

SESSION DE 2004

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : mécanique

épreuve de conception des systèmes

Durée : 8 heures

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

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

*Ce sujet est la propriété du candidat et ne doit pas lui être repris, même
partiellement. Il fournit toutes les informations nécessaires au travail demandé.*

*Le candidat est invité à proposer toutes les hypothèses et à choisir les données non
formulées dans le sujet et qui lui seraient nécessaires.*

*Après la distribution du sujet, le candidat dispose de 8 heures pour prendre
connaissance du sujet et répondre aux questions des trois parties.*

Le candidat devra **obligatoirement** rendre :

- 3 copies séparées intitulées partie I, partie II et partie III;
- les documents DR1 au format A4, DR2 au format A2 dans la copie intitulée partie II, le document DR3 au format A4 à rendre dans la partie III.

Ce sujet est constitué de :

1. Cette feuille de présentation (numérotée 0).
2. 14 pages d'énoncé, numérotées de 1 à 14.
3. Un dossier technique comportant 17 documents:

- Document 0-1 : Mise en situation : rectifieuse grande vitesse.
- Document 0-2 : Fiche signalétique de la machine.
- Document 0-3 : Ensemble : rectifieuse grande vitesse (format A4).
- Document 1-1 : Sous ensemble : axe X (format A3).
- Document 1-2 : Composants initiaux sur l'axe X.
- Document 1-3 : Caractéristiques des servomoteurs HS.
- Document 1-4 : Documentation vis à billes et écrou double.
- Document 1-5 : Documentation ensemble palier fixe.
- Document 1-6 : Sous ensemble : contre-pointe (format A2).
- Document 1-7 : Nomenclature (partielle) du sous-ensemble contre-pointe.
- Document 2-1 : Formulaire THEORIE DE HERTZ appliquée à la géométrie d'un roulement.
- Document 2-2 : Roulement à contact oblique sous chargement axial.
- Document 2-3 : Broche porte pièce (format A2).
- Document 3-1 : Dessin de définition de la meule CBN \varnothing 400 mm.
- Document 3-2 : Formulaire d'élasticité.
- Document 3-3 : Étude de la liaison complète meule - porte meule.
- Document 3-4 : Tolérances et ajustements.

4. Un dossier comportant 3 documents réponses :

Document DR1 Courbe de déflexion axiale (à rendre dans la partie II).
Document DR2 Broche porte meule Format A2 (à rendre dans la partie II).
Document DR3: Diagrammes de Ashby (à rendre dans la partie III).

Les auteurs du sujet recommandent au candidat de répartir le temps de travail de la façon suivante :

Lecture du sujet et compréhension du fonctionnement : 1h30

Partie 1 : analyse des solutions constructives : 2h

Partie 2 : Étude de la broche porte pièce et porte meule : 2h30

Partie 3 : Étude de la meule et de l'interface porte meule: 2h

Le thème proposé porte sur une machine de **rectification grande vitesse par contournage**. Les procédés d'élaboration de pièces par enlèvement de matière par abrasion sont parmi les plus anciens. Celui-ci a bénéficié des avancées technologiques pour obtenir des procédés plus rapides, moins chers, plus simples à mettre en oeuvre.

L'architecture de la machine est définie sur le document 0-3 (au format A4 en vue de dessus) et sur le document 0-1 (photos en couleurs). La fiche signalétique de la machine est définie sur le document 0-2.

La machine comporte deux axes orthogonaux, l'axe Z porte la pièce entre pointes (ce qui permet un cylindrage de la pièce) et l'axe X porte la broche porte meule (ce qui permet un dressage de la pièce). L'orientation des axes est définie par: Axe Z compté positivement de la broche porte pièce vers la contre-pointe, l'axe X compté positivement quand la meule s'éloigne de la pièce. Le plan XZ est horizontal, Y est vertical ascendant.

Ce sujet se compose de trois parties complètement indépendantes:

- **Partie 1: analyse des solutions constructives (temps 2h).**
- **Partie 2: étude de la broche porte pièce et porte meule (temps 2h30).**
- **Partie 3: étude de la meule et de l'interface porte meule (temps 2h).**

Il est conseillé une heure et demie pour la lecture intégrale du sujet.



Partie I : Etude des solutions constructives.

Objet de cette partie

- ❑ analyse de l'architecture globale de la machine.
- ❑ analyse du choix des composants de l'axe X et de son comportement dynamique.
- ❑ analyse fonctionnelle et structurelle du sous ensemble contre pointe.

Complément de Cahier des charges de l'axe X.

(La colonne flexibilité a été reproduite dans la colonne Niveaux dans cette étude)

Fonction	Critères	Niveaux - Flexibilité
Positionner la meule	Course d'approche	$X_{\max} = 300 \text{ mm}$
	Vitesse de déplacement rapide	$V_{X_{\max}} = 12 \text{ m/mn}$
	Accélération	$\gamma_{X_{\max}} = 1.25 \text{ m/s}^2 \text{ en standard}$
	Masse de l'axe équipé (en translation sur l'axe x)	700 kg
	Effort de rectification - en plongée - en cylindrage	$F_r < 200\text{N}$ $F_a < 200\text{N}$

1.a Architecture globale de la machine.

☞ Q1.1 Architecture globale de la machine.

Proposer un schéma d'architecture en perspective à main levée faisant apparaître les différents sous-ensembles de la machine et leur mobilité relative.

1.b Etude du sous ensemble : axe X.

L'axe X de la machine est celui qui est le plus sollicité dynamiquement. Cet axe permet un travail en plongée pour dresser une face.

Le document 1-1 définit le sous-ensemble axe X, et le document 1-2 définit les composants choisis initialement (donc non optimisés).

☞ Q1.2 Architecture de l'axe X.

À partir du plan d'ensemble document 1-1, et du document 1-2:

La table portant la broche porte meule est en translation par rapport au bâti de la machine (non défini sur le document 1-1).

Proposer un schéma cinématique de l'axe X, commenter la conception générale de l'axe de la machine ainsi que les choix des constituants.

☞ Q1.3 Temps positionnement de l'axe X.

Calculer la valeur minimale du temps de positionnement meule pour un déplacement radial de 300 mm. Calculer le temps et la distance d'accélération.

☞ Q1.4 Recherche de l'optimum inertie charge sur inertie moteur.

Par expérience pour obtenir un comportement dynamique et vibratoire de la machine compatible avec la qualité du procédé de rectification, on cherche à obtenir un rapport inertie mécanique sur inertie moteur compris entre 1 et 3. Avec 1 comme rapport optimum.

Montrer que l'accélération de la broche porte meule est maximale lorsque l'inertie équivalente de l'ensemble entraînée ramenée à l'arbre moteur est égale à l'inertie équivalente moteur.

Donner l'expression littérale du moment d'inertie total équivalent ramené à l'arbre moteur J_{Teq} . Application numérique dans le cas étudié, calculer J_{Teq} et J_{Teq}/J_{mot} .

☞ Q1.5 Caractérisation du moteur de l'axe X en rectification de plongée.

Estimer les principales caractéristiques dynamiques d'entraînement du moteur d'avance en rectification de plongée selon X en régime permanent (pendant l'avance rapide): vitesse maximale d'utilisation et couple dynamique permanent. Vérifier le choix du moteur.

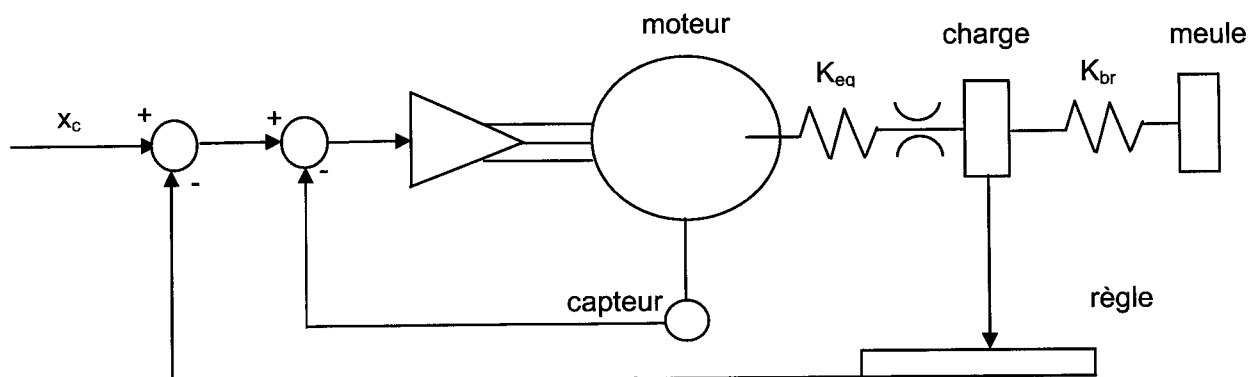
Estimer le couple dynamique maximal en régime transitoire, à partir des caractéristiques des composants choisis.

☞ Q1.6 Modèle de comportement de l'axe X.

Identifier les éléments élastiques, dissipatifs et les différentes masses, proposer un modèle discret (masse et inertie concentrées et ressort sans masse, amortisseur sans masse). Les résultats seront portés dans un tableau de synthèse, les valeurs numériques tirées de la documentation proposée ou estimées à partir d'hypothèses simplificatrices. Proposer un modèle masse ressort à un degré de liberté en translation.

☞ Q1.7 Etude dynamique de l'axe X.

La modélisation retenue pour cette question est la suivante : Modélisation du fonctionnement électromécanique (deux raideurs).



C'est le modèle simplifié le plus proche de la réalité. Il tient compte de l'élasticité entre le chariot mobile et la meule qui peut être approximée par la rigidité radiale de la broche au

droit de la meule K_{br} (cette rigidité sera étudiée dans la partie II, le candidat la considèrera comme infinie). La mesure au niveau de la meule n'est pas possible, mais c'est pourtant le comportement du centre de meule qui définit la géométrie et l'état de surface de la pièce usinée.

L'asservissement en vitesse de l'axe X est réalisé par un retour de vitesse du moteur, mesuré par un capteur rotatif. L'asservissement en position est réalisé avec retour de position obtenu au moyen d'une règle de mesure optique placée sur le bâti de la machine.

A partir du tableau construit à la question 1.6, calculer la raideur équivalente K_{eq} . En déduire une estimation de la première fréquence propre mécanique de l'axe à partir des données du document 1-2.

☞ **Q1.8 Augmentation de la bande passante de l'axe.**

On désire augmenter la première fréquence propre mécanique de l'axe à 100Hz.

Sur quels paramètres mécaniques peut-on jouer pour agir sur la bande passante. Proposer des nouveaux choix de composants à partir du document 1-4 et document 1-5. Vérifier la compatibilité du moteur avec le critère de la question 1.4 ou en choisir un nouveau à partir du document 1-3.

☞ **Q1.9 Modifications d'architecture.**

Quel serait l'avantage de monter la vis à billes sur deux paliers fixes avec précontrainte de la vis.

Analyser les avantages / inconvénients d'un montage écrou tournant et vis fixe.

1.c Analyse fonctionnelle de la contre-pointe.

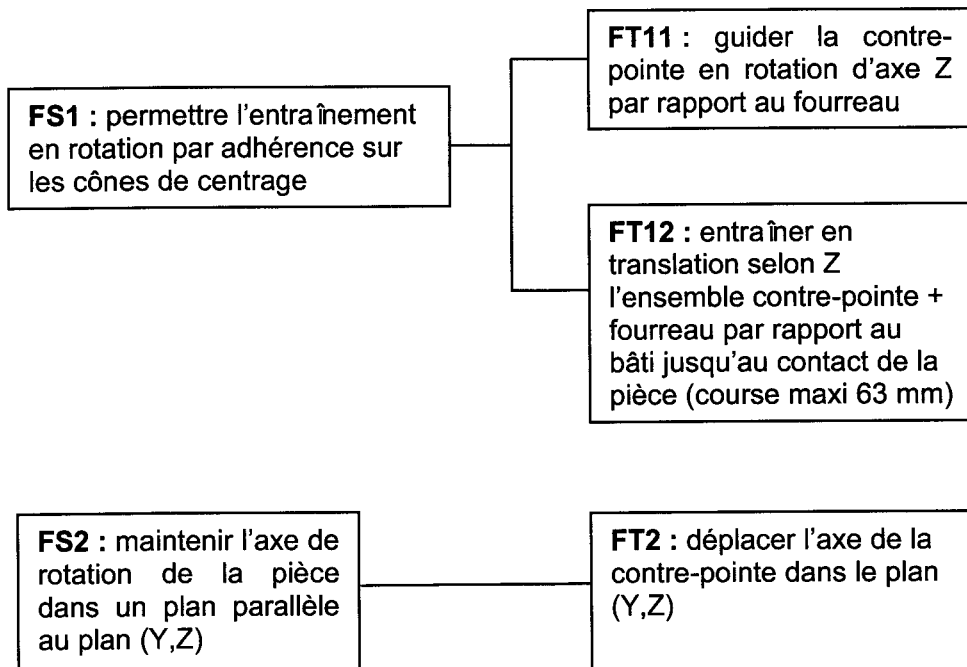
☞ **Q1.10 Analyse fonctionnelle et structurelle de la contre-pointe.**

Lors d'un cylindrage de la pièce, pour éviter une forme conique, l'axe matérialisé par l'ensemble pointe / contre-pointe doit être parallèle à l'axe de translation Z de la pièce.

Le dessin d'ensemble de la contre-pointe et du système de réglage est fourni sur le document 1-6, la nomenclature sur le document 1-7.

La contre-pointe, située à une hauteur de 180 mm par rapport au plan horizontal de référence (X,Z), doit :

- Etre parfaitement guidée en rotation autour de son axe.
- S'adapter à la longueur de la pièce, avec une course 63 mm maximale.
- Exercer un effort d'appui sur la pièce à rectifier.
- Maintenir l'axe de rotation de la pièce dans un plan parallèle au plan (Y,Z).



Complétez l'analyse fonctionnelle ci-dessus en y indiquant les pièces mises en jeu pour la réalisation de chaque fonction.

Proposer un schéma cinématique de ce double système de réglage.

Quel est l'écart de position maximal compensé dans la direction X ?

Partie II : Analyse de la broche porte pièce BPP (7500 tr/mn) et synthèse de la broche porte meule BPM (15000 tr/mn).

Mise en situation.

Il existe différentes technologies d'électrobroches, pour les machines d'Usinage Grande Vitesse.

À chaque secteur d'activité correspond une technologie plus spécifique. La broche devient l'un des éléments de la chaîne UGV le plus important.

Cette partie porte sur l'analyse des solutions constructives de la broche porte pièce qui tourne à 7500 tr/mn. Ces résultats seront utilisés pour la synthèse (conception) de la broche porte meule qui tourne à 15000 tr/mn.

NOTA :

Dans cette partie des modèles approchés de comportement de roulements seront utilisés d'une part pour rester dans le cadre d'une épreuve en temps limité de 8 heures et d'autre part pour préserver le savoir-faire du concepteur de la broche.

Nomenclature (partielle) du sous ensemble broche porte pièce.

Repère	Désignation	Nbre	Observations
1	corps	1	
2	système d'étanchéité	1	
4	Stator du moteur d'électrobroche	1	
9	Bobinage stator	1	Refroidissement par eau
12	Arbre	1	
14	Roulement de tête	2	
16	Entretoise	1	
21	Rotor electrobroche	1	
24	Roulement de queue	1	
31	Codeur	1	
33	Entretoise	1	
38	Couvercle arrière moteur	1	
45	Ressort	6	Précontrainte initiale du roulement de queue

2.a étude locale du composant roulement.

Le Document 2.1 reprend les éléments de cours de la théorie de Hertz qui permettent de caractériser le comportement local au niveau d'un élément roulant.

☞ Q2.1 Etude de la loi de comportement locale.

Montrer que la loi de comportement locale au niveau d'un élément roulant peut se mettre sous la forme :

$$Q = K_n \cdot \delta^p \quad \text{eq 2.1}$$

avec $p = 3/2$ pour un roulement à billes, Q la charge transmise par l'élément roulant et δ le déplacement du centre de courbure de la bague extérieure BE par rapport au centre de courbure de la bague intérieure BI.

Proposer sous forme d'organigramme le calcul du coefficient K_n de la loi de comportement.

On précisera les principales hypothèses utilisées pour cette modélisation.

☞ **Q2.2 Etude du comportement du roulement sous charge axiale.**

En utilisant les notations définies dans le document 2.2

Montrer que la loi de comportement axiale du roulement peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{F_a}{ZK_n(BD)^{1.5}} = \sin(\alpha) \left(\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha)} - 1 \right)^{1.5} \quad \text{eq 2.2}$$

Montrer que le déplacement axial du roulement peut se mettre sous la forme suivante :

$$\delta_a = \frac{BD \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos(\alpha)} \quad \text{eq 2.3}$$

☞ **Q2.3 Calcul de l'angle de contact sous charge.**

Le coefficient de la loi de comportement K_n est une fonction de l'angle de contact final α , l'équation précédente doit être résolue par des méthodes itératives.

En adoptant une théorie simplifiée, le coefficient de la loi de comportement K_n peut se mettre sous la forme suivante :

$$K_n = \frac{KD^{0.5}}{B^{1.5}} \quad \text{eq 2.4}$$

relation dans laquelle le coefficient K ne dépend que du coefficient B , la courbe caractérisant cette évolution est donnée dans le document 2.2

l'équation 2.2 devient alors :

$$\frac{F_a}{ZD^2K} = \sin(\alpha) \left(\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha)} - 1 \right)^{1.5} \quad \text{eq 2.5}$$

Proposer un algorithme de résolution de l'équation 2.5

Application numérique :

Pour un chargement axial $F_a = 600\text{N}$ et la géométrie interne du roulement définie sur le Document 2.2, calculer

- L'angle de contact sous charge α ;
- Le déplacement axial δ_a de la BI/BE.

2.b Etude du comportement de la broche.

☞ Q2.4 Etude de l'installation de la pré charge.

On installe une précharge axiale de $F_p = 600\text{N}$ dans la liaison pivot constituée des deux roulements de tête (rep 14), le troisième roulement de queue (rep 24) ne sera pas pris en compte dans cette question.

En utilisant les relations et notations de la partie 2.a calculer l'angle de contact α_p de chaque roulement et le déplacement δ_p à installer pour réaliser cette précharge (pour un roulement).

Expliquer en quelques lignes la procédure à suivre pour installer cette précharge.

☞ Q2.5 Calcul de la raideur axiale de la broche.

La broche est maintenant soumise à un chargement purement axial F_a .

Ecrire le système d'équations à résoudre pour déterminer le déplacement axial δ_a de l'arbre.

Pour la résolution de ce système, on pourra utiliser la courbe de déflexion axiale du roulement de tête (rep 14) fournie sur le document DR1.

Calculer le déplacement axial de la broche sous une charge purement axiale de référence de valeur $F_a = 1000\text{N}$.

Sur le document DR1 à rendre dans cette partie, tracer la courbe de raideur axiale de l'axe $F_a = f(\delta_a)$, la courbe sera construite en trois points et les quantités F_1 , F_2 , F_a , F_p , δ_1 , δ_2 , δ_a , δ_p seront repérées clairement sur le graphique.

F_1 : effort sur le roulement 1

F_2 : effort sur le roulement 2

F_a : effort axial extérieur.

F_p : effort de précontrainte.

δ_1 : déplacement axial du roulement 1 sous charge F_1

δ_2 : déplacement axial du roulement 2 sous charge F_2

δ_a : déplacement axial de l'arbre sous charge F_a

δ_p : déplacement axial des roulements sous charge F_p

A partir de l'état préchargé, préciser la référence prise en compte pour les déplacements δ_1 , δ_2 , δ_a .

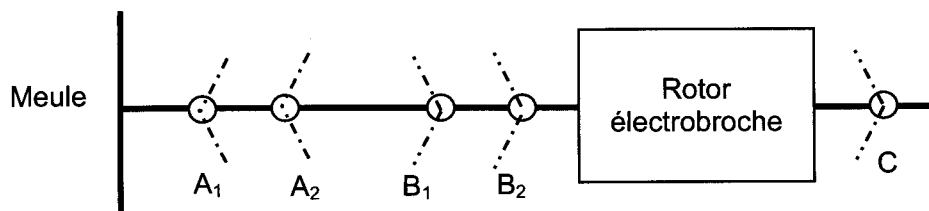
☞ Q2.6 Influence du troisième roulement sur la rigidité radiale statique et dynamique.

On désire étudier en avant projet l'influence du roulement de queue (rep 24) sur la rigidité statique et dynamique de la broche. Proposer une modélisation (hypothèses, type d'éléments, chargement, conditions aux limites, etc...) en vue d'une étude statique ou dynamique de la broche.

2.c Synthèse de la broche de meule (15000 tr/mn).

Compte tenu des modèles simplifiés mis en place dans les paragraphes 2.a et 2.b, on envisage de concevoir suivant le même principe la broche porte meule.

Une étude réalisée par le fournisseur des roulements préconise une broche respectant l'architecture définie ci-dessous.



Les roulements A₁ et A₂ forment le palier fixe, les roulements B₁ et B₂ forment le palier mobile. Le roulement de queue C est monté sans jeu radial et précontraint axialement. Les roulements A₁ et A₂, B₁ et B₂ ont pour dimension d=80, D=125 et B=22, le roulement C de queue a pour dimension d=50, D=80, B=16. Les roulements acier de la broche porte pièce sont remplacés par des roulements hybrides (acier-céramique).

☞ Q2.7 Modèle de comportement du roulement.

Le modèle mis en place dans la question 2.1 est-il toujours acceptable ? Justifier, application numérique à l'appui.

☞ Q2.8 Mise en place de la précontrainte sur la nouvelle broche.

Le choix de l'électrobroche s'est porté sur un moteur synchrone. Justifier le choix de ce type de motorisation par rapport à d'autres (asynchrone, ...).

Une étude thermique par simulation numérique a permis de trouver les ordres de grandeurs en régime permanent des températures des bagues des roulements et des entretoises.

On note T_e et T_i la température moyenne de l'arbre et de l'alésage, et ΔT la différence de température T_i - T_e qui peut atteindre 5°C en nominal et 10°C en transitoire.

Justifier, application numérique à l'appui, pourquoi le système de mise en place de la précontrainte de la question 2.4 n'est plus adapté à cette nouvelle broche.

Rappel : coefficient de dilatation de l'acier $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

☞ Q2.9 Modèle de comportement du troisième roulement.

Dans la conception de cette nouvelle broche, les fréquences de rotation imposent une conception sans jeu radial.

Proposer une solution constructive permettant d'annuler le jeu du roulement C de la broche porte meule.

La fréquence de rotation impose un changement du mode de lubrification des roulements par rapport à la solution retenue pour la broche porte pièce (graissage à la graisse). On envisage une lubrification air huile :

☞ Q2.10 Préciser le coté du roulement à lubrifier pour que l'huile entre dans celui-ci.

- pression d'air dans la conduite d'amenée, env 3 bar
- diamètres de tuyère d'amenée, 0.5 à 1 mm.
- Amené parallèle à l'axe de rotation de la broche entre l'épaulement de la bague intérieure et l'alésage de la cage.
- Nombre de tuyères, séparées pour chaque roulement, une par 150 mm de circonférence.
- Diamètre du cercle de répartition des tuyères 99 mm.
- Tubes d'amenée : diamètre intérieur 2 à 2.5 mm, tuyau flexible en matière synthétique transparente de sorte que le courant d'huile soit visible, raccord au pas gaz 1/8.

☞ Q2.11 Conception de la nouvelle broche.

Sur le document DR2 proposer :

un nouveau système de mise en place de la précontrainte (question 2.8).

une solution constructive pour l'implantation du roulement de queue C, sans jeu radial (question 2.9).

Un système de lubrification (question 2.10).

- Le codeur sera schématisé avec les mêmes dimensions que pour la broche porte pièce.
- Un circuit de drainage sera prévu pour récupérer l'huile et l'eau de condensation.
- L'étanchéité entre l'arbre et le palier gauche sera assurée par la même solution que pour la broche porte pièce.