

**SESSION DE 2001**

**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, au cours de l'épreuve. Il fournit toutes les informations nécessaires au travail demandé.*

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

*Le candidat doit obligatoirement traiter les deux parties sur des copies distinctes, en précisant bien sur chaque copie le repère et la partie de l'épreuve traitée.*

# **Tête revolver ETR3**

Le texte du sujet est constitué de :

- un dossier texte comportant 16 pages numérotées de 1 à 16 ;
- un dossier documentation comportant des documents techniques repérés DT1 à DT3 :
  - ◆ document DT 1 : Plan d'ensemble (format A1) de la tête revolver ETR3 ;
  - ◆ document DT 2 : Nomenclature de la tête revolver ETR3 ;
  - ◆ document DT 3 : Plan d'ensemble (format A4) de la broche.
- un calque pré-imprimé, document-réponse en conception repéré DR (format A4).

## **AUCUN DOCUMENT SUPPLEMENTAIRE N'EST AUTORISE**

La durée de l'épreuve est de 8 heures qu'il est conseillé de répartir de la façon suivante :

- Pour la première partie, qui mobilise des compétences dans les champs de la mécanique et de la conception des systèmes, la durée conseillée est de **4h30**.
- Pour la seconde partie, qui met en œuvre des compétences dans le champ de la construction des systèmes mécaniques, la durée conseillée est de **3h30**.

Le dessin de conception sera traité sur le calque pré-imprimé, document-réponse repéré DR.

**Il est conseillé de lire le sujet dans sa totalité avant de composer.**

---

## Introduction

---

Tout en favorisant une augmentation de la productivité, l'évolution des performances des **machines outils** doit conduire à une amélioration de la compétitivité des produits fabriqués.

La durée du cycle de production est fortement liée aux durées de changements d'outils. Afin d'optimiser cette durée, la société SOMEX produit des machines spéciales. Elle propose par exemple une tête revolver ETR3 à trois positions indexées. Chacune des trois broches de cette tête peut comporter des outils d'usinage simples ou multiples (Figure 1).

Les usinages effectués avec cette tête sont essentiellement, pour l'instant, des perçages et des taraudages. Une évolution de ce produit vers le fraisage est envisagé.

---

## Présentation de la tête revolver ETR3

---

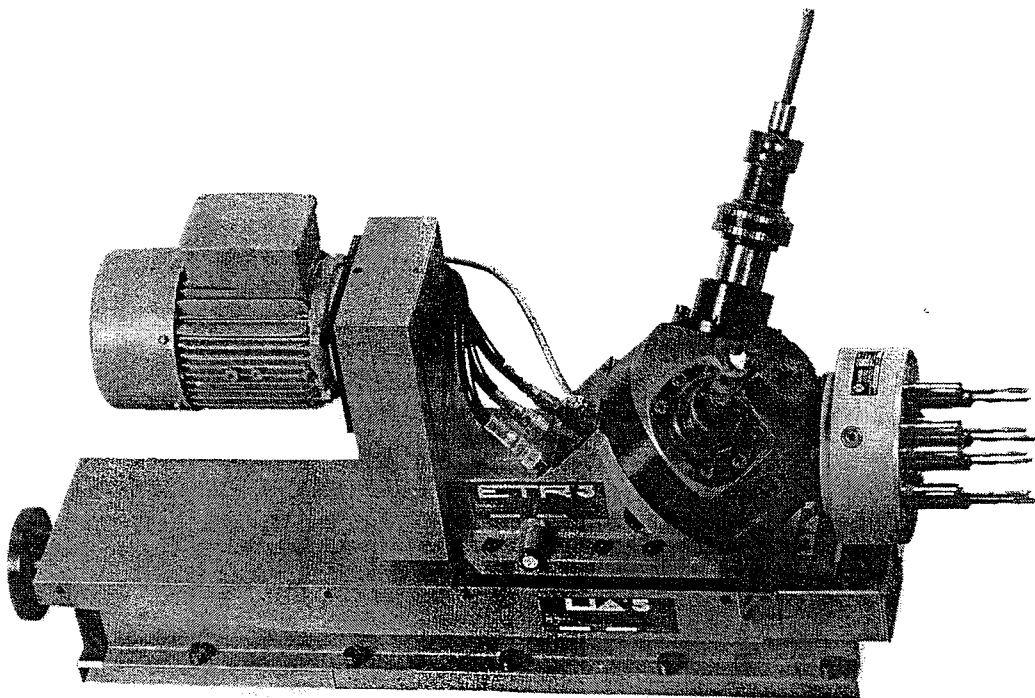


Figure 1 : Vue d'une tête revolver ETR3

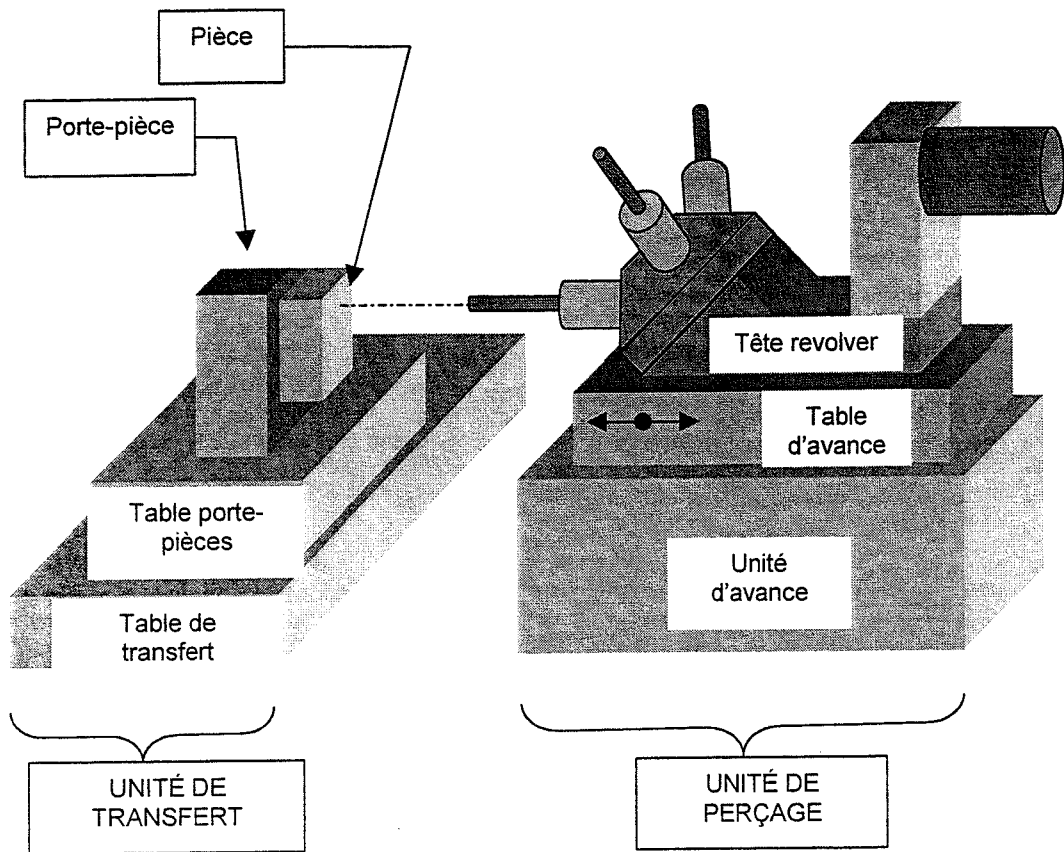


Figure 2 : Structuration du poste de travail

**Définition des fonctions de service et des fonctions contraintes de la tête ETR3**

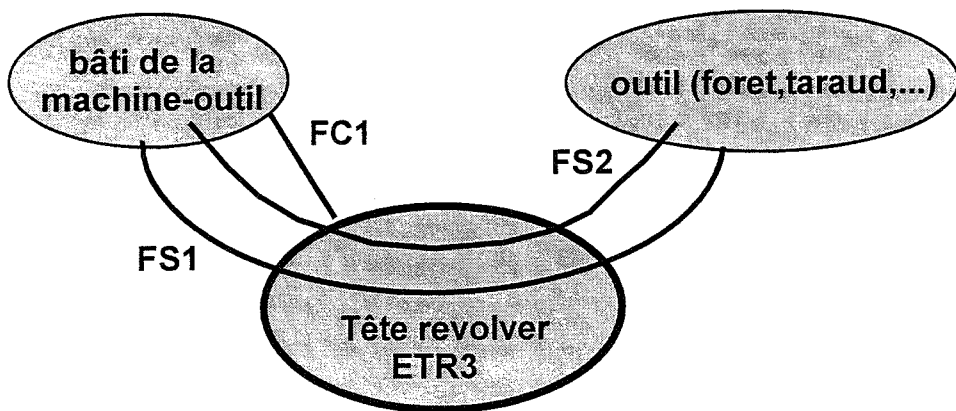


Figure 3 : Graphe des interacteurs.

FS1 : Permettre l'indexage de 3 positions de travail.

FS2 : Autoriser la rotation de la broche.

FC1 : Etre assemblée rigidement avec la table d'avance de la machine-outil.

### L'architecture de la tête revolver comporte (documents DT 1 à 3):

- le bâti support (1) (lié à la machine outil) ;
- la tourelle rotative (15) ;
- la broche porte-outils (34).

### Caractéristiques de cette tête revolver :

Capacité de perçage maximale	φ30 mm
Capacité de taraudage maximale	M24
Couple maximal à la broche	120 N.m
Effort radial maximal à la broche	2500 N
Vitesse de rotation maximale de la broche	5000 tr/min
Vitesse de rotation de broche imposée lors de la rotation de la tourelle	80 tr/min
Durée d'évolution de la tourelle ETR3 à vide (pour 120 degrés)	1,5 s
Puissance du moteur de broche	4 kW
Masse sans broche porte-outil	65 kg
Pression d'alimentation des vérins hydraulique	30 bar
Effort plaqueur dû aux rondelles élastiques	10 000 N

Le changement de broches se fait en trois phases :

- Soulèvement de la tourelle ;
- Rotation de la tourelle ;
- Descente, indexage et maintien en position de la tourelle.

Des capteurs de position permettent de séquencer ces différentes phases.

## PREMIERE PARTIE : ETUDE DES PERFORMANCES DE LA TETE ETR3

Dans cette première étude, l'objectif est de vérifier certaines performances de la tête revolver.

Dans le cas où les dimensions ne sont pas précisées dans le texte, elles pourront être paramétrées sur un croquis ou schéma puis mesurées sur le plan.

### Travail demandé

#### Question 1 :

Q 1-1 : Après avoir réalisé une lecture détaillée du plan d'ensemble (document DT1), effectuer le schéma cinématique de principe (capteurs et prises d'information exclus) de la tête revolver ETR3.

Q 1-2 : Le diagramme partiel de la fonction : " Réaliser un perçage sériel sur une machine spéciale" est donné en annexe 1. La figure 2 rappelle la structuration du poste de travail.

Compléter le diagramme fonctionnel (type FAST) de la tête revolver ETR3 limité à la fonction de service "Mettre en œuvre la tête revolver". On se limitera à une description des fonctions remplies sans décrire les solutions technologiques utilisées.

Q 1-3 : Dans l'architecture proposée, l'axe de la tourelle présente un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe de la broche d'usinage.

Dans cette question, on se place dans l'hypothèse d'une utilisation en perçage-taraudage uniquement et l'on se propose d'analyser les trois architectures suivantes :

- Axe  $\delta$  horizontal
- Axe  $\delta$  oblique ( $\alpha = 45^\circ$ , architecture correspondant au plan fourni)
- Axe  $\delta$  vertical

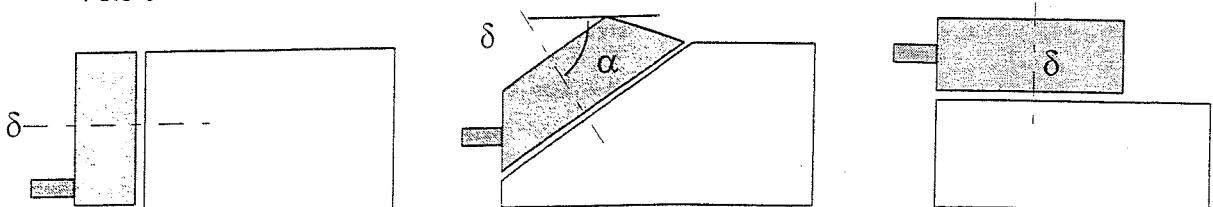


Figure 4 : Schéma des différentes architectures envisagées

Après avoir dégagé les différents critères, qui seront repris dans un tableau comparatif, conduire une analyse critique des trois architectures ci-dessus. Cette analyse débouchera nécessairement sur des conclusions.

Valeurs conseillées pour attribuer les critères :

Critères	Valeurs
Solutions équivalentes entre elles	id
Impossible	0
Moyen ou ayant autant d'avantages que d'inconvénients	1
Bon ou ayant de sérieux avantages	2

### **Question 2 : Détermination du temps de changement d'outil**

Une analyse cinétique a permis de déterminer, dans la configuration du plan d'ensemble, soit avec trois broches porte-outil identiques (type BETR-05 de 5 kg), les caractéristiques d'inertie suivantes :

Mouvement de la tourelle	Débattement	Inertie des pièces mobiles
Translation	$d = 6 \text{ mm}$	$m(S_T) = 34 \text{ kg}$
Rotation	$\theta = 120 \text{ degrés}$	$J(S_R)/\text{axe } \delta = 0,3 \text{ kg.m}^2$

- ( $S_T$ ) : ensemble des pièces mobiles en translation ;
- ( $S_R$ ) : ensemble des pièces mobiles en rotation par rapport à l'axe  $\delta$ .

Autres données de l'étude :

- la pression d'alimentation des vérins est supposée constante :  $p = 30 \text{ bar}$  ;
- l'action des rondelles élastiques est de  $10\,000 \text{ N}$ . Cette valeur moyenne est supposée constante sur la valeur du déplacement ;
- la vitesse angulaire est limitée à  $80 \text{ tr/min}$  par limitation du débit dans le vérin rotatif ;
- on suppose que l'angle parcouru dans la phase de rotation accélérée est le même que dans la phase de rotation décélérée ;
- le constructeur indique un temps de changement d'outil de  $1,5 \text{ seconde}$ .

**Q 2 :** Vérifier si la durée du changement d'outil est bien celle annoncée par le constructeur.

Regrouper les résultats sous la forme d'un tableau récapitulatif ayant la forme suivante :

Mouvement de la tourelle	Débattement (en mm ou degré)	Durée (en s)
Soulèvement		
Rotation accélérée		
Rotation uniforme		
Rotation décélérée		
Abaissement		
		<b>Durée totale :</b>

**Question 3 :** Analyse de la phase de rotation de la tourelle lors d'un changement d'outillage  
 Dans le dossier technique de la tête ETR3, le constructeur indique que lors de la rotation de la tourelle la vitesse de rotation de la broche ne doit pas être nulle. Elle doit s'approcher le plus possible de la valeur :  $N_{3/1} \approx \frac{50}{t_{120}}$

Dans cette relation :

- $N_{3/1}$  : fréquence de rotation de l'arbre (3) par rapport au bâti (1) en tr/min ;
- $t_{120}$  : durée de la rotation de la tourelle sur 120 degrés en seconde.

**Q 3-1 :** Quel est l'intérêt de ce mouvement ?

Réaliser un schéma cinématique paramétré et justifier la relation ci-dessus par une étude cinématique.

Préciser les hypothèses associées à cette relation.

**Q 3-2 :** Préciser le rôle ainsi que le mode de fonctionnement du sous-ensemble composé des pièces {40, 41, 42, 43}.

**Question 4 :**

L'arbre qui commande la rotation de la tourelle est composé de deux parties :

- une partie inférieure (16) : Axe du vérin rotatif ;
- une partie supérieure (26) : Piston.

L'exploitation de la tourelle a montré que la liaison complète entre ces deux parties posait des problèmes de tenue aux efforts (éclatement de la chemise (17)). On se propose donc d'analyser cette liaison complète.

Données de l'étude :



- la pression de commande de la levée de la tourelle est considérée constante et égale à 30 bar ;
- les rondelles ressort délivrent, lorsque la tourelle est en position haute un effort de 11500 N ;
- le vissage de la vis (25) CHC, M10-80, 10.9 conduit à un effort limite de 15000 N lorsque cette vis admet une section normale (vis non percée). La section du noyau résistant est de 52,3 mm<sup>2</sup>.

### **Analyse statique de l'assemblage languette-rainure**

Dans cette question, on veut évaluer, lorsque la tourelle est en position haute, l'effort presseur au niveau du plan de joint entre les deux parties de l'axe.

#### **Q 4-1 : Phase de précharge.**

L'assemblage n'est soumis qu'à l'effort de la vis (25). Compte tenu de la section de la vis et de la forme et des dimensions de la surface d'assemblage entre les deux parties de l'axe.

- Calculer (en N) l'effort de serrage effectif de la vis ;
- Calculer (en MPa) la pression de contact régnant dans cette interface.

#### **Q 4-2 : Phase de chargement.**

La tourelle est en position haute, le vérin est alimenté à la pression de 30 bar.

Montrer que dans cette phase, la face inférieure du piston (26) est en appui sur la face supérieure de la tourelle (15).

Déterminer l'effort  $F_j$  qui règne dans le plan de joint entre les deux parties de l'axe.

Conclure quant au risque de glissement de ces deux parties.

### **Question 5 : Analyse dynamique de l'assemblage languette-rainure**

On considère que les deux parties de l'arbre de rotation de la tourelle sont liées exclusivement par l'assemblage languette-rainure maintenu en contact par la vis (25).

Dans cette question, on veut évaluer le torseur d'encastrement relatif à l'assemblage languette-rainure lors du mouvement de rotation de la tourelle. Cette étude est conduite dans le cas d'un déséquilibre dû à des outillages de masse différente.

Les caractéristiques dynamiques de l'ensemble en mouvement (noté S) sont les suivantes :



Durant la phase d'accélération relative à la rotation de la tourelle, l'accélération angulaire est supposée constante égale à :  $\frac{d\omega}{dt}(S/R_0) = 250 \text{ rad/s}^2$ . La vitesse de rotation maximale sera considérée égale à  $N(S/R_0) = 80 \text{ tr/min}$ .

Pour les trois questions qui suivent, on donnera les résultats en N et N.m dans la base B liée à la tourelle

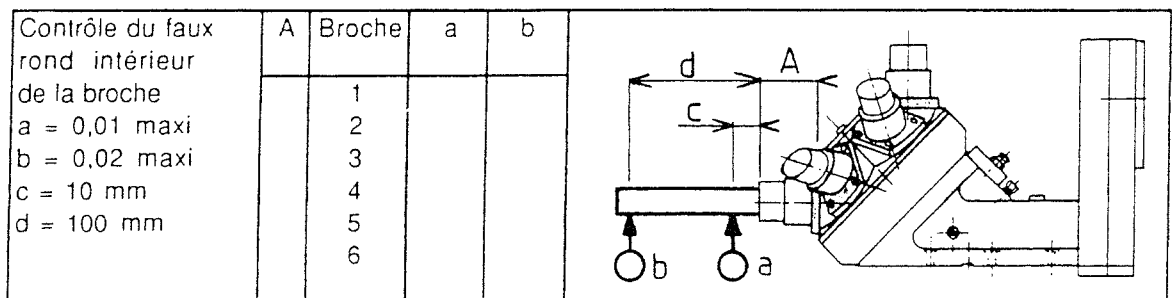
**Q 5-1 :** Calculer en C (centre de l'assemblage languette-rainure) le torseur dynamique galiléen de la tourelle (Figure 5).

**Q 5-2 :** Calculer en ce même point C, le torseur caractérisant l'effet de la pesanteur sur la tourelle (Figure 5).

**Q 5-3 :** A partir des résultats obtenus aux deux questions précédentes, conclure quant au risque de détérioration de l'assemblage languette-rainure.

**Question 6: Cotation**

Comme tous les éléments de machine-outil, la tourelle revolver doit satisfaire à des contrôles géométriques très exigeants. Une de ces exigences concerne le faux rond de la broche. Voir figure 6 un extrait du document constructeur concernant le contrôle géométrique des têtes à 3 ou 6 broches.



**Figure 6 : Extrait du document de contrôle géométrique des têtes ETR3 et ETR6**

Les roulements utilisés pour le guidage de la broche (34) sont deux roulements à rouleaux coniques de précision pour lesquels le faux-rond maximal est de  $4 \mu\text{m}$ . Cette valeur est mesurée au milieu de la bague intérieure.

**Q 6** : Réaliser un dessin de définition à main levée de la (ou des) pièce(s) fabriquées entrant en jeu pour le respect de cette spécification.

Mettre en place la cotation géométrique de position des surfaces intervenant dans cette spécification.

## SECONDE PARTIE : AVANT-PROJET DE CONCEPTION D'UNE EVOLUTION DE LA TOURELLE ETR3

### Présentation de l'évolution

La tourelle ETR3 était initialement prévue pour réaliser des opérations de perçage. Afin d'améliorer la productivité certains utilisateurs ont été tenté de réaliser d'autres opérations en particulier des "petits fraisages". Lors d'utilisations extrêmes par rapport au cahier des charges initial, des dysfonctionnements sont alors apparus :

- lors de l'utilisation de la tourelle pour effectuer des opérations de fraisage, les efforts de coupe ne participant plus au "plaquage" de la tourelle sur son support, un défaut de positionnement a été constaté au cours de l'utilisation ;
- dans le cas de déséquilibre dynamique entre les trois broches utilisées et si, de plus, la rotation est trop rapide, la chemise (17) éclate et provoque une fuite d'huile. Ce phénomène est dû en particulier au fait que la liaison type "languette-rainure" entre le piston (26) et l'axe (16) conserve un degré de liberté suivant l'axe de la rainure. Cette translation est en effet seulement immobilisée par le frottement et la chemise (17).

## Travail demandé

On propose la conception d'un prototype afin de valider de nouvelles solutions évitant ces problèmes. Les données suivantes sont extraites du nouveau cahier des charges :

### Extraits du nouveau cahier des charges

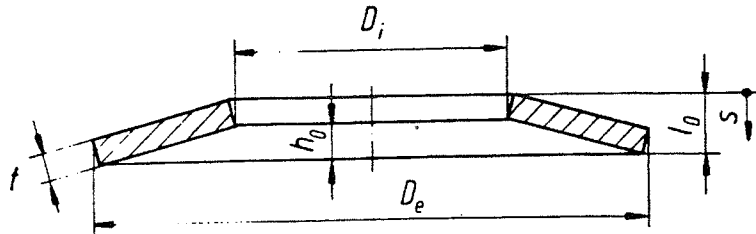
Fonctions	Critères	Niveau	Flexibilité
F1 : Fournir un effort plaqueur hydraulique	Effort plaqueur	12000 N	±5%
F2 : Etre alimenté en huile	Pression	30 bar	±1%
	Arrivée d'huile	Par un trou dans l'arbre (16)	Nulle
F3 : Assurer l'étanchéité	Débit d'huile	Aucun	Nulle
F4 : Résister aux efforts même en cas de déséquilibre	Déformation des pièces	Dans le domaine élastique	Nulle
F5 : Fournir un effort de décollement avec des rondelles élastiques	Effort de décollement constant sur tout le déplacement	2000 N	±10%
	Déplacement de la tourelle	6 mm	0/-1mm
F6 : Minimiser les modifications	Conserver les principales pièces en l'état	Pas de remise en cause des bruts	Nulle
F7 : Assurer la sécurité*	Aucun risque de desserrage en cas de chute de pression	100% de l'effort de serrage	Nulle

La principale évolution concerne l'effort plaqueur qui n'est plus fourni par des rondelles élastiques mais par l'huile de la centrale hydraulique, disponible sur la machine.

Par contre, le décollement de la tourelle est maintenant réalisé par un empilage de rondelles élastiques.

\* La fonction F7 ne sera pas étudiée dans le cadre de la modification.

Le premier choix du concepteur se tourne vers des rondelles référence 180009 dont les caractéristiques sont précisées par la figure 7. Pour une première approche du choix des rondelles, nous limiterons la flèche à  $0,75 h_0$ .



Caractéristiques géométriques					Effort F (N)			
De (mm)	Di (mm)	t (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	h <sub>0</sub> (mm)	pour 0,25 h <sub>0</sub>	pour 0,5 h <sub>0</sub>	pour 0,75 h <sub>0</sub>	pour h <sub>0</sub>
28	14,2	1,25	2,1	0,85	907,4	1634	2240	2785

**Figure 7 : Rondelle ressort (extrait de documentation MUBEA)**

Ces rondelles semblent convenir car l'effort pour  $s = 0,75 h_0$  est de 2240 N ce qui est satisfaisant par rapport au cahier des charges.

### **Question 7 :**

**Q 7-1 :** Déterminer les caractéristiques de l'empilage de rondelles afin de satisfaire à la fonction F5 du cahier des charges.

On récapitulera les caractéristiques suivantes : nombre de rondelles, disposition, flèche de précharge en position plaquée, valeurs extrêmes de l'effort exercé.

Conclure sur ce choix en tenant compte des autres fonctions à remplir.

**Q 7-2 :** Montrer que l'effort axial plaqueur disponible respecte le nouveau cahier des charges si l'on conserve des caractéristiques géométriques identiques à la solution initiale pour le piston. On modifiera simplement la zone d'admission d'huile dans le vérin.

**Q 7-3 :** Proposer sous la forme de croquis (perspective ou vues planes), à main levée, trois solutions permettant de définir la forme du piston et de réaliser la liaison encastrement entre le piston (26) et l'axe (16) ainsi que l'alimentation en huile.

On aura le souci de simplifier les formes tout en respectant le cahier des charges fonctionnel.

Classer ces trois solutions, par rapport aux critères suivants : positionnement relatif des deux pièces, efforts transmissibles, complexité de fabrication.

**Q 7-4 :** L'objectif de cette question est de proposer une solution sous la forme d'un dessin d'ensemble réalisé aux instruments sur le document réponse DR joint.

Après une étude d'optimisation par rapport à l'encombrement du dispositif, le concepteur a fait le choix des rondelles suivantes (références 180015) :

Caractéristiques géométriques					Effort F (N)			
De (mm)	Di (mm)	t (mm)	$l_0$ (mm)	$h_0$ (mm)	pour $0,25 h_0$	pour $0,5 h_0$	pour $0,75 h_0$	pour $h_0$
34	12,3	1,25	2,45	1,2	946,4	1587	2024	2359

**Caractéristiques de l'empilage :**

Nombre de rondelles	19
Longueur à vide	$l_0=46,55$ mm
Ecrasement des 19 rondelles pour 1800 N	$S_T=13,9$ mm

- réaliser en vue de face coupe A-A (voir plan d'ensemble Document DT 1) la modification répondant au nouveau cahier des charges. Des vues complémentaires seront éventuellement réalisées afin de définir complètement les solutions constructives retenues ;

- mettre en place les conditions fonctionnelles indispensables à la définition de la solution.

**Remarque :** Les composants normalisés seront dessinés de façon aussi vraisemblable que possible.

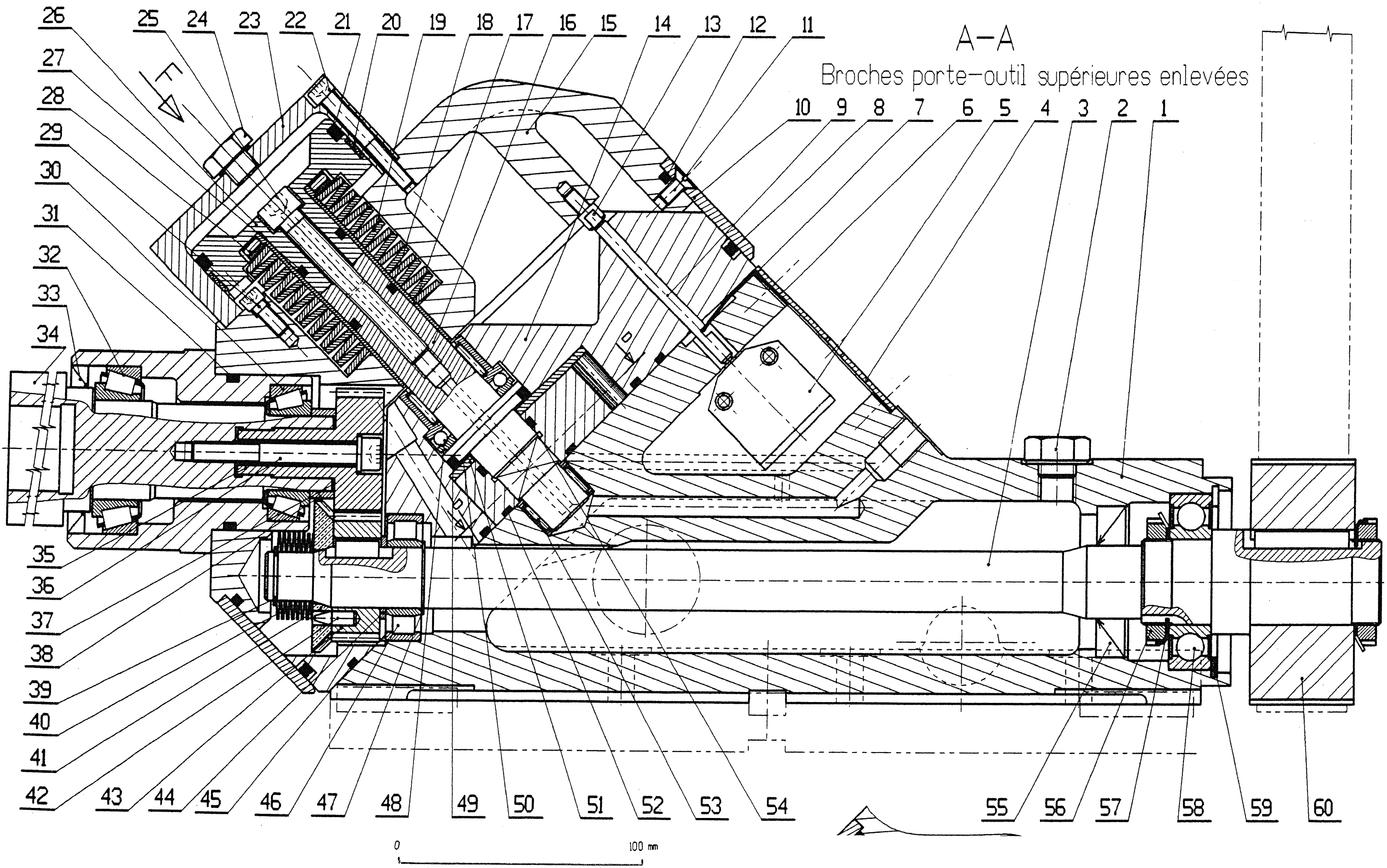


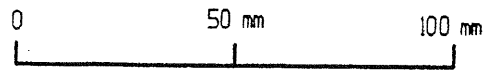
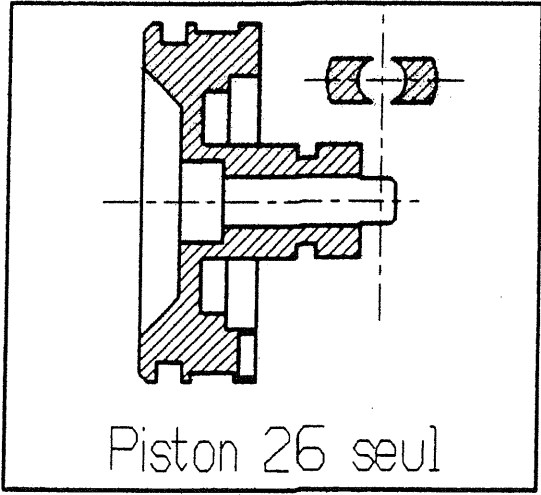
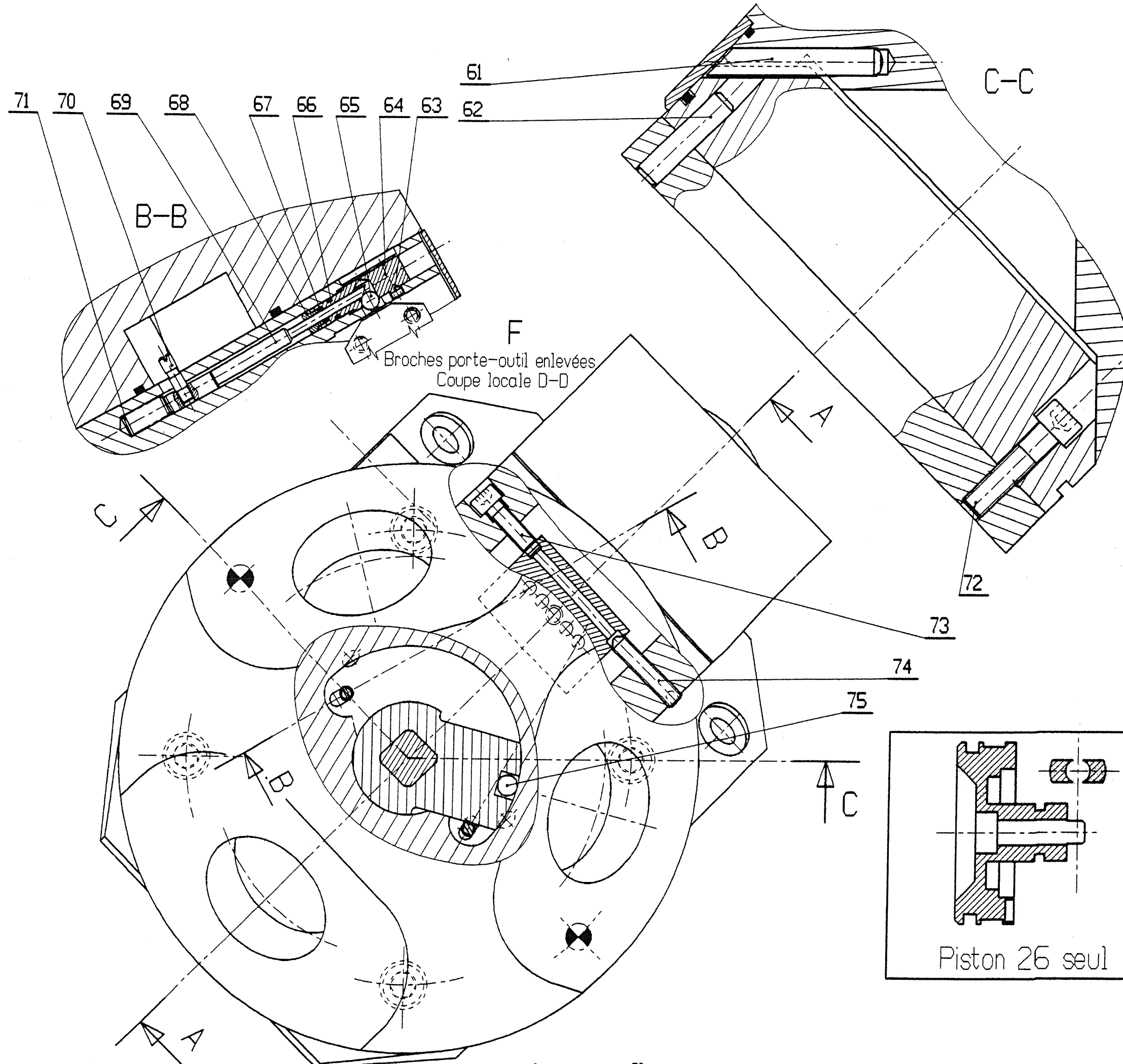


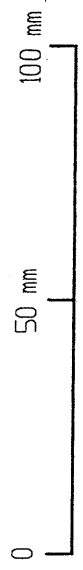
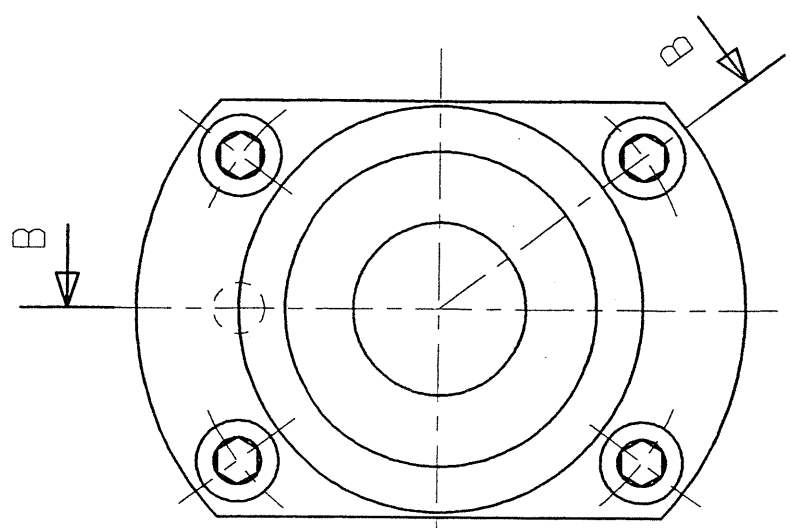
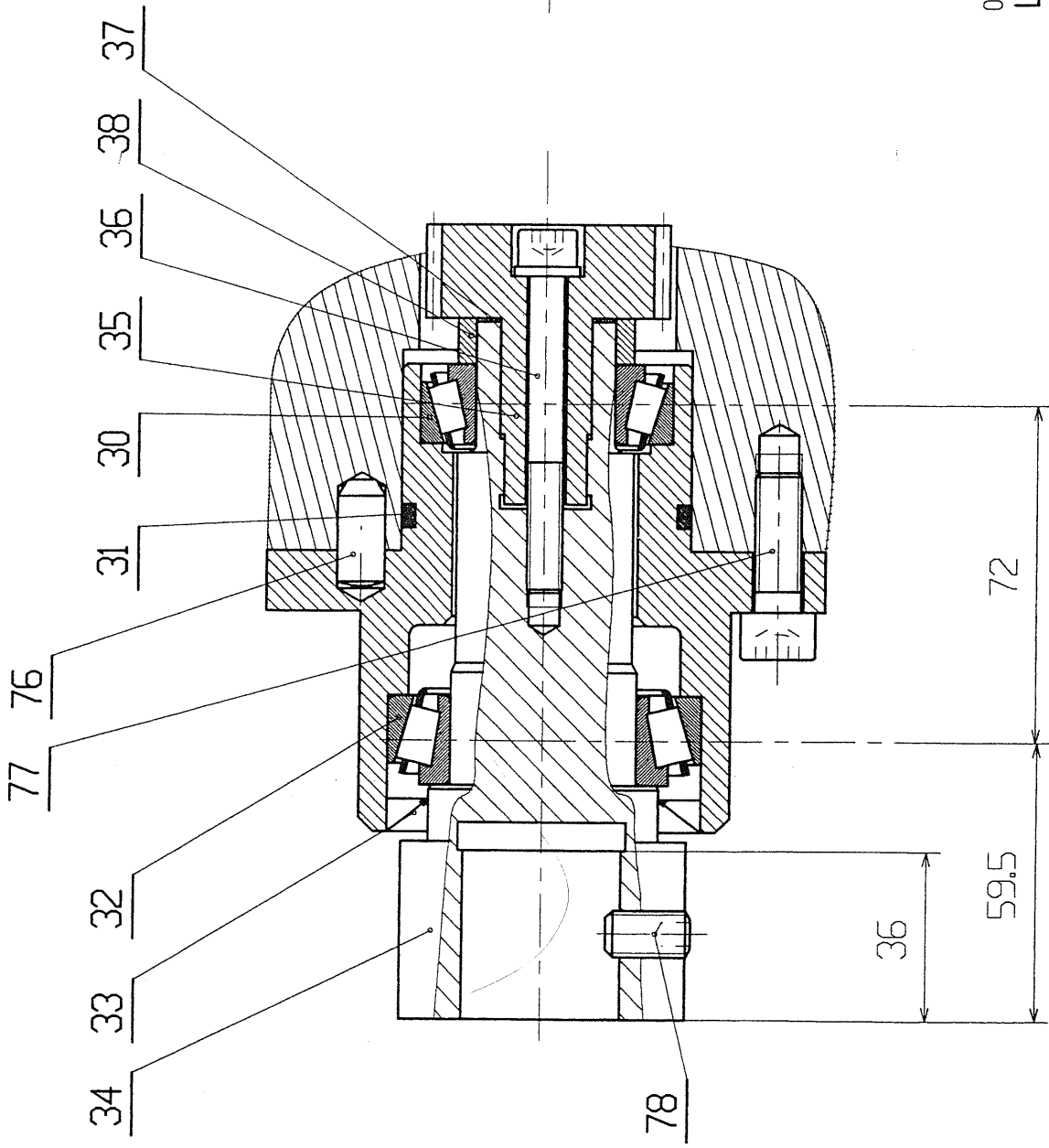
44	1	Entretoise	
43	1	Roue dentée $m_{43}=2, Z_{43}=25$	
42	3	Doigt de guidage	
41	1	Roue dentée conique de synchronisation $m_{41}=2, Z_{41}=25$	
40	15	Rondelles élastiques	
39	1	Anneau élastique 20x1,2	NF E 22.163
38	1	Entretoise	
37	1	Cale de réglage	
36	1	Vis CHC, M8.70-25, 10.8	NF E 25.125
35	1	Pignon arbré $m_{35}=2, Z_{35}=25$	
34	1	Axe de broche (Prise d'outil à queue cylindrique)	
33	1	Joint à lèvres radiale IEL 50x67x7	NF R 99.001
32	1	Roulement à rouleaux coniques 40x68x19	NF E 22.330
31	1	Joint torique 57x4	
30	1	Roulement à rouleaux coniques 30x54x17	NF E 22.330
29	3	Vis d'entraînement CHC, M5.16, 10.8	NF E 25.125
28	1	Butée à aiguilles 30x47x7	
27	1	Joint torique	
26	1	Piston $\phi 80$ mm	
25	1	Vis CHC, M10.80-50, 10.8 - Percée $\phi 4$ mm	NF E 25.125
24	1	Vis de purge	
23	1	Corps du vérin hydraulique	
22	6	Vis CHC, M6.50-24, 8.8	NF E 25.125
21	1	Joint torique 70x2 et bague anti-extrusion	
20	1	Bague de guidage	
19	17	Rondelles élastiques	
18	1	Joint torique	
17	1	Chemise	
16	1	Axe du vérin rotatif	
15	1	Tourelle	
14	1	Support de tourelle	
13	3	Poussoir	
12	1	Joint torique	
11	3	Vis FS, M6.12, 4.8	NF E 25.123
10	1	Couronne de protection	
9	3	Tige de capteur	
8	1	Joint quatre lobes 240x5	
7	3	Lame ressort	
6	1	Joint plat	
5	1	Capteur	
4	1	Cache capteur	
3	1	Arbre de transmission	
2	1	Bouchon de remplissage	
1	1	Bâti	
Repère	Nombre	Désignation	Matière - Caractéristiques

## **DT2 - TETE REVOLVER A 3 BROCHES NOMENCLATURE**

78	1	Vis HC M10 à bout plat	Repères présents uniquement sur le Document DT 3	NF E 27.180
77	12	Vis CHC M10-30		NF E 25.125
76	3	Goupille cylindrique de précision		NF E 27.475
75	1	Joint cylindrique		
74	4	Vis CHC M12		NF E 25.125
73	2	Vis CHC M6 à téton long		NF E 25.125
72	2	Vis HC M6 à bout tronconique		NF E 27.180
71	2	Ressort de contact		
70	2	Doigt de fin de course		
69	2	Tige de fin de course		
68	2	Palier de guidage		
67	2	Joint torique		
66	2	Joint torique		
65	2	Bille		
64	2	Douille de détection		
63	2	Vis HC M6 à bout tronconique		NF E 27.180
62	2	Pion de centrage		
61	6	Pige de positionnement		
60	1	Poulie		
59	1	Anneau élastique 75x3		NF E 22.165
58	1	Roulement rigide à billes 35x72x17		NF E 22.315
57	2	Rondelle Frein pour écrou à encoche type A de 35		NF E 22.307
56	2	Écrou à encoche série légère M35x1,5		NF E 22.306
55	1	Joint à lèvres radiale IEL 30x52x12		NF R 99.001
54	1	Joint torique 24x3		
53	1	Douille d'aiguilles		NF E 22.372
52	1	Joint torique		
51	1	Plaque du vérin rotatif		
50	1	Plaque de protection		
49	1	Joint quatre lobes		
48	1	Roulement combiné		
47	1	Anneau élastique 25x1,2		NF E 22.163
46	1	Roulement à rouleaux cylindriques NU 25x52x15		NF E 22.315
45	1	Joint torique		

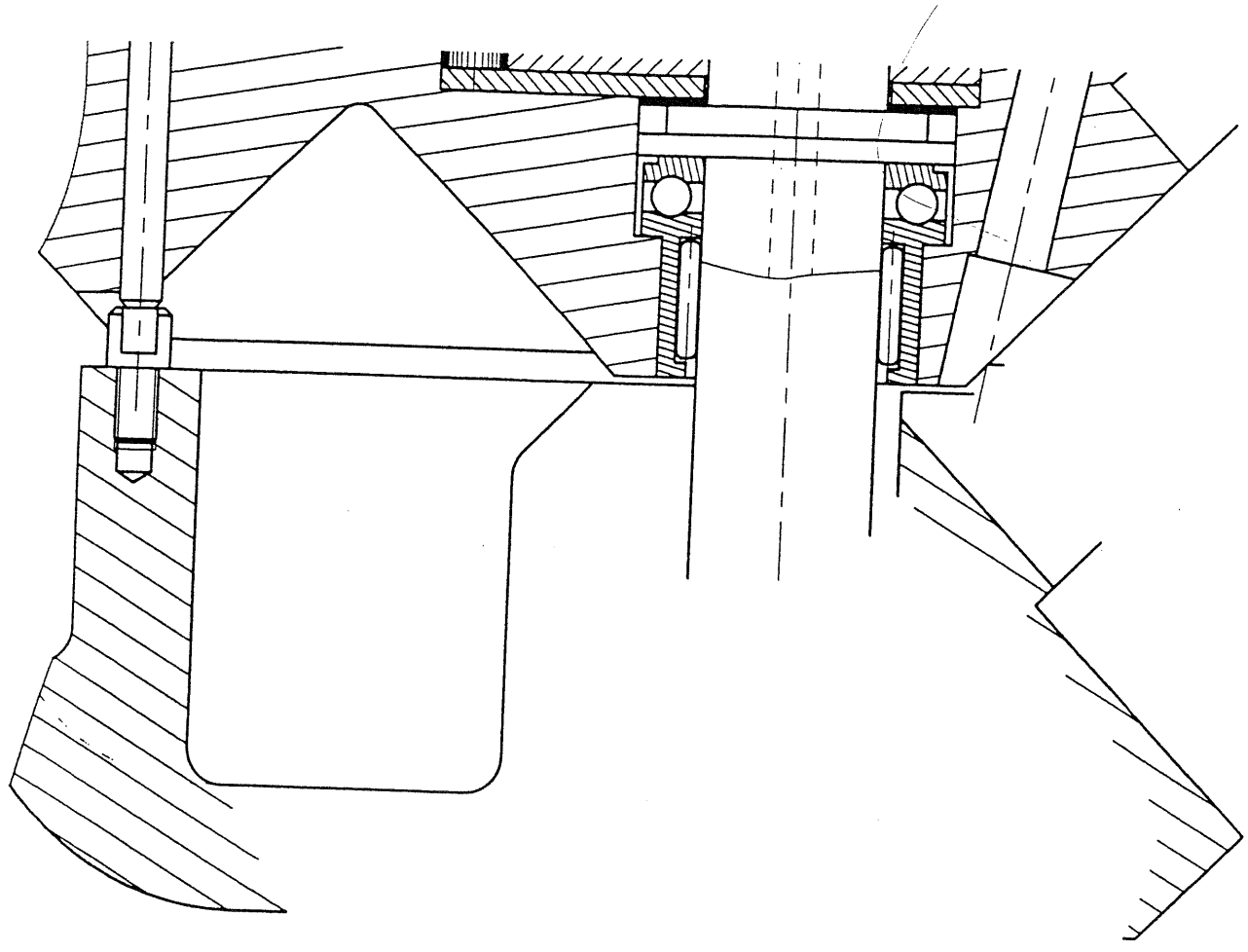






DT 3 - BROCHE SEULE

A-A



Document Réponse DR – plaquage hydraulique – Echelle 1:1 – Format A4h