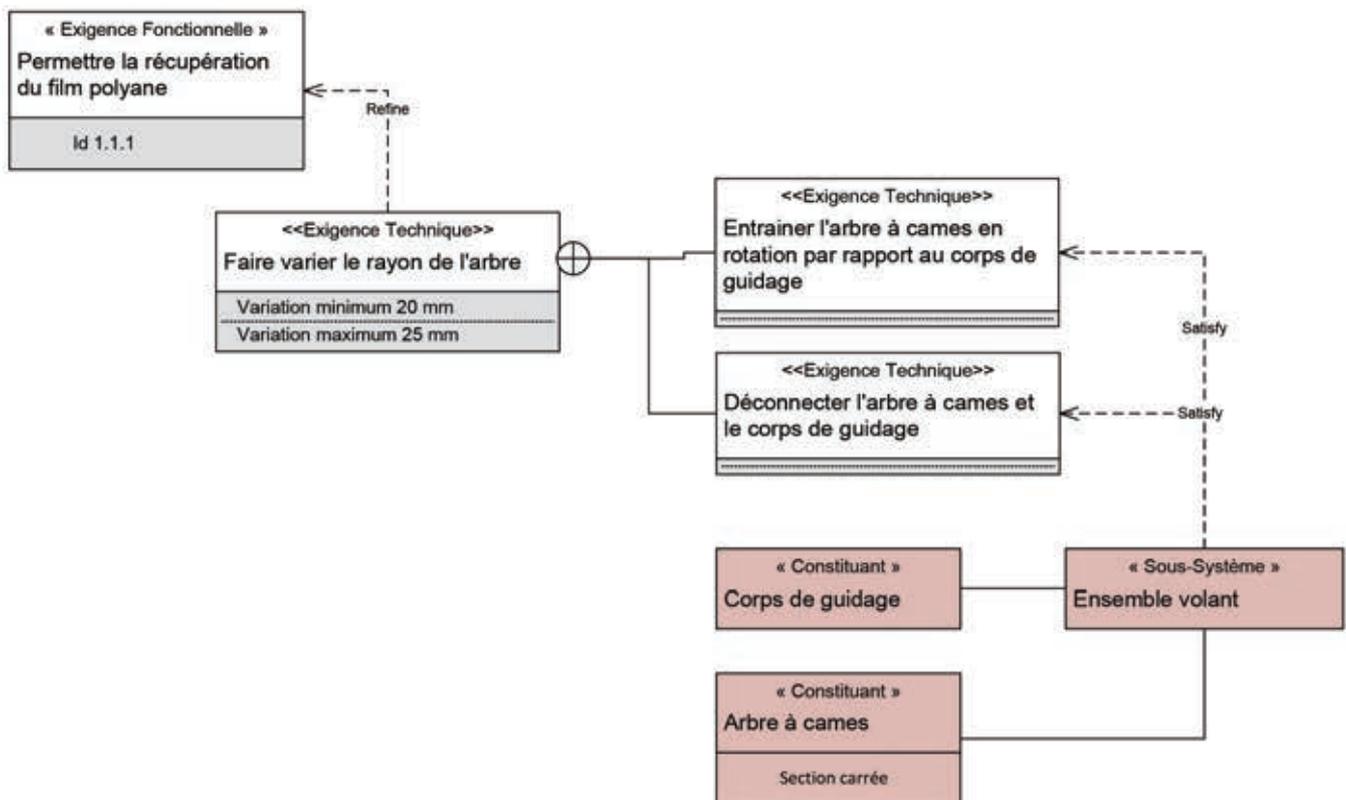
Question 2-5 Nous pouvons considérer 2 géométries possibles à l'extrémité du poussoir : sphérique ou plane. Choisir et justifier une solution de conception pour cette forme de poussoir.

Question 2-6 A l'aide du document technique DT-5, déterminer la pression maximale de contact entre le poussoir et l'excentrique, dans le cas d'un contact sphère/cylindre de matériau identique.

Question 2-7 Conclure définitivement sur le choix du matériau.

Etude du mécanisme de libération des pales

Lors de la phase d'enroulement du polyane, le corps de guidage est solidaire de l'arbre à cames et entraîné en rotation. Lors de la phase d'extraction du polyane, il est nécessaire de désolidariser le corps de guidage de l'arbre à cames pour rendre possible la diminution de diamètre. Cette première proposition de conception est représentée sur le Document technique **DT-4**.



Une réflexion est menée pour optimiser fonctionnellement les constituants de cet ensemble volant et de diminuer le nombre de pièces, en tenant compte des procédés de **fabrication additive** possible. Ceci dans un objectif de coût minimum (minimiser la matière), et en minimisant le nombre d'opération de reprise sur les éléments standard (volant).

Question 2-8 Sur cette première version de conception, le corps de guidage n'est pas positionné complètement par rapport à l'axe d'entraînement du côté de l'ensemble volant. Il est donc nécessaire de reconcevoir cet ensemble volant afin d'assurer ce positionnement. Justifier cette affirmation.

Question 2-9 Proposer, sous forme de croquis sur le document réponse **DR-4**, une solution de conception permettant de répondre à la remarque de la question précédente et de diminuer le nombre de pièces.

Question 2-10 En tenant compte des sollicitations mécaniques, proposer 2 méthodologies d'optimisation de structure.

Question 2-11 Conclure sur le choix du procédé de fabrication additive en explicitant les principales contraintes et avantages, préciser les précautions de mise en œuvre de ce procédé.

3^{ème} partie : Industrialisation du corps de guidage

Temps conseillé : 1 heure 30

L'objectif de cette étude est d'étudier la conception du corps de guidage et de valider sa réalisation par usinage.

Analyse fonctionnelle du corps de guidage

Les fonctions du corps de guidage sont principalement de guider les poussoirs, par l'intermédiaire des coussinets, et d'entraîner en rotation l'ensemble pales/poussoirs lors de la phase d'enroulement.

Question 3-1 Proposer une démarche structurée de spécification fonctionnelle du corps de guidage.

Question 3-2 Exprimer les conditions de fonctionnement sur copie. Identifier sur le document réponse **DR-5** les surfaces fonctionnelles, les classes de surface et les éléments de situation permettant de satisfaire la fonction de guidage des poussoirs.

Question 3-3 A l'aide du document ressource **DR-6**, justifier (ou discuter) les spécifications des surfaces de référence A, B et C présentes sur le document **DT-6**.

Question 3-4 Sur feuille de copie et à l'aide du document réponse **DR-7**, analyser et interpréter les spécifications suivantes présentes sur le document **DT-6** :

Ø 74 H8 $\text{\textcircled{E}}$

Intervalle de tolérance Qualité 8= 0,046mm

$\text{\textcircled{\phi}}$	0,1	CZ	A	B
-----------------------------	-----	----	---	---

Question 3-5 Proposer une gamme de contrôle pour cette spécification de localisation mobilisant une machine à mesurer tridimensionnelle.

Conception du processus de fabrication du corps de guidage

Le corps de guidage est une pièce réalisée en acier. Des coussinets en bronze sont montés serrés au niveau des poussoirs pour assurer leur guidage.

Question 3-6 Quel brut est-il pertinent d'utiliser pour le corps de guidage ? Justifier votre choix avec des critères fonctionnels et économiques.

L'effort d'insertion des coussinets dans le corps de guidage est estimé à 145 daN. Une simulation par éléments finis des contraintes induites au niveau du corps de guidage est donnée Figure 9. Les deux surfaces latérales sont considérées comme encastrées et l'effort d'insertion est distribué sur la surface cylindrique en contact avec le coussinet.

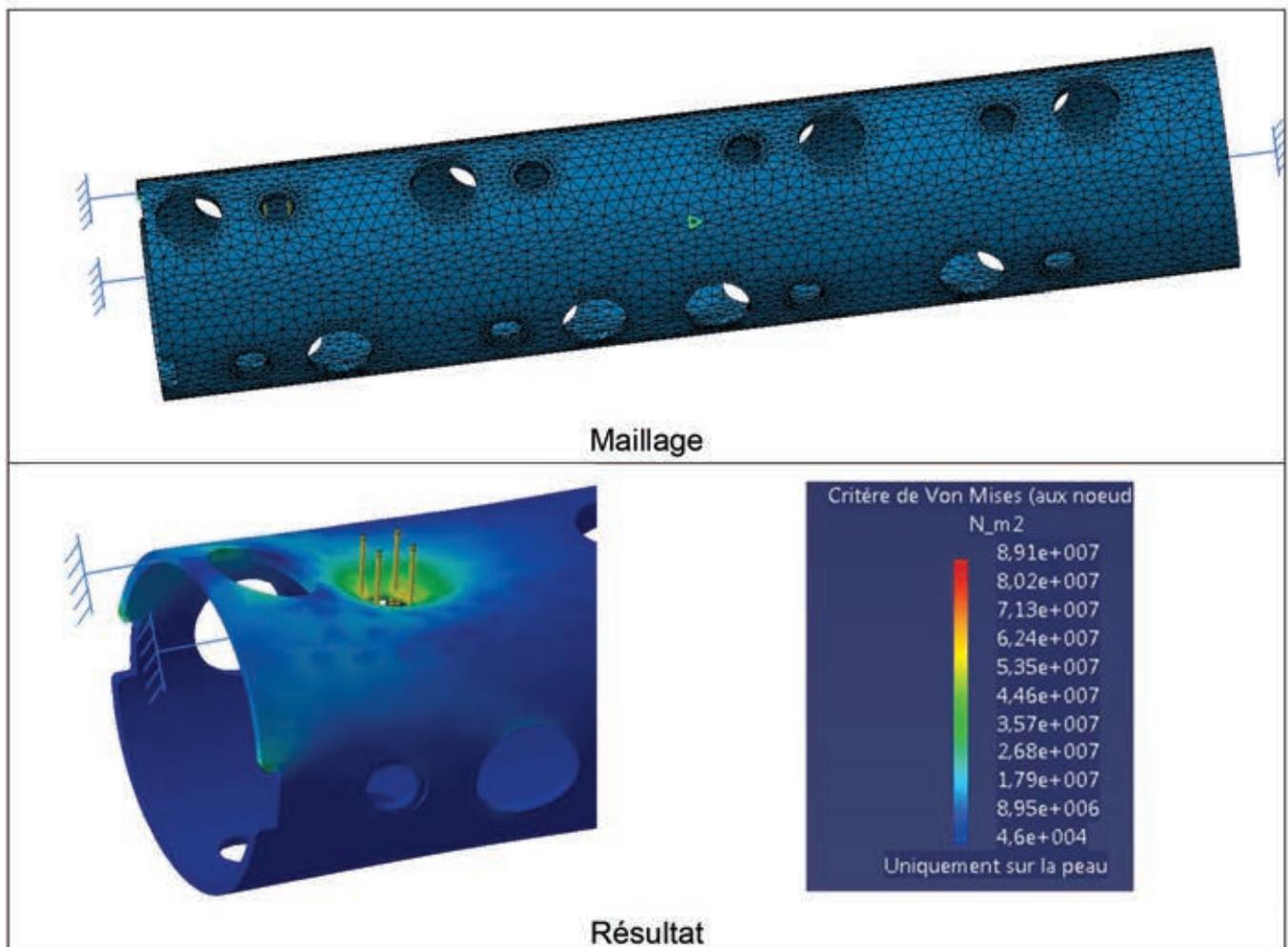


Figure 9 : simulation par éléments finis de l'insertion d'un coussinet

Question 3-7 Justifier le choix des conditions aux limites et du maillage de la simulation au regard des solutions technologiques nécessaires à l'insertion des coussinets. Cette simulation permet-elle de faire une validation globale sur l'ensemble du corps de guidage ? Conclure quant à la nécessité d'usiner les coussinets après l'assemblage.

Question 3-8, On s'intéresse à la fabrication des trous de $\varnothing 24$ du corps de guidage (DT-6). Proposer une stratégie d'usinage, justifier votre choix.

Question 3-9 Afin de réaliser un guidage correct, il est important de maîtriser la géométrie des trous $\varnothing 8$ des coussinets (Figure 10). Pour cela, une qualité H7 doit être garantie. Justifier le choix d'une opération d'alésage.

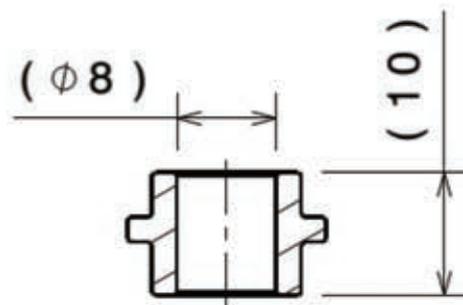


Figure 10 : dimension du coussinet de guidage des poussoirs

On considère que l'opération d'alésage des trous de $\varnothing 8$ est réalisée à partir d'un premier trou de diamètre 7 mm. Les conditions de coupe de l'opération d'alésage sont schématisées sur la Figure 11. L'outil utilisé est une barre à aléser à une dent. La plaquette choisie est de forme triangulaire avec un rayon de bec $r_{\varepsilon}=0,8$ mm et un angle d'attaque $\kappa_r=90^\circ$. Les premières conditions de coupe choisies sont : $f=0,1$ mm/tr, $V_c=500$ m/min.

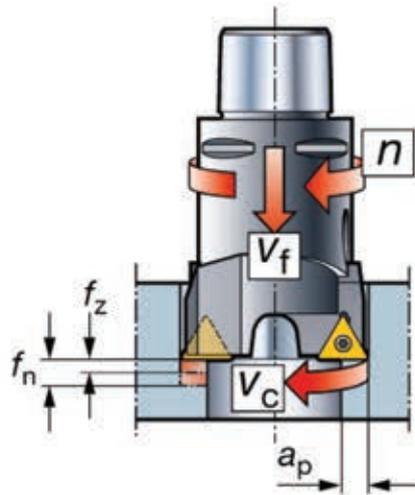


Figure 11 : conditions de coupe de l'opération d'alésage [Sandvik]

Question 3-10 Afin de valider ces premières conditions de coupe, calculer l'état de surface (rugosité totale) généré. Est-il acceptable ?

Question 3-11 Conclure vis-à-vis de cette gamme de fabrication des trous de guidage des poussoirs.

Question 3-12, De manière générale, quelles conclusions peuvent être portées sur cette solution à cames ? Quelle démarche et quelles précautions doivent être observées par la société avant le lancement en fabrication ?