

1489-A

23522
repère à reporter sur la copie

SESSION DE 2002

**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.

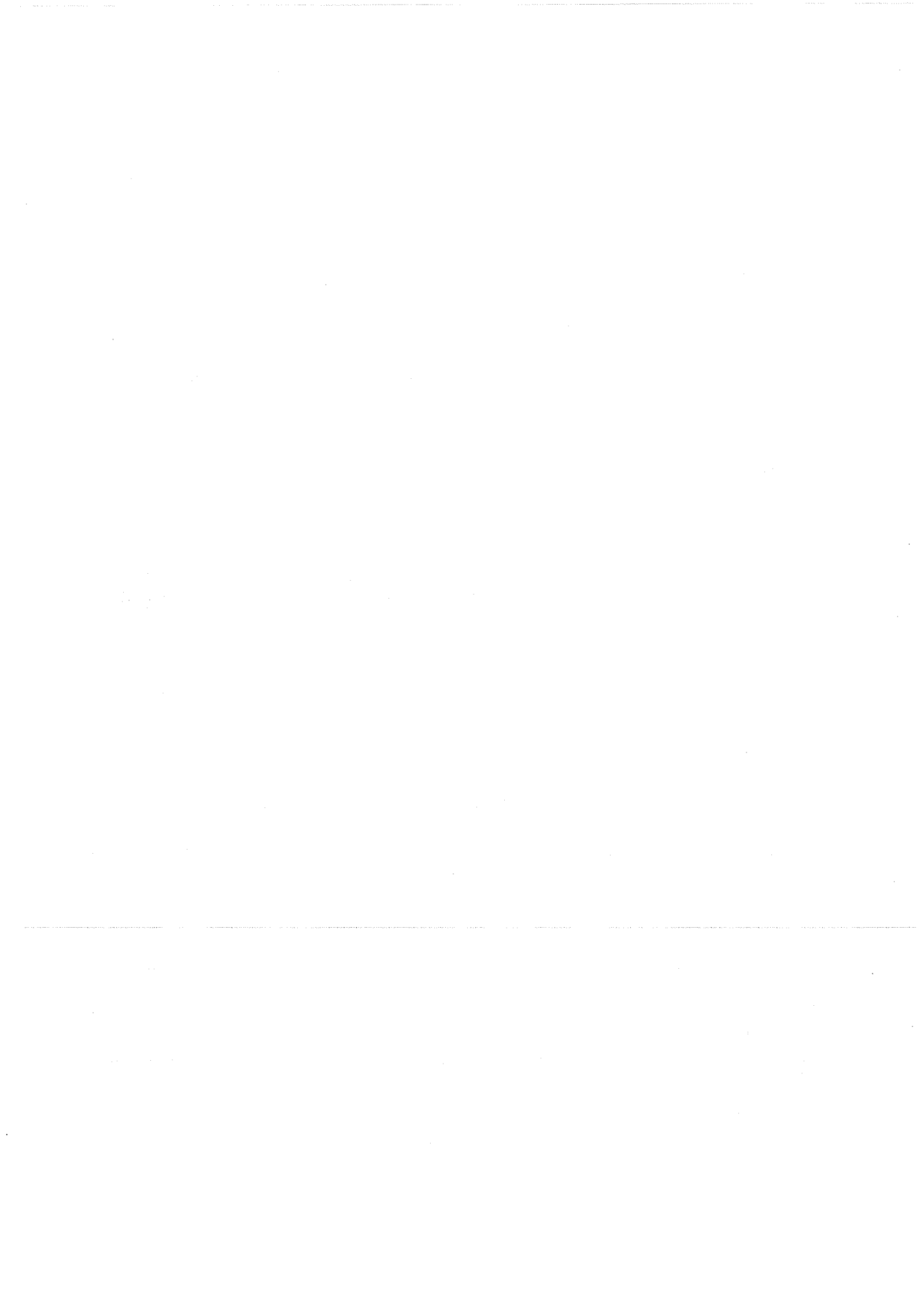
Le candidat est invité à proposer toutes les hypothèses et à choisir les données non formulées dans le sujet et qui lui seraient nécessaires.

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 ;
- le document DR1 au format A2.

Tournez la page S.V.P.



Ce sujet est constitué de :

1. Cette feuille de présentation.
2. 20 pages d'énoncé, numérotées de 2 à 21.
3. Un dossier technique comportant seize documents:
 - Document 0 : Documentation du constructeur.
 - Document 1 : Vues d'ensembles de la machine, échelle 1 : 4 au format A2.
 - Document 2 : Dessin d'ensemble du système de palpation au format A1.
 - Document 3 : Extrait de la nomenclature du système de palpation.
 - Document 4 : Analyse fonctionnelle partielle.
 - Document 5 : Caractérisation des capteurs, actionneurs et guidages.
 - Document 6 : Diagramme fonctionnel partiel.
 - Document 7 : Dessin de définition d'un arbre à cames étalon avec spécifications géométriques partielles, au format A3.
 - Document 8 : Modélisation du barreau et du support de palpeur.
 - Document 9 : Matériau et section du barreau.
 - Document 10 : Paramètres de conception du barreau et du support de palpeur.
 - Document 11 : Dessin de détail du support de palpeur.
 - Document 12 : Résultats des simulations numériques du comportement du support de palpeur.
 - Document 13 : Boîtier à galets.
 - Document 14 : Nouveau palier intermédiaire.
 - Document 15 : Figurines.
4. Un dossier comportant 1 document réponse :

Document DR1 : Modification de la tête de mesure, au format A2.

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 de l'architecture de la machine : 1h30

Partie 2 : analyse du système de palpation : 2h

Partie 3 : conception du guidage de l'axe X : 3h

MACHINE FLEXIBLE DE CONTROLE DIMENSIONNEL ET D'ECARTS DE FORME

0. INTRODUCTION

0.1. Présentation du contexte

L'automatisation croissante du montage automatique en lignes de production impose une analyse de qualité à tous les stades de l'élaboration des pièces.

Quelques entreprises ont porté leur savoir faire au plus haut niveau technologique dans les domaines suivants du contrôle automatisé :

1. Mesure dimensionnelle électronique ou pneumatique ;
2. Mesure de couple et d'effort ;
3. Contrôle non destructif (relevés de tapures, criques, ...) ;
4. Contrôle d'étanchéité ;
5. Contrôle de denture en pignonnerie ;
6. Machines et lignes de montage et de calage ;
7. Bancs d'essais ;
8. Centrales de mesure et d'acquisition.

L'effort de recherche dans les domaines de spécialisation a notamment porté sur :

- ⇒ **La flexibilité** du contrôle, de façon à pouvoir contrôler différentes cotes d'une pièce de même famille sans changement de l'organe de mesure.
- ⇒ **L'assistance en contrôle qualité**, afin de permettre à l'opérateur d'effectuer un suivi statistique en temps réel de sa production.
- ⇒ **La traçabilité** (marquage laser ou jet d'encre, micro percussion, peinture à froid).
- ⇒ **La précision des mesures**, les techniques utilisées assurent le plus souvent la mesure du micromètre.
- ⇒ **La maîtrise d'œuvre** des ensembles, avec automatisation complète du contrôle en y incluant les systèmes de chargement et de déchargement.

0.2. Le marché et ses besoins

Jusqu'à récemment, la production était organisée chez les constructeurs automobiles selon le schéma de la ligne de transfert.

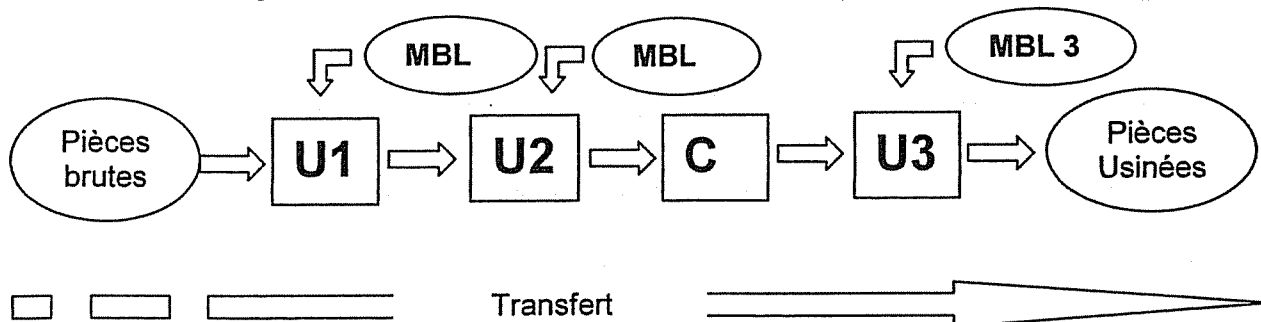


Figure 1 : Schéma de la ligne de transfert

1. U 1, 2, 3 ... Postes et machines d'usinage.
2. C : Machine de contrôle automatique.
3. MBL 1, 2, 3, ... « Montage bord de ligne ». Ces machines effectuent des mesures, par prélèvement d'échantillons de la production, contrairement aux machines de contrôle automatique qui vérifient 100% de la production.

Chaque machine est dédiée à un seul type d'usinage et le « MBL » permet de corriger les dérives des critères de production (dérives lentes, géométrie machine, usure et réglage des outils), il est spécialisé par phase d'usinage.

Ce système est fiable, mais pas flexible, d'où des coûts d'exploitation élevés : à chaque changement de produit ou évolution de celui-ci, il y a changement de machine d'usinage et de « MBL ». Jusqu'à récemment, les constructeurs automobiles construisaient une ligne de fabrication pour 15 ans. Aujourd'hui, leurs produits ont une durée de vie moyenne de 3 à 5 ans. Ils cherchent donc tous à utiliser des moyens de production et de contrôle flexibles.

0.3. Evolutions de l'organisation chez les constructeurs automobiles

Afin de gagner en flexibilité et en coût, la production s'oriente de plus en plus vers un schéma de lignes dites « agiles » de centres d'usinage (CU).

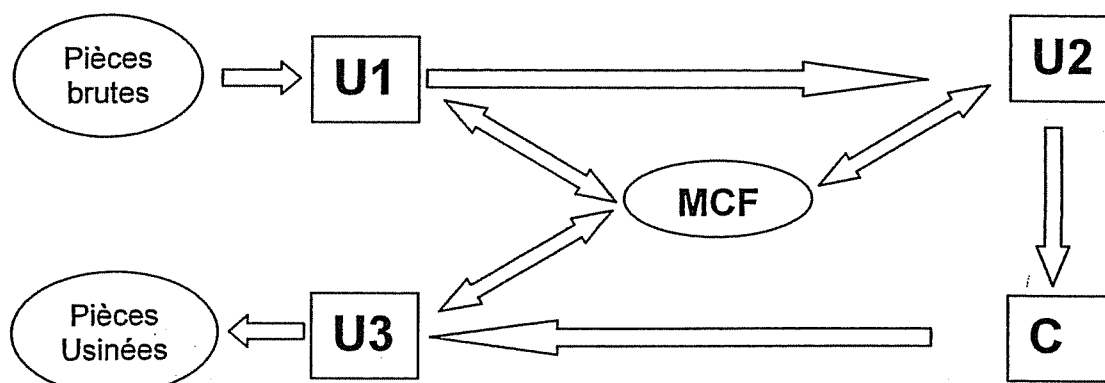


Figure 2 : Schéma de la ligne « agile »

1. U 1, 2, 3 ... Postes et machines d'usinage.
2. C : Machine de contrôle automatique.
3. MCF « Moyen de contrôle flexible ».

Les machines d'usinage sont des équipements flexibles pouvant traiter des types différents de pièces (commande numérique, prise de pièces flexibles, etc...).

D'où un besoin en « MCF », pouvant effectuer indifféremment la gestion et la correction des dérives pour les multiples opérations des machines d'usinage.

0.4. Solutions proposées par certains constructeurs

De nombreux constructeurs de machines ont tenté de répondre à ce besoin en « MBL flexible » en utilisant des machines de métrologie.

Ces machines sont des équipements scientifiques de laboratoires. Elles sont fragiles et nécessitent un environnement spécifique (salle climatisée). Elles sont fiables à condition d'être servies par un personnel hautement spécialisé (programmation numérique, réglage délicat des instruments : capteurs etc...).

Le besoin du marché est donc de disposer d'une machine ayant les qualités des machines de métrologie tout en ayant des caractéristiques d'exploitation compatibles avec le milieu industriel :

- robustesse ;
- manipulation simple par du personnel de production ;
- milieu ouvert, cadences compatibles avec les rythmes de production des lignes industrielles.

0.5. Développement d'un produit innovant

Il s'agit de développer une machine industrielle permettant de contrôler « entre pointes » des pièces de types : vilebrequin, arbre à cames, arbre de boîte de vitesses, arbre d'équilibrage, etc.

Pour ce faire, il faut :

- positionner la pièce entre pointes ;
- donner les indications axiales et radiales des caractéristiques à mesurer ;
- extrapoler tout écart de forme par rapport aux caractéristiques à contrôler ;
- réagir dans un temps très court avec les contraintes industrielles.

Cette machine associera les deux techniques du contrôle d'écarts de forme et du contrôle dimensionnel.

Elle ne nécessitera pas d'environnement particulier protégé, et bénéficiera d'une interface homme/machine conviviale basée sur des modes de pilotage pré-établis.

0.6. Descriptif technique général de la machine

- longueur entre pointes : 200 mm à 400 mm ;
- poids de la pièce : inférieur à 50 kg ;
- course du prototype : 120 mm ;
- précision de l'axe Z : $\pm 2.5 \mu\text{m}$;
- précision de l'axe X : $\pm 1 \mu\text{m}$;
- précision de l'axe C : $\pm 5.10^{-5}$ rd.

Types de contrôles programmés :

1. arbres à cames : loi de levée, calage, diamètre des portées ;
2. vilebrequin : diamètre de ligne, **diamètre des manetons, demi-course** ;
3. spécifications géométriques : circularité, rectitude, cylindricité, coaxialité ou concentricité, battement ;
4. mesure dimensionnelle par palpage.

0.7. Phases de conception de la machine

Description de la méthode de conception retenue par le constructeur.

Phase 0 : approche et définition du projet. (cahier des charges, planning prévisionnel).

Phase 1 : AMDEC de la machine de contrôle.

1. Développement de la partie mécanique :
Analyse fonctionnelle des composants mécaniques de la machine.
2. Développement de la partie commande :
Définition des besoins en calculs, capacité, acquisition des mesures, gestion d'axes, traitement des informations, interface homme/machine, commandes et éditions, éléments d'ergonomie et de sécurité.

Phase 2 : réalisation d'un prototype.

- fabrication ;
- essais ;
- mise au point ;

**Le thème du sujet proposé porte sur une conception à coût objectif CCO, la gamme de prix de ce type d'équipement devant se trouver entre 75 000 € et 150 000 €.
Le prototype issu de la phase 2 est défini dans les documents 1, 2 et 3.
L'analyse fonctionnelle partielle et les principaux capteurs sont décrits dans les documents 4, 5 et 6.**

0.8. Fonctionnement de la machine

Description des phases d'utilisation de la machine.

Préparation :

- écriture / modification de la gamme de palpé (FC4) ;
- étalonnage de la machine (FC3).

Pour chaque pièce à contrôler :

- montage de la pièce entre pointes (FC6) ;
- palpé de deux sections circulaires au niveau de la broche supérieure et inférieure ;

Remarque : ce palpé de deux sections circulaires sur toutes les pièces mesurées permet de s'affranchir des défauts sur l'usinage des portées de centrage de la pièce.

- périodiquement, calibrage de la machine avec une pièce étalon (FC3 et FC1) ;

Remarque : ce calibrage permet de s'affranchir des variations de température, il consiste à palper une pièce étalon à température ambiante, dont la géométrie est connue à la température de référence 20°C.

- pour chaque spécification :

- palpation des éléments tolérancés (FP1) ;
- palpation des éléments de référence (s'il y a lieu) (FP1) ;
- affichage des informations de contrôle (FC7) et (FC5).

PARTIE 1 (A REDIGER SUR COPIE SEPARÉE)

1. Etude de l'architecture de la machine

La machine doit pouvoir contrôler des pièces, du type arbre à cames ou vilebrequin, c'est la fonction principale FP1 du document 4.

Le schéma cinématique minimal qui décrit les mouvements principaux de la machine est donné ci-dessous :

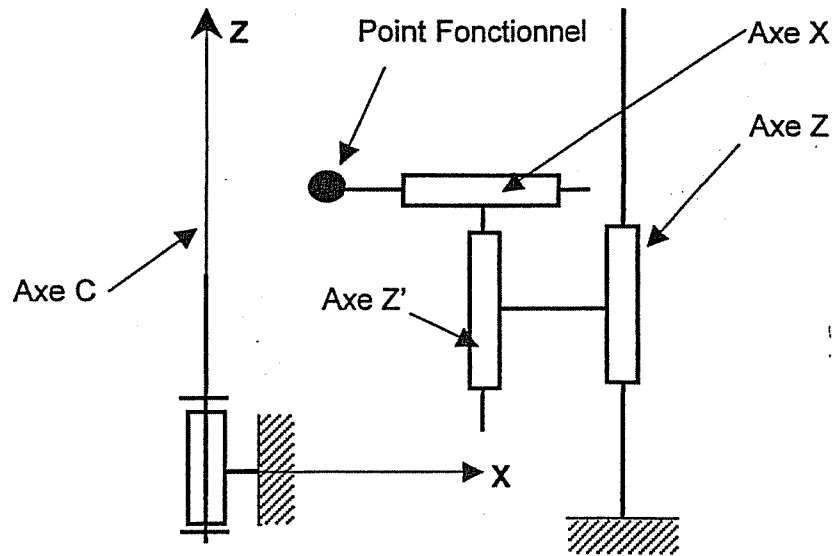


Figure 3 : Schéma et paramétrage du mécanisme

L'axe de broche Z sera pris vertical ascendant et l'axe radial X horizontal dirigé de la broche vers le palpeur.

1.1. Décodage de spécifications

Pour un arbre à cames, il faut être capable de contrôler le profil de came mais aussi la position de la came dans un référentiel pièce ou la position relative de deux lois de levée. Le document 7 représente un arbre à cames qui sert pour l'étalonnage de la machine.

On cherche à construire un référentiel

A-B	D	C
-----	---	---

qui servira à contrôler les autres entités géométriques de la pièce.



Q1 : Proposer un décodage selon la normalisation en vigueur de la spécification suivante :

ZONE COMMUNE		
\varnothing	0.2	A-B
//	0.02	A-B

▼

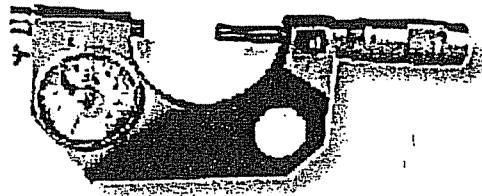
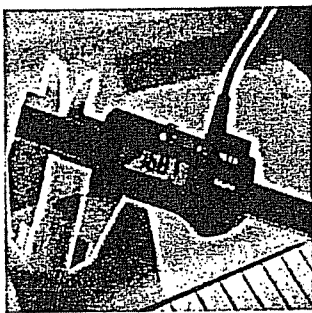
C

1.2. Justification de l'architecture de la machine

Rappel du principe d'ABBE :

Le déplacement en translation des points d'un solide (S) est connu avec une précision maximale et constante pour tous les points de (S) alignés sur l'axe de mesure. Cette précision est alors celle de l'axe de mesure. La perte de précision pour les autres points est une fonction croissante de la distance r à l'axe de mesure. On appelle offset d'ABBE cette distance r .

Le principe d'ABBE précise que la mesure d'une longueur se fait toujours avec un maximum de précision quand la règle est dans le prolongement de l'axe du déplacement.



Figures 4a et 4b : Instruments de mesure

Le pied à coulisse est un instrument de mesure qui ne respecte pas le principe d'ABBE contrairement au micromètre.

Q2 : Quels sont les axes qui respectent (ou ne respectent pas) le principe d'ABBE ? Quelle est l'influence au niveau des performances de la machine ? Il est demandé une analyse qualitative permettant de hiérarchiser les paramètres influents, les mesures pourront être prises sur les documents 1 et 2.

Q3 : Proposer d'autres architectures de machine pour la même morphologie de pièce. Pour chaque solution proposée, effectuer une analyse critique concernant le respect du principe d'ABBE.

1.3. Analyse d'une machine avec défauts géométriques

On supposera que :

- les guidages sont parfaits (sans jeux, sans frottement, sans hystérésis, déplacement rectiligne) et que les différentes pièces de la machine sont rigides ;
- l'axe Z' est bloqué (axe X et axe Z' considérés comme un ensemble monobloc).

Q4 : Quelles sont les contraintes géométriques que doivent respecter les sous-ensembles suivants pour garantir la qualité des mesures ?

- SE₁ : axe Z vertical ;
- SE₂ : axe X radial et axe Z' (considérés comme un ensemble rigide) ;
- SE₃ : axe C ;
- SE₄ : bâti.

Q5 : Proposer les schémas paramétrés associés aux différents défauts géométriques que l'on devra maîtriser.

Remarque : chaque liaison pourra être représentée par un repère partiel construit avec les entités (Plan, Droite, Point), un tableau doubles entrées permettra de spécifier les contraintes (parallélisme, coaxialité, coïncidence, etc.) entre ces entités géométriques.

1.4. Analyse d'une machine avec guidage réel et défauts géométriques

Les guides en translation sont maintenant considérés comme des pseudo translations avec :

Notation :

Pour un guidage en translation dont Z_1 est l'axe moyen de déplacement et X_1Z_1 le plan principal de la glissière. On note :

O_2 la position réelle du coulisseau ;

O_{2th} la position théorique du coulisseau : $O_1O_{2th} = Z.Z_1$;

P le point fonctionnel : $O_2P = -\lambda.X_2$;

$T_z(Z)$ le défaut de justesse de la règle ;

$T_x(Z)$ et $T_y(Z)$ les défauts de rectitude de l'axe dans les directions X_1 et Y_1 ;

$R_z(Z)$ le défaut de roulis autour de l'axe Z_1 ;

$R_x(Z)$ le défaut de tangage autour de l'axe X_1 ;

$R_y(Z)$ le défaut de lacet autour de l'axe Y_1 .

Ces défauts sont exprimés dans le repère $R_1(O_1, X_1, Y_1, Z_1)$ et sont fonctions de Z, position mesurée du coulisseau dans ce repère.

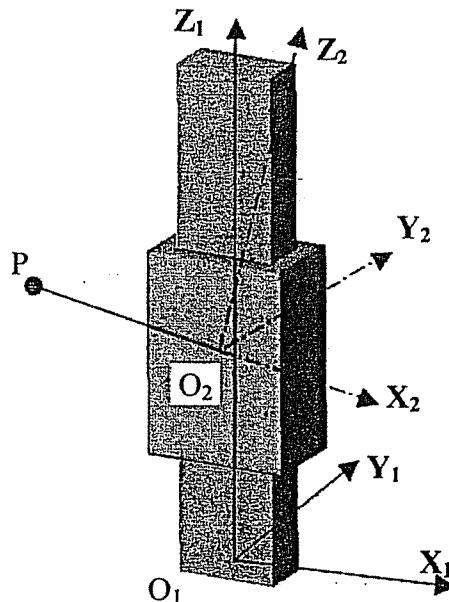


Figure 5 : Défauts géométriques d'une liaison glissière

L'objectif est d'étudier la précision de mesure au point fonctionnel et les conséquences en terme de solutions constructives.

Q6 : Pour l'axe Z (correspondant au mouvement vertical de l'ensemble porte palpeur), avec les notations ci-dessus, caractériser au point fonctionnel l'incidence des différents défauts de la liaison sur la mesure (axiale ou radiale).

Présenter le résultat sous la forme d'un tableau et/ou d'un graphe adapté. Pour cette question, l'axe X et l'axe Z' seront considérés comme parfaits et liés rigidement au coulisseau. Proposer une hiérarchisation de l'influence des défauts sur la précision de mesure, argumenter votre propos.

Q7 : On désire mesurer, la concentricité de la section de diamètre 50 mm, par rapport aux deux sections circulaires A et B de diamètre 30 mm. Voir figure 6.

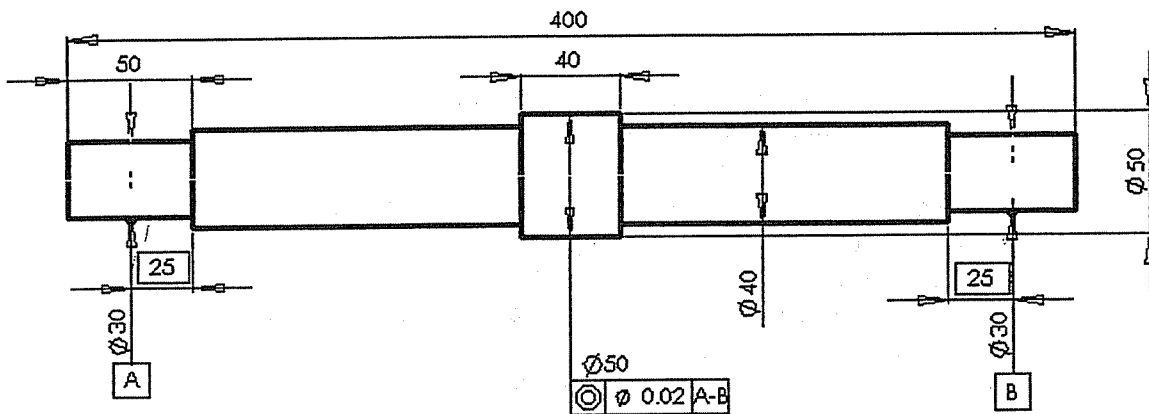


Figure 6 : Pièce à contrôler

Quelles sont les performances du guidage en translation de l'axe Z en terme de précision pour pouvoir mesurer ce type de défaut ?

Devant les compromis coût-qualité, le concepteur envisage d'utiliser un guidage en translation de moyenne gamme (en terme de qualité géométrique des guidages) couplé à un barreau en céramique monté parallèlement à l'axe Z. Faire un schéma de principe de la solution retenue par le constructeur.

Q8 : Quels sont les défauts géométriques corrigables par cette solution ? Proposer sous forme de schéma ou de dessin 2D, la liaison complète réglable et démontable entre le barreau céramique et la plaque support.

1.5. Etude d'un contrôle radial d'une section droite

Pour les deux questions suivantes, la mesure s'effectue dans les conditions normales d'utilisation de la machine (contrôle en ligne).

Q9 : Pour contrôler le défaut de forme d'une section circulaire **coaxiale avec l'axe de rotation**, indiquer sous forme d'organigramme sans effectuer aucun calcul, le traitement permettant de passer de la mesure à la caractéristique contrôlée.

Q10 : On désire contrôler un profil de came supposé en rotation autour de l'axe des pointes, avec un **palpeur sphérique**. En utilisant le paramétrage de la came donné figure 7.

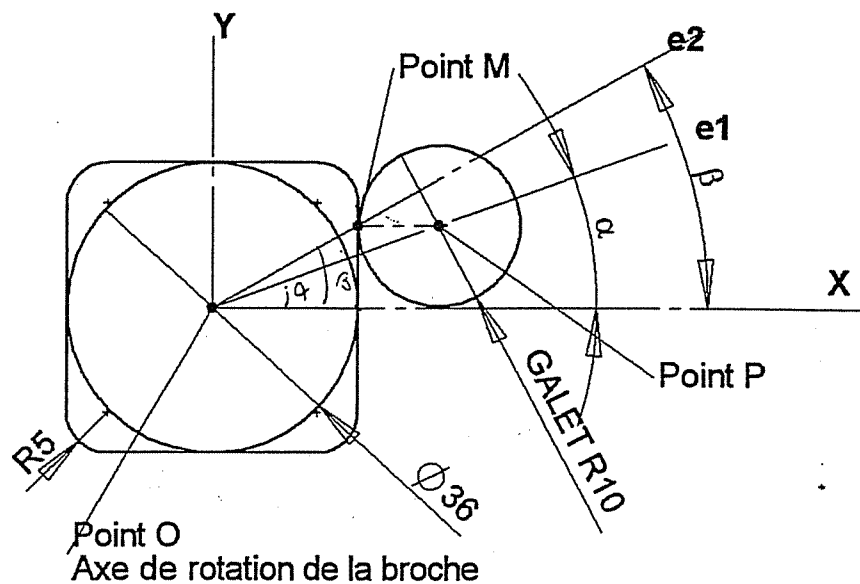


Figure 7 : Paramétrage d'une came (voir document 7 section A-A)

On note : $OP = R(\alpha).e_1$ et $OM = r(\beta).e_2$. L'axe OZ sera considéré comme l'axe de rotation de la broche.

Identifier les paramètres qui caractérisent le profil de came à contrôler. Identifier les paramètres mesurés par la machine (on associera le capteur correspondant). Expliciter les relations qui lient ces deux jeux de paramètres.

2. Analyse du processus d'accostage

2.1. Description des cycles

Q11 : A partir du document 5, expliquer la fonction de chaque capteur (codeur axe C, règle axe Z, règle axe X, capteur MT12 de l'axe Z').

Q12 : Sous forme de diagramme fonctionnel décrire les différentes étapes d'une séquence :
 - de palpation axiale ;
 - de palpation radiale.

Q13 : Effectuer le(s) schéma(s) cinématique(s) associé(s) à chacune de ces deux séquences en y référant les différents capteurs et les différents axes de la machine.

2.2. Analyse des modes d'accostage palpeur pièce

Pour garantir une mesure de qualité il faut être capable de garantir un effort de palpation constant. Cette fonction technique se décline en deux sous fonctions

FT1322	Assurer un effort de palpation axial bilatéral constant.
--------	--

FT1422	Assurer un effort de palpation radial unilatéral constant.
--------	--

Figure 8 : Extrait du diagramme fonctionnel

→ Q14 : Quels types de solutions sont utilisés dans le domaine des palpeurs de métrologie pour remplir cette fonction ?

→ Q15 : Pour quelles raisons ces solutions ne peuvent pas être retenues dans notre contexte ?

2.3. Analyse du système d'application de l'effort de palpation

Le document 7 présente les caractéristiques fonctionnelles d'un arbre à cames étalon dont on doit contrôler la géométrie, en particulier la loi de levée.

Le mécanisme de palpation radial ainsi que les différents éléments qui composent le palpeur, son support et la tête de mesure sont définis sur le plan d'ensemble. (Document 2)

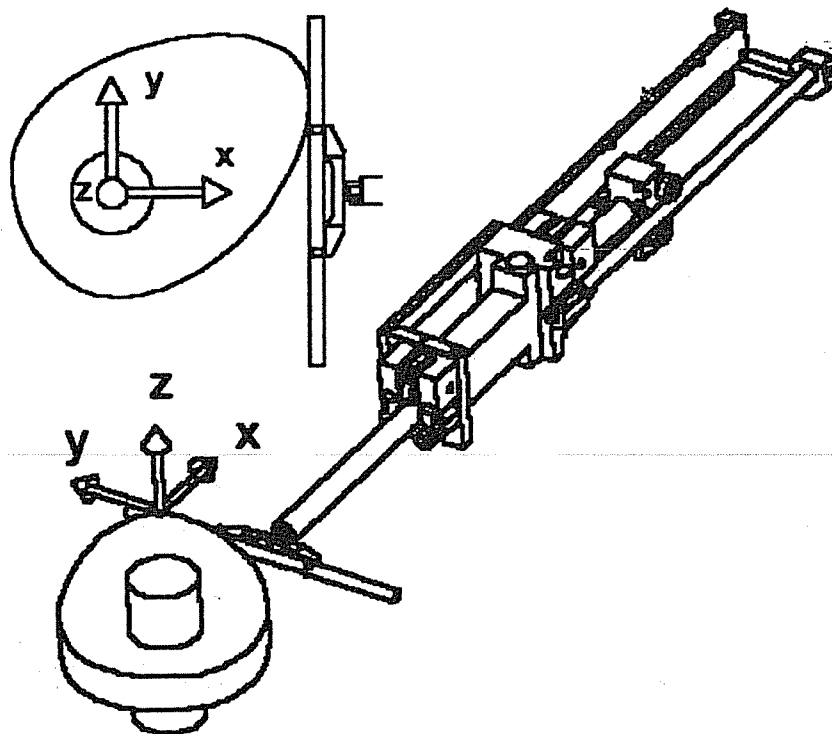


Figure 9 : Contrôle d'un profil de came

Le contrôle en continu du profil d'une came impose :

- le maintien du contact entre la surface extérieure de la came et le barreau palpeur par l'application d'un effort de palpation de préférence constant ;
- le respect de l'orientation du barreau par rapport au référentiel de la machine ;
- une rigidité du système de palpation compatible avec la précision du contrôle.

On supposera dans cette première approche, qu'à l'exception des différents ressorts, les pièces du système de palpation radial sont indéformables.



Q16 : Décrire sous forme de schéma technologique la solution retenue pour appliquer l'effort suivant l'axe X (FT1422).

Effectuer l'évaluation des valeurs extrêmes de l'effort appliqué par ce système lors du contrôle de la came du document 7.

Q17 : On désire modifier ce système de manière à appliquer un effort de palpation constant dont le niveau moyen est de l'ordre de un Newton (figure 10).

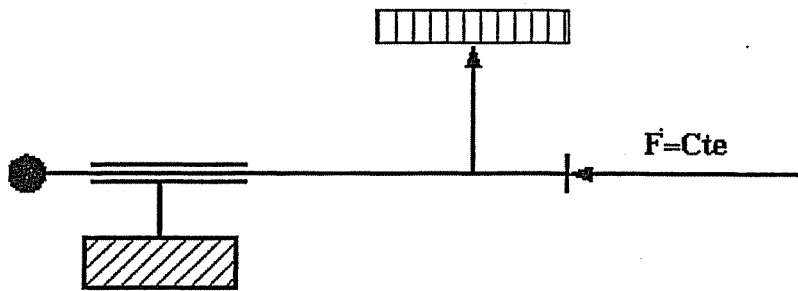


Figure 10 : Modèle de palpation à effort constant

Proposer, en la justifiant, une solution adaptée au mécanisme de palpation radial.

Effectuer le schéma technologique précisant l'implantation de cette solution.

PARTIE 2 (A REDIGER SUR COPIE SEPARÉE)

3. Re-conception de l'ensemble porte palpeur

L'objectif de cette partie est d'optimiser les matériaux, formes et liaisons du barreau de palpation et de son support.

La forme générale du palpeur est cylindrique. Le support de palpeur peut être modélisé par un ensemble de poutres de sections rectangulaires.

Afin de garantir la continuité du contact pendant la procédure de palpation les pinces de liaison palpeur/support doivent avoir une architecture ouverte.

La définition des formes de détail du support, dans la zone des griffes de liaison avec le palpeur est schématique (document 2 et document 8).

3.1. Matériaux et formes génériques.

Q19 : On désire optimiser les matériaux et formes des composants du chariot de palpation radial (barreau, support, axe horizontal, tête) de manière à minimiser leur masse et augmenter leur rigidité.

Justifier de manière qualitative le choix de ces critères de conception.

Q20 : Montrer que pour choisir un couple matériau géométrie pour une poutre légère et rigide en flexion, le meilleur choix est celui qui maximise l'indice de performance M_1 suivant :

$$M_1 = \frac{(E\phi_f^e)^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

- E : module d'élasticité longitudinal du matériau.
- ρ : masse volumique du matériau.

- $\phi_f^e = \frac{4\pi I}{A^2}$: facteur de forme de la section qui est égal au rapport de la rigidité en flexion de la poutre et de la rigidité en flexion d'une poutre de section circulaire pleine d'aire identique A .

Q21 : En utilisant le graphe 1 du document 9 effectuer un choix de matériau pour le palpeur.

3.2. Optimisation du barreau de palpation et de ses liaisons avec le support de palpeur

Le document 8 propose un paramétrage associé à la modélisation présentée figure 11 ainsi que la définition de la raideur de palpation k_p et de la souplesse associée $S_p=1/k_p$.

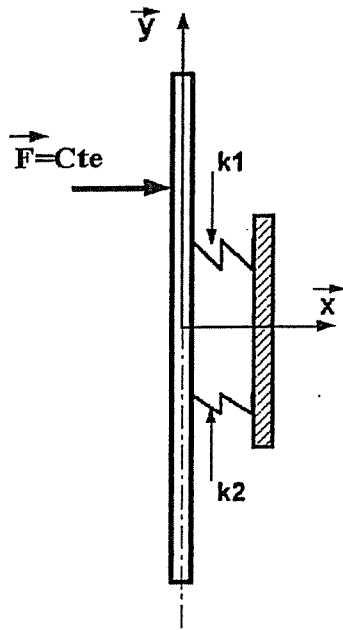


Figure 11 : Modélisation simplifiée du support de palpeur

Hypothèses :

- Les seules pièces déformables sont :
 - o Le palpeur assimilé à une poutre de section circulaire.
 - o Les ressorts qui modélisent le comportement du support et de ses liaisons avec le barreau et l'axe horizontal.
- La phase de mesure est quasi statique.
- L'effort appliqué est constant de l'ordre de 1N.

~~Q22~~ Q22 : Dans le cas d'un barreau flexible sur appuis rigides.

Tracer l'allure de l'évolution de la souplesse de palpation en fonction de la position du point de palpation.

Montrer que les valeurs extrêmes de la souplesse de palpation s'écrivent sous la forme :

- $S_{pe} = \delta(E,d)\gamma_e(l,\lambda)$ pour un contact à l'extérieur des appuis.
- $S_{pi} = \delta(E,d)\gamma_i(l,\lambda)$ pour un contact entre les appuis.

En utilisant les graphes des documents 9 et 10 et les spécifications générales de la machine, choisir les différents paramètres de conception du barreau.

~~Q23~~ Q23 : Dans le cas d'un barreau rigide sur appuis élastiques

Effectuer le bilan des formes et liaisons du support de palpeur qui ont une influence significative dans l'évaluation de la raideur des ressorts.

(k_1 et k_2 correspondent aux valeurs des raideurs évaluées pour la position de palpation définie sur la figure 11).

Donner l'allure de l'évolution de la souplesse de palpation en fonction de la position du point de palpation.

~~Q24~~ Q24 : Montrer que la valeur extrême de la souplesse de palpation s'écrit sous la forme :

- $S_p = S_{p1}\gamma(\lambda, \mu)$ où $S_{p1} = 1/k_1$ est la souplesse de l'appui sollicité en compression dans la position de la figure 11.

En utilisant les graphes des documents 9 et 10, les spécifications générales de la machine et le graphe précédemment tracé, effectuer une analyse critique des formes du support et des solutions techniques adoptées pour la réalisation des liaisons avec le palpeur.

3.3. Liaison du support de palpeur avec l'axe X

Q25 : A partir de l'analyse du dessin d'ensemble de la machine. (document 2)

Effectuer le bilan et l'analyse critique des solutions technologiques et conditions fonctionnelles qui définissent la liaison du support de palpeur avec l'axe horizontal.

3.4. Réglage de l'orientation du support autour de Z

La figure 12 et le document 2 représentent les détails du support de palpeur comprenant le mécanisme de réglage de l'orientation des griffes.

Q26 : Expliquer le principe utilisé pour orienter le barreau autour de l'axe Z.

La caractérisation du comportement du mécanisme de réglage s'effectue à l'aide de simulations numériques par éléments finis.

L'étude porte sur le modèle du **support seul** en supposant la **vis fixe** et en modélisant les effets de la vis sur le support par des conditions limites appropriées.

Le modèle mis en place (figure 12 et document 11) est établi à partir d'une géométrie qui représente le quart du support de palpeur, dans la base (X,Y,Z) de la machine.

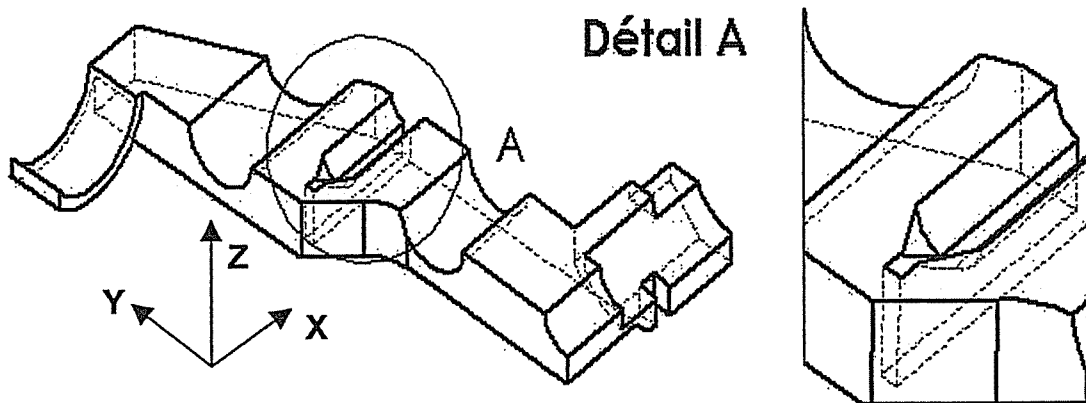


Figure 12 : Réglage de l'orientation du barreau

Q27 : Justifier le choix de cette géométrie.

Q28 : Choisir un type d'élément pour réaliser le maillage de ce modèle et définir une discrétisation globale et locale afin d'obtenir une précision raisonnable pour le calcul des champs de déplacements et de contraintes.

Q29 : En utilisant les figures du document 11, mettre en place les conditions limites qui permettent de :

- caractériser l'effet de l'extrémité de la vis sur le support de palpeur ;
- caractériser l'effet des filets de la vis sur le support de palpeur ;
- prendre en compte la spécificité de la géométrie choisie pour ce modèle.

Le document 12 représente un extrait des résultats issus de la simulation numérique de l'opération de réglage de l'orientation des pinces qui tiennent le palpeur.
 Pour cette simulation le déplacement axial relatif du support par rapport à la vis, au niveau des filets est supposé de 0.01mm.

Q30 : A partir de l'analyse du champ de déplacement du document 12 :

- proposer un schéma cinématique équivalent au mécanisme d'orientation ;
- définir sous forme de schéma, une nouvelle architecture du mécanisme d'orientation, de manière à améliorer le comportement du support de palpeur sans pénaliser la précision et la stabilité de l'opération de contrôle.

3.5. Intégration du palpaxe axial

Q31 : Le palpaxe axial (axe Z) s'effectue à l'aide d'un support spécifique constitué d'un embout sphérique.

Cette solution nécessite le changement manuel du support et ne permet pas le contrôle en continu de toutes les spécifications fonctionnelles.

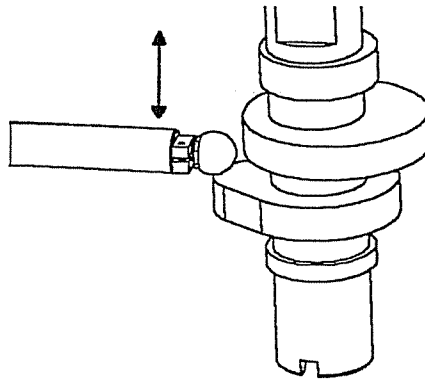


Figure 13 : Palpage axial

Proposer sous forme de schéma une modification du support de palpeur de manière à intégrer cette fonction dans le dispositif de contrôle radial précédent.

3.6. Avant projet de re-conception du support

Q32 : Sur le document réponse calque DR1, représenter aux instruments ou à main levée, par des croquis perspectifs et/ou des schémas et/ou un dessin d'ensemble à l'échelle 2, une solution technologique du nouveau système de palpaxe (limité au palpeur et à son support) en y intégrant :

- les modifications nécessaires à l'optimisation de la raideur de l'ensemble (dimensions du barreau, liaisons barreau/support, dimensions et formes du support) ;
- les fonctions qui garantissent la liaison du support avec l'axe horizontal ;
- le réglage de l'orientation du barreau autour de l'axe Y ;
- la prise de cotes axiales.

La nouvelle version de l'ensemble support doit permettre de mieux respecter les critères de précision et de stabilité des mesures axiales et radiales.

Il est recommandé de mettre l'accent sur la simplicité des solutions techniques et des moyens de réalisations adoptés.

PARTIE 3 (A REDIGER SUR COPIE SEPARÉE)

4. Etude des solutions constructives de l'ensemble de palpation

La version proposée document 2 représente l'état actuel du prototype de la machine à mesurer.

L'ensemble broche – contre pointe ainsi que l'unité de translation verticale et la règle de référence donnant entière satisfaction, leur structure n'est pas remise en cause.

Dans la première version de l'ensemble de palpation, les deux guidages en translation étaient réalisés à l'aide de douilles à billes.

Les essais ont montré que sans charge radiale suffisante les billes ne roulent pas régulièrement et que le contrôle de l'effort de palpation dans ces conditions n'est pas bon.

Il a donc été décidé de remplacer chaque douille à billes par un module à galets dont le dessin est fourni document 2 (cadre "Module à galets : Ech 1:1")

4.1. Exigences géométriques sur le corps du module

Q33 : Quelle modélisation cinématique peut-on associer à un module complet, en admettant que sa géométrie soit parfaite? (justification en 15 mots maximum)

Q34 : En prenant le chariot comme bâti, faire un schéma technologique, en perspective et à main levée, de l'ensemble des pièces assurant les guidages associés aux mouvements des axes X et Z'.

Ne pas représenter les différents ressorts ni le système de contre poids.

Dans ce schéma, un seul module à galets sera détaillé afin d'en montrer sa structure, les trois autres seront représentés par la liaison choisie en Q33.

Ce schéma doit faire apparaître clairement les composants qui constituent ce sous ensemble fonctionnel, y compris les éléments de positionnement et d'assemblage.

Aucune symbolique normalisée n'est imposée, chaque galet sera représenté par une ellipse les autres pièces seront symbolisées par un tracé de type filaire en trait fort. Seule la clarté et la qualité d'expression de ce schéma seront évaluées.

Q35 : Une pièce réelle comporte nécessairement des écarts géométriques par rapport à son modèle.

Proposer une cotation fonctionnelle (sans chiffrer les valeurs des tolérances) du boîtier à galets garantissant :

- un fonctionnement du module conforme au modèle défini en Q33 ;
- une maîtrise de la position relative de deux modules associés dans le même guidage en translation.

On pourra soit faire des croquis à main levée, soit utiliser les silhouettes fournies document 13 (boîtier à galets) en leur appliquant la technique "couper coller" manuellement.

4.2. Relation produit procédé

Les machines d'usinage à commande numérique et les outils coupants modernes permettent de réaliser, dans des conditions économiques intéressantes, des pièces complexes en petite série garantissant une qualité inégalable par des moyens traditionnels.

On envisage de fusionner sur un même bloc les boîtiers des quatre modules à galets ainsi que le palier intermédiaire. Une architecture possible pour cette pièce est représentée sur le document 14 (nouveau palier intermédiaire).

- ✕ Q36 : Lister les avantages et les inconvénients que présente cette solution (nouveau palier intermédiaire) par rapport à la solution initiale.

Sa fabrication dans la masse d'un bloc d'Al Cu 4 Mg est envisagée sur un centre de fraisage à broche horizontale 4 axes.

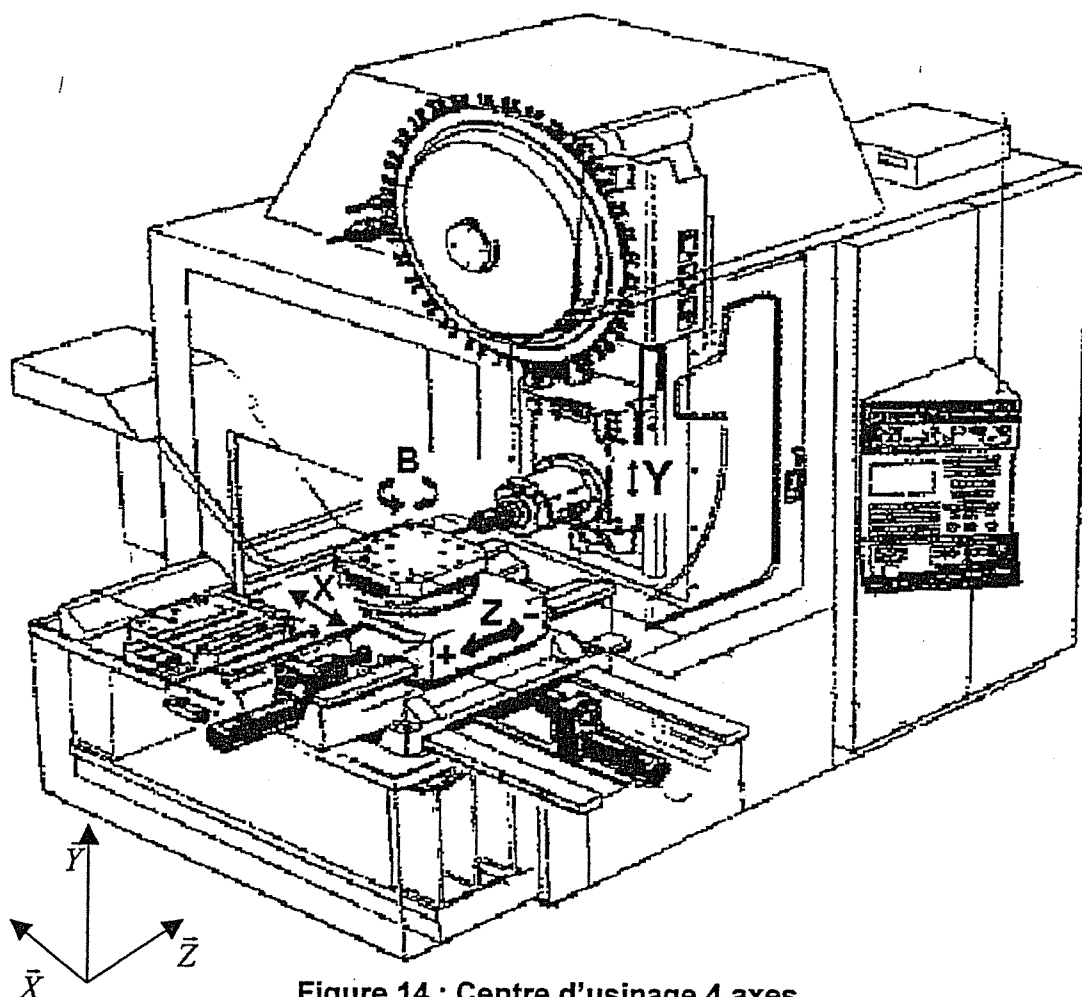


Figure 14 : Centre d'usinage 4 axes

La structure de cette machine est de type cartésienne, la broche est orientée suivant l'axe Z et possède une translation suivant Y.

La table possède deux translations X et Z et une rotation (rotation B) autour de l'axe vertical Y.

Un diviseur à commande numérique représenté figure 15 est positionné sur la table de la machine, autorisant ainsi une cinquième mobilité en rotation d'axe horizontal (axe U).

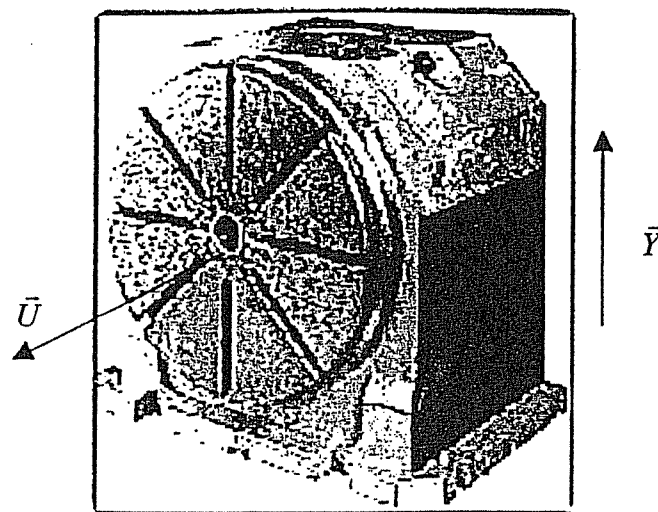


Figure 15 : Diviseur à commande numérique

Cette machine possède un magasin d'outils contenant les outils standards pour réaliser des plans, des rainures et toutes les opérations de forage, alésage, taraudage et filetage à la fraise à fileter (temps moyen de changement d'outil de copeau à copeau inférieur à 3 s).

La qualité de la machine, commande numérique et géométrie, garantit une précision (justesse et répétabilité) de positionnement et de rectitude en interpolation sur un seul axe linéaire (X, Y ou Z) inférieure à 2,5 μm .

Le calculateur de la commande numérique permet tous les calculs de recalage d'origine après rotation de la table et du diviseur.

Sur ce type de machine, la présence d'éléments de maintien (système de bridage) limitant l'accès des outils aux surfaces de la pièce est très pénalisante.

La possibilité, de visser directement le bloc brut sur la table ou sur une rehausse intermédiaire, permet généralement d'usiner un maximum de surfaces dans la même phase.

Q37 : A l'aide des silhouettes fournies pour le nouveau palier intermédiaire (document 15), montrer que pour cette pièce particulière il est possible d'utiliser la face 1 comme face de posage unique.

Préciser sur chaque figure :

- les axes X,Y,Z de la machine outil (l'axe Z étant l'axe de la broche) ;
- l'orientation de la pièce par rapport à la broche (valeurs des angles B et U) ;
- la liste des surfaces réalisées (les repérer par coloriage et/ou surlignage).

4.3. Définition graphique d'une solution technique

La solution technique adoptée initialement pour guider le système de palpation radial et entraîner la tête de lecture X à l'aide d'un chariot à galets n'est pas satisfaisante :

- la maîtrise du roulis du palpeur n'est pas totale (jeu au contact avec le tube de guidage) ;
- trop grande complexité (nombre de pièces, montage, ...) ;
- malgré toutes les précautions prises en fabrication on ne garantit pas l'horizontalité du barreau de palpation.

Il est décidé pour la version industrialisée de la machine à mesurer de re-concevoir la tête de mesure en y intégrant les fonctions suivantes :

- ⇒ - appui ponctuel roulant bilatéral avec le tube de guidage ;
- réglage de l'horizontalité du barreau de palpation ;
- implantation de la tête de lecture X directement sur le support avant, suppression pure et simple du chariot à galets ;
- contact ponctuel unilatéral, de normale parallèle à X, **sans frottement**, avec l'écrou du dispositif de motorisation ;
- système d'application d'un effort de palpation constant en remplacement du ressort d'axe X (181).

✕ Q38 : Sur le document réponse DR1, **représenter aux instruments ou à main levée, par des croquis perspectifs et/ou des schémas et/ou un dessin d'ensemble à l'échelle 1**, une solution technologique de la nouvelle tête de mesure en X avec tous ses composants.

On devra y définir sans ambiguïté :

- la liaison du support avant avec l'axe horizontal ;
- le sous-ensemble fonctionnel assurant l'appui bilatéral (sans jeu) avec le tube de guidage ;
- le dispositif de réglage d'orientation (rotation autour de l'axe des X) ;
- les nouvelles formes de l'écrou du dispositif de motorisation et sa liaison avec le support avant ;
- la liaison entre la tête de lecture et le support avant.

Si la solution ne comporte pas de dessin à l'échelle 1, il est exigé de fournir sur les croquis :

- les géométries de référence (points, axes, plans) permettant de structurer le traitement de l'ensemble (composants et assemblages) avec un outil CAO ;
- le paramétrage fonctionnel des différentes pièces.

Dans tous les cas les pièces et les sous-ensembles fonctionnels seront repérés par leur désignation, la structure du montage sera décrite sous la forme d'un graphe d'assemblage hiérarchisé.

Dossier Technique

Ce dossier contient 16 documents :

Document 0 : format A4

Document 1 : format A2

Document 2 : format A1

Document 3 : format A4

Document 4 : format A4

Document 5 : format A4

Document 6 : format A4

Document 7 : format A3

Document 8 : format A4

Document 9 : format A4

Document 10 : format A4

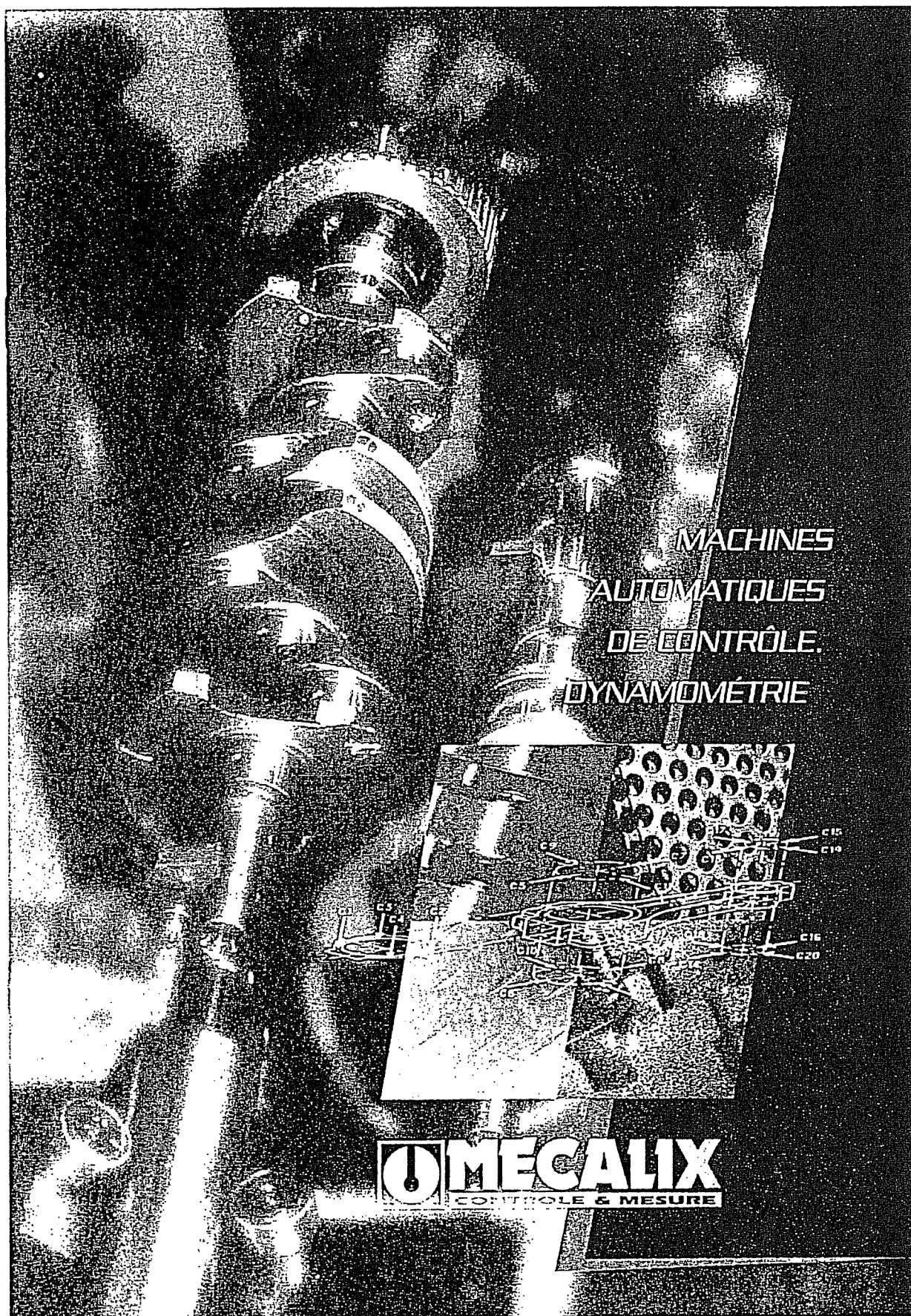
Document 11 : format A4

Document 12 : format A4

Document 13 : format A4

Document 14 : format A4

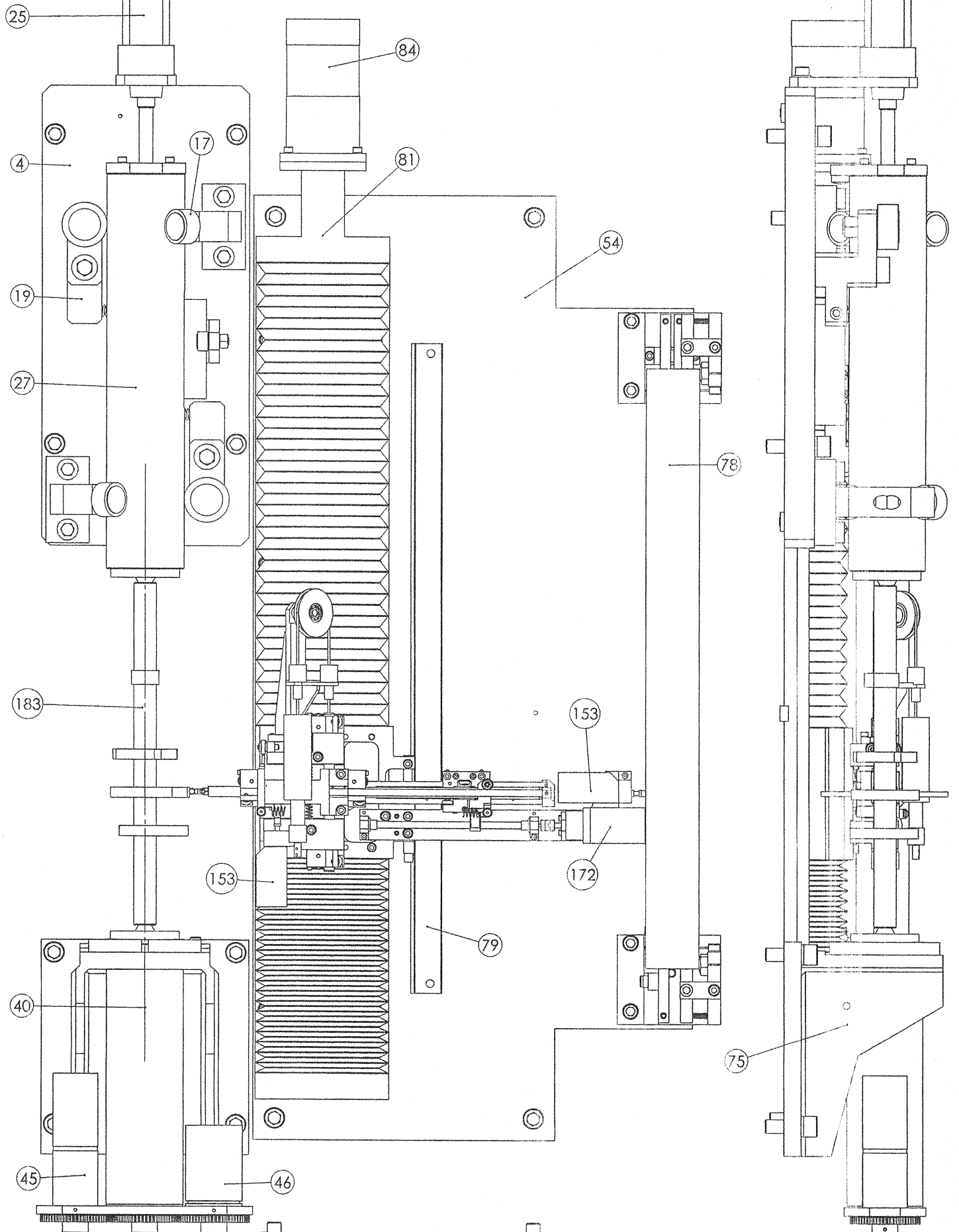
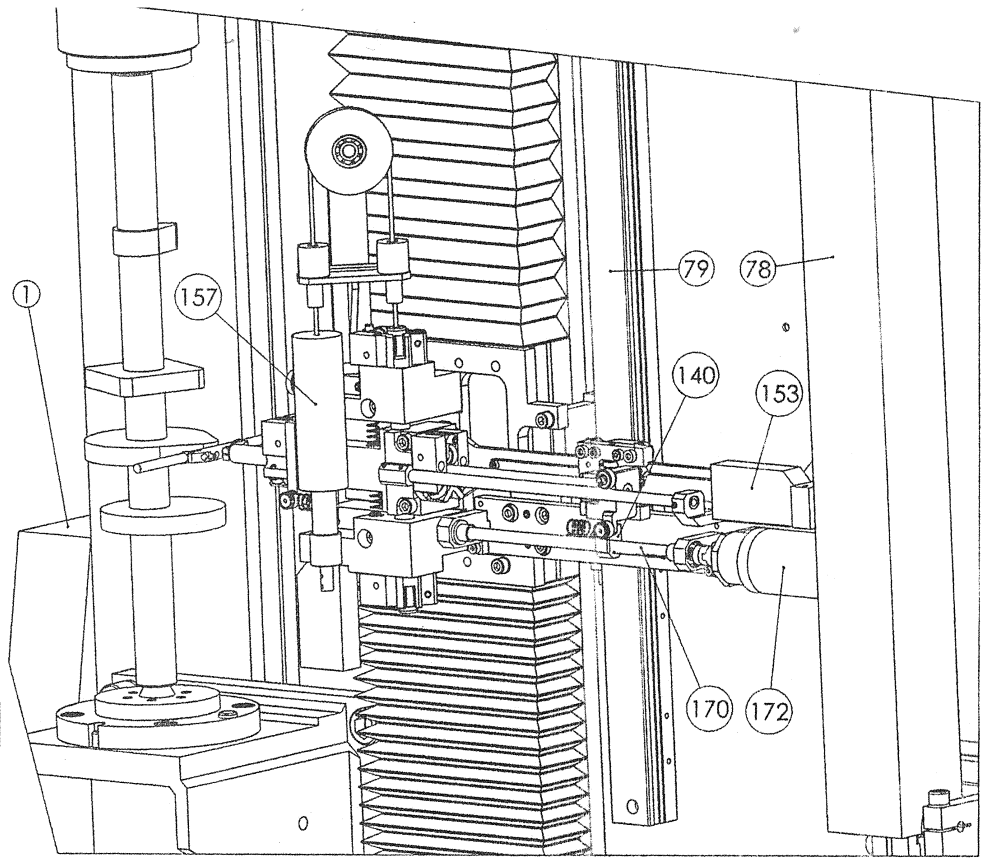
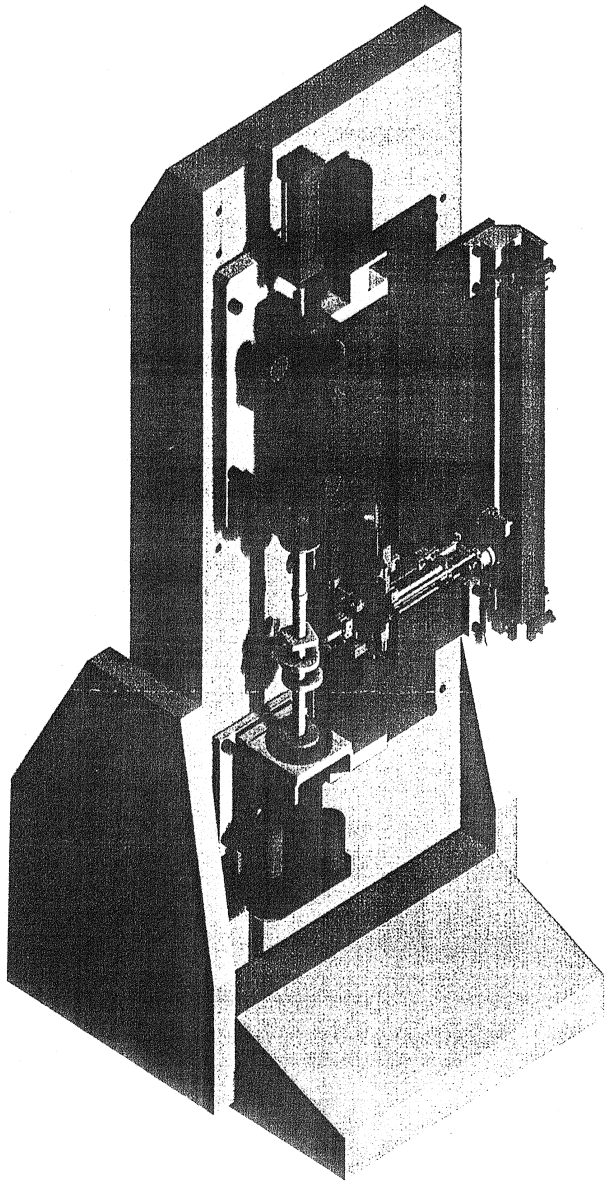
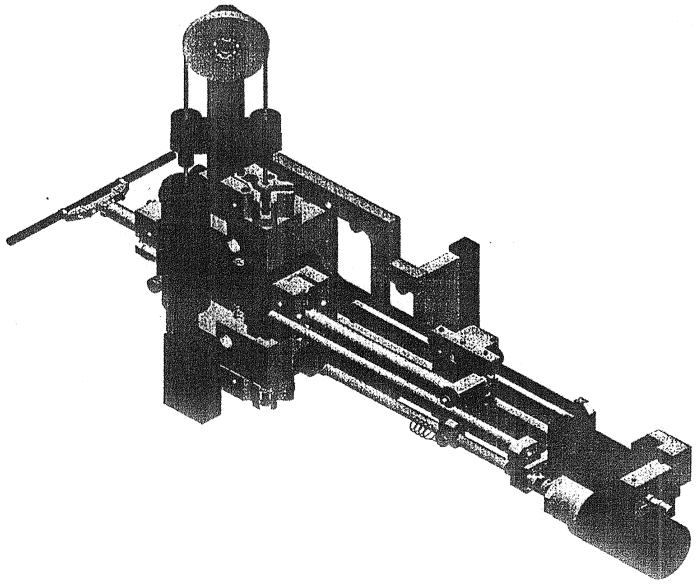
Document 15 : format A4



MACHINES
AUTOMATIQUES
DE CONTRÔLE.
DYNAMOMETRIE

OMECALIX
CONTROLE & MESURE

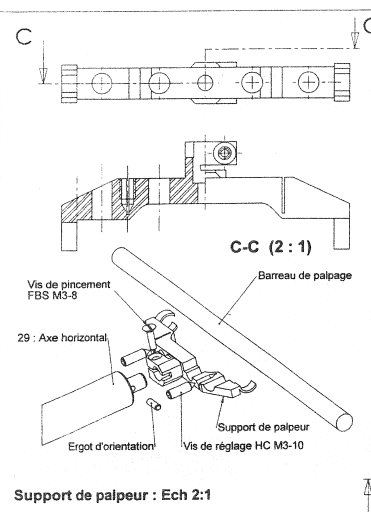
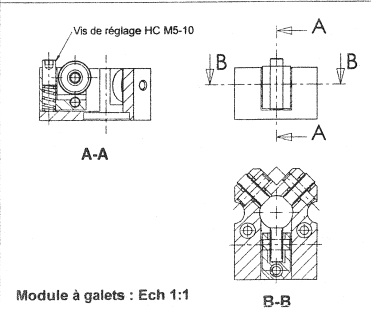
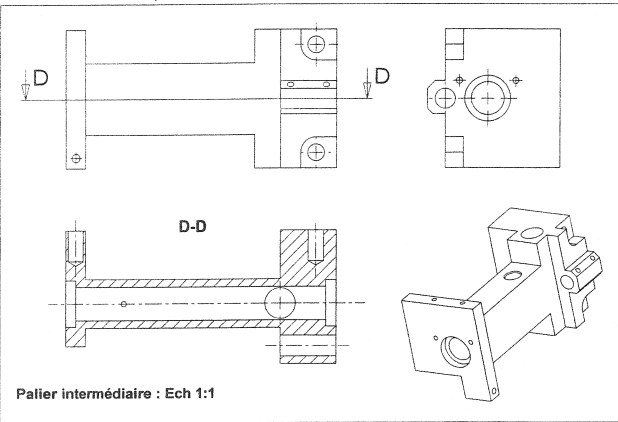
Système de palpé radial



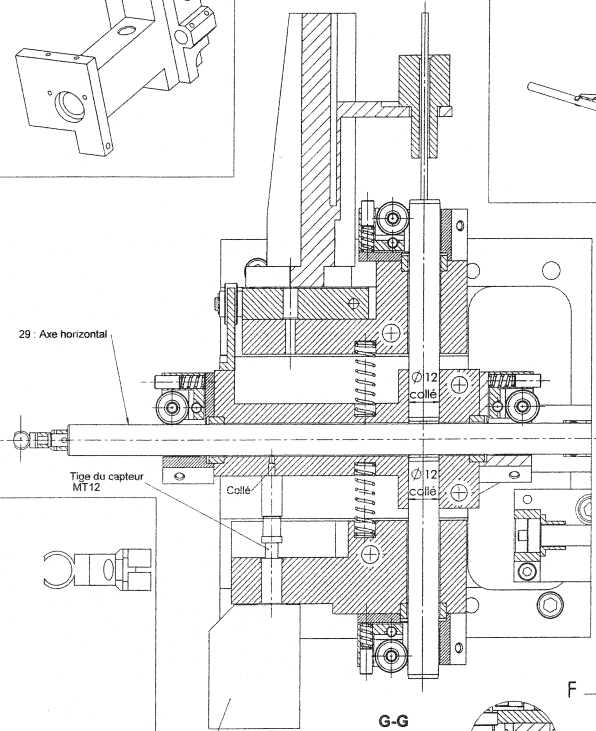
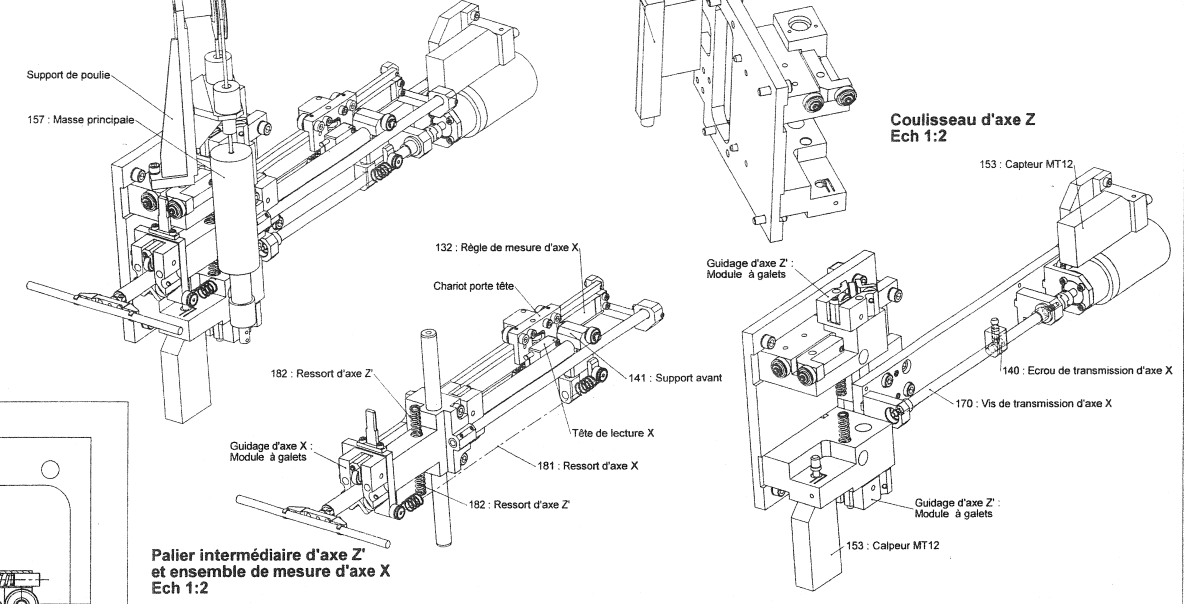
Arborescence

- machine a mesurer
- Annotations
- Lumière
- Plan1
- Plan2
- Plan3
- Origine
- (f) bâti marbre<1>
- broche supérieure<1>
- broche inférieure<1>
- (-) table verticale<1>
- Annotations
- Plan1
- Plan2
- Plan3
- Origine
- (-) table équipée<1>
- (-) support haut<1>
- (-) support bas<1>
- (-) barreau ceramique<1>
- (-) regle Is406<1>
- (-) unite lineaire<1>
- (-) ensemble de palpé sujet<1>
- (-) arbre à cames<1>

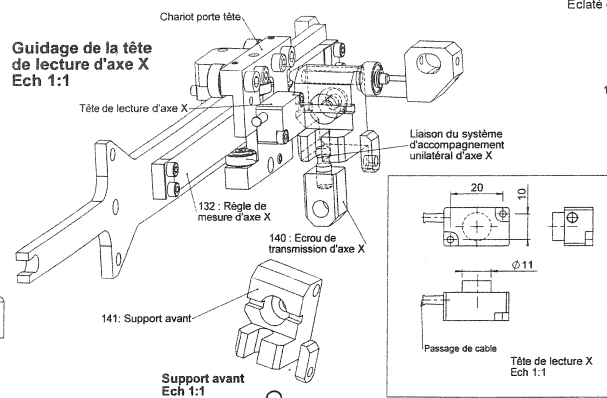
Document 1 :
Vues d'ensemble de la machine
Echelle 1:4
FORMAT A2



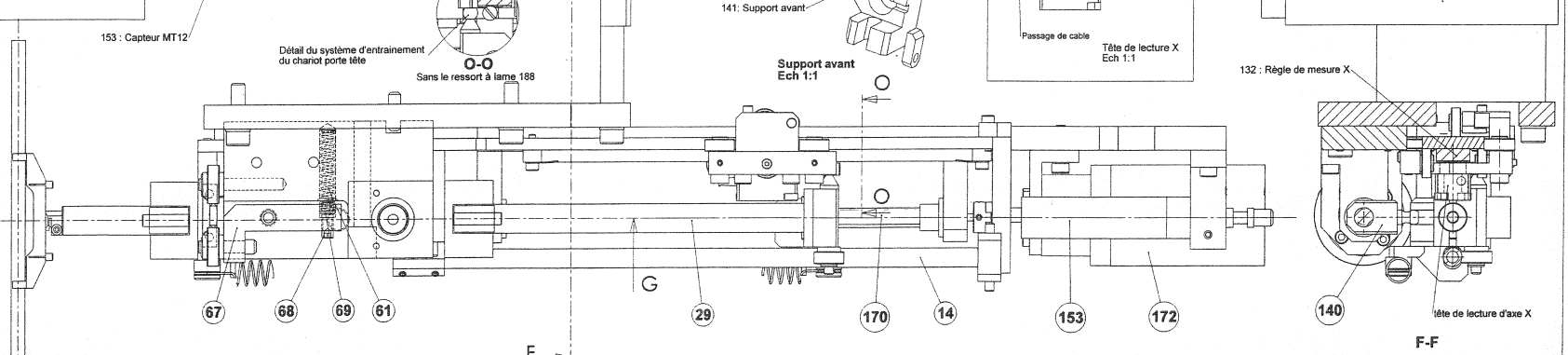
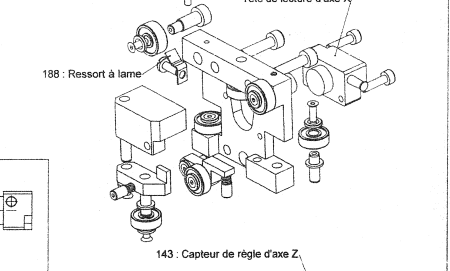
**Ensemble de mesure
Ech 1:2**



**Guidage de la tête de lecture d'axe X
Ech 1:1**



Eclaté du chariot porte tête



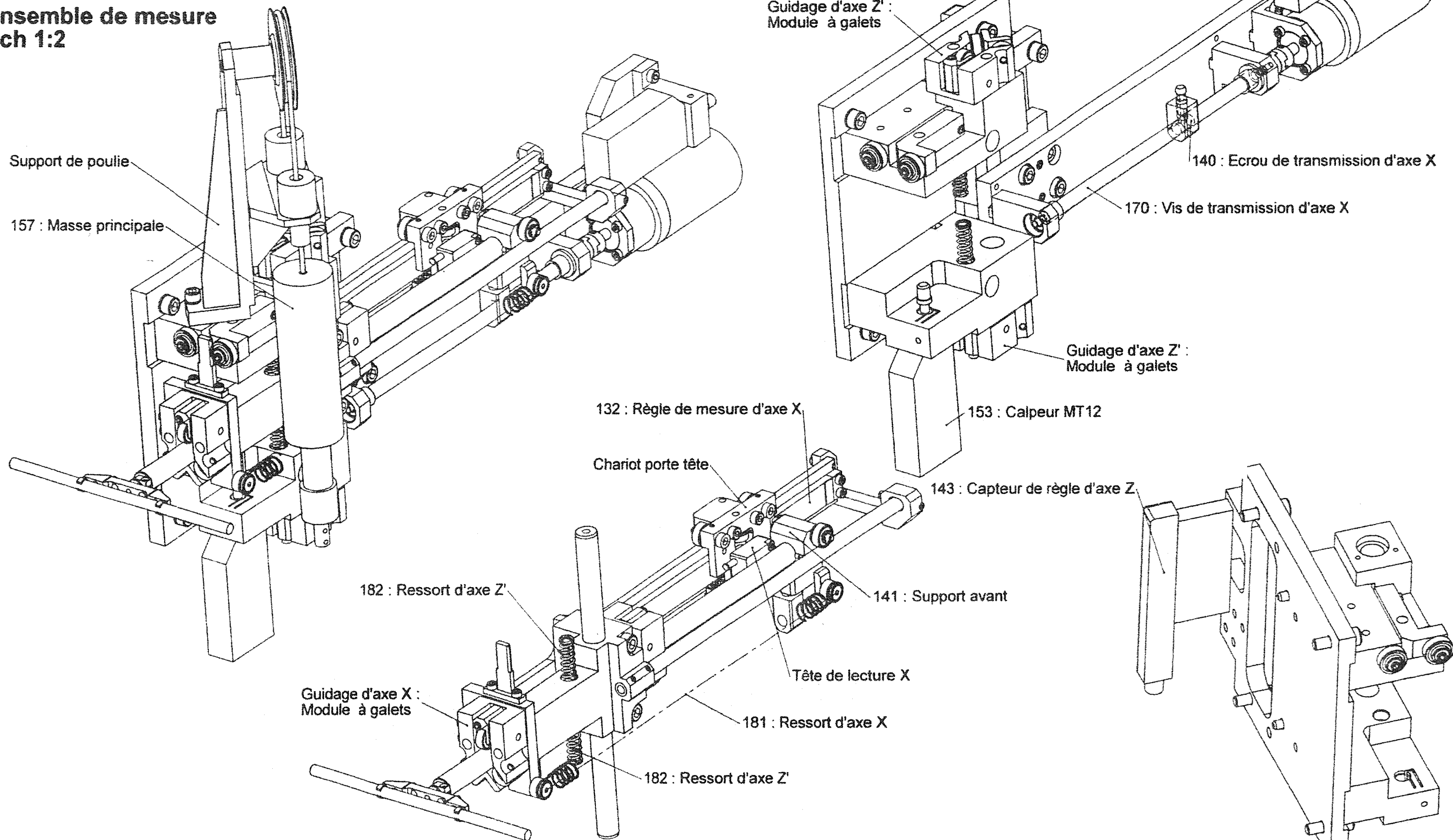
**Vue de dessus de l'ensemble de palpage
Ech 1:1**

Module à galets supérieur et ensemble de compensation (masse principale, support de poulie, câble) non visibles

**Document 2 : Système de palpage
Format A1**

Coulisseau d'axe Z
Ech 1:2

Ensemble de mesure
Ech 1:2



Palier intermédiaire d'axe Z'
et ensemble de mesure d'axe X

132 : Règle de mesure d'axe X

Chariot porte tête

182 : Ressort d'axe Z'

Guidage d'axe X :
Module à galets

182 : Ressort d'axe Z'

Tête de lecture X

181 : Ressort d'axe X

141 : Support avant

Guidage d'axe Z' :
Module à galets

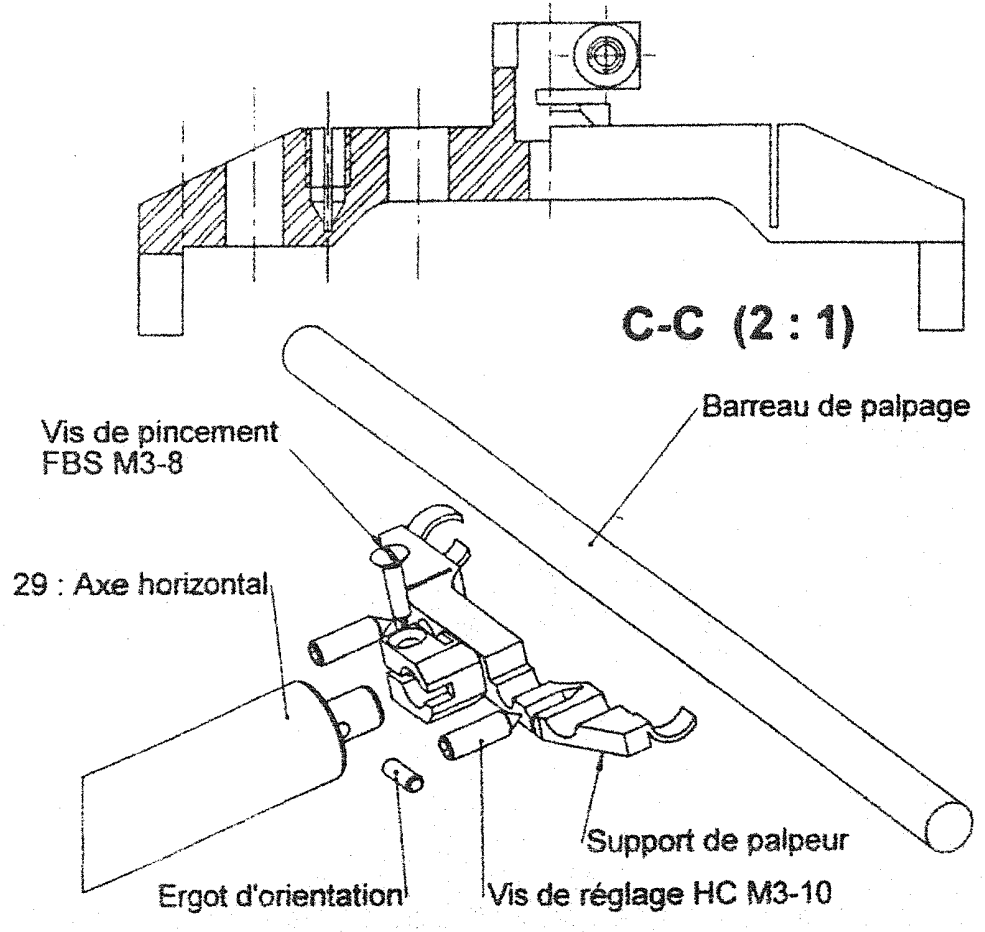
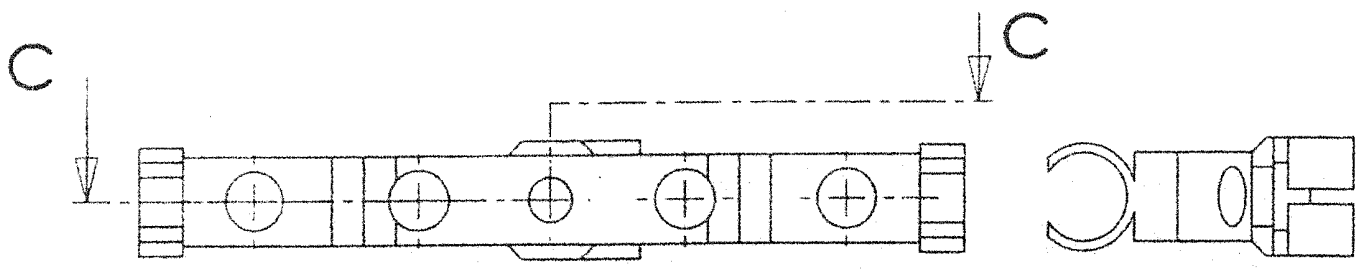
153 : Calpeur MT12

143 : Capteur de règle d'axe Z

140 : Erou de transmission d'axe X

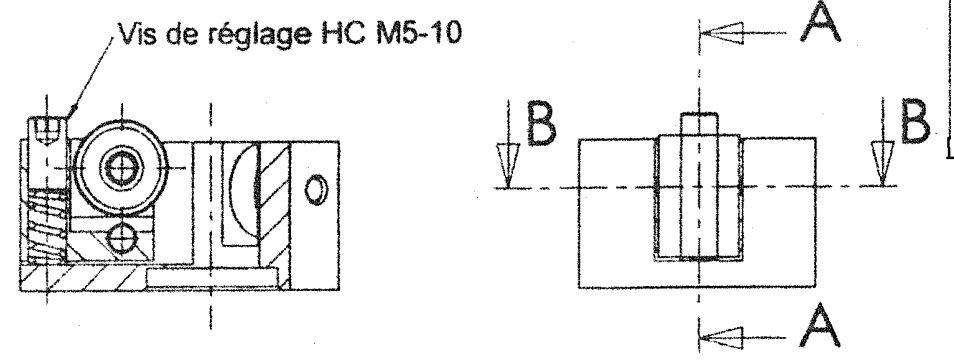
170 : Vis de transmission d'axe X

Guidage d'axe Z' :
Module à galets



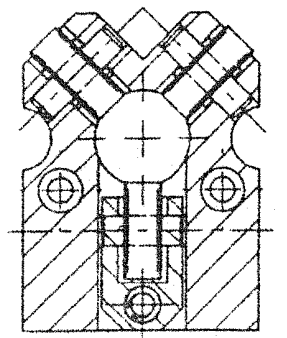
C-C (2 : 1)

Support de palpeur : Ech 2:1

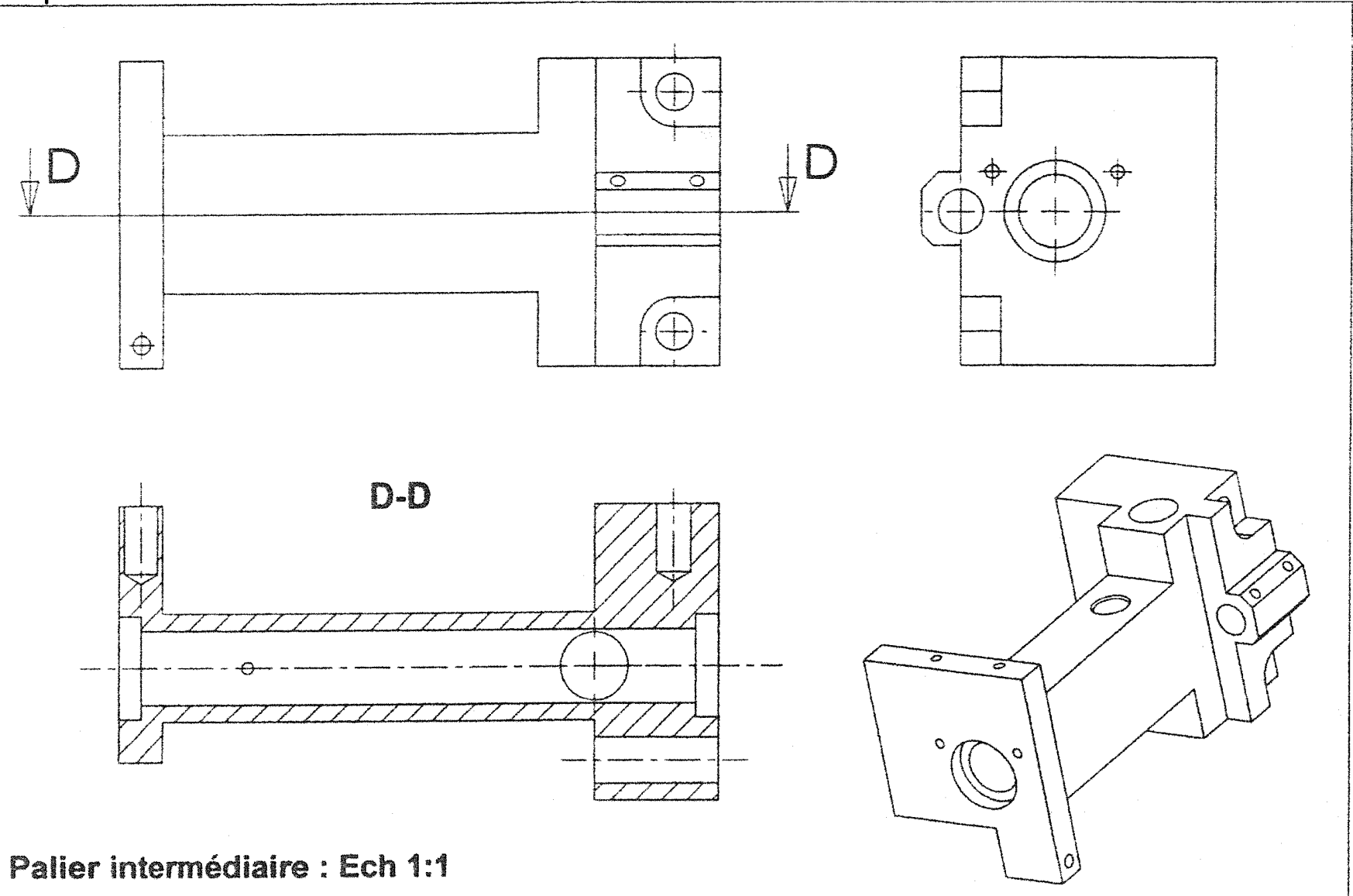


A-A

Module à galets : Ech 1:1



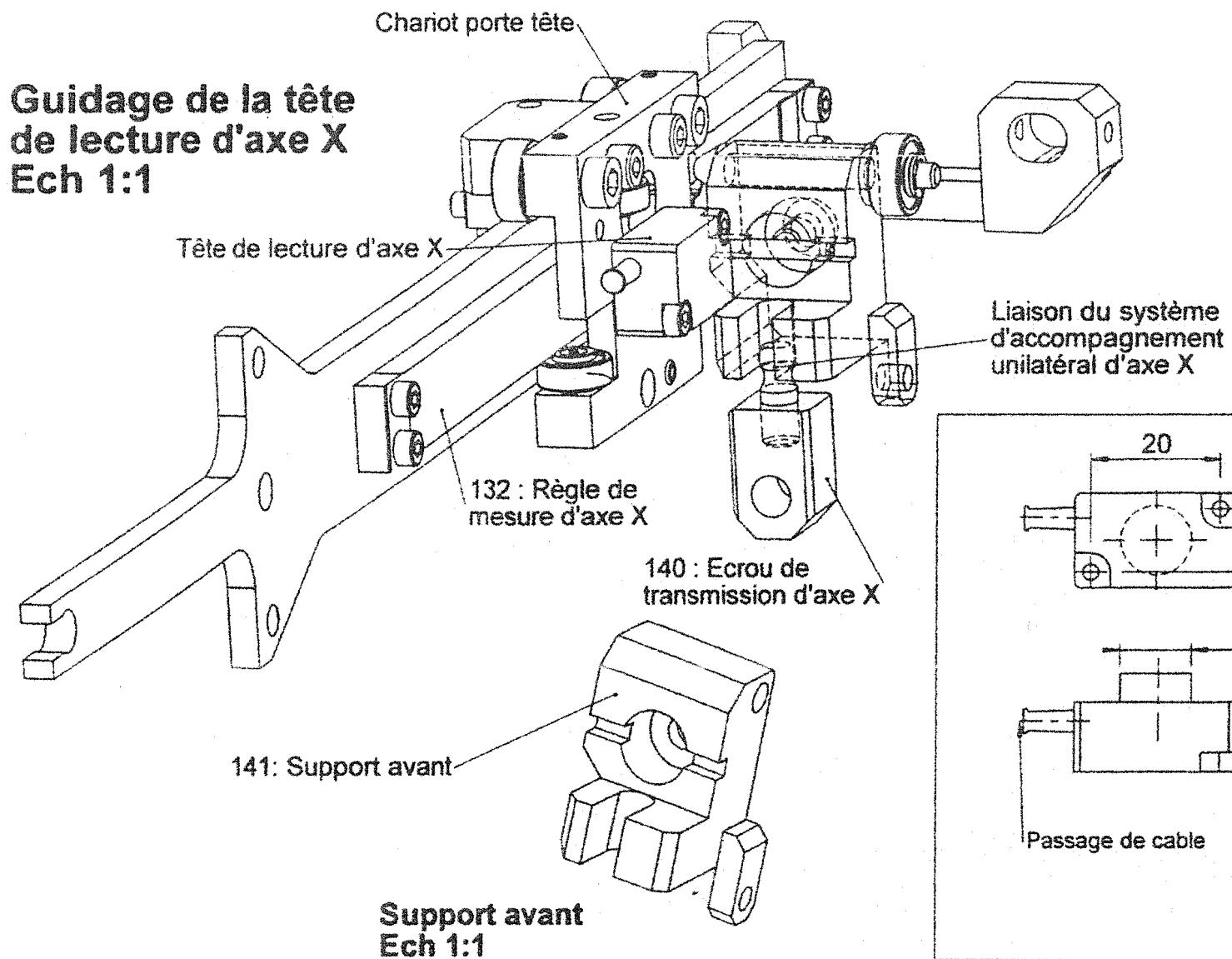
B-B



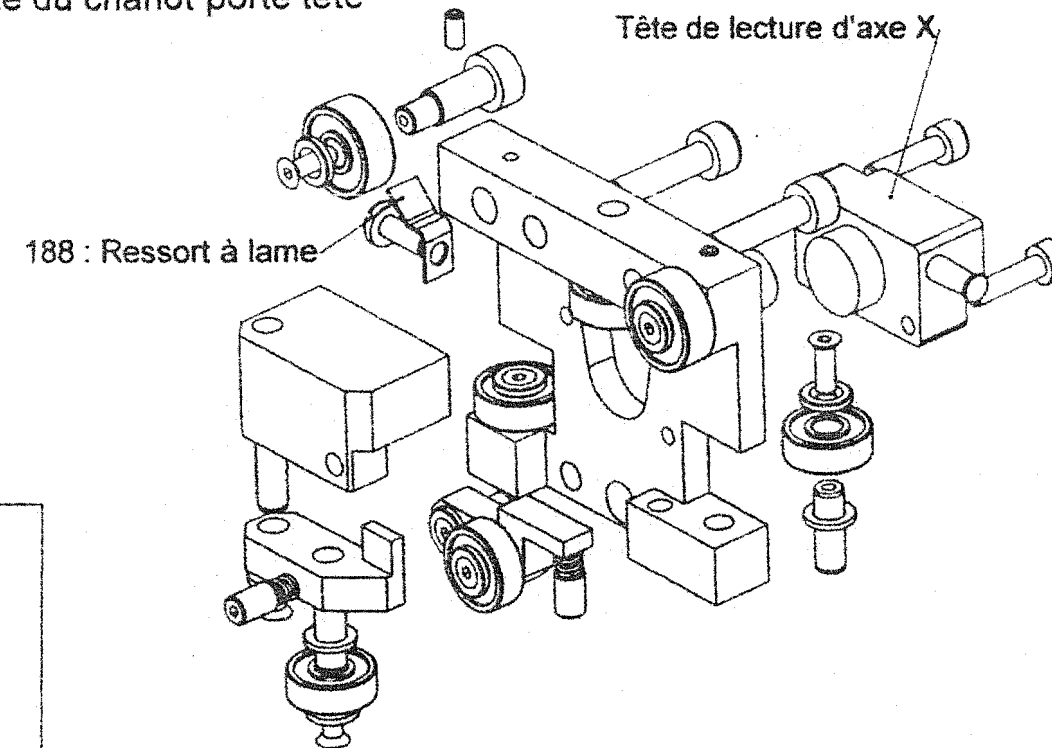
Palier intermédiaire : Ech 1:1

Document 2 : cadre 3, Système de palpage

Guidage de la tête de lecture d'axe X
Ech 1:1



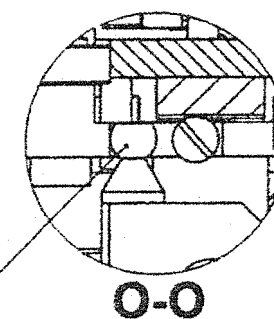
Eclaté du chariot porte tête



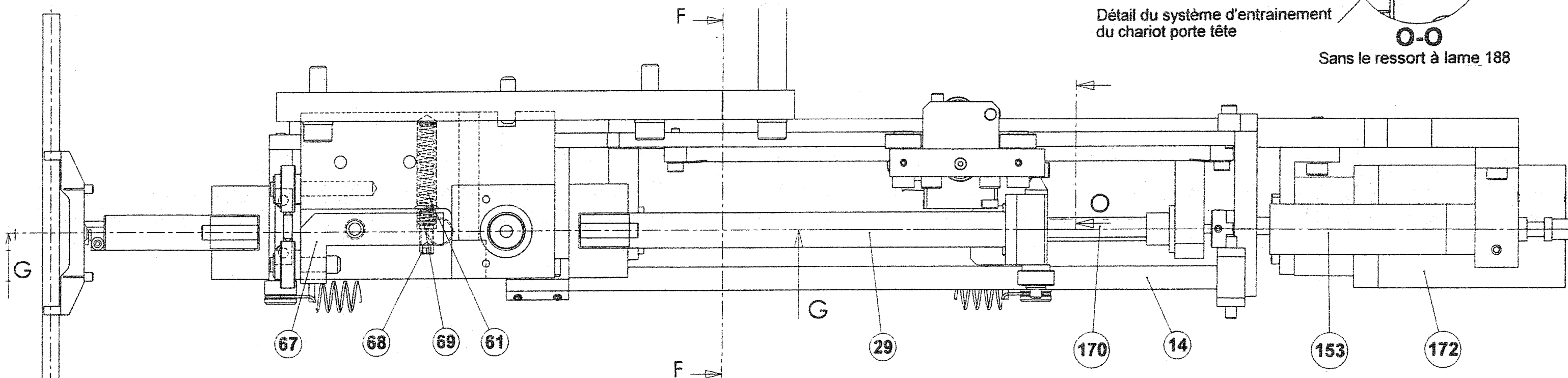
Ech 1:1

1:

Détail du système d'entraînement du chariot porte tête

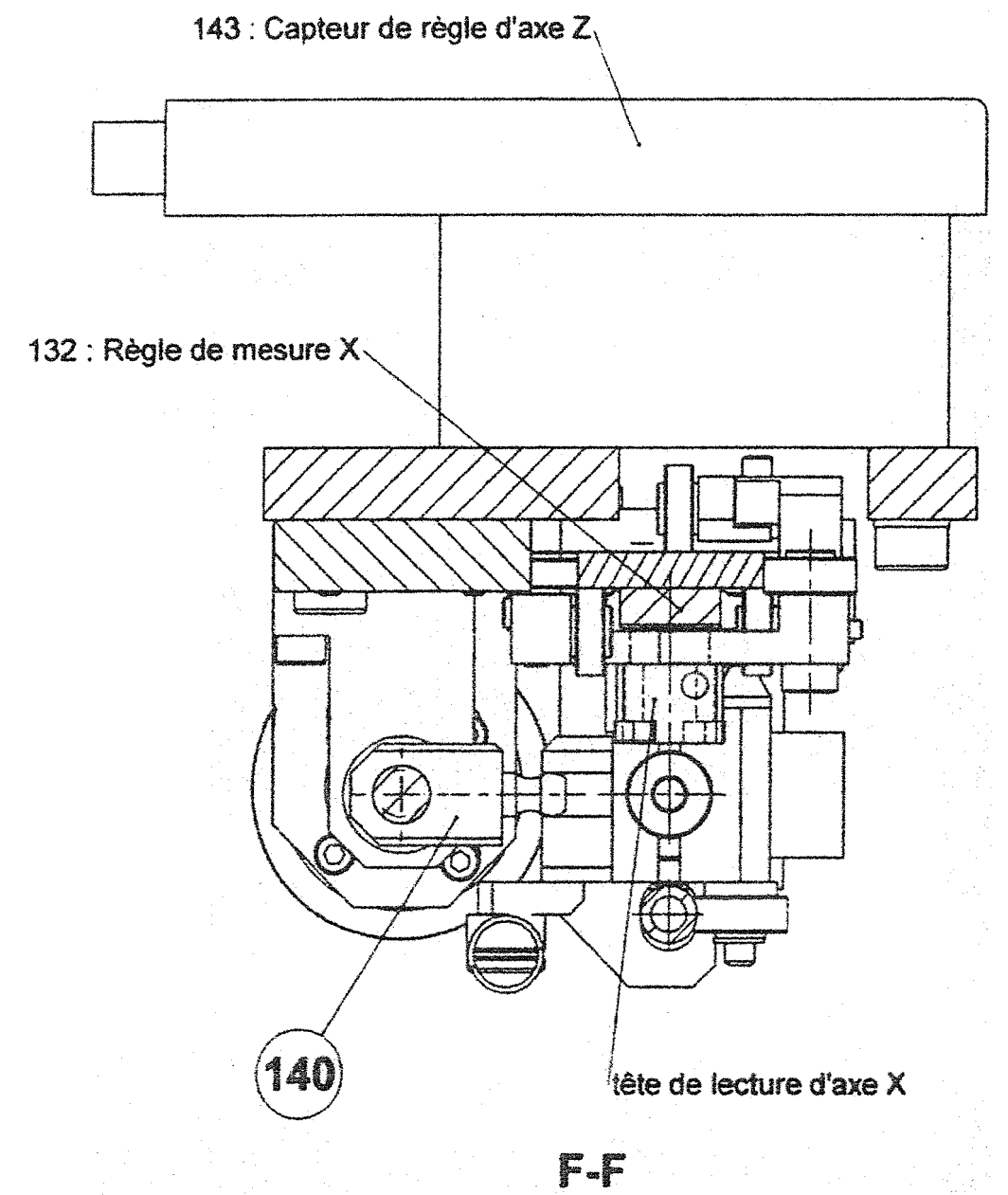
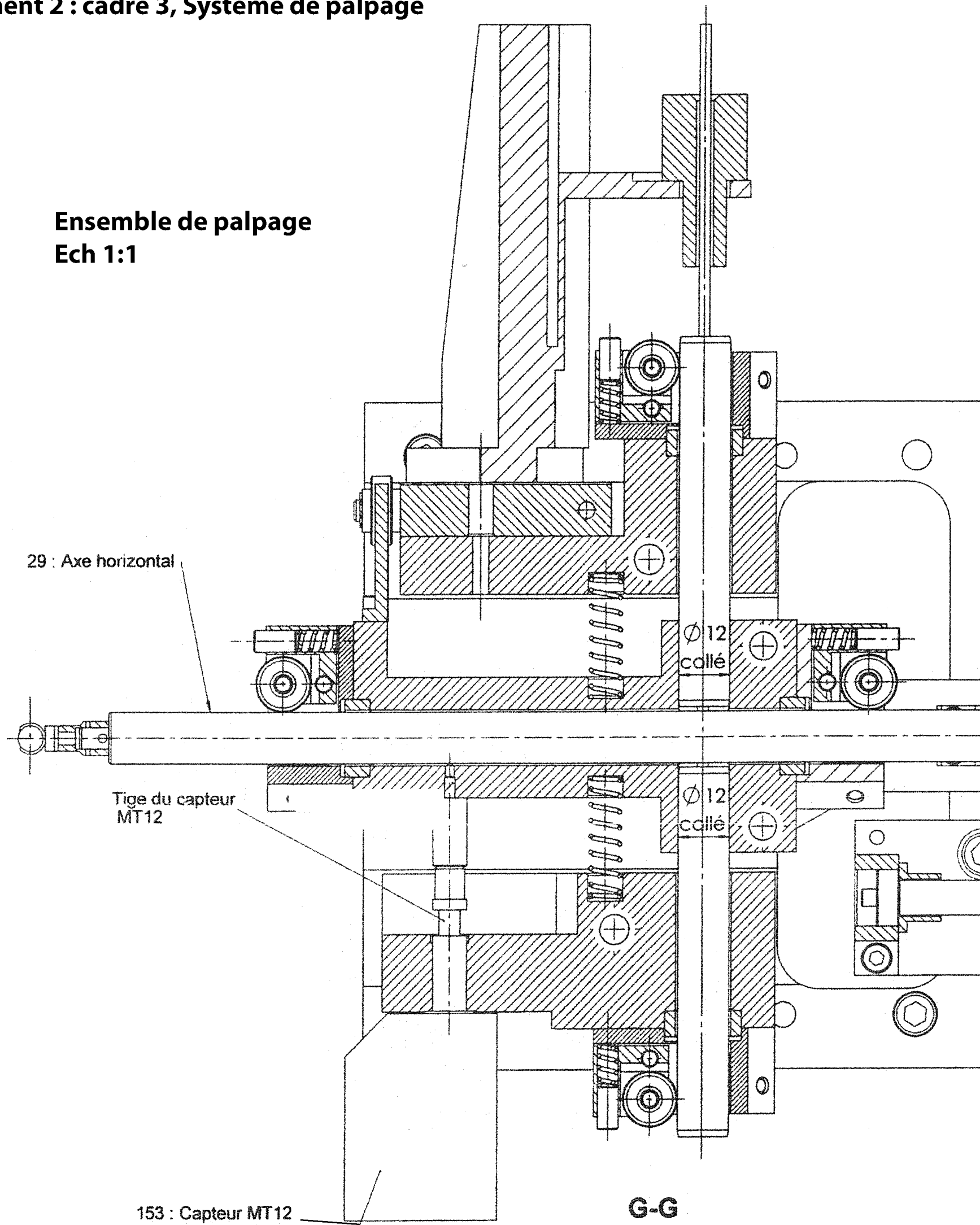


Sans le ressort à lame 188



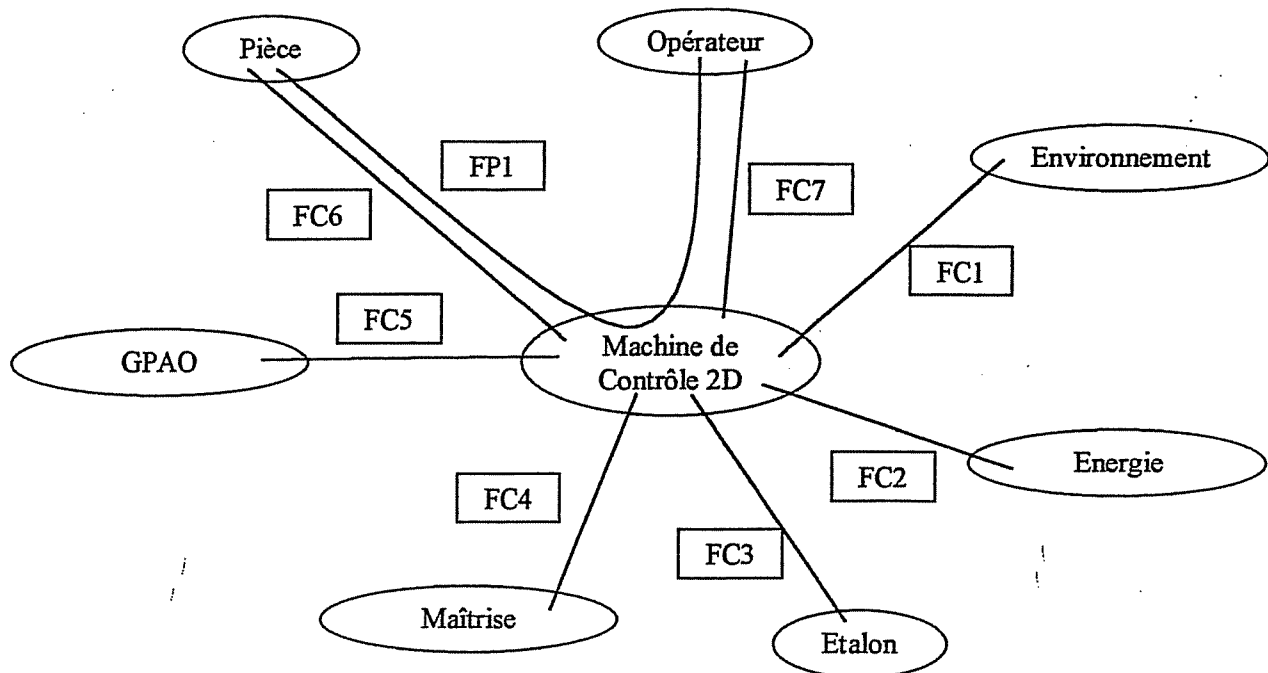
Vue de dessus de l'ensemble de palpage, Ech 3:4

Ensemble de palpage
Ech 1:1



N°	Quantité	Matériau	Désignation	Observations
1	1	marbre	Bâti	$\alpha_{\text{marbre}} = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
4	1	acier	Platine de broche supérieure	$\alpha_{\text{acier}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
14	1		Tube de guidage	
17	4		Galet Nadella	Réf. : GCL 40 EEM
19	2		Support de galet	
25	1		Vérin	
27	1		Broche supérieure	
29	1		Axe horizontal	
40	1		Broche inférieure	
45	1		Moto-réducteur pas à pas	
46	1		Codeur	
54	1	Alliage léger	Plaque	$\alpha_{\text{al}} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
61	1		Ressort de compression	
67	1		Levier presseur	
68	1		vis HC M5-10	
69	1		Rondelle d'appui	
75	1		Support bas	
78	1		Barreau céramique	
79	1		Règle d'axe Z	Réf. : LS406
81	1		Table linéaire d'axe Z	
84	1		Moteur pas à pas	
132	1		Règle de mesure d'axe X	Réf. : LS120
140	1		Ecrou de transmission d'axe X	
141	1		Support avant	
143	1		Capteur de règle d'axe Z	
153	2		Capteur de déplacement	Réf. : MT12
157	1		Masse principale	
170	1		Vis de transmission d'axe X	
172	1		Moteur pas à pas	
181	1		Ressort d'axe X	raideur = 0,0083 N/mm
182	2		Ressort d'axe Z'	
183	1		Arbre à cames	
188	1		Ressort à lame	

Document 3 : Extrait de Nomenclature



FP1 : Contrôler une pièce pendant la production.

FC1 : S'adapter à un environnement de production industriel.

FC2 : Etre alimentée en énergie.

FC3 : Etalonner la machine.

FC4 : Etre programmée par un agent des méthodes. (gamme de palpé)

FC5 : Retourner l'information sur le pilotage de la chaîne de production.

FC6 : Prendre la pièce entre pointes.

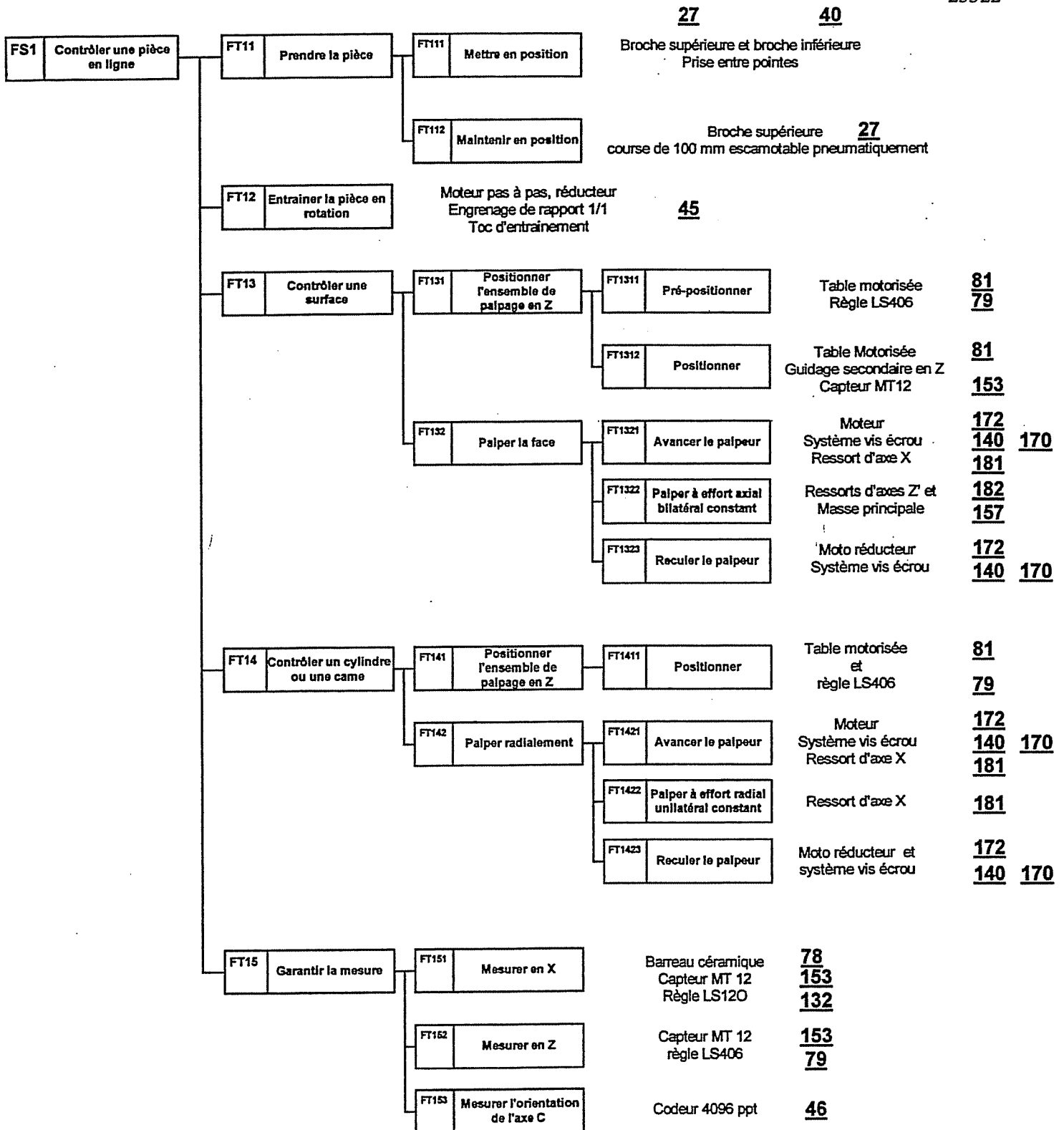
FC7 : Dialoguer avec l'opérateur.

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
FP1	Diamètre de la pièce	De 20 à 140 mm	20 min et 140 max
	Longueur de la pièce	400 mm	max
	Précision radiale	$\pm 1 \mu\text{m}$	min
	Précision axiale	$\pm 2.5 \mu\text{m}$	min
	Fréquence de rotation	6 tr/min	max
FC6	Masse de la pièce	50 kg	max

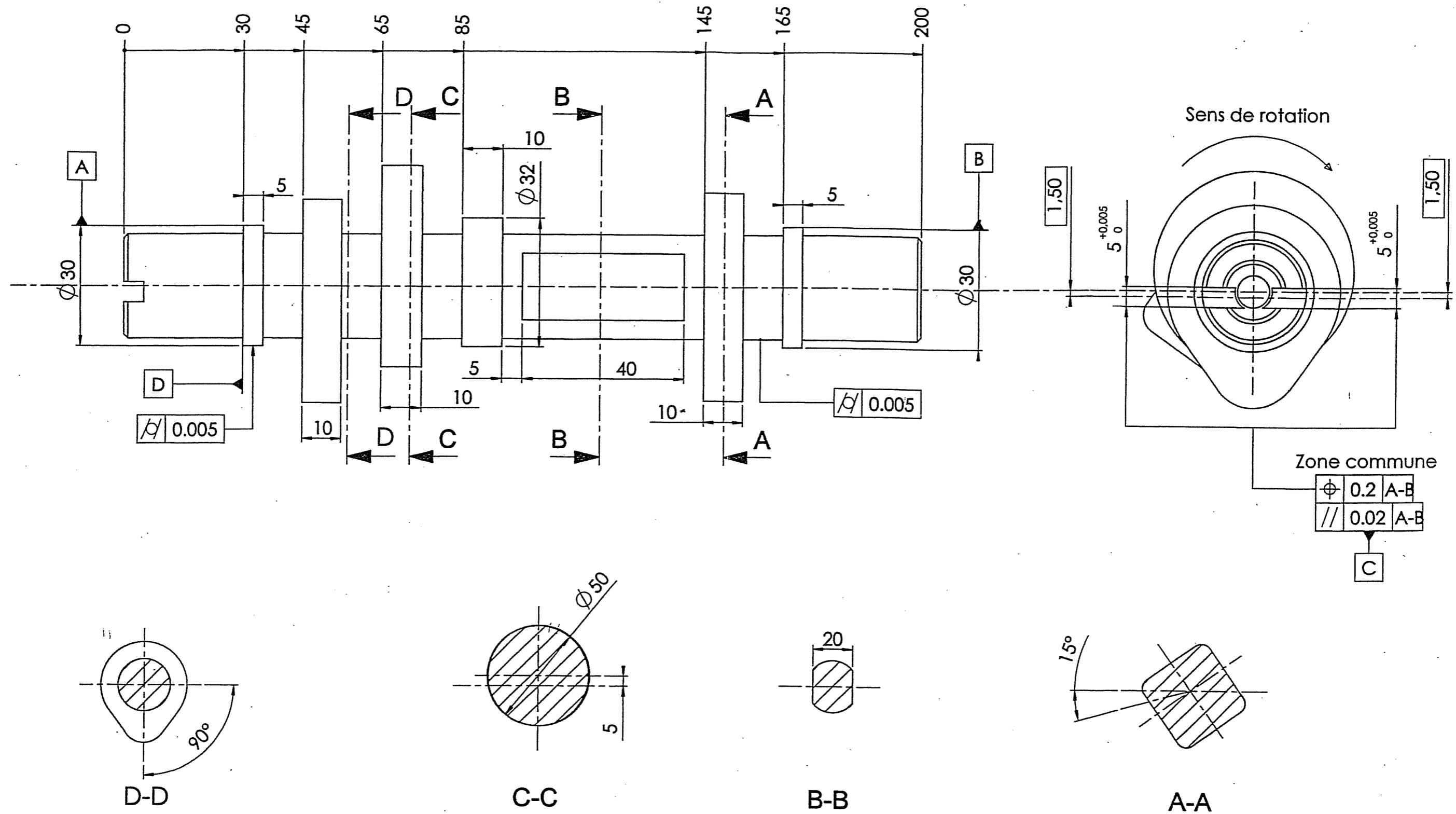
Document 4 : Analyse fonctionnelle partielle

Rep.	Désignation	Caractéristiques techniques
40	Broche inférieure	Battement radial < 0.5 μm . Battement axial < 0.5 μm . Fréquence de rotation maximale : 20 tr/min. Effort axial maximum : 800 N.
27	Broche supérieure	Battement radial < 0.5 μm . Battement axial < 0.5 μm . Fréquence de rotation maximale : 20 tr/min. Effort axial maximum : 150 N.
81	Table linéaire d'axe Z	Unité linéaire avec entraînement par vis à billes équipée de capteurs de fin de course inductifs. Course du chariot : 600 mm. Défaut de trajectoire du centre du coulisseau : - dans le plan YZ : 15 μm suivant Y ; - dans le plan XZ : 8 μm suivant X. Résolution : 0.025 mm. Précision absolue : 0.06 mm pour 300 mm. Répétabilité : 0.03 mm.
46	Codeur absolu pour l'axe C	Principe de mesure : opto-électronique. Nombre de tours : - 12 bits (4096 tours) ; - 4096 Points/tour. Classe de précision : $\pm 5.10^{-5}$ rd.
79	Règle de mesure pour l'axe Z : LS406	Système de mesure linéaire incrémentale. Support de mesure : règle en verre graduée. Coefficient de dilatation thermique : $\alpha_{\text{therm}} = 8.10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Classe de précision : $\pm 5 \mu\text{m}$. Longueur 700 mm.
132	Règle de mesure pour l'axe X : LS120	Système de mesure linéaire incrémentale. Support de mesure : règle en verre graduée. Coefficient de dilatation thermique : $\alpha_{\text{therm}} = 8.10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Classe de précision : $\pm 0.5 \mu\text{m}$. Longueur 180 mm.
153	Capteur d'axe Z' et capteur sur barreau céramique : MT12	Capteurs incrémentaux pour la mesure dimensionnelle. Course : 12 mm. Précision du système : $\pm 0.5 \mu\text{m}$ sur toute la course.
45	Actionneur axe C	Moto-réducteur pas à pas.
84	Actionneur axe Z	Moto-réducteur pas à pas.
172	Actionneur axe X	Moto-réducteur pas à pas.

Document 5 : Caractérisation des capteurs, actionneurs et guidages



Document 6 : Diagramme fonctionnel partiel de la machine

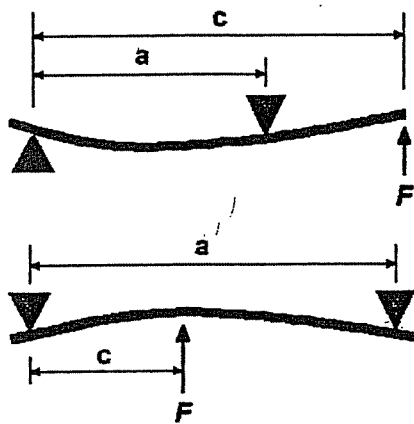
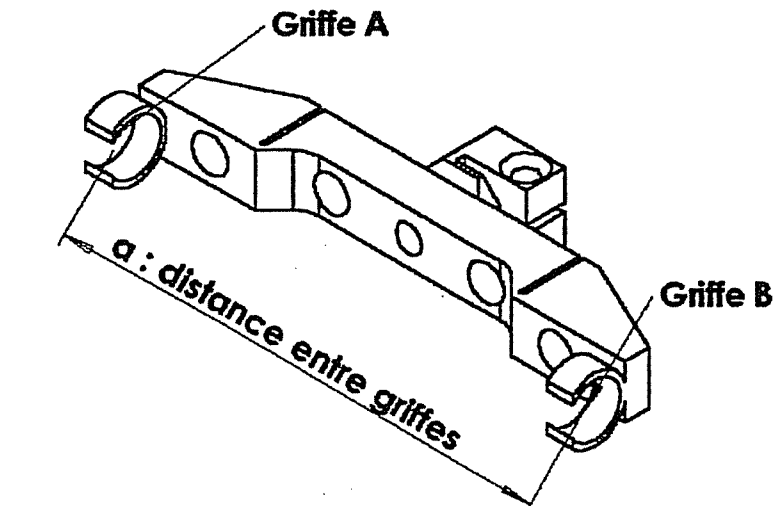


La cotation du dessin est limitée aux éléments utiles pour répondre aux différentes questions.

Document 7, format A3, échelle 1:1
 Dessin de définition d'un arbre à cames étalon

Support de palpeur

Barreau flexible sur appuis rigides



Flèche sous F : $f = \frac{F c (c - a)^2}{3EI}$

Flèche sous F : $f = \frac{F c^2 (a - c)^2}{3aEI}$

Paramètres associés au barreau :

- l : longueur, $l = 2b + a$
- d : diamètre
- E : Module d'élasticité longitudinal
- ρ : masse volumique

Paramètres associés au comportement du support dans la position de la figure :

- k1 : raideur d'un appui sollicité en compression
- k2 : raideur d'un appui sollicité en traction
- a : distance entre appuis
- b : dépassement

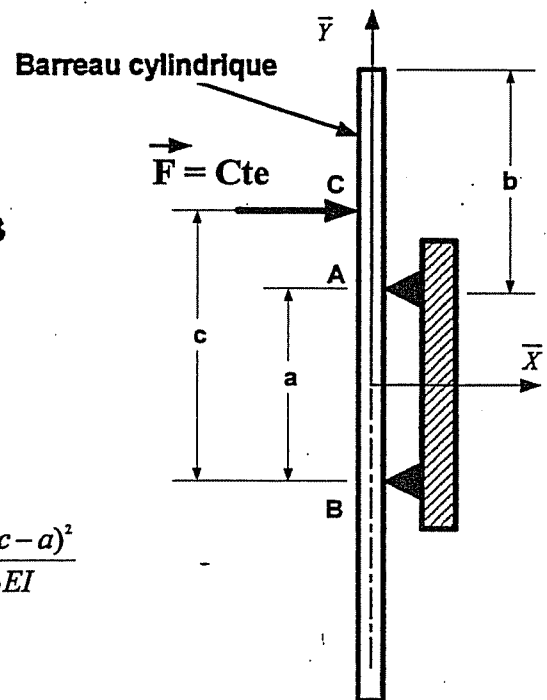
Paramètres de conception :

- $\lambda = \frac{b}{a}$
- $\mu = \frac{k_2}{k_1}$

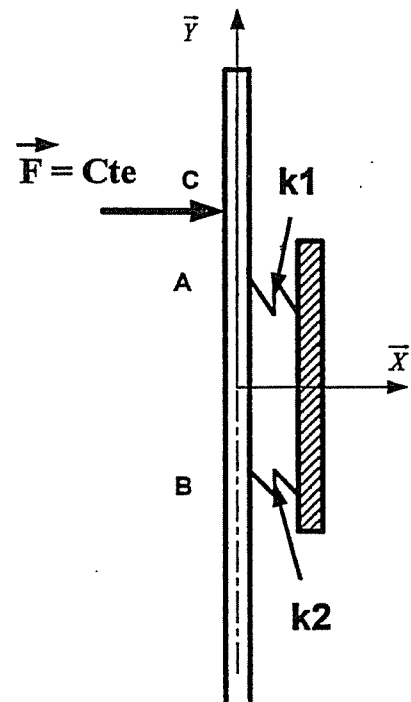
Raideur de palpation :

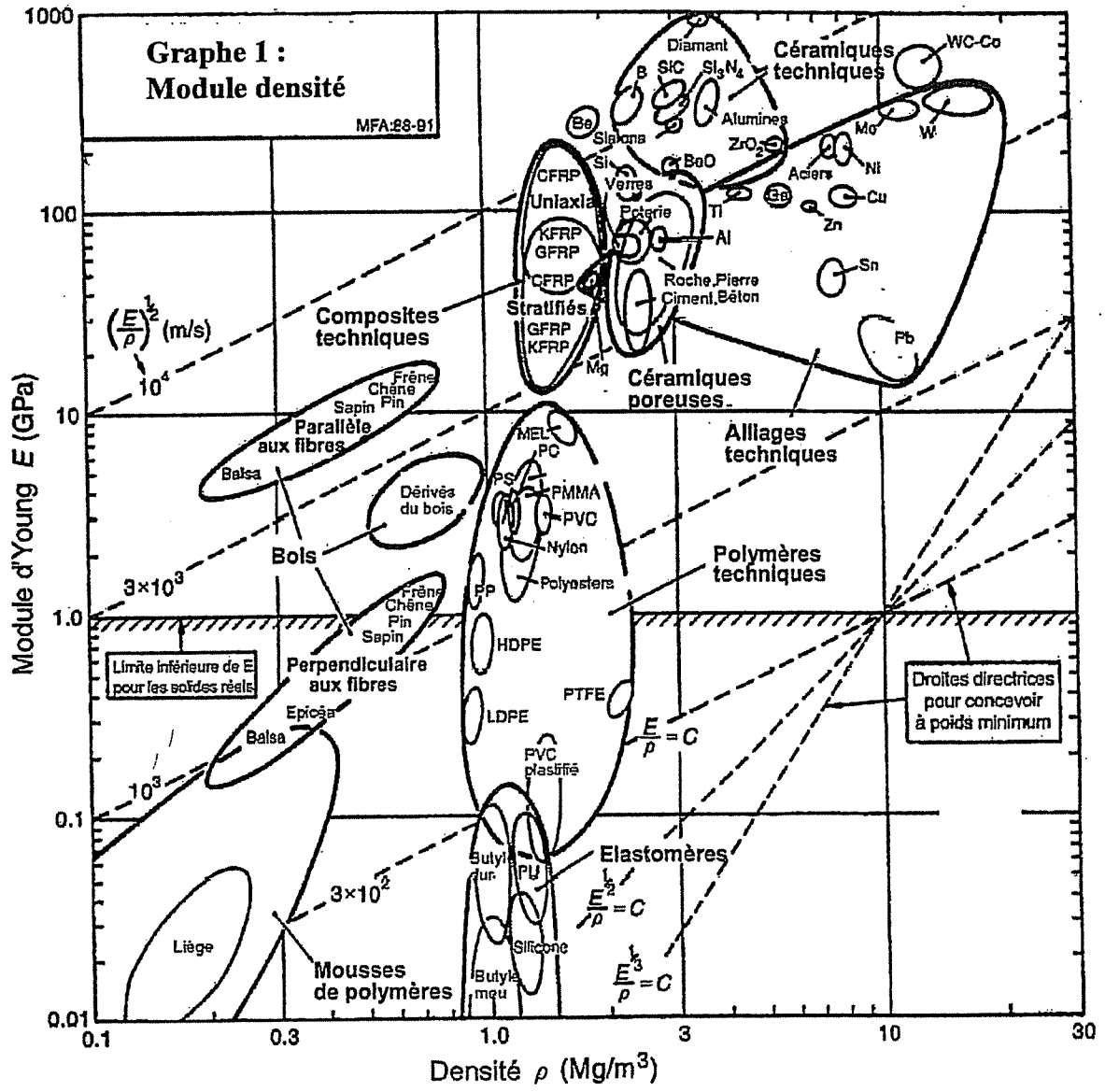
$$k_p = \frac{F}{u_c}$$

F : norme de l'effort de palpation
 u_c : flèche au point C

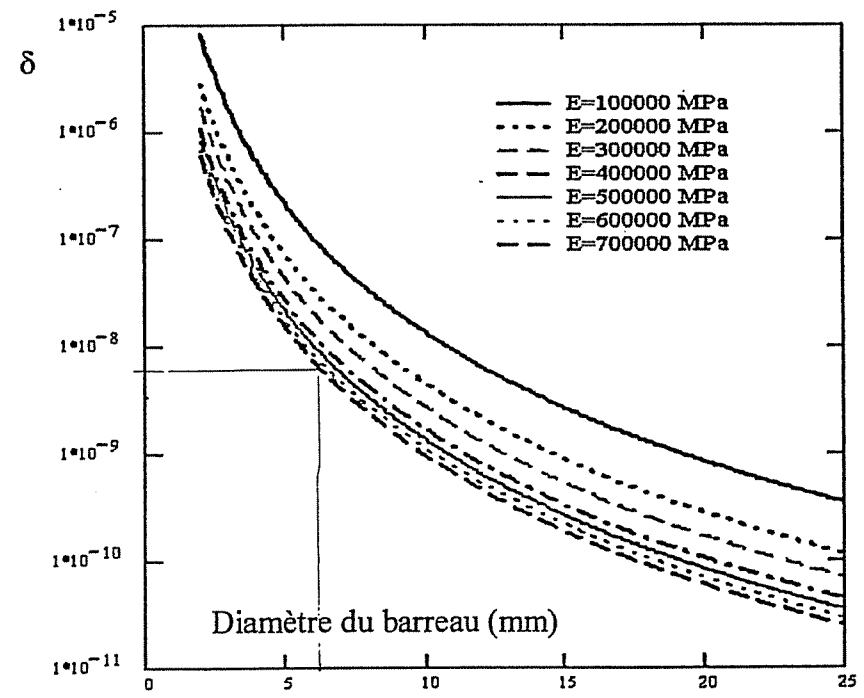


barreau rigide sur appuis flexibles

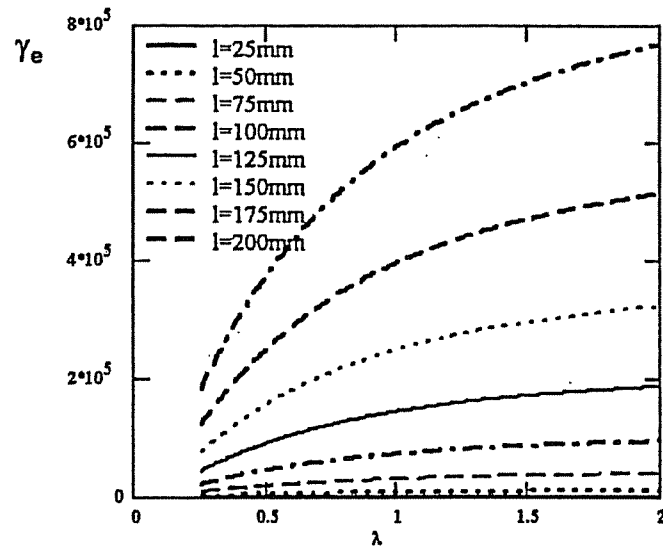




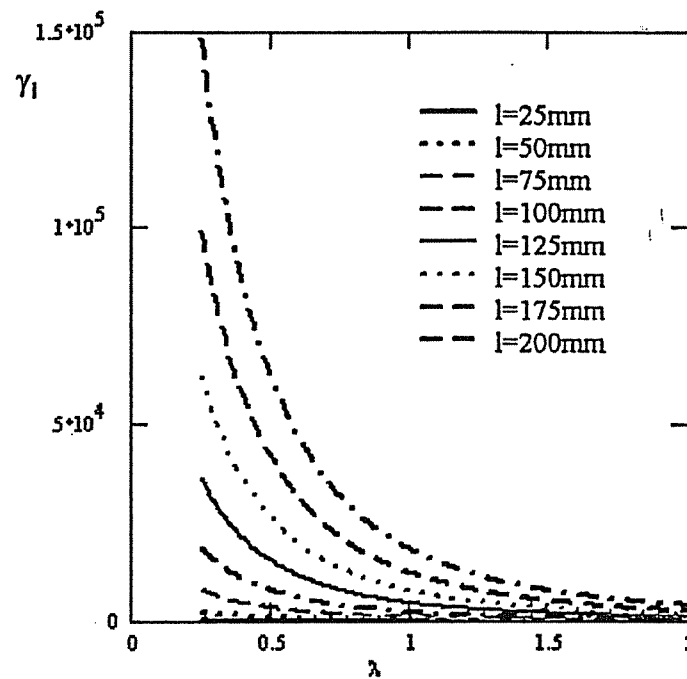
**Graphe 2 :
Coefficient de souplesse
 $\delta(E, d)$**



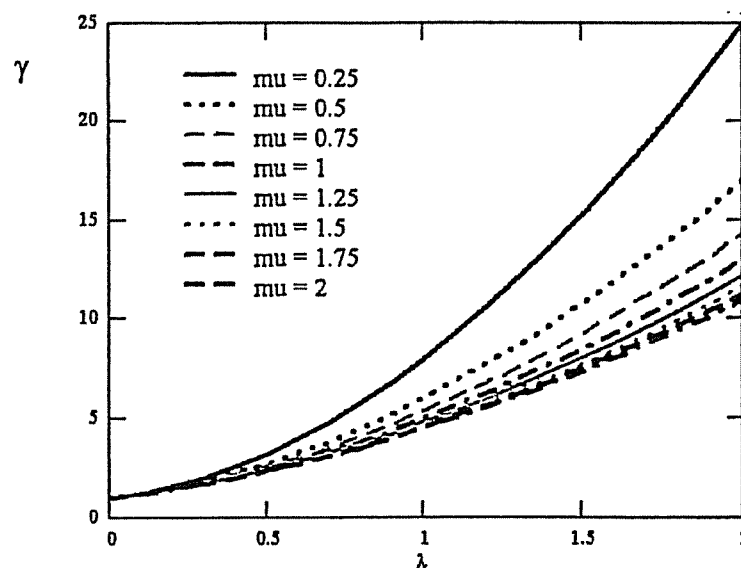
Grphe 3 :
Coefficient de souplesse
 $\gamma_e(\lambda, l)$

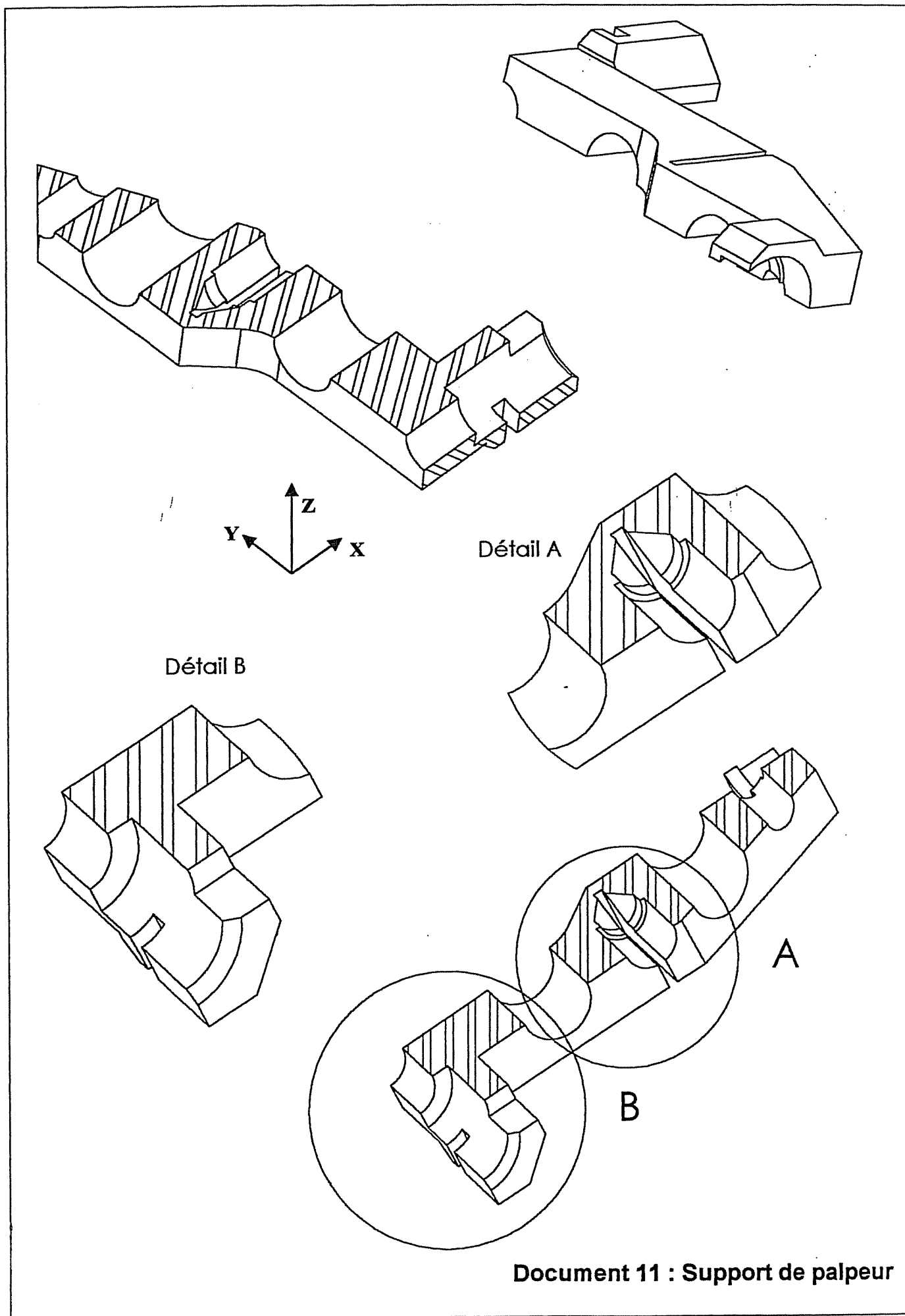


Grphe 4 :
Coefficient de souplesse
 $\gamma_i(\lambda, l)$

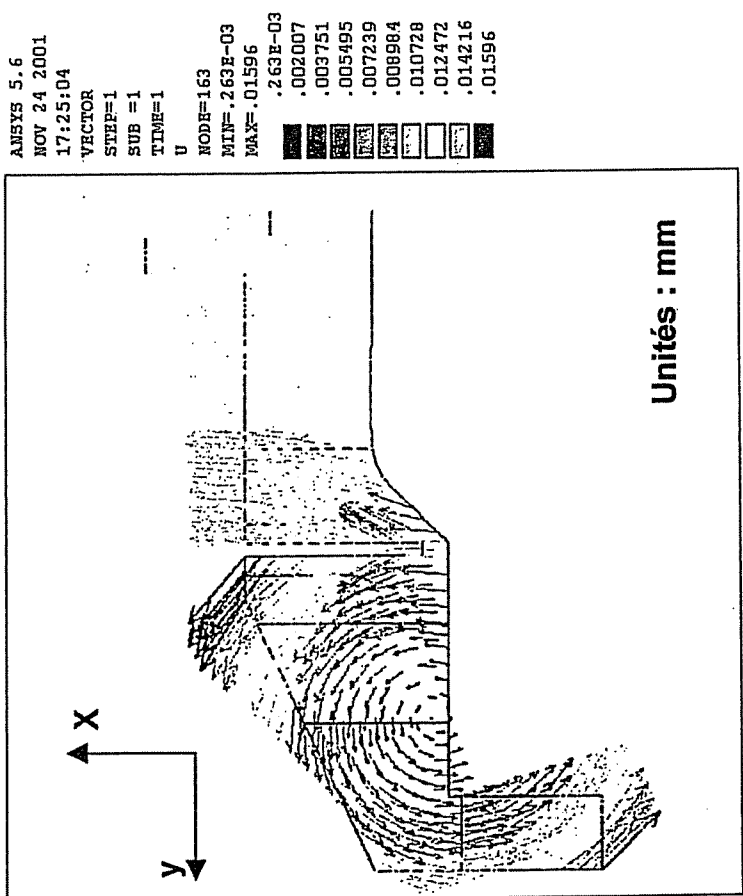
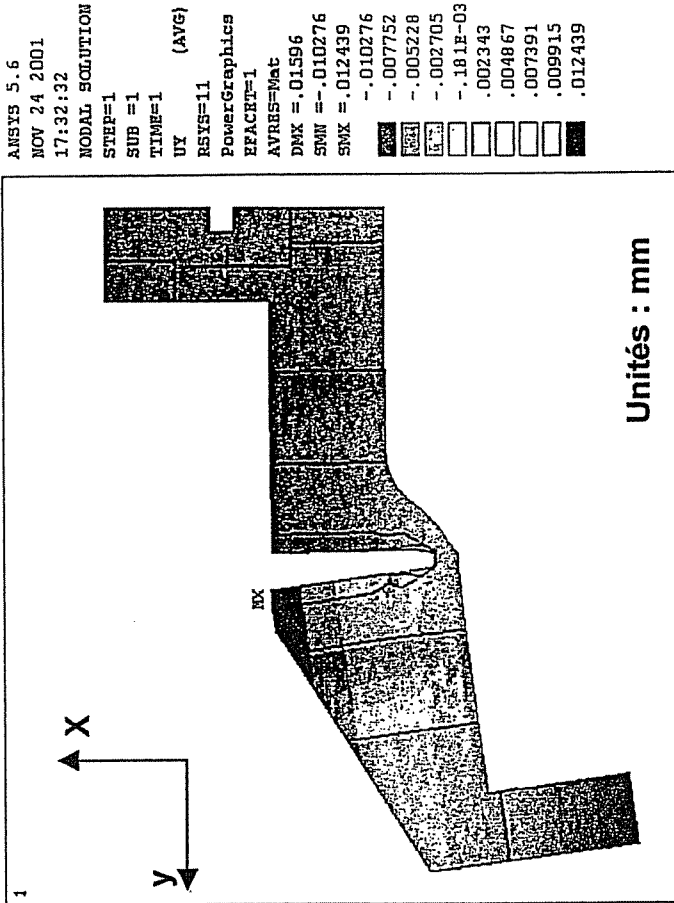
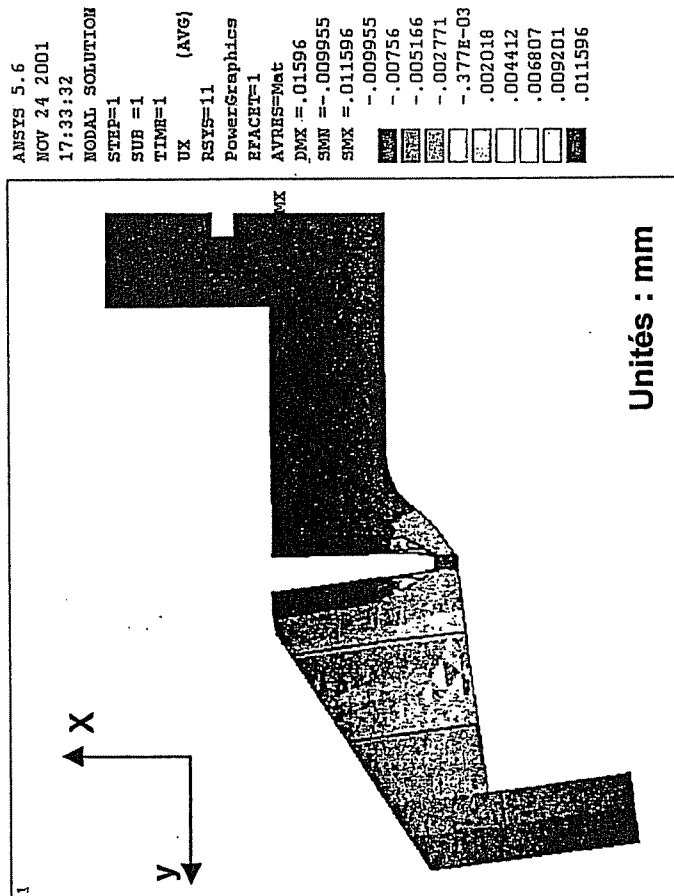


Grphe 5 :
Coefficient de souplesse
 $\gamma(\lambda, \mu)$





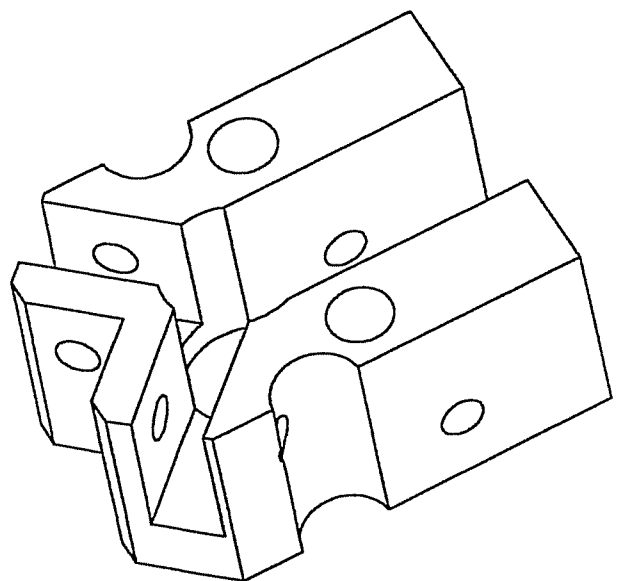
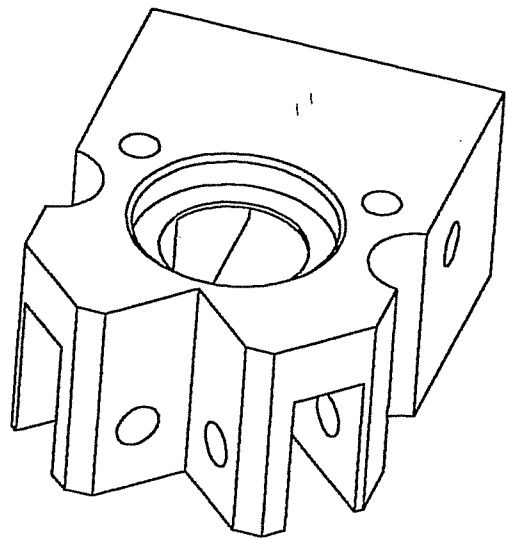
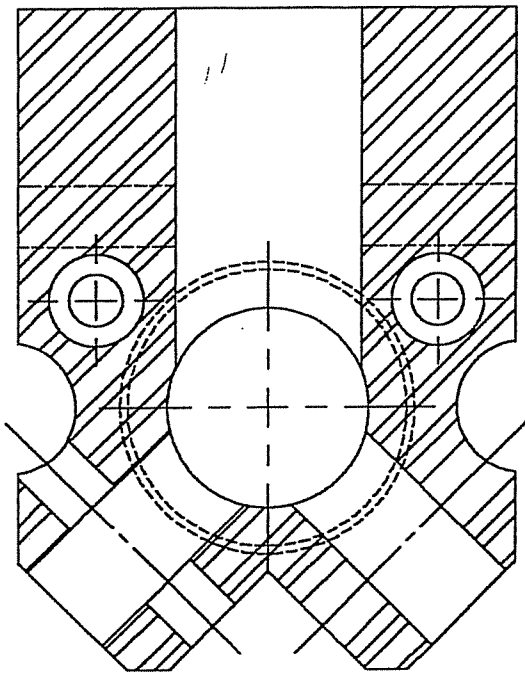
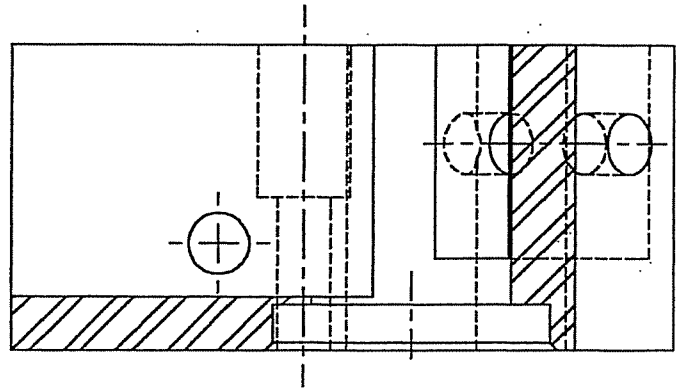
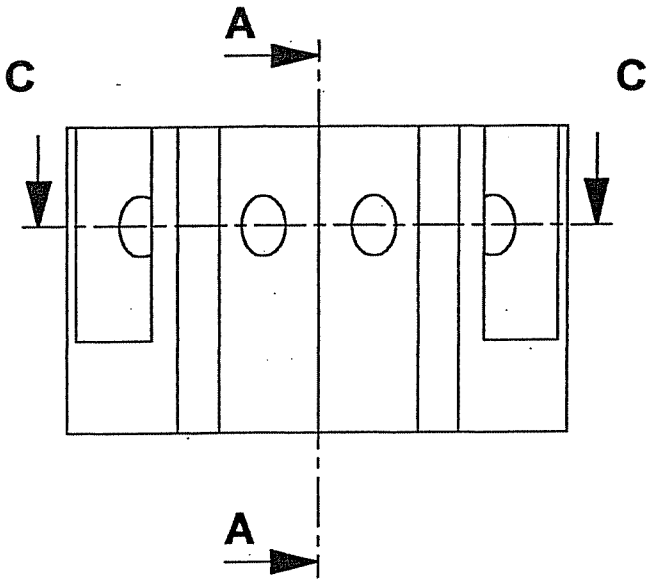
Document 11 : Support de palpeur



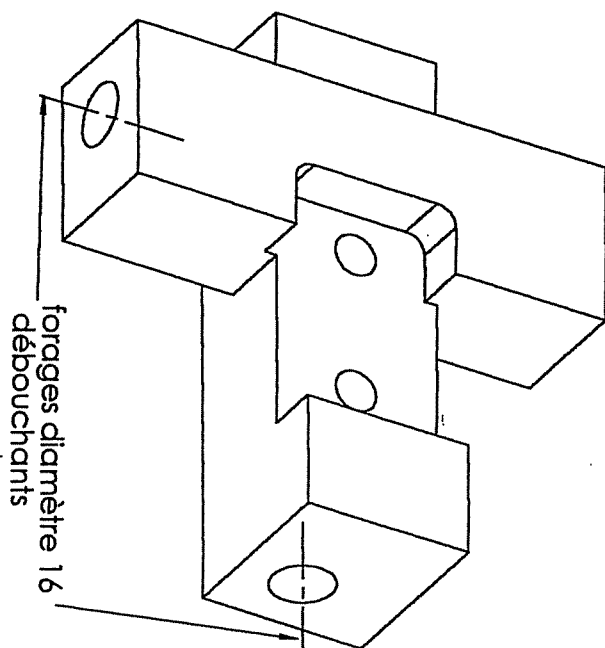
Champs de déplacements du support de palpeur.

Résultats édités dans la base (X,Y,Z) de la machine.

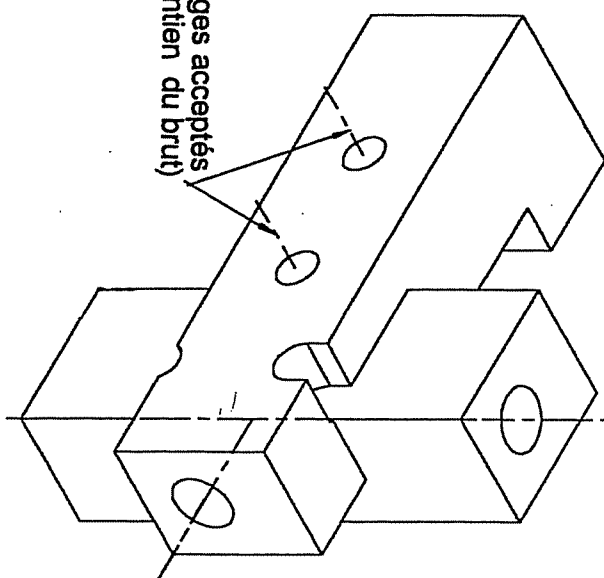
**Document 12 :
 Analyse du comportement du support de palpeur.**



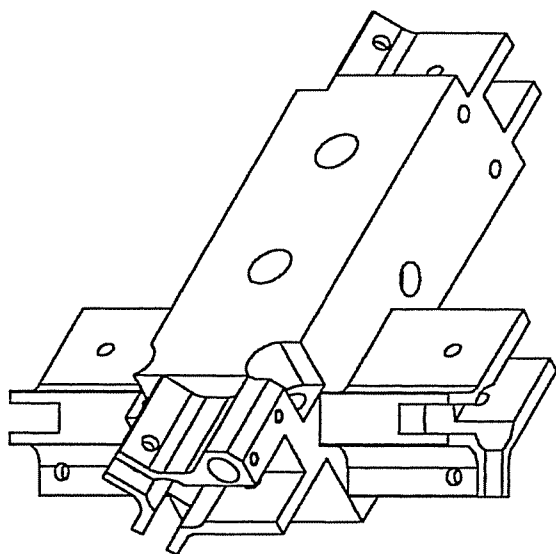
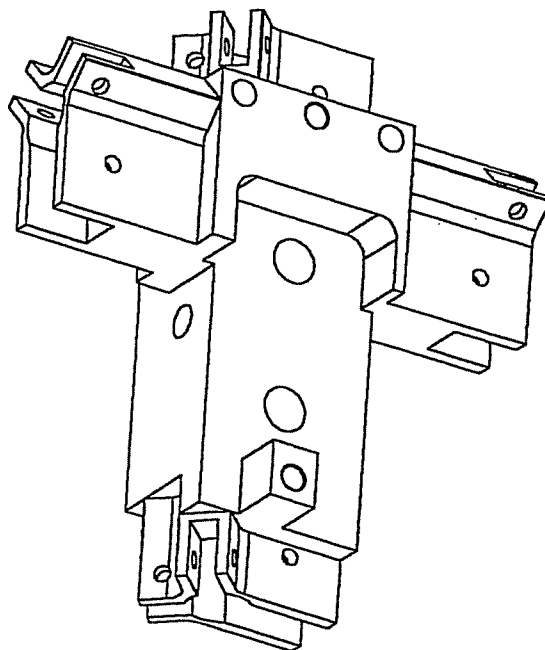
Etat après la phase d'ébauche



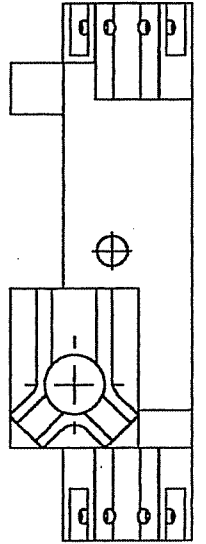
Forages acceptés (maintien du brut)



Etat de la pièce après finition

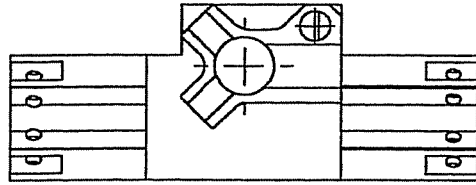


Face 5

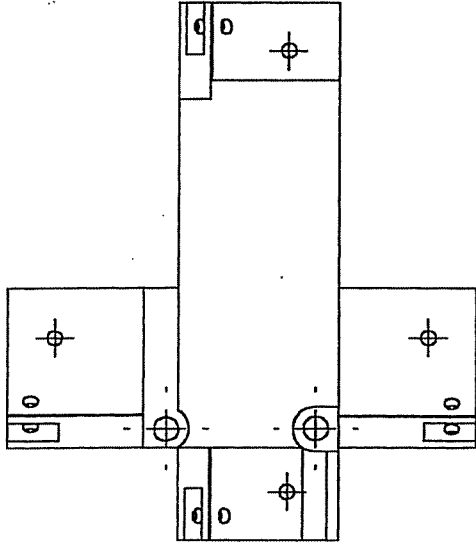


Percages de maintien sur la MOCN non représentés

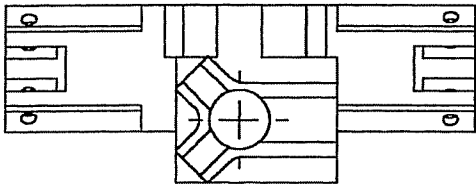
Face 2



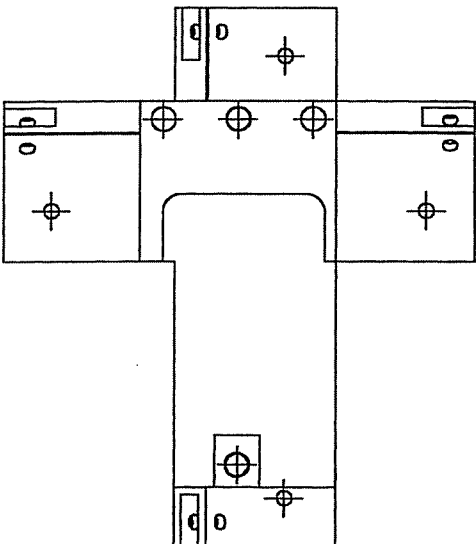
Face 1



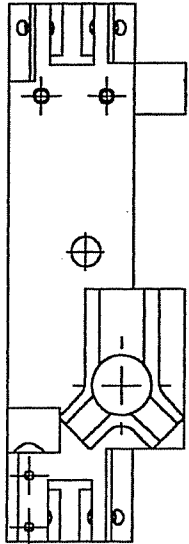
Face 4

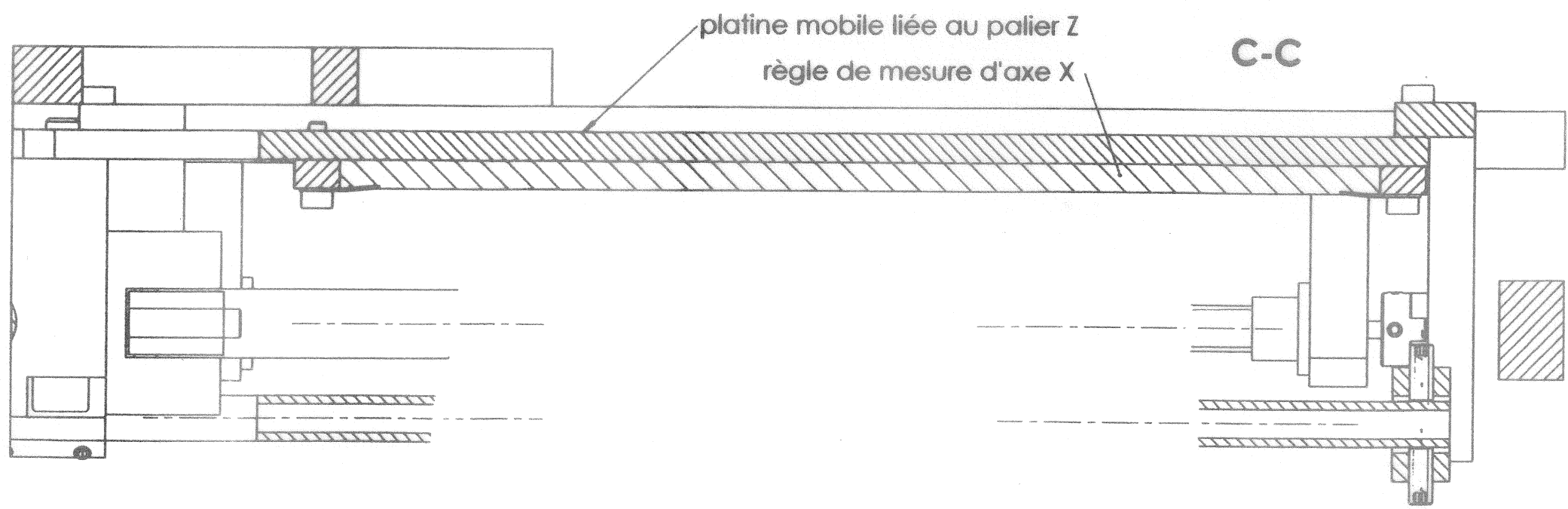
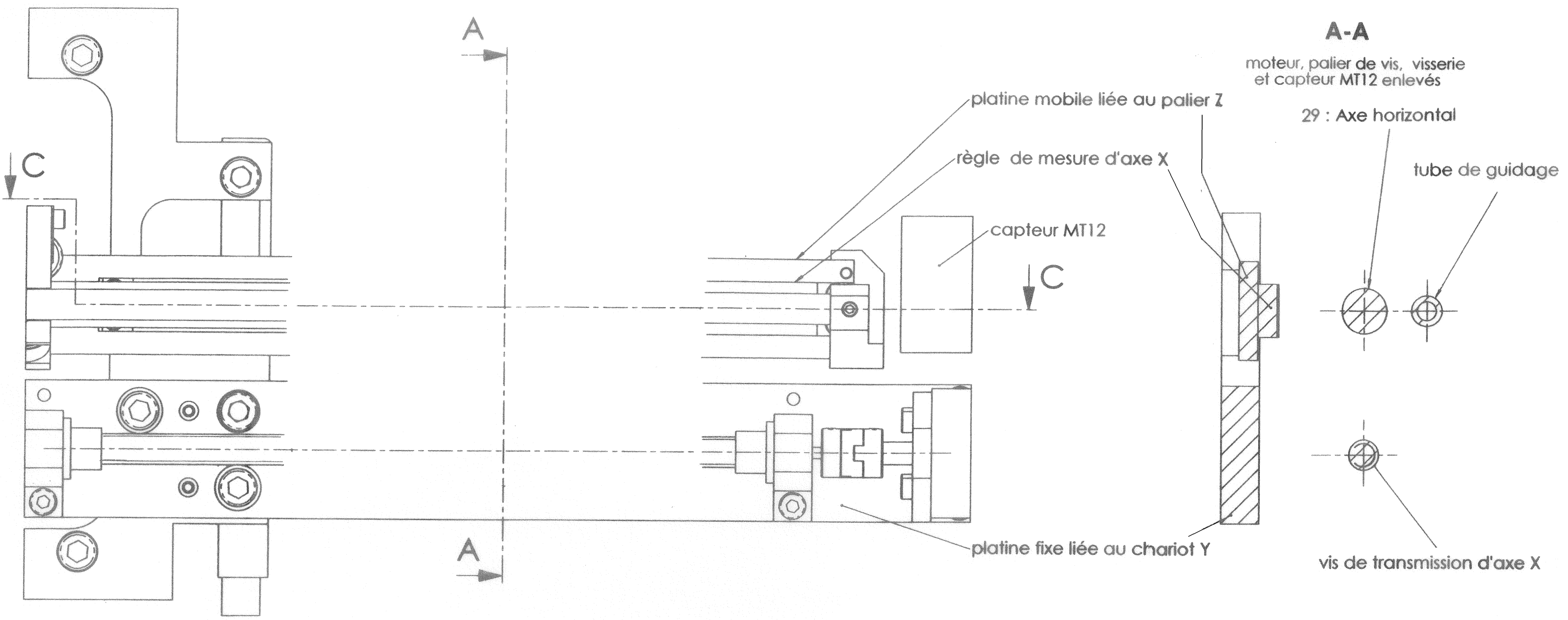


Face 3

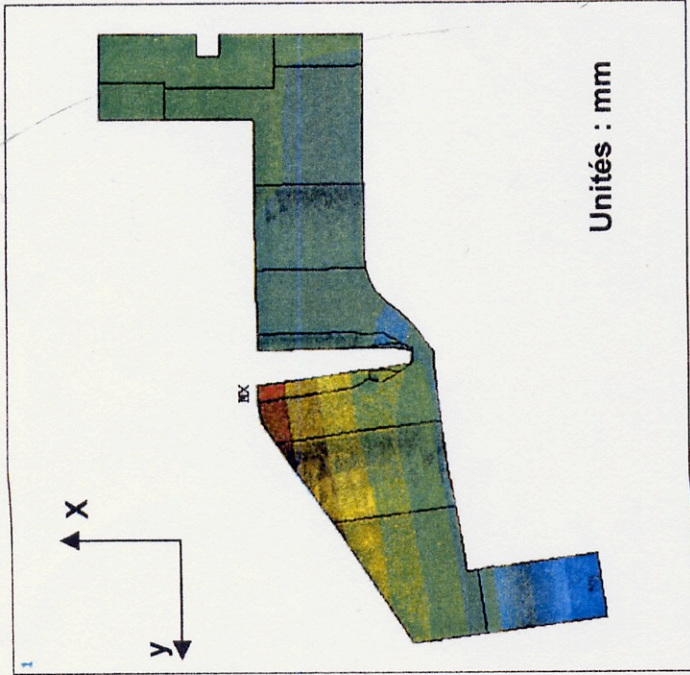


Face 6

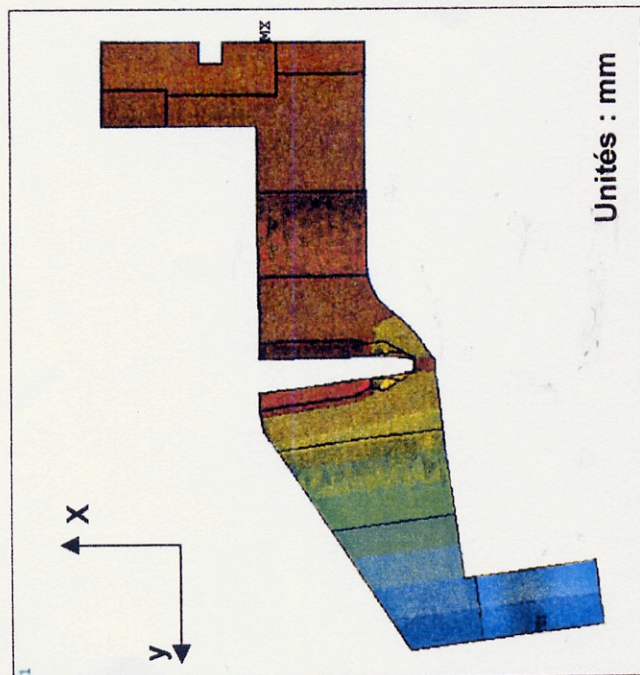




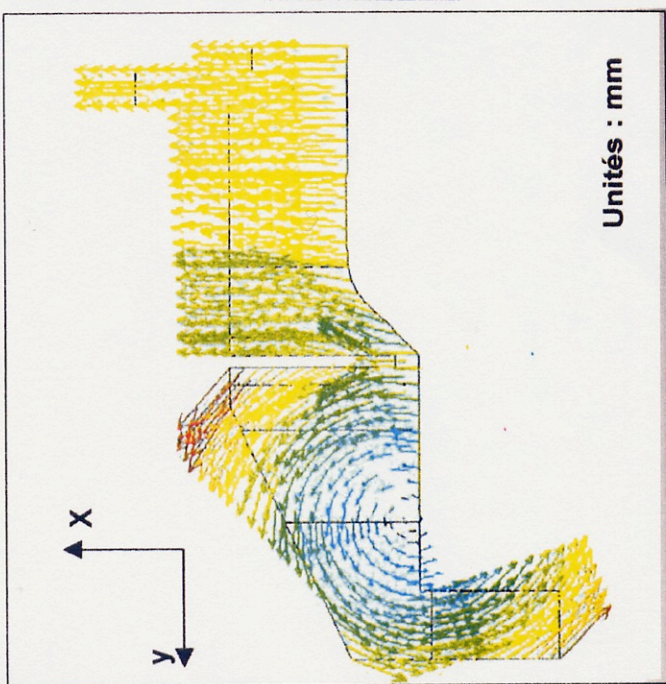
ANSYS 5.6
 NOV 24 2001
 17:32:32
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 UY (AVG)
 RSYS=11
 PowerGraphics
 EFACEF=1
 AVRES=Mat
 DMX =.01596
 SMN =-.010276
 SMX =.012439
 -.010276
 -.007752
 -.005228
 -.002705
 -.181E-03
 .002343
 .004867
 .007391
 .009915
 .012439



ANSYS 5.6
 NOV 24 2001
 17:33:32
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 UX (AVG)
 RSYS=11
 PowerGraphics
 EFACEF=1
 AVRES=Mat
 DMX =.01596
 SMN =-.009955
 SMX =.011596
 -.009955
 -.00756
 -.005166
 -.002771
 -.377E-03
 .002018
 .004412
 .006807
 .009201
 .011596



ANSYS 5.6
 NOV 24 2001
 17:25:04
 VECTOR
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 U
 NODE=163
 MIN=-.263E-03
 MAX=.01596
 .263E-03
 .002007
 .003751
 .005495
 .007239
 .008984
 .010728
 .012472
 .014216
 .01596



Champs de déplacements du support de palpeur.

Résultats édités dans la base (X,Y,Z) de la machine.

