

SESSION DE 1998**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : génie mécanique**

composition sur les technologies de fabrication

Durée : 8 heures*Documents et dictionnaires interdits**Moyens de calculs autorisés : calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable et alphanumérique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 86-228 du 28 juillet 1986.***DOCUMENTS REMIS AUX CANDIDATS****PRÉSENTATION DU THÈME DE L'ÉTUDE**

Contexte, schéma et extrait de dessin d'ensemble (document 1).
Dessin de définition (document 2).
Dessin du brut (document 3).
Nomenclature des phases (document 4).

PARTIE A : Élaboration de la pièce brute.

Sujet A.
Documents techniques A.
Documents-réponses A.

PARTIE B : Étude du processus de fabrication.

Sujet B.
Documents techniques B.
Documents-réponses B.

PARTIE C : Contrôle des spécifications - Métrologie.

Sujet C.
Documents techniques C.
Documents-réponses C.

IMPORTANT

Le candidat est invité à formuler toute hypothèse qu'il jugera nécessaire pour répondre aux questions posées.

Après avoir complété les en-têtes, le candidat remettra en fin d'épreuve ses copies paginées et ses documents-réponses regroupés dans trois chemises distinctes :

PARTIE A : Élaboration de la pièce brute.
PARTIE B : Étude du processus de fabrication.
PARTIE C : Contrôle des spécifications - Métrologie.

Tournez la page S.V.P.

PRÉSENTATION DU THÈME DE L'ÉTUDE

Cette chemise contient :

Contexte, schéma et extrait de dessin d'ensemble : Document 1

Dessin de définition : Document 2

Dessin du brut : Document 3

Nomenclature des phases : Document 4

Contexte

Le boîtier d'irréversibilité étudié fait partie de l'ensemble fonctionnel appelé «effecteur du plan horizontal» d'un avion.

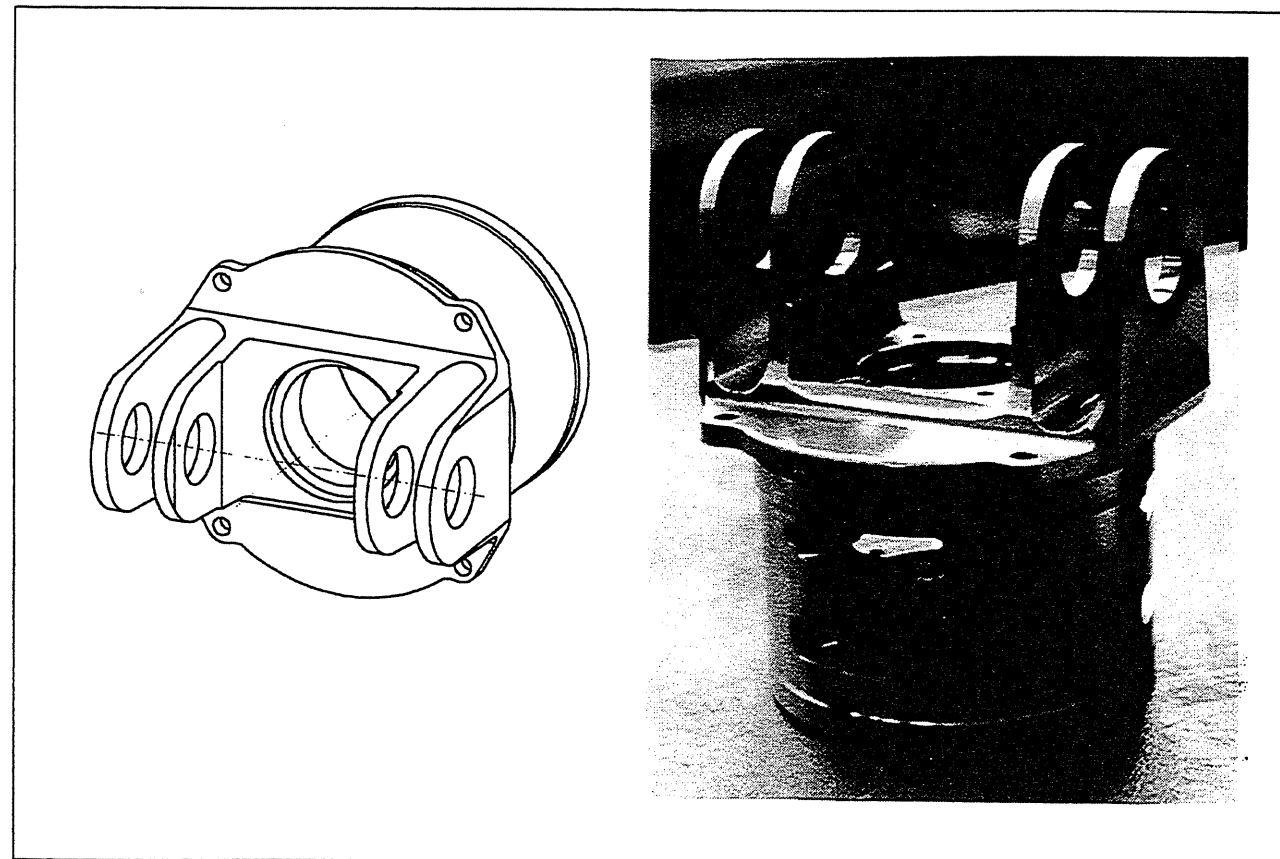
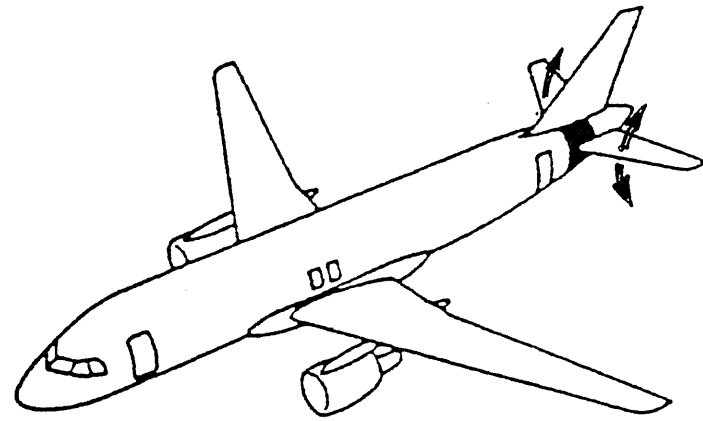
Ce sous-système mécanique est placé verticalement dans la queue de l'appareil. Il constitue l'essentiel de la partie opérative de l'asservissement de l'angle d'incidence du plan horizontal (figure 1).

La vis, mise en rotation par un ensemble hydromécanique, génère un mouvement linéaire de l'écrou qui assure le mouvement angulaire du plan horizontal.

Placé en bout de vis, un sous-ensemble assure l'immobilisation angulaire de la transmission lorsque celle-ci n'est pas sollicitée. Un boîtier sert de logement aux différents éléments fonctionnels, il est par ailleurs relié à la structure par deux chapes.

La photo et le dessin 3D ci-dessous montrent le boîtier d'irréversibilité, objet de l'étude, son dessin de définition est donné document 2.

Figure 1



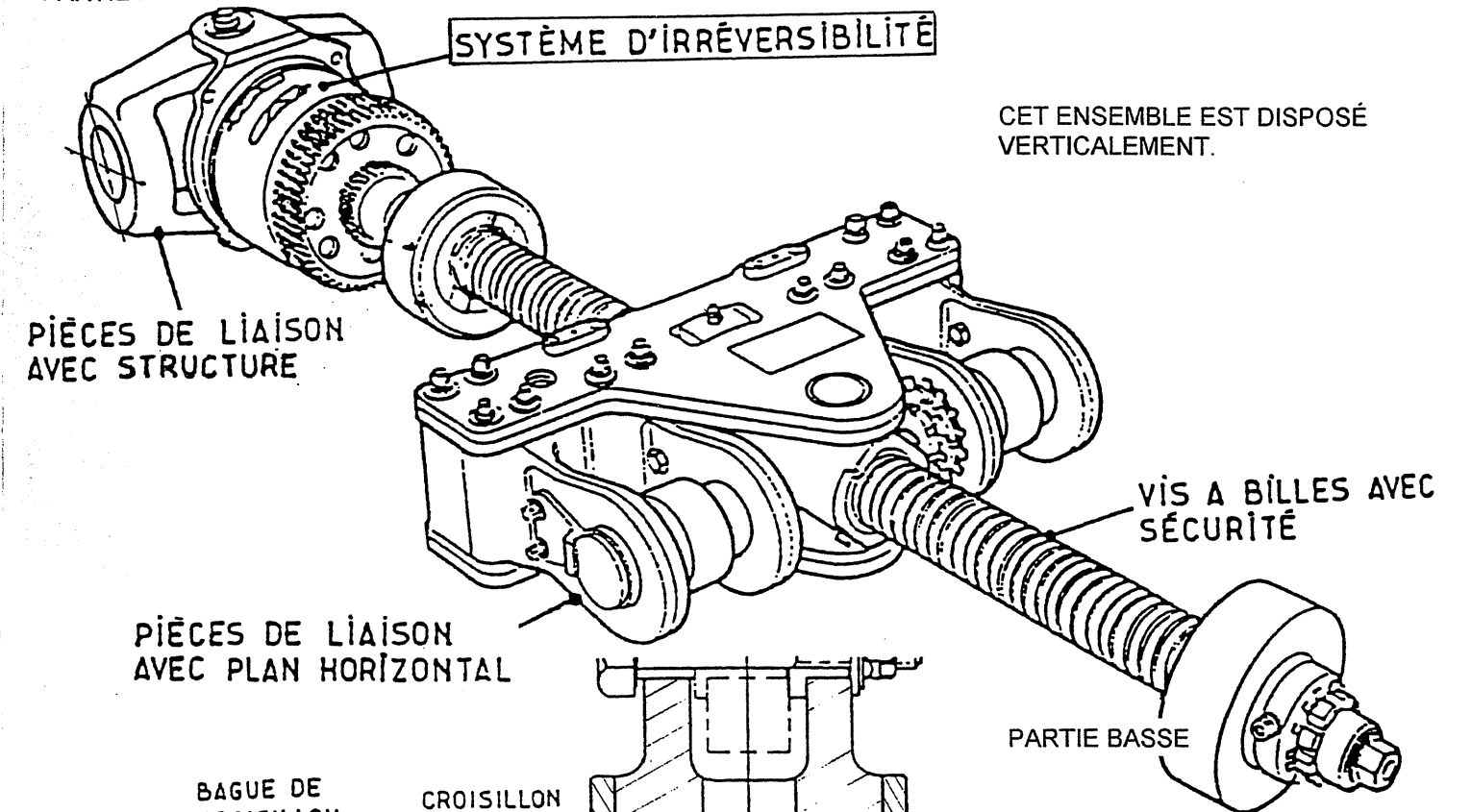
Données de fabrication

Ces pièces sont usinées par lot mensuel de 50 unités à partir d'un brut d'alliage TiAl6V matricé (document 3).

La nomenclature des phases d'usinage est présentée de façon graphique avec isostatisme et surfaces usinées (document 4).

DOCUMENT 1

PARTIE HAUTE



BAGUE DE CROISILLON

CROISILLON

CHAPE

CHAPE

JOINT

CLIQUET

ROULEMENT A ROULEAUX

ROUE A ROCHETS

BAGUE DE FROTTEMENT

EPAULEMENT DE LA VIS

BAGUE DE FROTTEMENT

ROUE A ROCHETS

ROULEMENT A ROULEAUX

BOÎTIER

RONDELLE RESSORT

ROUE DE PUISSANCE

DOCUMENT 2

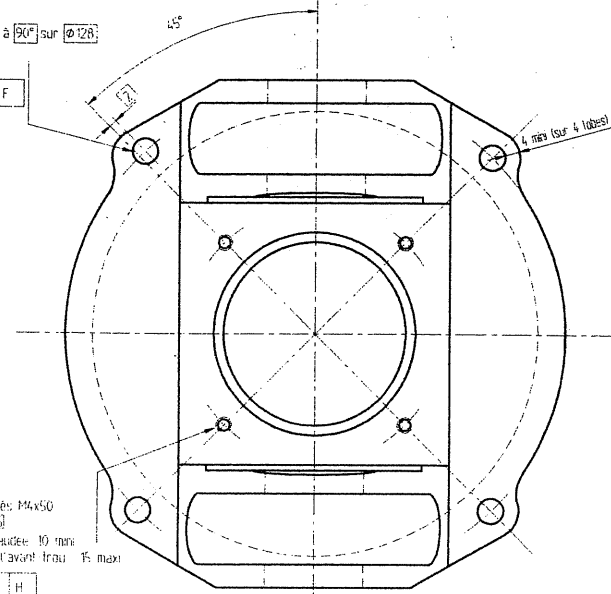
4 trous $\phi 6.5 \pm 0.05$ à 90° sur $\phi 12.6$
dont un décalé

$\oplus 0.1$ P F

4 trous taraudés M4x50
à 90° sur $\phi 12.6$
profondeur taraudée: 10 mm
profondeur de l'avant trou: 15 mm

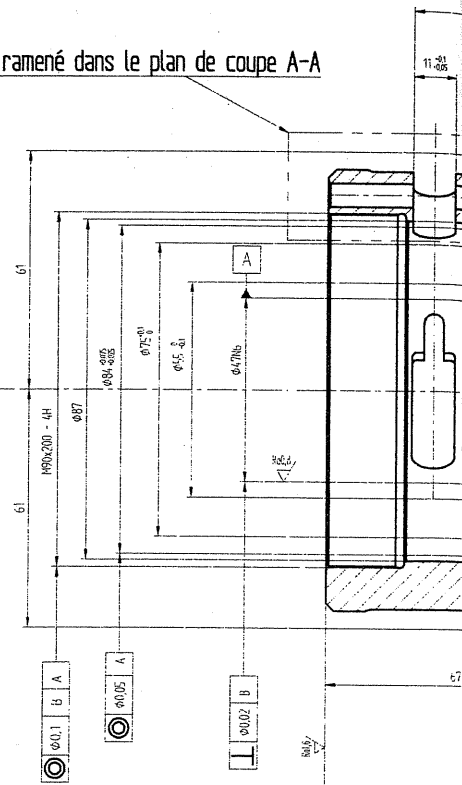
$\ominus 0.1$ S H

A



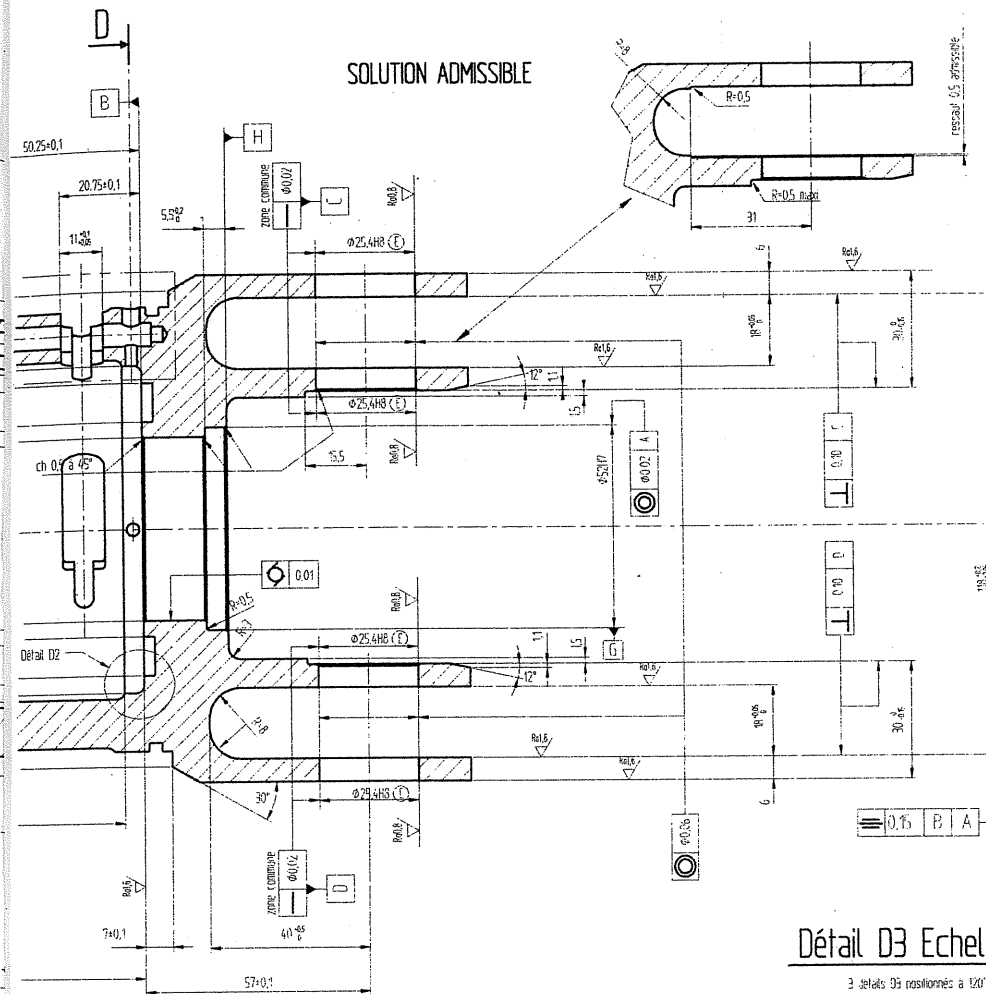
A

Détail D3 ramené dans le plan de coupe A-A

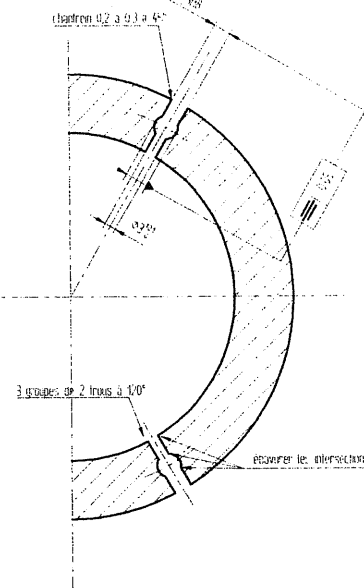


A-A

SOLUTION ADMISSIBLE

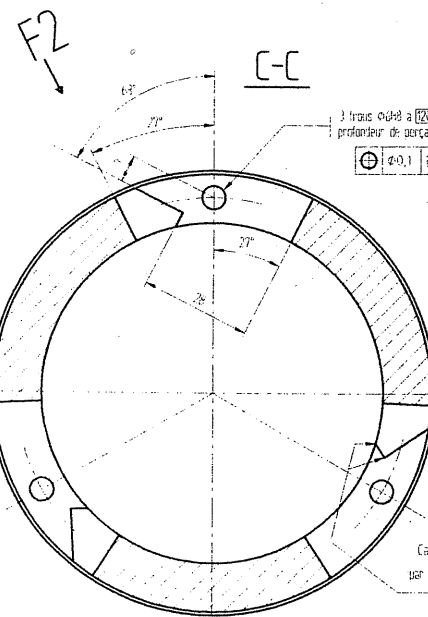


D-D

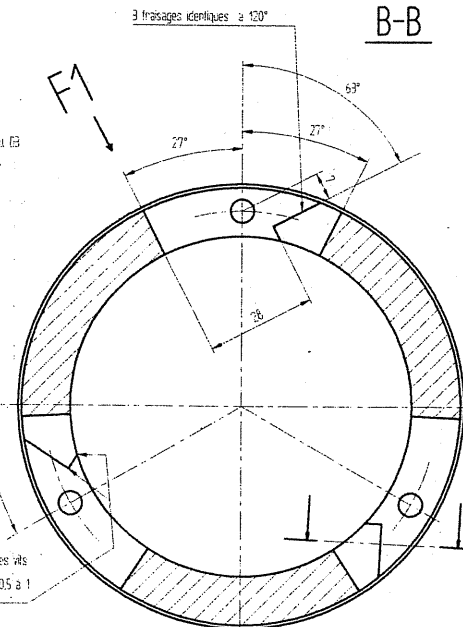


Détail D3 Echelle 2:1

3 détails D3 positionnés à 120°

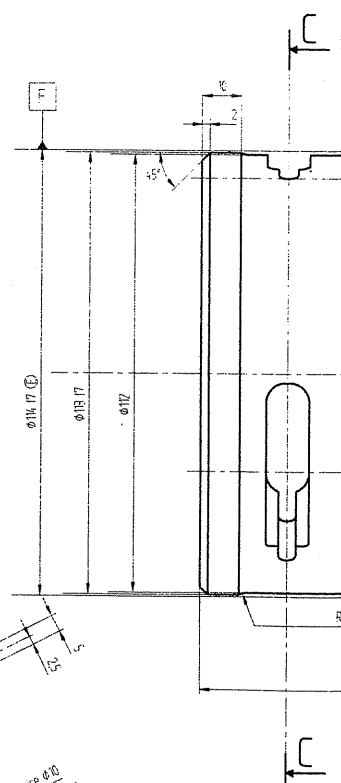


VUE SUIVANT F2

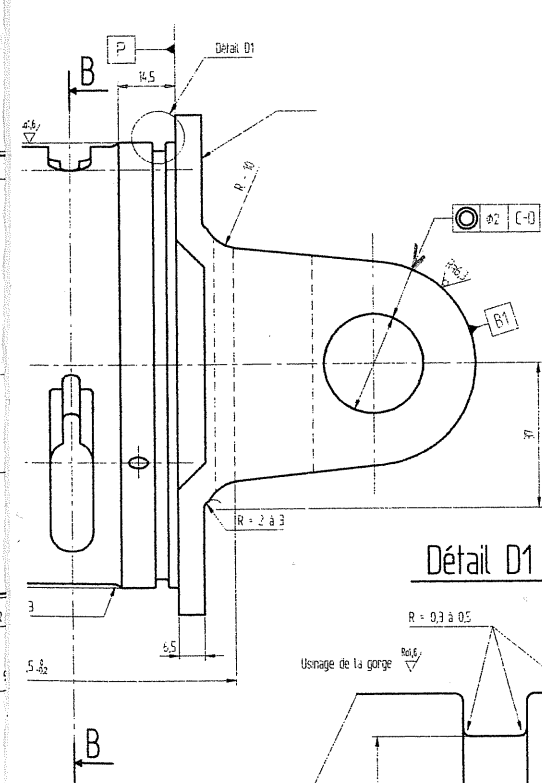


VUE SUIVANT F1

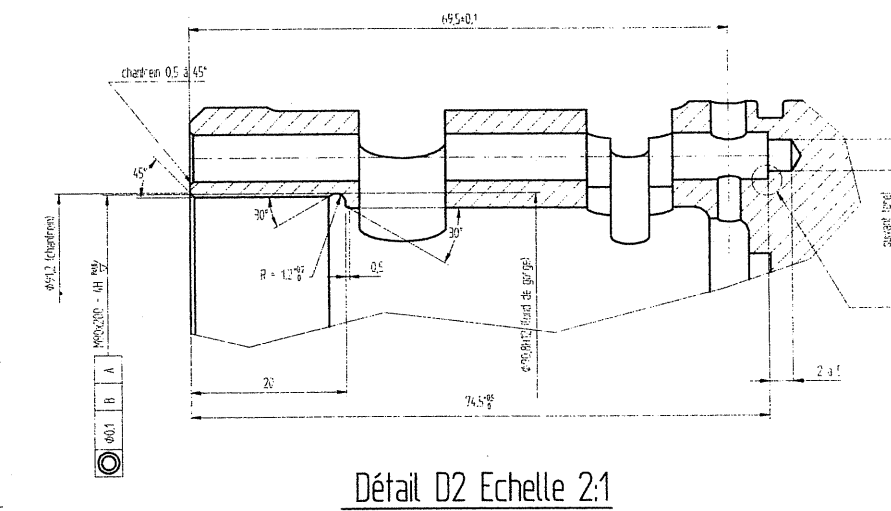
B-B



Détail D1 Echelle 5:1



Détail D2 Echelle 2:1



DOCUMENT 2

Tolérances générales ISO 2768 - fH
 $900 < R < 1150$ MPa Re<830 MPa A% = 10
 BOITIER D'IRREVERSIBILITE Matière : TiAl6V

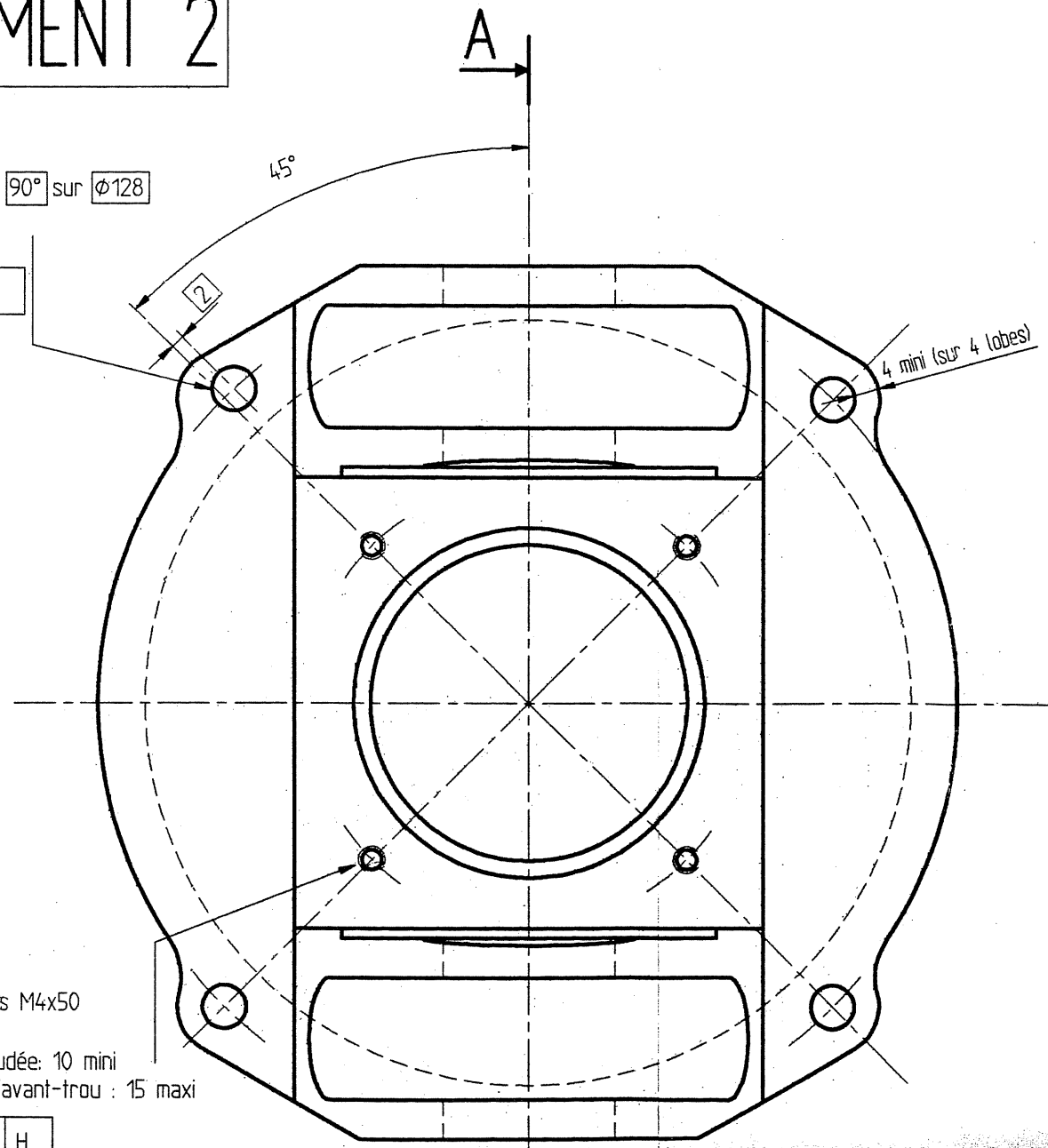
DOCUMENT 2

4 trous $\phi 6,5 \begin{smallmatrix} +0,1 \\ 0 \end{smallmatrix}$ à 90° sur $\phi 128$
dont un décalé

$\oplus \phi 0,1$ P F

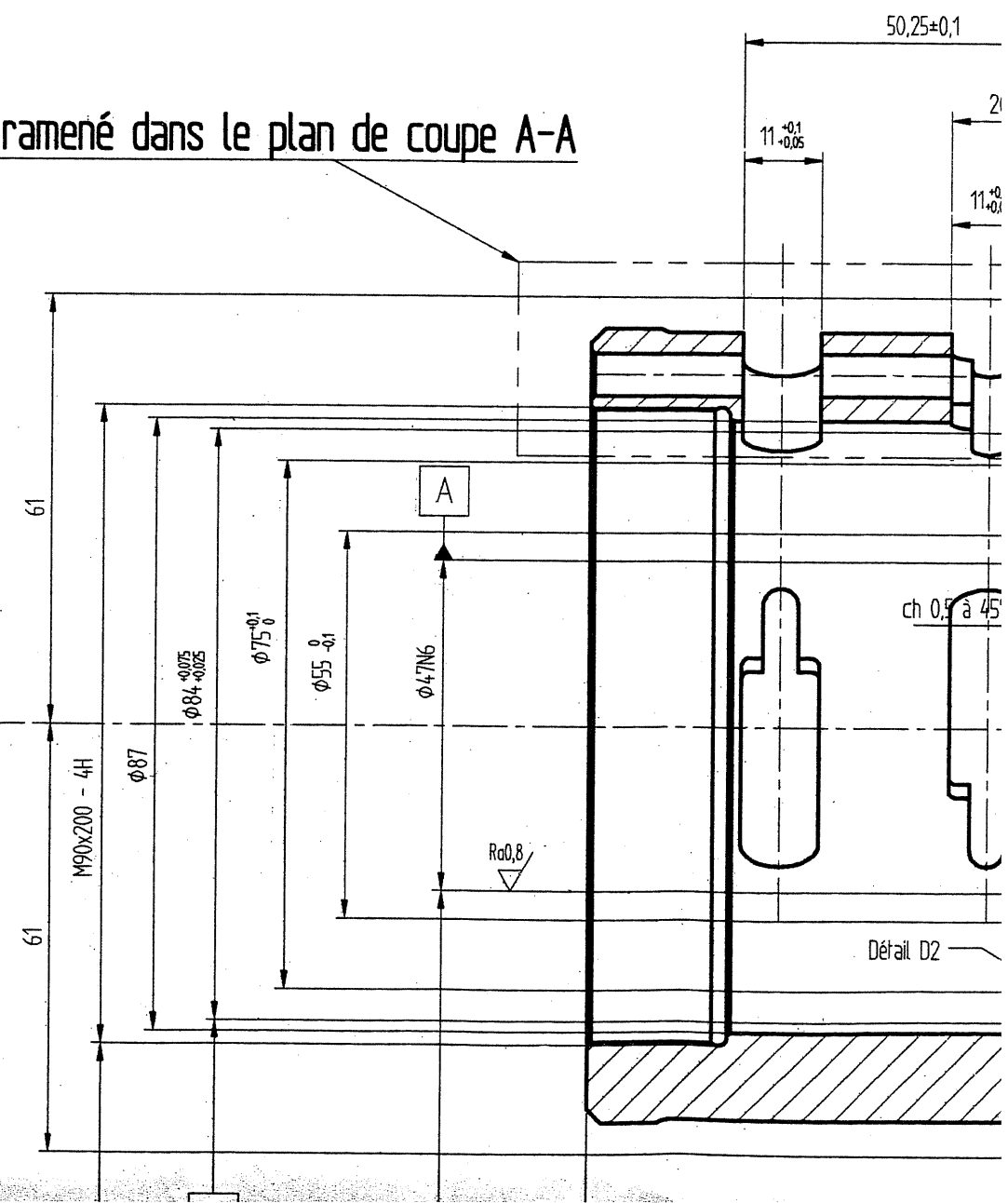
4 trous taraudés M4x50
à 90° sur $\phi 66$
profondeur taraudée: 10 mini
profondeur de l'avant-trou: 15 maxi

$\oplus \phi 0,1$ G H

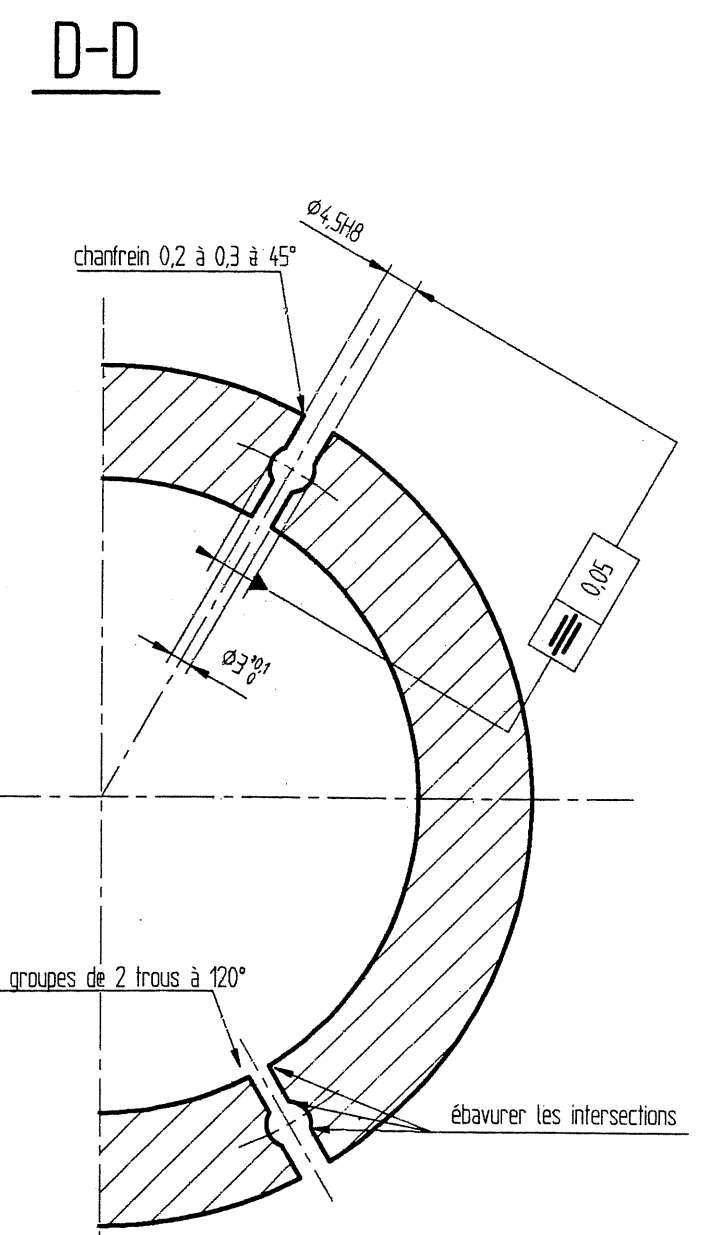
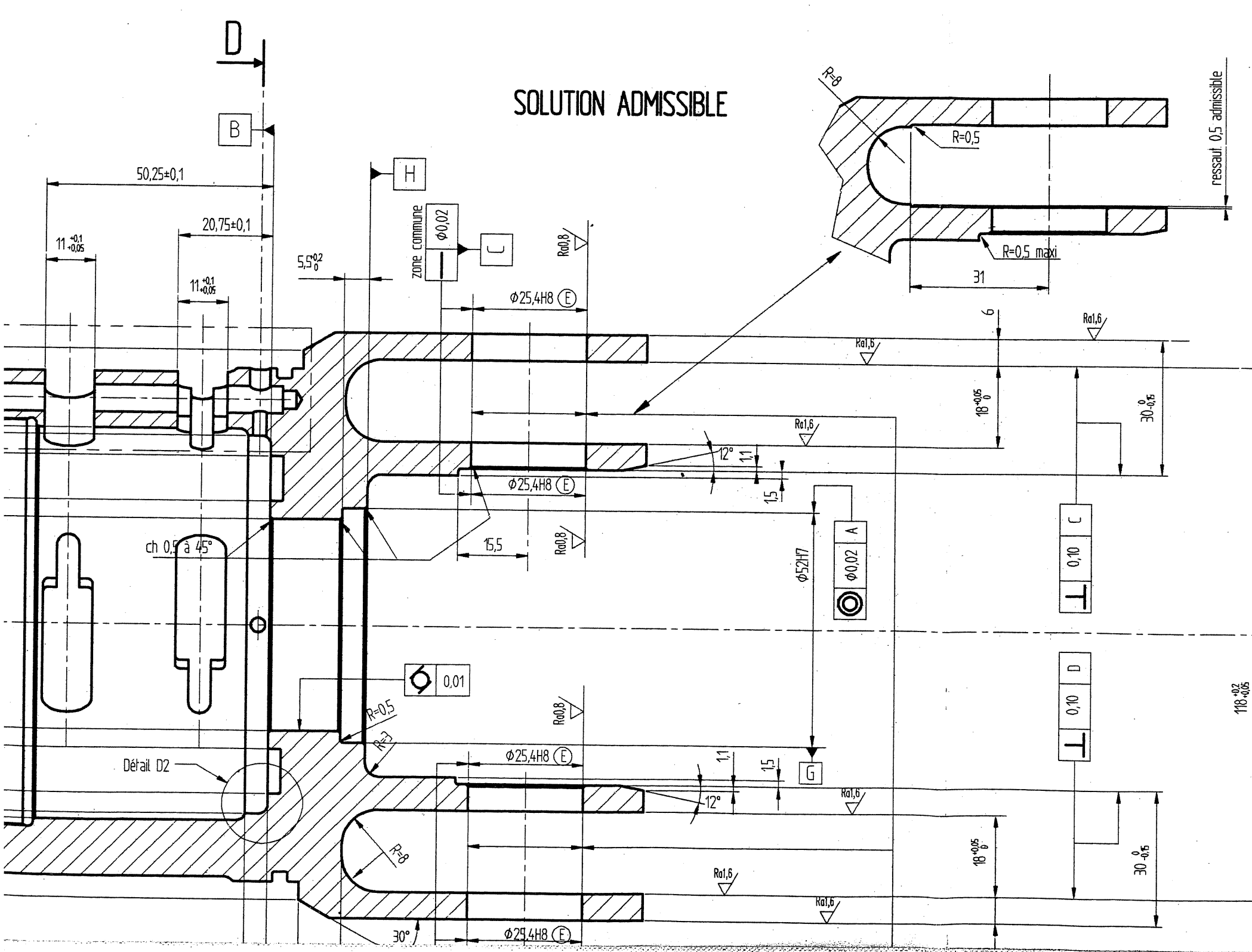


A-A

Détail D3 ramené dans le plan de coupe A-A



BOULEA DUBBENEKOPPE
 187-1



es Intersections

A

⊕ 0,1 B A

⊙ 0,05

⊥ 0,02 B

Relief

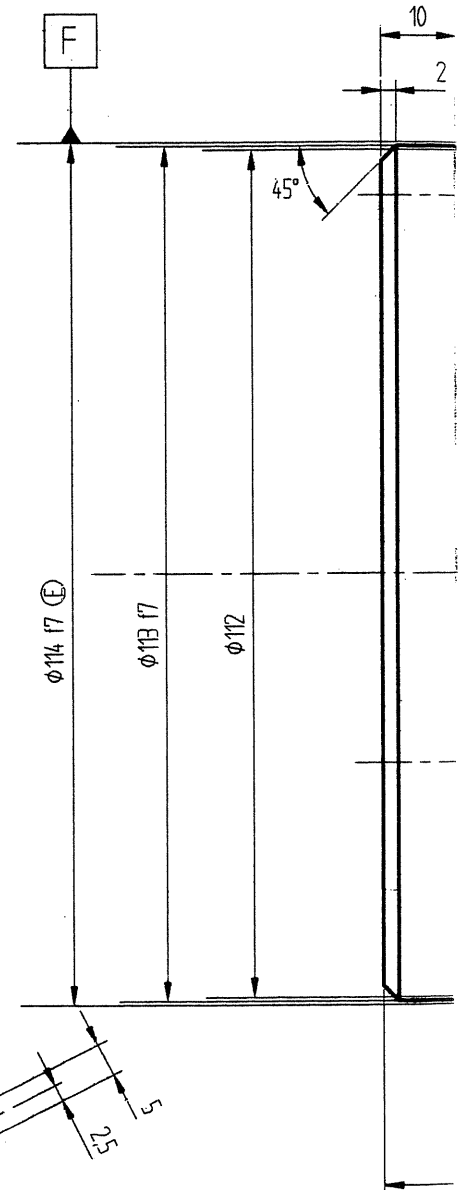
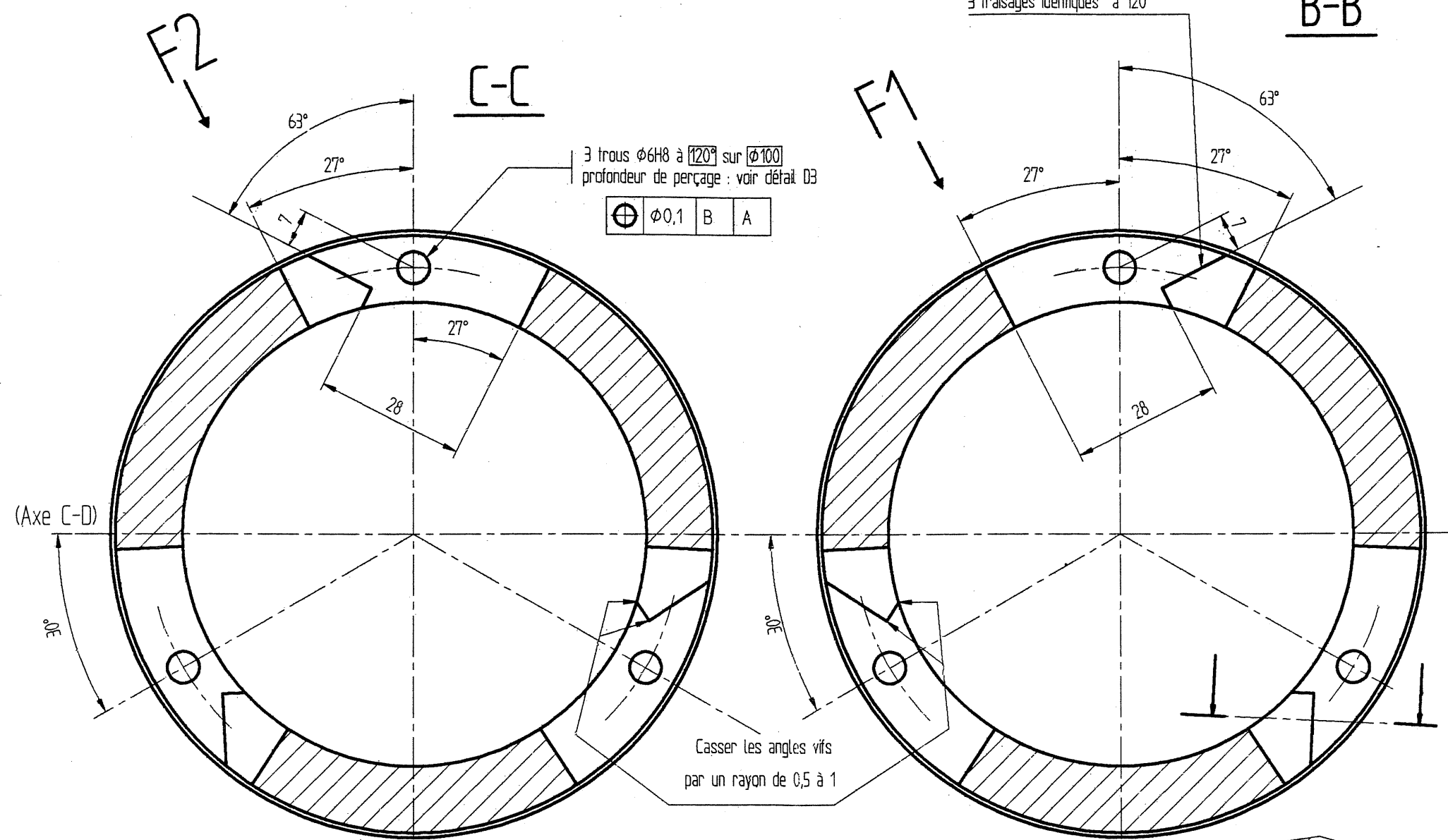
B-B

3 fraises identiques à 120°

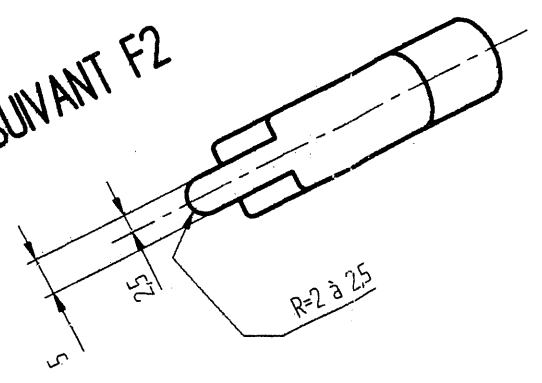
C-C

3 trous $\phi 6H8$ à 120° sur $\phi 100$
profondeur de perçage : voir détail D3

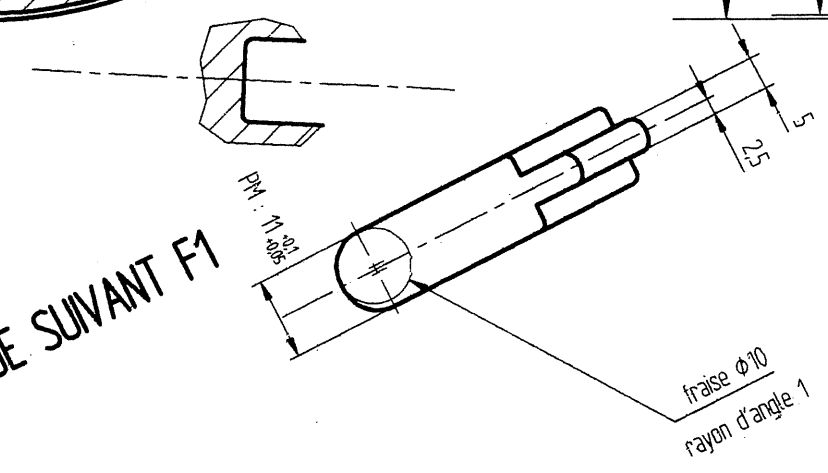
⊕ 0,1 B A

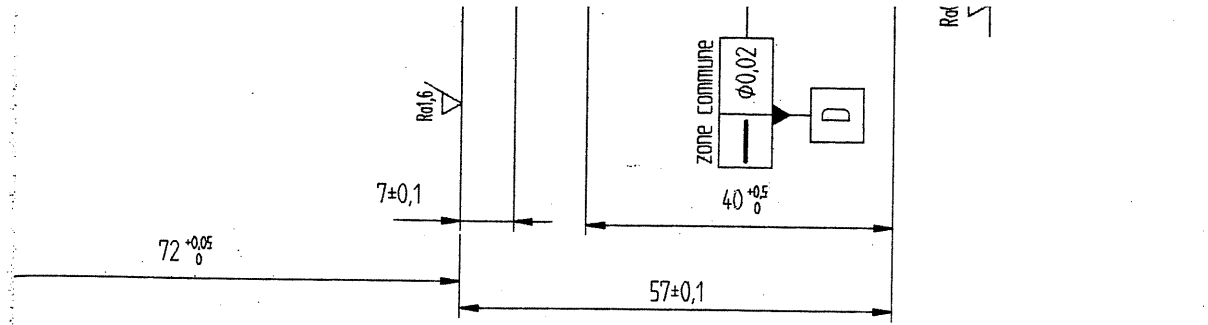


VUE SUIVANT F2



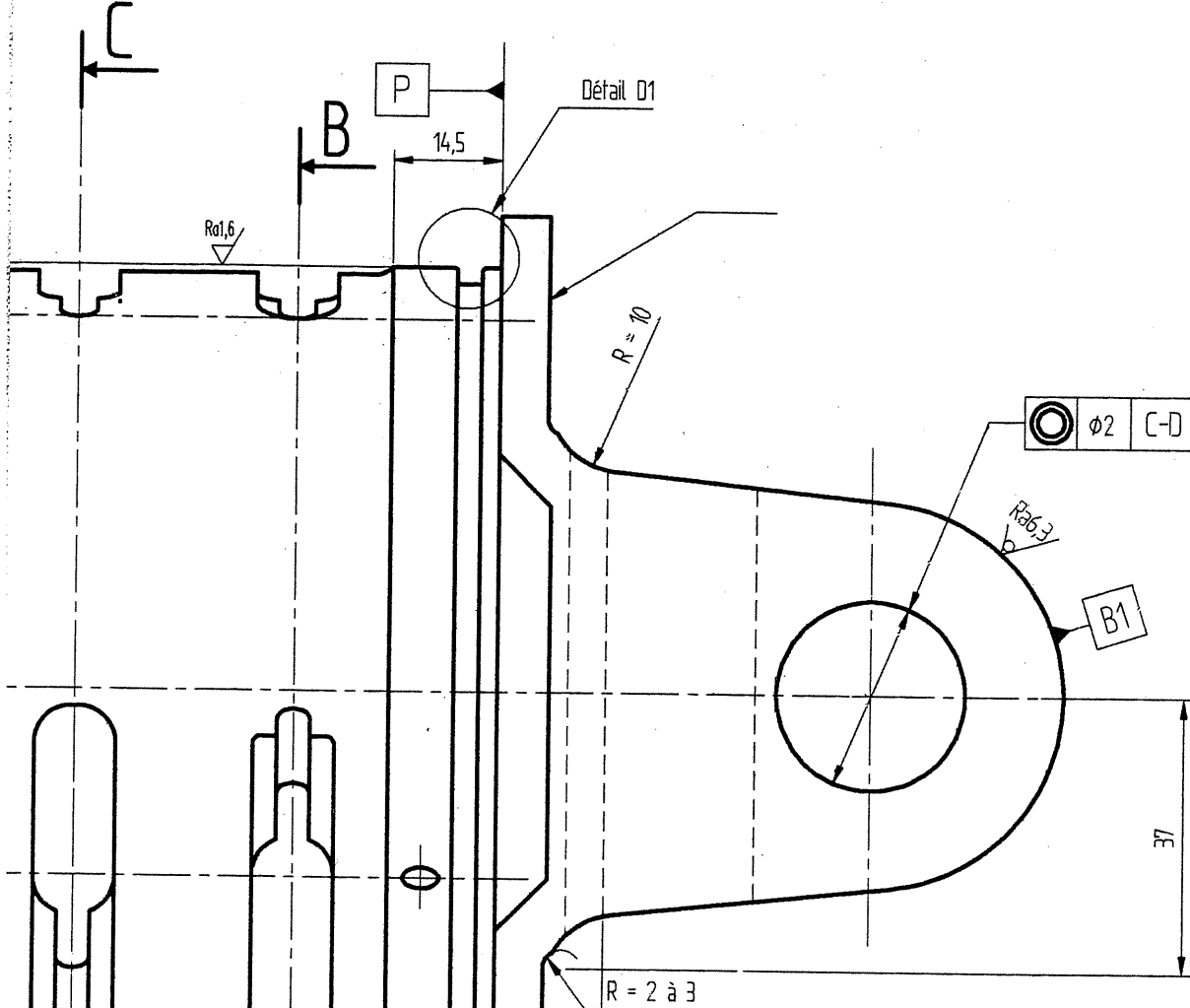
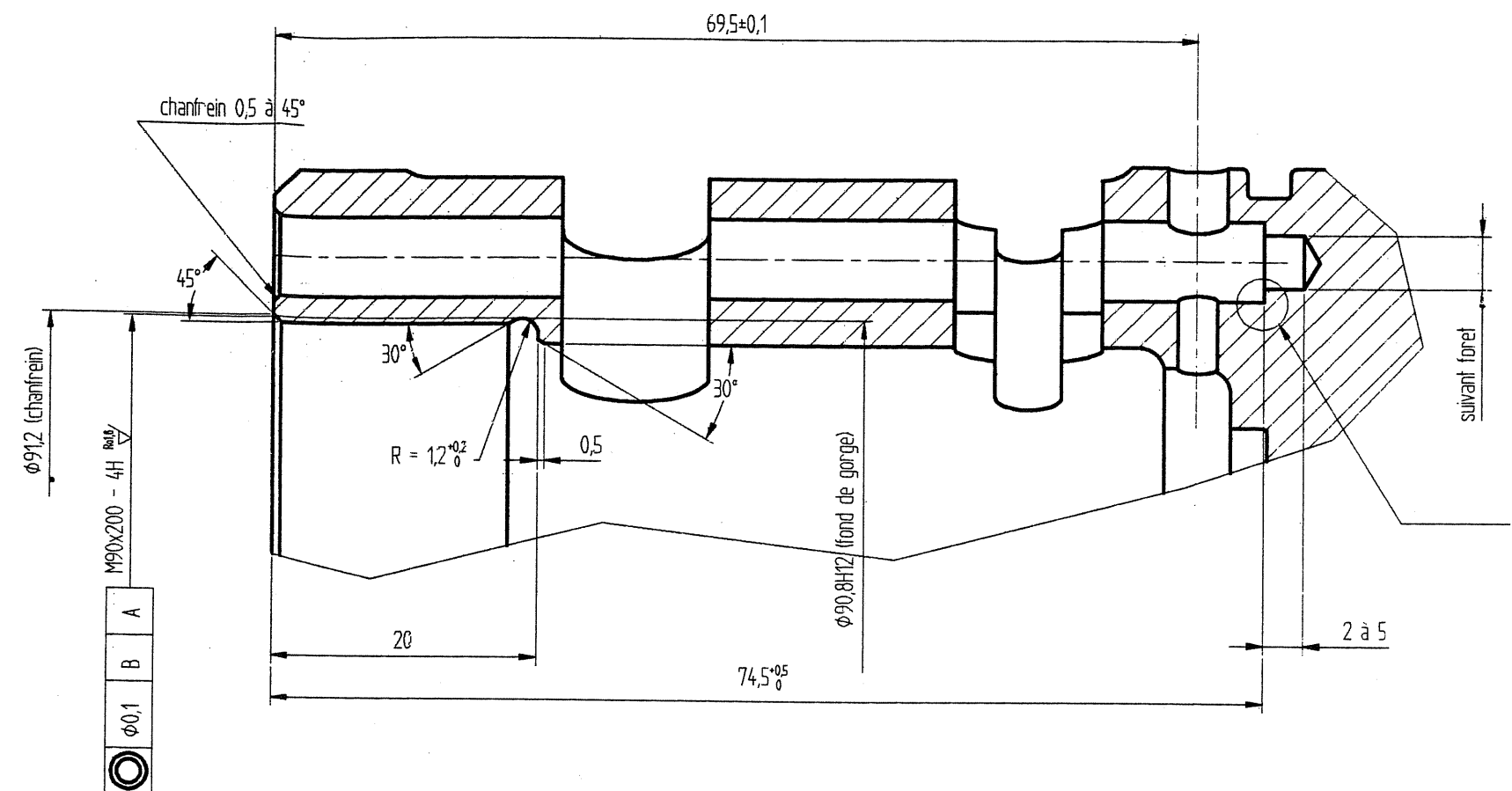
VUE SUIVANT F1



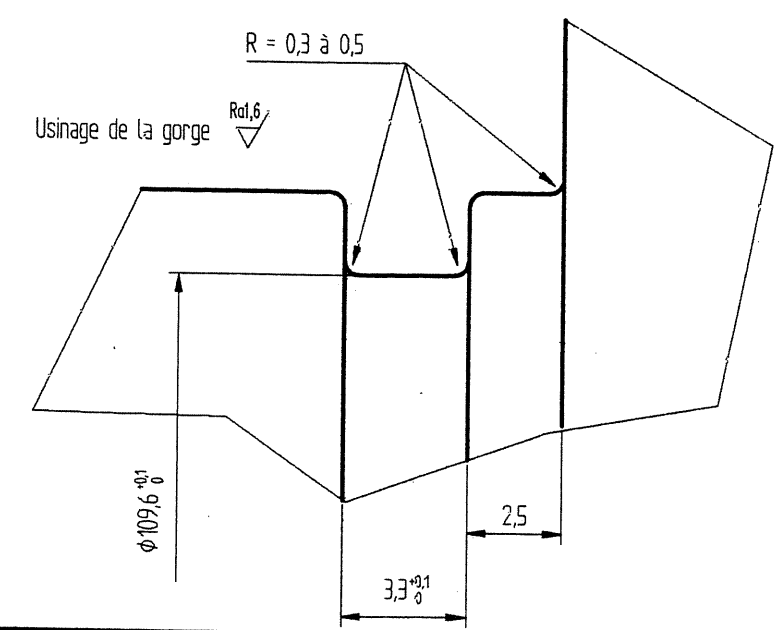


Détail D3 Echelle 2:1

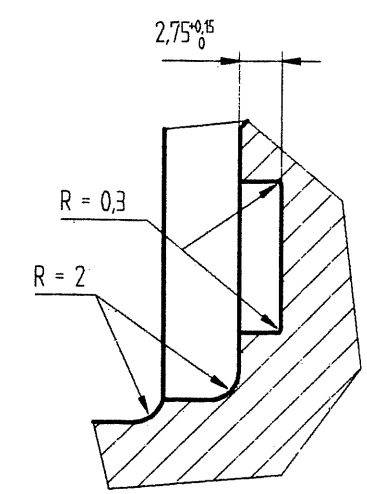
3 détails D3 positionnés à 120°



Détail D1 Echelle 5:1



Détail D2 Echelle 2:1



DOCUMENT 2

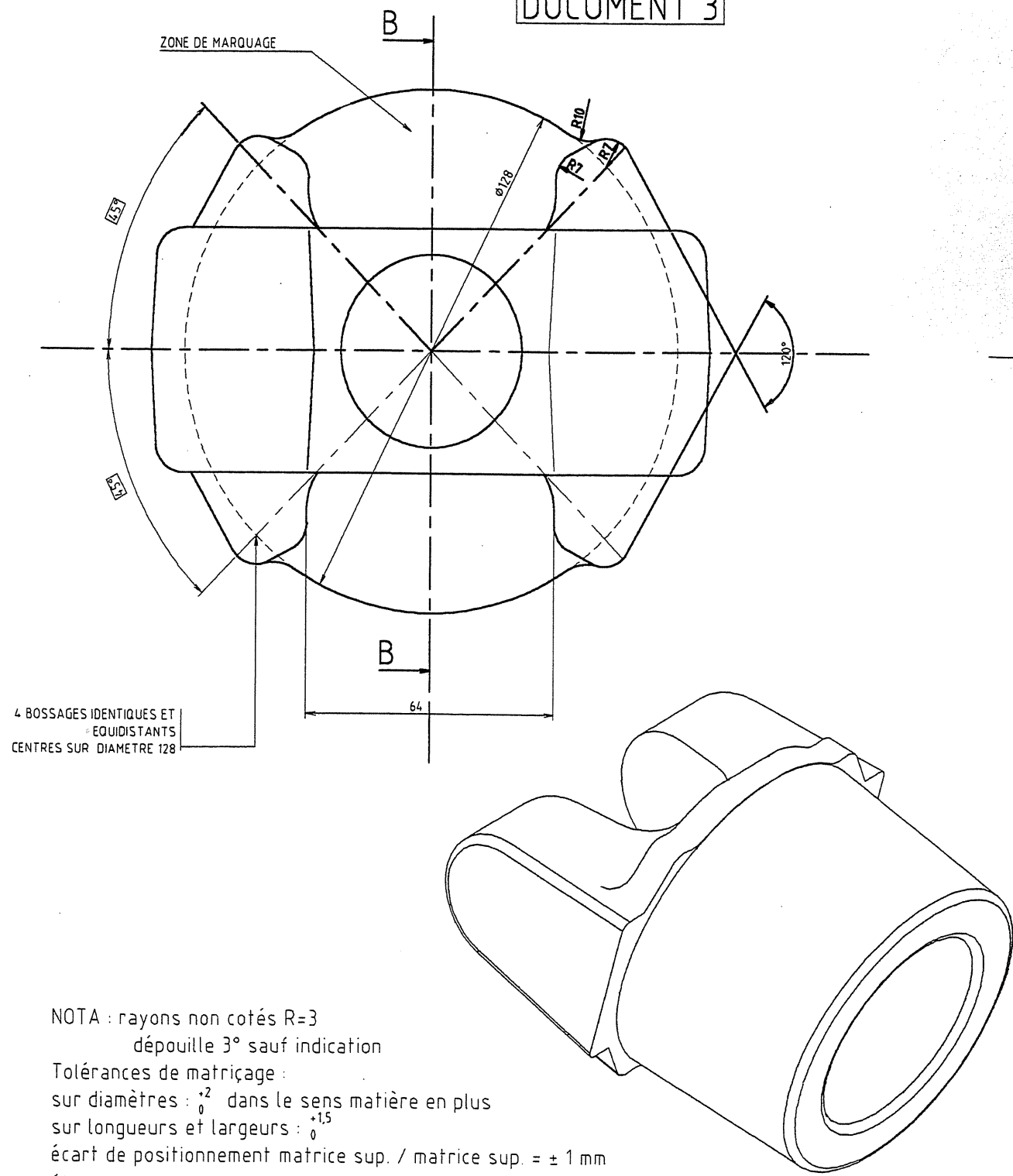
37.0.1

J. 1582-Bb

Tolérances générales ISO 2768 - fH		
900 < R < 1160 MPa	Re < 830 MPa	A% = 10
BOITIER D'IRREVERSIBILITE		Matière : TiAl6V

$\phi 47N6 = \phi 47_{-0.12}^{+0.28}$
 $\phi 25,4H8 = \phi 25,40_{+0.033}^{+0.000}$

DOCUMENT 3

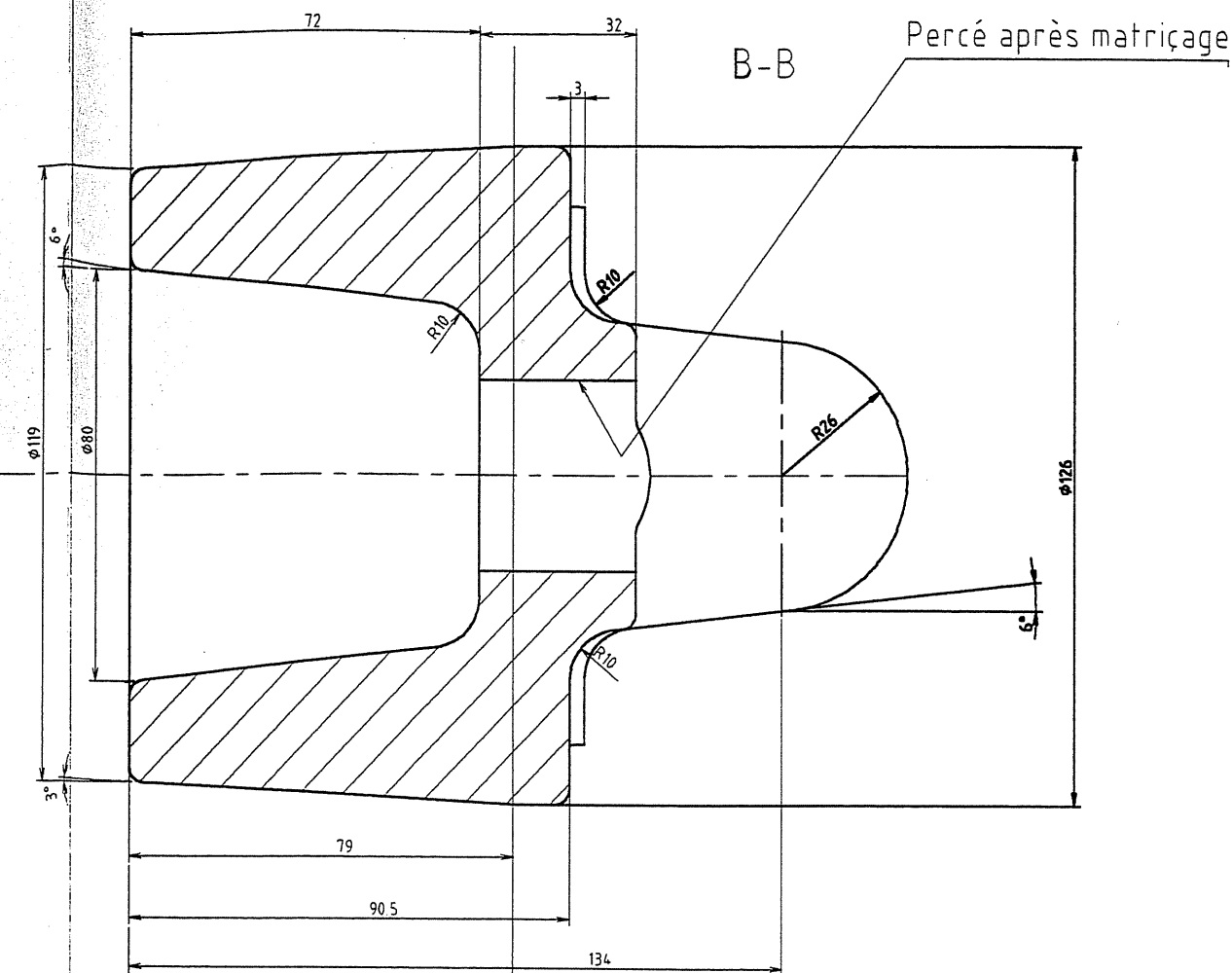


4 BOSSAGES IDENTIQUES ET EQUIDISTANTS CENTRES SUR DIAMETRE 128

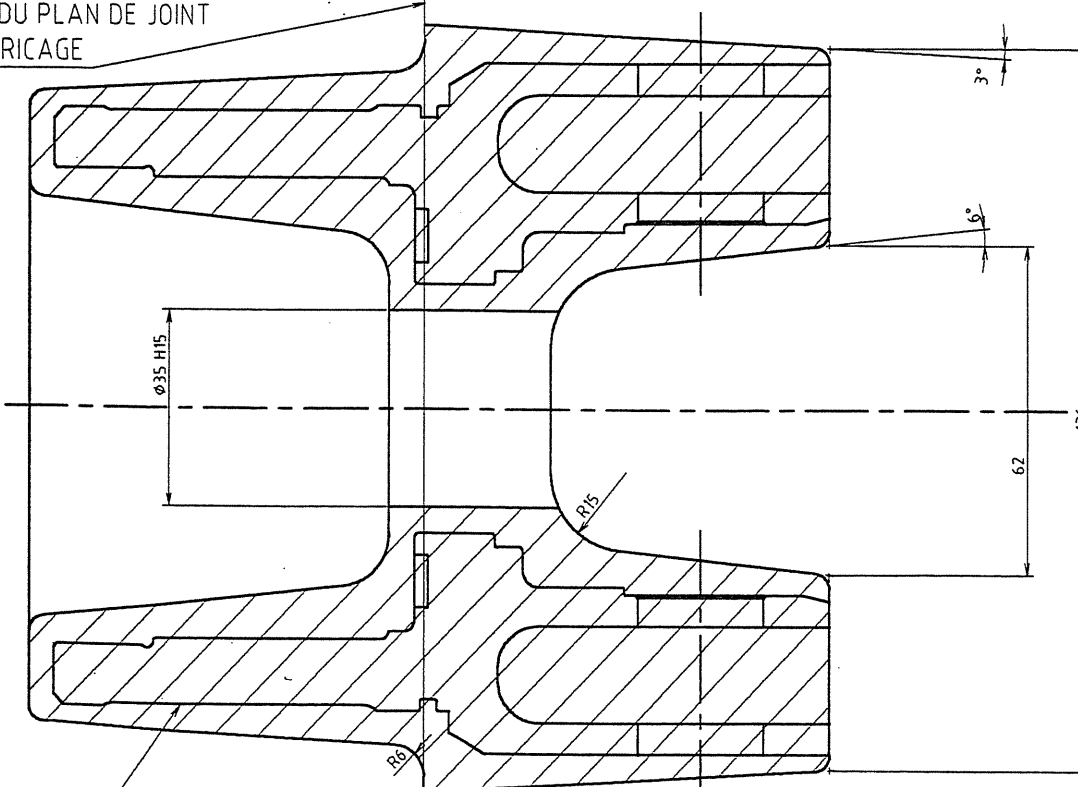
NOTA : rayons non cotés R=3
 dépouille 3° sauf indication
 Tolérances de matricage :
 sur diamètres : $^{+0.2}_0$ dans le sens matière en plus
 sur longueurs et largeurs : $^{+0.15}_0$
 écart de positionnement matrice sup. / matrice sup. = ± 1 mm
 état de livraison : recuit

DOCUMENT 3 ECHELLE 0,7:1

Matière : TiAl6V à l'état recuit
900 < R < 1160 MPa Re < 830 MPa A% = 10
BOITIER D'IRREVERSIBILITE BRUT



TRACE DU PLAN DE JOINT DE MATRICAGE



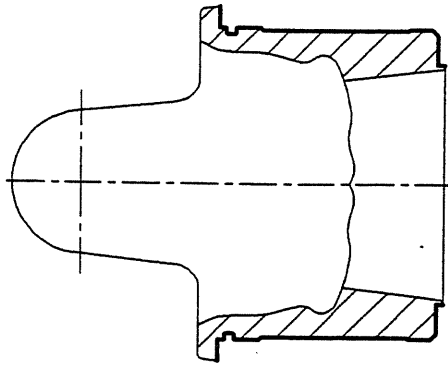
PROFIL PIECE FINIE

DOCUMENT 4

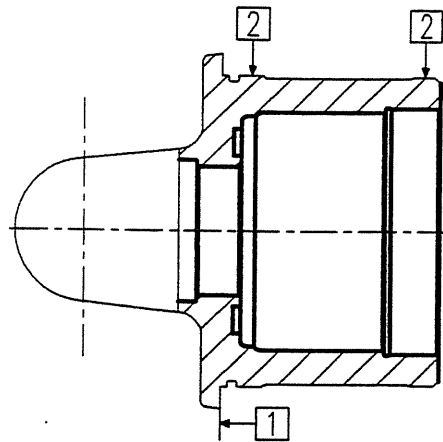
NOMENCLATURE DES PHASES (surfaces usinées en trait fort, indication partielle de l'isostatisme)

PHASE 10 : Contrôle du brut

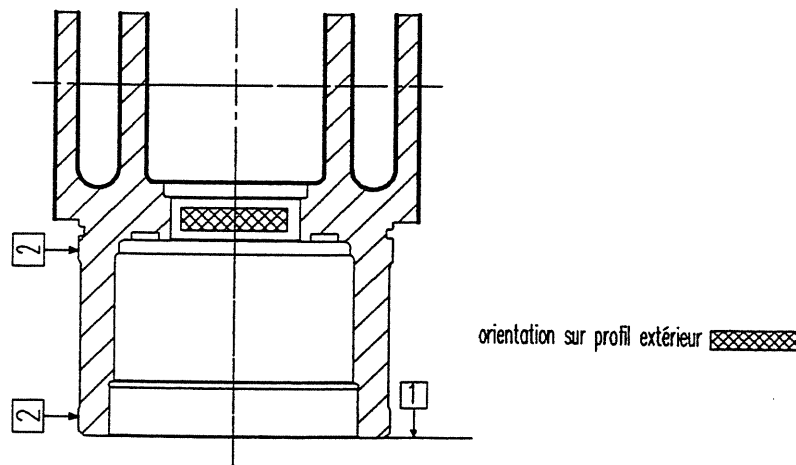
PHASE 20 : Tournage CN ébauche extérieure



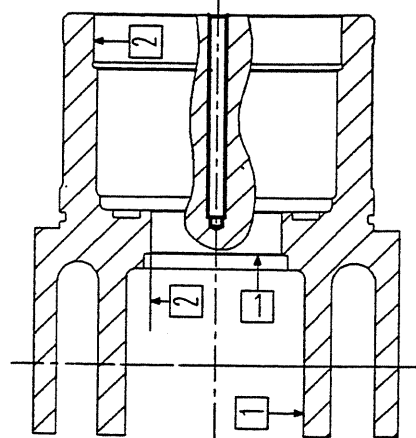
PHASE 30 : Tournage CN ébauche intérieure



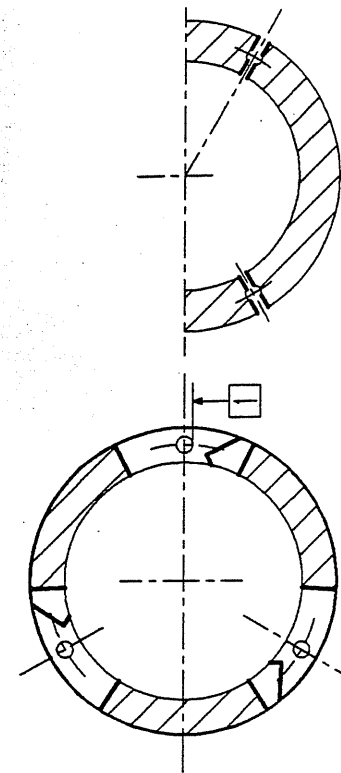
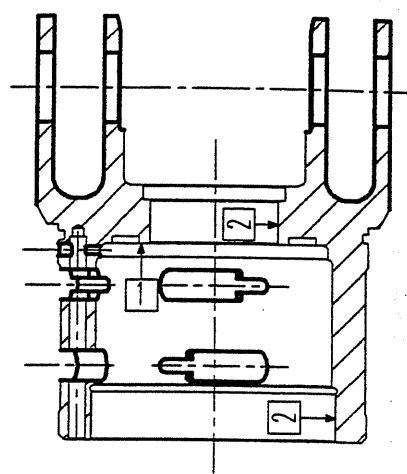
PHASE 40 : Fraisage horizontal ébauche des chapes



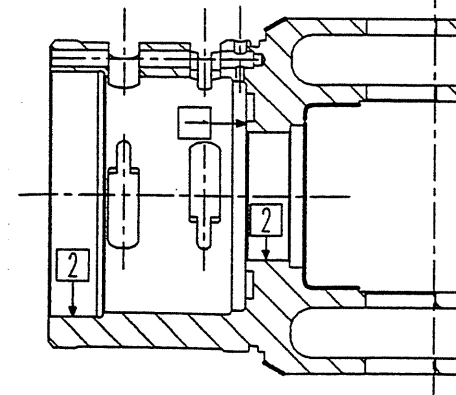
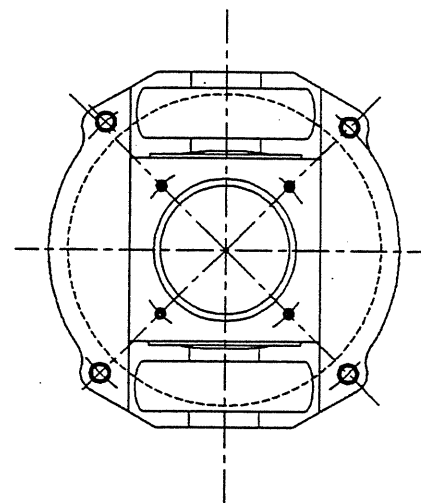
PHASE 50 : Perçage alésage vertical CN



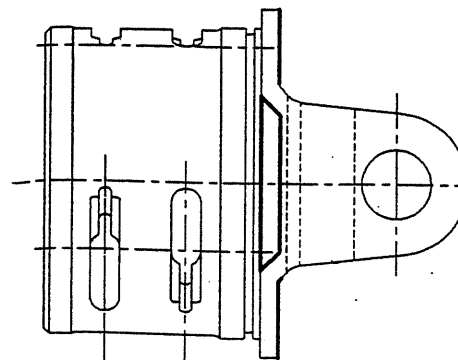
PHASE 60 sous-phase 1 : Usinage sur CUCN 4 axes horizontal palettisé



PHASE 60 sous-phase 2 : Usinages sur CUCN 4 axes horizontal palettisé



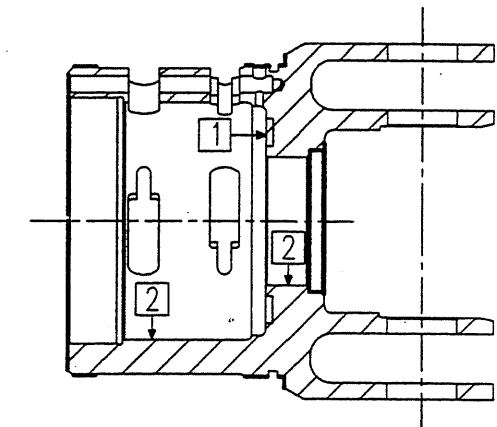
Isostatisme identique à celui de la sous-phase 1



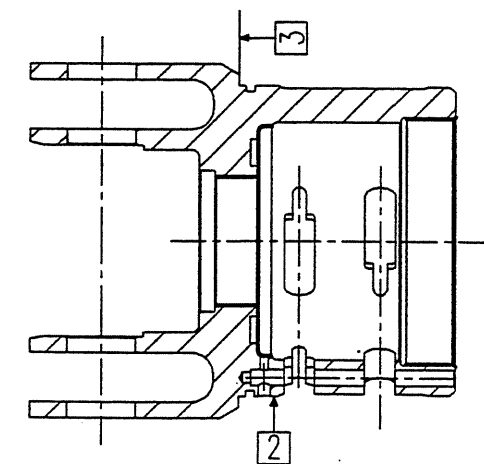
37.0.1

J. 1582-Bd

PHASE 70 : Tournage CN Finition



PHASE 80 : Tournage CN finition et filetage



PARTIE A

ÉLABORATION DE LA PIÈCE BRUTE

Cette chemise comprend :

Texte du sujet (pages de 1/4 à 4/4).

Documents techniques à utiliser en partie A

DTA1 : Nomenclature des phases d'obtention du brut et instructions de contrôle de structure

DTA2 : Documentation technique sur alliage de titane

DTA3 : Test de torsion et modèle de comportement du matériau

Documents réponses partie A

DRA1 : Résultats d'une simulation de formage à analyser

DRA2 : Définition de la forme de l'ébauche

PARTIE A - TEXTE DU SUJET - Page 1/4

Présentation :

Le brut de départ en alliage de titane TiAl6V est obtenu par estampage à partir d'un lopin cylindrique préparé (\varnothing 100 mm , longueur 184 mm).

Les opérations associées à cette obtention sont partiellement définies sur le document DTA1.

L'aspect morphodimensionnel de la pièce brute est défini par le dessin du brut Document 3.

La structure cristallographique de la pièce brute devra être conforme aux exigences définies sur le document DTA1 pages 2, 3 et établie en regard des caractéristiques mécaniques requises.

Pour les alliages de titane le "chemin de déformation" [du lopin de départ inclus à la pièce estampée finie] peut introduire dans la structure cristallographique des évolutions qui ne sont pas, contrairement à celles des aciers, toutes modifiables par traitement thermique ultérieur (problème d'hérédité structurale).

Les paramètres caractéristiques des différentes étapes de ce "chemin" sont donc à définir de façon optimale. Les questions proposées visent à établir cette définition. Le document DTA2 fournit les éléments nécessaires à la compréhension du comportement de l'alliage TiAl6V.

L'étude proposée se scinde en deux parties :

- première partie : étude du point de vue métallurgique
- deuxième partie : étude du point de vue formage

PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE DU POINT DE VUE MÉTALLURGIQUE
--

(Réponse sur feuille de copie)

QA1 - Structure du matériau de départ

QA11 - Justifier, pour le lopin de départ, les exigences sur la structure du matériau (voir DTA1).

QA12 - Préciser les conditions d'élaboration du matériau de départ qui permettent d'obtenir ce type de structure.

QA2 - Définition du domaine de forgeage

QA21 - Définir le (les) domaine(s) de forgeage compatible(s) avec l'obtention des structures admissibles sur la pièce estampée.

QA22 - Définir l'intervalle de température de forgeage à respecter pour la (ou les) opérations de mise en forme. Justifier les choix effectués pour chacune des bornes de l'intervalle en précisant leur incidence sur les paramètres caractéristiques de l'opération (structure, remplissage des empreintes, efforts,...).

QA3 - Définition des moyens.

- Proposer des moyens techniques adaptés à la réalisation des opérations de chauffe et de mise en forme en précisant les conditions de travail nécessaires à la conduite de ces opérations :
 - chauffe : température, durée,...
 - mise en forme : machine, outillage, vitesse,...
- Justifier et argumenter les choix effectués en reproduisant des graphes, courbes, valeurs, extraits éventuels du document DTA2.

Tournez la page S.V.P.

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE DU POINT DE VUE FORMAGE

Présentation :

On fournit les résultats d'une simulation de l'obtention "directe" du brut à partir du lopin cylindrique écrasé en une opération unique (document DRA1).

Nota : dans un souci de simplification, l'étude proposée est limitée à l'obtention de la partie axisymétrique qui pose le plus de difficultés de remplissage compte tenu de ses formes et dimensions.

La simulation effectuée par logiciel fournit en fonction des paramètres caractéristiques de l'opération les répartitions :

- des contraintes,
- de la déformation,
- de la vitesse de déformation généralisée,
- de la température,
- du champ des vitesses d'écoulement
- de l'évolution temporelle de l'effort.

Elle permet dans cette hypothèse (opération unique) de mettre en évidence un problème de remplissage de l'empreinte.

L'étude proposée permettra :

- de choisir ou de justifier les paramètres caractéristiques de l'opération,
- d'interpréter les résultats obtenus,
- de déduire (de ces constats) la (ou les) opération(s) d'ébauche préliminaire(s) pour garantir un remplissage correct et l'obtention d'une structure conforme (problème analysé en 1^{ère} partie).

DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DE L'OPÉRATION D'ESTAMPAGE NÉCESSAIRES POUR RÉALISER LA SIMULATION ("VALEURS D'ENTRÉE")

(étude limitée aux paramètres caractéristiques du comportement du matériau)

(Réponse sur feuille de copie)

La description des grandeurs de rhéologie du matériau est basée sur la loi de comportement de Norton-Hoff (voir DTA3 page 2/3). Cette relation fait intervenir :

- la "consistance" K , fonction de la température T et de la déformation généralisée $\bar{\epsilon}$.
- la "sensibilité à la vitesse de déformation" m .

QA4 : Détermination de la consistance K du matériau

On se propose de déterminer la consistance K du matériau pour une température donnée à partir du test de torsion. Le principe et le résultat de ce test sont donnés sur le document DTA3 page 1/3 et page 3/3.

Les principales étapes de cette détermination pourront être abordées dans l'ordre suivant :

QA4-1 Exprimer, à l'aide des indications du document DTA3 et en tenant compte de toutes les hypothèses, la vitesse de déformation généralisée $\dot{\bar{\epsilon}}$ au point M en fonction de r et de $\dot{\theta}$,

QA4-2 Déduire l'expression littérale de la déformation généralisée $\bar{\epsilon}$ au point M en fonction de N, L et r

QA4-3 Après avoir exprimé le couple élémentaire dC , établir l'expression du couple C en fonction de la

contrainte tangentielle $\tau_{(r)}$. Établir l'expression de $\frac{d\tau_{(r)}}{dr}$ en fonction de $L, \theta, \dot{\theta}, \frac{\partial \tau_{(r)}}{\partial \bar{\epsilon}}, \frac{\partial \tau_{(r)}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}}$.

Après intégration par parties, on obtient l'expression suivante pour C :

$$C = 2\pi \frac{R^3}{3} \tau_{(R)} - 2\pi \frac{\sqrt{3}}{9L} \int_0^R \left(\theta \frac{\partial \tau_{(r)}}{\partial \bar{\epsilon}} + \dot{\theta} \frac{\partial \tau_{(r)}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \right) r^3 dr \quad \boxed{\text{équation E}}$$

QA4-4 Établir, à partir de l'expression de $C = f(\tau_{(r)})$ obtenue à la question QA4-3 les éléments

suivants : $\frac{\partial C}{\partial \theta}$ et $\frac{\partial C}{\partial \dot{\theta}}$. Donner la nouvelle écriture de l'équation E faisant intervenir $\frac{\partial C}{\partial \theta}$ et $\frac{\partial C}{\partial \dot{\theta}}$.

QA4-5 Dédurre de la nouvelle équation E l'expression de $\tau_{(R)}$ puis l'expression de σ_0 . Montrer que l'on

obtient une expression de la forme $\sigma_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi R^3} C (3 + n + m)$ avec

n = sensibilité à la déformation θ (écrouissage),

m = sensibilité à la vitesse de déformation $\dot{\theta}$ (viscoplasticité). Donner les expressions de m et n .

QA4-6 Déterminer la valeur de la consistance K à partir des résultats de l'essai (document DTA3 page3) pour la température T choisie en question QA2. On affectera aux coefficients m et n les valeurs suivantes : $m = 0,17$ et $n = 0$.

QA5 : Étude de la relation entre σ_0 et $\dot{\bar{\epsilon}}$

Interpréter la dépendance de la contrainte d'écoulement σ_0 vis à vis de la vitesse de déformation généralisée $\dot{\bar{\epsilon}}$ avec les valeurs de K , m et n déterminée et définies en QA4.

QA6 - Ajustement de la consistance K

La valeur de la consistance K est ajustée au cours de la simulation à partir de la valeur déterminée par l'essai de torsion (notée K_0) selon la relation définie sur DTA3 page 2/3.

- Expliquer cette loi de dépendance sachant que $n=0$ en justifiant l'influence des différents facteurs $\{K_0, \beta, T\}$.
- Proposer une méthode possible de détermination du coefficient β en fonction des données en votre possession.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE SIMULATION

(Réponses sur document réponse DRA1 page 1/2 et 2/2)

L'interprétation sera effectuée dans l'optique :

- d'analyser l'évolution du formage (obtention forme et structure),
- de vérifier la corrélation du comportement de l'alliage par rapport aux indications données en DTA3,
- de comparer les valeurs obtenues avec celles que l'on pourrait déterminer par un calcul rapide (hors simulation).

QA7 - Analyse du champ des vitesses.

Interpréter la répartition du champ des vitesses obtenu.

QA8 - Analyse de l'évolution de l'effort de forgeage.

- Justifier l'évolution de l'effort dans le temps, établir la liaison avec l'évolution du remplissage,
- Comparer avec un effort moyen de forgeage calculé en tenant compte du seul fluage axial.

QA9 - Analyse de la répartition des contraintes équivalentes.

Interpréter la répartition obtenue.

QA10 - Analyse de la répartition de la déformation généralisée $\bar{\epsilon}$.

- Interpréter la répartition obtenue.
- Comparer les valeurs caractéristiques avec celle du taux de corroyage approximatif correspondant.

QA11 - Analyse de la répartition de la vitesse de déformation généralisée $\dot{\bar{\epsilon}}$

- Justifier la répartition sensiblement constante,
- Comparer avec la valeur de $\dot{\bar{\epsilon}}$ en périphérie du test de torsion.

QA12 - Analyse de la répartition de température T.

- L'évolution de température constatée est-elle prévisible en regard de l'évolution des autres facteurs (σ_0 et $\bar{\epsilon}$) ?
- Déterminer par calcul l'élévation de température maximale prévisible ΔT et la comparer avec celle constatée sur la simulation,
- Définir le risque sur l'évolution de la structure du matériau,
- Tirer des conclusions pratiques.

DÉFINITION DE L'OPÉRATION D'ÉBAUCHE

(Réponse sur document réponse calque DRA2)

QA13 - Recherche de la forme d'ébauche

Proposer une forme d'ébauche permettant de résoudre les problèmes de remplissage dégagés lors de l'analyse des résultats de la simulation.

Deux représentations graphiques sont demandées :

- sur figure 1, tracé de la forme d'ébauche effectué en superposition sur le profil de la pièce brute finie à l'échelle 1:1 en justifiant les choix effectués pour les formes et les dimensions retenues.
- sur figure 2, tracé de la forme d'ébauche positionnée sur la matrice inférieure de finition. La matrice supérieure sera représentée en position écartée. (Échelle de travail au choix).

Obtention du brut - Nomenclature des phases
(obtention par lot de 50 unités)

- 010 - Contrôle matière selon fiche d'essai (voir annexe page 2 et 3)
- 020 - Débit (lopins Ø100, longueur 184)
- 030 - Rayonnage des arêtes (R10) en tournage
- 040 - Chauffe des lopins
- 050 - Ecrasage à longueur 170
- 055 - **Estampage ébauche**
- 060 - Chauffe des ébauches
- 070 - **Estampage finition**
- 080 - Ebavurage à la presse mécanique
- 090 - Grenailage
- 100 - Décapage fluonitrique
- 110 - Décroiquage à la meule
- 120 - Chauffe
- 130 - **Estampage (reprise finition pour calibrage)**
- 140 - Ebavurage
- 150 - Recuit
- 160 - Grenailage
- 170 - Décapage fluonitrique
- 180 - Contrôle dimensionnel (8 pièces par lot)
- 190 - Contrôle dureté(à 100%)
- 200 - Essais destructifs (1 pièce par lot) - fibrage et texture par macro et micrographie (voir annexe page 2 et 3)
- traction
- 210 - Ressuage (à 100%)
- 220 - Perçage du Ø35
- 230 - Contrôle final
- 240 - Marquage (à 100%)
- 250 - Remise à expéditions

Annexe : INSTRUCTIONS DE CONTRÔLE - Examens de Structure

phase 010 :

Matière : T A6 V état recuit, laminé - écrouté, dernière fusion réalisée obligatoirement par électrode consommable.

contrôle U.S. (ultrasons) effectué par le fournisseur matière.

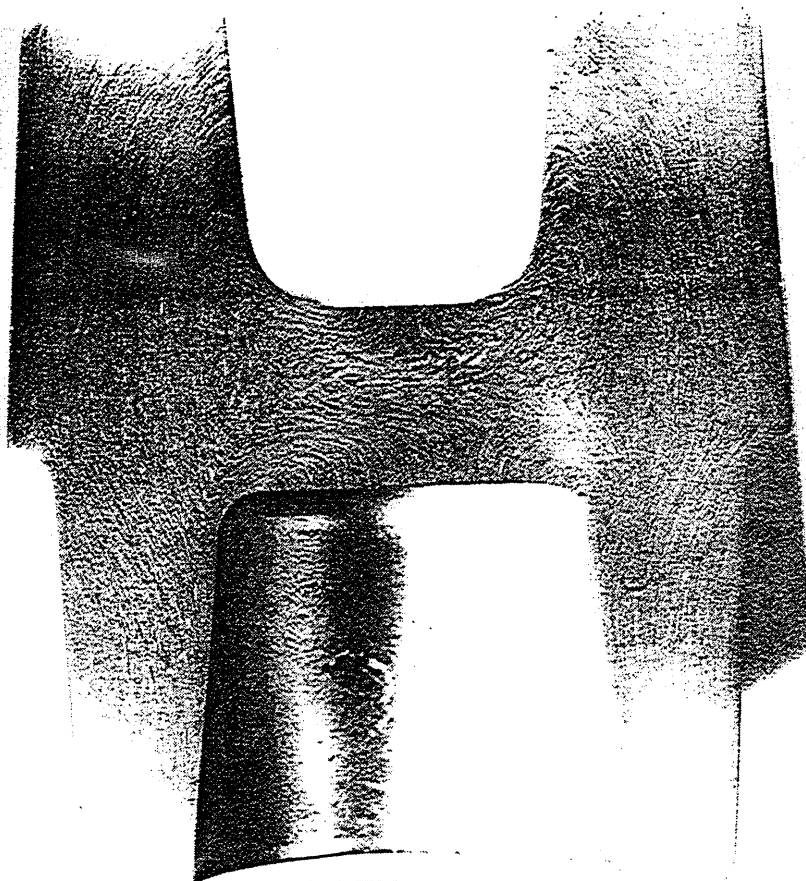
Examen de structure :

- prélèvement par dissection sens longitudinal
- examen micrographique : la structure doit être une structure équiaxe du type $\alpha + \beta$ homogène conforme à l'image 1007-1 (voir planches photos en annexe)

phase 200 :

Examen de structure :

- dissection sens longitudinal
(une demi pièce servira au contrôle chez le forgeron, l'autre demi- pièce sera jointe à la livraison)
- examen macrographique : fibrage
(+ contrôle micro-dureté et dosage d'hydrogène)



- examen micrographique : la structure doit être une structure du type $\alpha + \beta$ homogène (voir planches photos en annexe)

Planche 1 : structures conformes

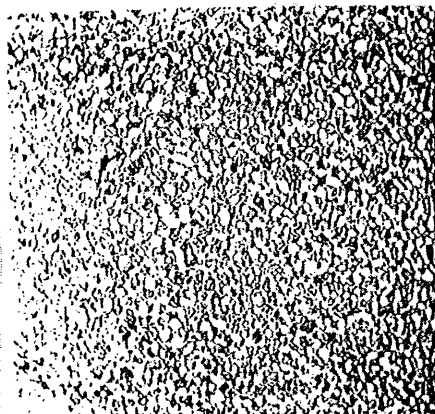
- structure équiaxe fine et grossière.
- structure aciculaire (aiguillée) en limite d'acceptation.

Planche 2 : structures non conformes

- structure aciculaire avec ou sans présence de joints β

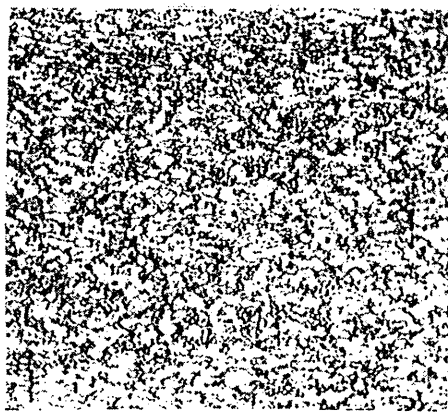
Planche 1 : TA6V Recuit - structures conformes

- structure équiaxe fine



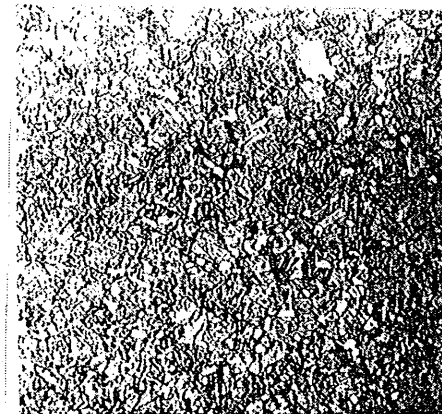
1007-1 x100

- structure équiaxe fine



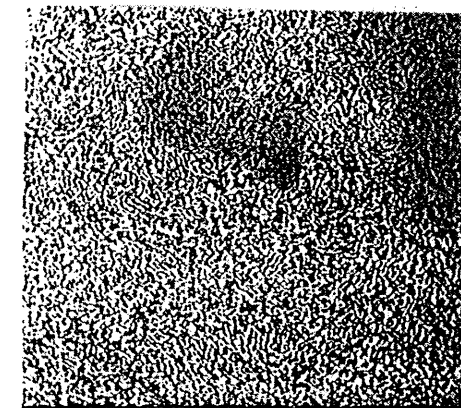
1007-2 x100

- structure équiaxe grossière



1007-3 x100

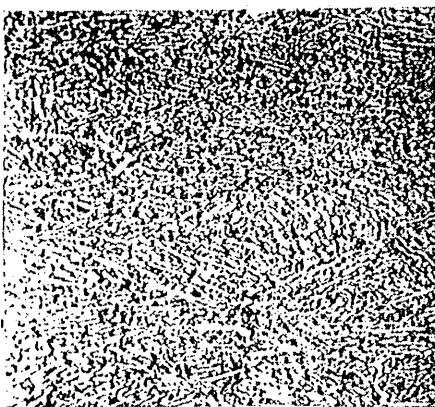
- début de structure aciculaire (aiguillée)
- limite d'acceptation



1007-4 x100

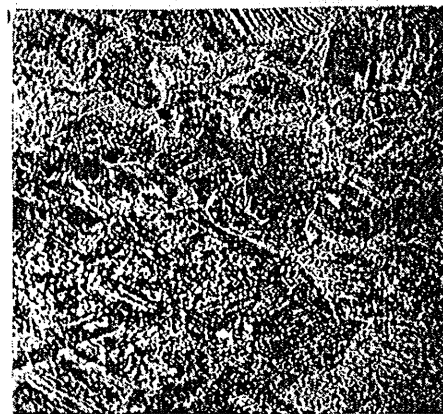
Planche 2 : TA6V Recuit - structures non conformes

- structure aciculaire sans présence de joints β



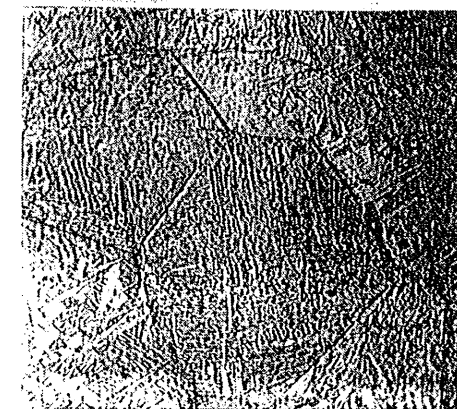
1007-5 x100

- structure aciculaire
avec présence de joints β



1007-7 x100

- gros grains



1007-8 x100

Alliages de titane

Classement des éléments d'alliage et principaux types d'alliage de titane :

Le titane non allié possède une structure hexagonale compacte dite *phase alpha* jusqu'à 882°C. Au-dessus de ce point de transformation, parfois désigné par l'expression *transus bêta*, c'est une structure cubique centrée dite *phase bêta* qui est stable. (figure 1)

Les éléments d'alliage sont classés en éléments alphas ou bêtas suivant leur tendance à augmenter le domaine de stabilité de l'une des deux phases alpha ou bêta. Certains sont dits neutres du fait de leur faible influence.

Les effets alphas ou bêtas des différents éléments sont approximativement additifs.

Les alliages obtenus sont classés dans l'un des types alpha, alpha + composé, alpha + bêta ou bêta suivant la nature des éléments prépondérants à température d'utilisation (figure 2).

L'alliage *TiAl6V* est un alliage $\alpha + \beta$ caractéristique.

Il contient un mélange des phases alpha + bêta et bêta à ses deux états d'utilisation, recuit ou trempé - revenu (figure 3).

Le cas des alliages bêta est particulier : il offre la possibilité de maintenir par trempe la phase bêta métastable à la température ambiante.

Il faut remarquer deux particularités de la transformation de phase du titane qui sont en opposition avec la métallurgie classique des aciers :

- son caractère généralement faiblement durcissant,
- son effet mémoire particulièrement fort appelé : hérédité structurale.

De ces deux points il découle que les traitements thermiques :

- ne modifient pas de façon sensible les propriétés du métal pour la plus grande partie des alliages,
- ne permettent pas d'effacer totalement l'hérédité des étapes antérieures de la fabrication d'où l'importance du choix de la gamme thermomécanique.

L'étape de traitement thermique est le plus souvent placée à la fin de la mise en œuvre des alliages de titane, sur pièce finie ou presque.

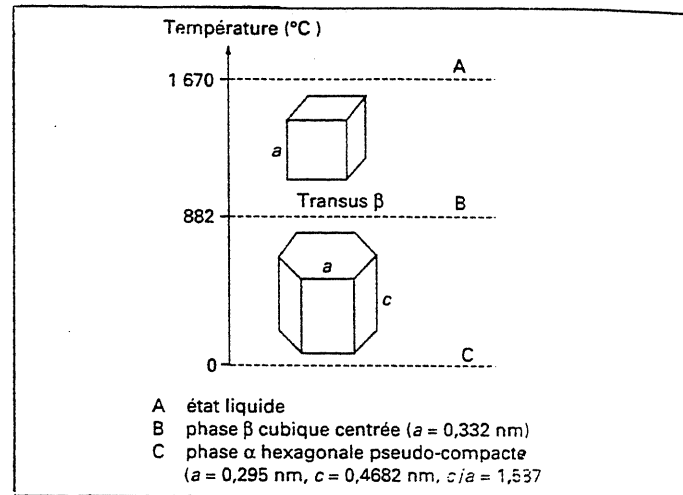


Figure 1 - Cristallographie du titane

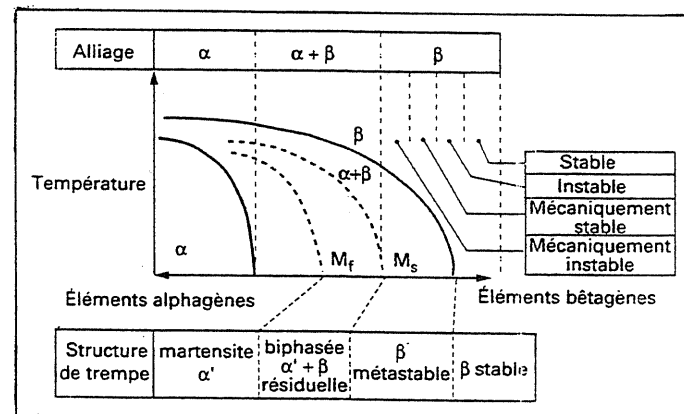


Figure 2 - Diagramme pseudo-binaire applicable aux alliages de titane

Figure 3 : Caractéristiques du titane et de l'alliage *TiAl6V*

Dénomination	Composition chimique en % masse	Type	État d'utilisation		Traction		
			R = recuit T = trempé TR = trempé-revenu	R _r [MPa]	R _{e0,002} [MPa]	A %	
<i>Ti non allié</i>		α	R	450	330	35	
<i>TiAl6V</i>	Aluminium : 6% Vanadium : 4%	$\alpha + \beta$	R TR	1000 1150	900 1050	15 12	

Élaboration des barres en alliage de titane

Objectifs de la transformation

La transformation permet de passer du stade lingot (diamètre ≈ 600 mm, masse ≈ 3 tonnes) au stade barre (diamètre < 350 mm).

Pour répondre aux exigences de qualité des clients la transformation doit permettre d'obtenir :

- une macrostructure fine et régulière
- une microstructure de type équiaxe

La macrostructure fine et régulière permet d'obtenir un écoulement homogène lors du forgeage, la microstructure de type équiaxe sert de base pour les traitements thermiques et thermomécaniques ultérieurs.

Domaines de températures

Les alliages de titane se caractérisent par une forte résistance à la déformation à la température ambiante. La figure 1 de la page 5 (DTA2) montre l'évolution de la contrainte d'écoulement de l'alliage $TiAl6V$ en fonction de la température pour différentes vitesses de déformation

généralisée $\dot{\epsilon}$.

Le dégrossissage se fait dans le domaine β , au dessus du transus bêta. L'obtention de la structure équiaxe (état de livraison) est conditionnée par une opération de corroyage final effectuée à une température inférieure au transus β . En effet la transformation $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ entraîne toujours au refroidissement la formation d'une structure aiguillée.

En fait, l'intervalle de température pour l'opération de finition est assez réduit, la borne inférieure étant donnée par l'augmentation rapide du seuil d'écoulement dès que la température décroît et par la forte tendance au criquage.

Aspect métallurgique

- Obtention d'une macrostructure fine et régulière

Les lingots sont dégrossis dans le domaine β à haute température (transus $+100$ à 200°C) par forgeage ou laminage. Cette étape permet de briser la structure de fusion illustrée par la figure 2. Cette structure est affinée par corroyage à une température plus basse (transus $+50^\circ\text{C}$) ou, ce qui est préférable (transus -30°C). Après ce corroyage un traitement thermique de recristallisation est généralement pratiqué dans le bas du domaine β (transus $+50^\circ\text{C}$).

Après ce traitement la macrostructure régulière et fine sera conservée sous réserve d'effectuer le corroyage ultérieur à une température inférieure au transus. La figure 3 montre un exemple de macrostructure de produit fini.

- Obtention d'une microstructure équiaxe

Après l'étape précédente, les produits ont une microstructure aiguillée, pour casser ces aiguilles on effectue un corroyage dans le domaine $\alpha + \beta$. Pour obtenir une microstructure équiaxe, il faut produire un taux de corroyage au moins égal à 3.

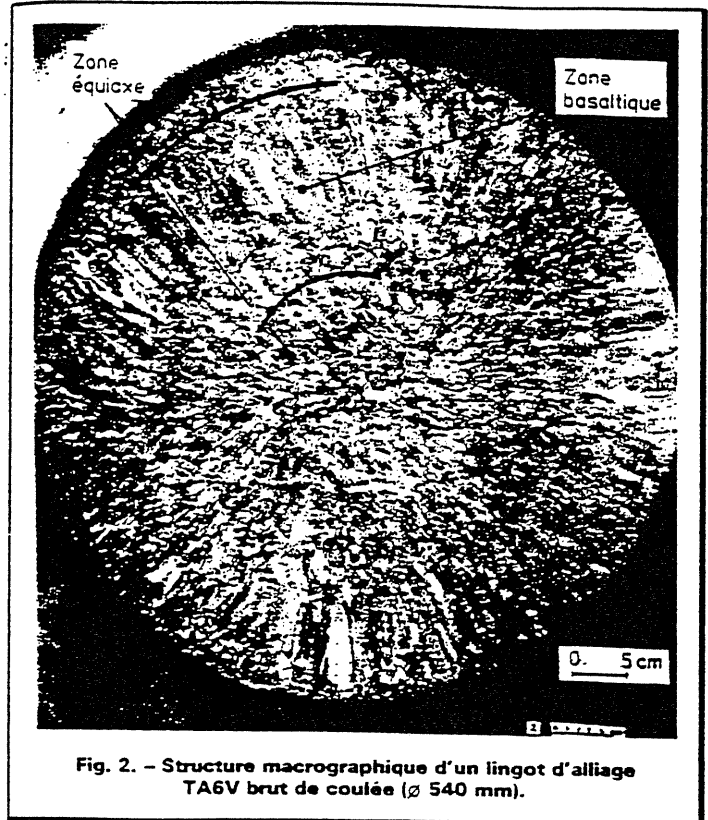


Fig. 2. - Structure macrographique d'un lingot d'alliage TA6V brut de coulée ($\varnothing 540$ mm).

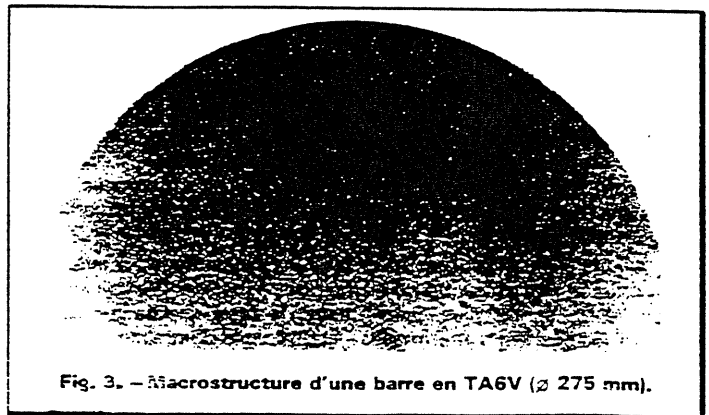


Fig. 3. - Macrostructure d'une barre en TA6V ($\varnothing 275$ mm).

- Limitations

Le corroyage étant plus faible sur les produits de gros diamètres (+ de 300 mm), leur microstructure possède en général un caractère moins équiaxe que pour les produits de moins de 200 mm. Les barres de diamètre inférieur à 80 mm présentent souvent une structure orientée dans le sens du laminage. La figure 4 montre deux exemples de microstructures équiaxes.

Modifications structurelles de l'alliage

Principe des traitements thermiques :

Faire évoluer la microstructure vers l'état d'équilibre $\alpha + \beta$ avec durcissement du fait de la formation de constituants finement dispersés.

Alliages $\alpha + \beta$

Ces alliages sont utilisés soit à l'état recuit, soit à l'état trempé-revenu. Le recuit consiste en un maintien à température assez élevée dans le domaine $\alpha + \beta$ suivi d'un refroidissement relativement lent de manière à obtenir une structure stable $\alpha + \beta$.

Le traitement thermique de trempé et revenu (vieillessement) est appliqué pour obtenir une résistance mécanique plus élevée : il est généralement limité aux pièces de dimensions relativement faibles (épaisseur < 50 mm) car les alliages de titane $\alpha + \beta$ n'ont pas une très bonne trempabilité. La température de trempé est située dans le haut du domaine $\alpha + \beta$. À l'état trempé les phases présentes sont soit α' (martensitique) et α , soit β (métastable) et α suivant la température de trempé et la composition de l'alliage.

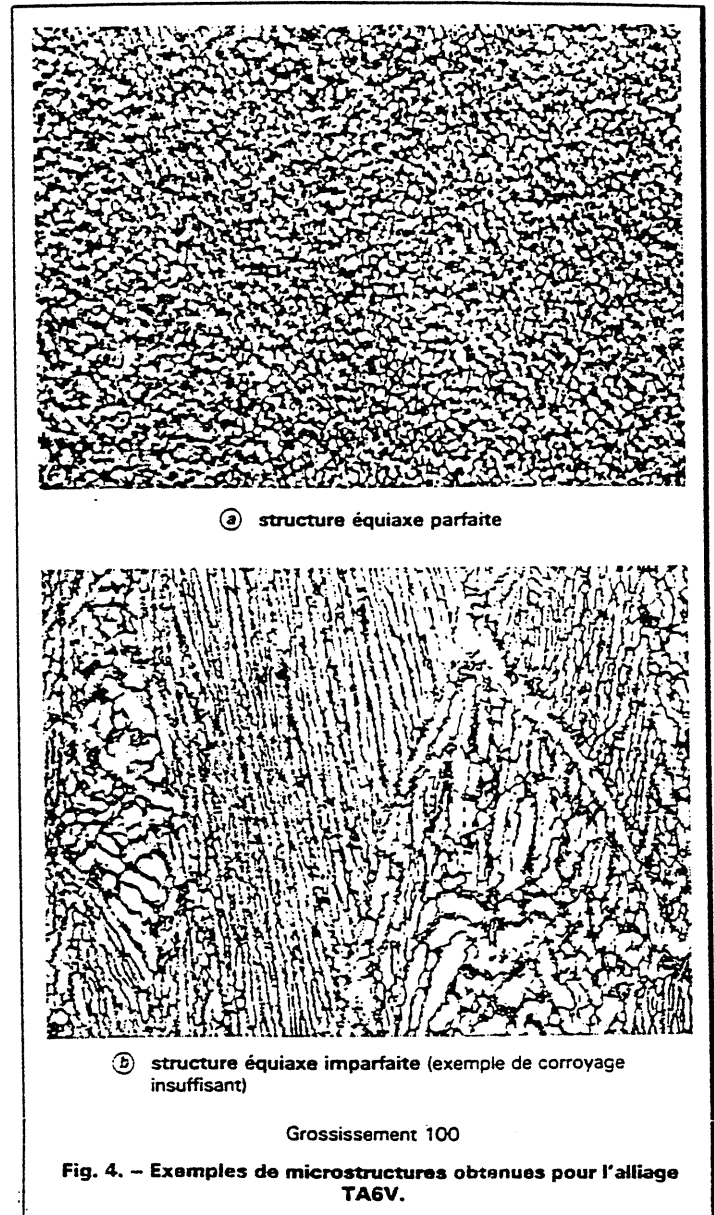
Application des traitements thermomécaniques à des alliages classiques (*TiAl6V* par exemple).

Les traitements classiques (recuit, trempé + revenu) restent d'actualité sur les alliages classiques et sont adaptés aux alliages en développement, mais des combinaisons nouvelles, incluant le traitement thermomécanique final et le traitement thermique, ont été essayées et adoptées sur des alliages en développement. On distingue classiquement deux grands types de microstructures :

- les microstructures fines équiaxes (globulaires ou $\alpha + \beta$)
 - les microstructures aiguillées (ou lamellaires ou β).
- Les premières sont obtenues par transformation dans le domaine $\alpha + \beta$ et traitement thermique dans le même domaine sans jamais repasser dans le domaine β tandis que les secondes sont obtenues par transformation et traitement thermique éventuel dans le domaine monophasé β .

Les avantages et les inconvénients attribués aux deux types de structure sont :

- gain en fatigue et ductilité pour la structure équiaxe,
- gain en fluage et ténacité mais risque d'hétérogénéité de la grosseur des grains pour la structure aiguillée.



La figure 3 ci-contre illustre l'influence de la structure sur la résistance à la fatigue du *TiAl6V*.

On tend maintenant à combiner les avantages des deux structures en créant :

- des structures aiguillées sans liserés α intergranulaires,
 - des structures mixtes équiaxes nodulaires et aiguillées.
- Pour ce genre de structure, un simple traitement thermique ne suffit pas, ce qui explique l'importance du traitement thermomécanique.

Structure mixte $\alpha+\beta/\beta$

La structure mixte $\alpha+\beta/\beta$ associe quelques nodules de phase α dans une matrice aiguillée. Elle permet d'optimiser le compromis fatigue-fluage, en tirant partie des nodules (fatigue) et des aiguilles (fluage). Ces structures sont obtenues en forgeant l'alliage dans le domaine $\alpha+\beta$

FORGEAGE OU MATRIÇAGE

Les pièces forgées ou matriçées en alliage de titane sont, généralement, des pièces de sécurité dont les exigences de qualité justifient l'opération de forgeage ou de matriçage. Leur domaine d'utilisation, le domaine aérospatial pour plus de 50% du tonnage consommé en Europe, est lié aux caractéristiques du titane et de ses alliages qui sont principalement :

- un excellent rapport résistance mécanique/densité,
- une bonne tenue à la fatigue dans une large gamme de température,
- une bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion,
- une bonne stabilité thermique.

Critères de choix du procédé de transformation

Le produit de départ, généralement considéré, est un tronçon de barre transformée à haute température à partir du lingot selon le processus décrit à la page 2 du DTA2.

Choix des températures et des vitesses de déformation

Température et structure cristallographique :

Le choix de la température de déformation prend en compte l'existence de deux températures critiques pour les alliages de titane qui sont :

- la température de transus $\alpha+\beta \rightarrow \beta$
- la température du début d'apparition des criques qui est la limite inférieure du domaine de forgeabilité.

On distingue deux types de forgeage selon que l'on se place au-dessus ou au-dessous du transus β :

Forgeage β la température de forgeage est supérieure au transus β (figure 1 ci-contre).

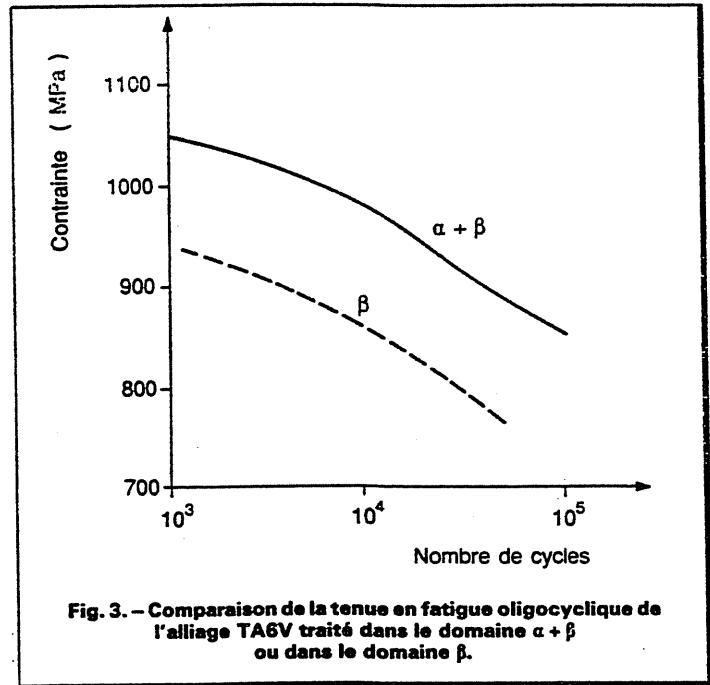
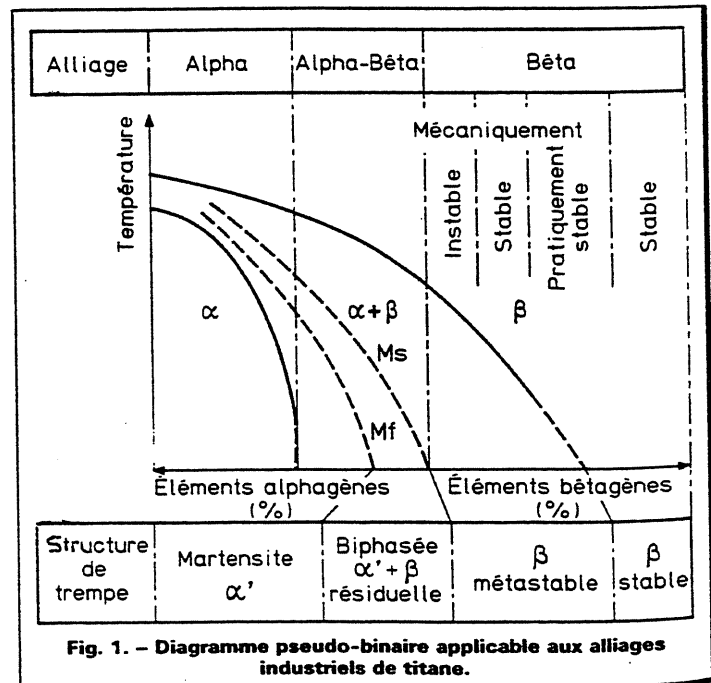


Fig. 3. - Comparaison de la tenue en fatigue oligocyclique de l'alliage TA6V traité dans le domaine $\alpha+\beta$ ou dans le domaine β .



La phase présente lors du forgeage est la phase cubique centrée stable à haute température. Les efforts de forgeage sont diminués car cette phase est plus plastique que la phase α (hexagonal compact).

Après refroidissement à la température ambiante, la microstructure obtenue est du type aiguillé (figure a). Cette structure constituée par des plaquettes α , dont l'orientation dépend de celle de la phase mère β , conduit à une limite d'élasticité et surtout à un allongement plus faibles que ceux obtenus en forgeage ($\alpha + \beta$). Cependant ce type de structure a un effet bénéfique sur la ténacité et sur la résistance au fluage.

Forgeage $\alpha + \beta$

Au-dessous du transus β , il existe un domaine de température où coexistent les deux phases α et β de l'alliage. Par déformation plastique dans ce domaine, on obtient, par un phénomène de recristallisation qui dépend de la température mais aussi du taux de déformation et du temps, une structure dite équiaxe. La figure b montre une telle structure où l'on trouve de la phase α primaire sous forme de grains polygonaux répartis dans une matrice très faiblement aiguillée issue de la transformation de la phase β en phase α au cours du refroidissement.

Cette structure équiaxe est recherchée lorsque l'on veut privilégier l'allongement à rupture pour une résistance donnée tout en gardant une ténacité correcte. Ce type de structure améliore également la tenue à la fatigue. Ce mode de forgeage ($\alpha + \beta$) est le plus généralement retenu pour le forgeage ou le matriçage final des pièces de structure en alliage *TiAl6V*.

Température et contrainte d'écoulement

Le choix de la température de forgeage étant dicté par des considérations métallurgiques, il en résulte une incidence directe sur l'effort de forgeage, compte tenu de la relation liant la contrainte d'écoulement du matériau à la température.

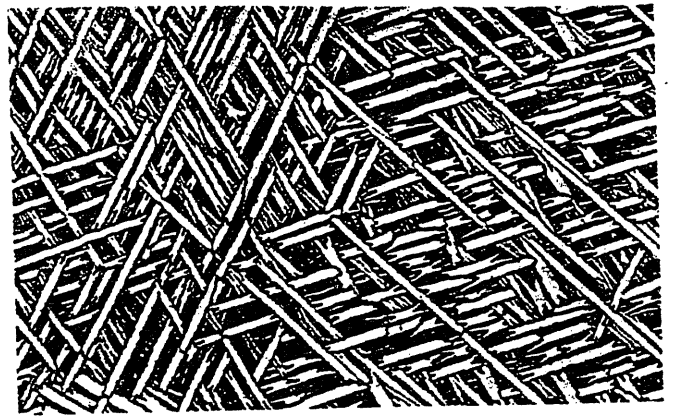
Les courbes utilisées en pratique sont déterminées à partir d'essais de compression réalisés en conditions isothermes et donnant directement l'effort de compression en fonction de la température. Les données obtenues par cet essai technologique sont directement utilisables pour évaluer les efforts de forgeage.

L'effet de la température sur la contrainte d'écoulement est nettement plus important sur le titane que sur l'acier.

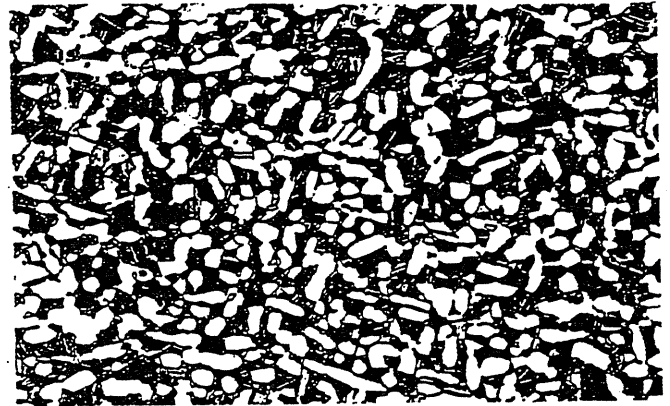
Vitesse de déformation et contrainte d'écoulement

La vitesse de déformation a une forte influence sur la contrainte d'écoulement du titane et de ses alliages.

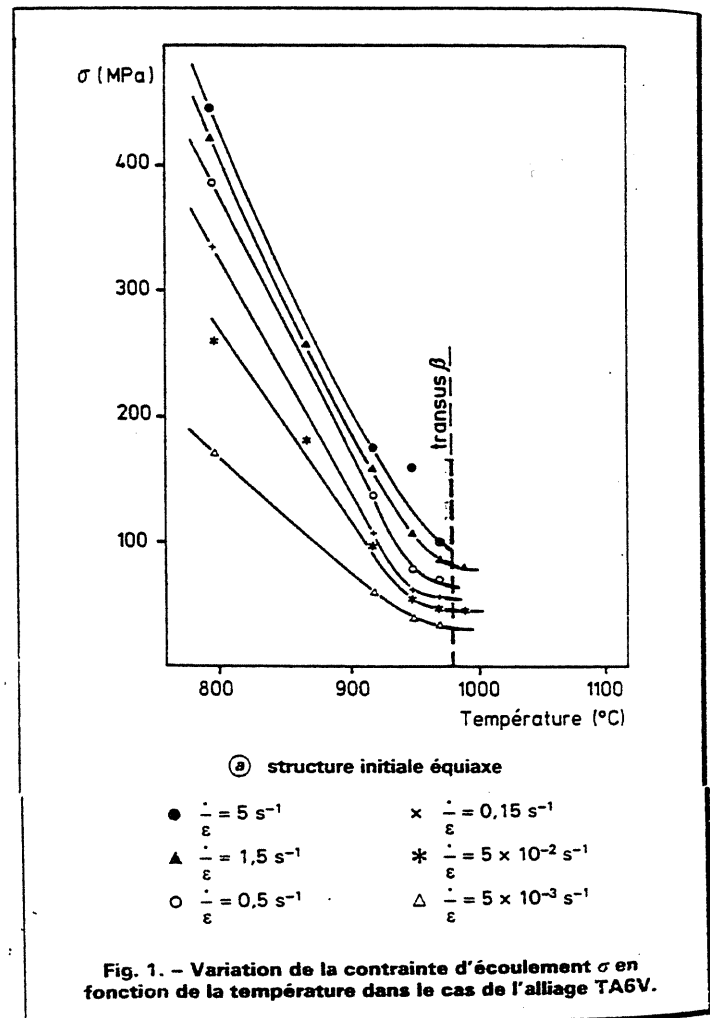
La figure 1 ci-contre montre l'évolution de la contrainte d'écoulement σ de la nuance *TiAl6V* en fonction de la vitesse rationnelle de déformation $\dot{\epsilon}$.



(a) forgeage dans le domaine β : structure aiguillée

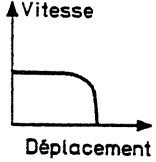
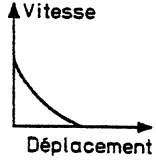
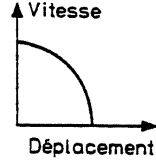


(b) forgeage dans le domaine $\alpha + \beta$: structure équiaxe



Rappelons que cette vitesse rationnelle $\dot{\epsilon}$ peut être approximativement prise égale au rapport $\frac{v}{\Delta H}$ d'un lopin de hauteur H écrasé de ΔH à la vitesse v entre tas plat.

Tableau III. – Caractéristiques de vitesse des principaux outils de forgeage et de matriçage.

Type d'outil	Cycle de déplacement de l'outillage	Vitesse linéaire mm/s	Vitesse rationnelle $\dot{\epsilon}$ s ⁻¹	Particularités
Presse hydraulique pour matriçage isotherme		0,01 à 1	10 ⁻⁵ à 10 ⁻³	Temps de contact long avec les outillages (plusieurs minutes).
Presse hydraulique		2 à 100	≈ 10 ⁻¹	Régulation possible en vitesse, effort et déplacement.
Presse mécanique Bielle		50 à 1500	≈ 1	Haute cadence de frappe. Production automatisée. Type de presse très utilisé en ébavurage par cisaillement.
Marteau-pilon à double effet		3000 à 9000	≈ 10	La grande vitesse de déformation impose des conditions adiabatiques. Temps de contact très court avec les outillages : 10 ⁻³ à 10 ⁻² s.

Le tableau III ci-dessus donne les caractéristiques de vitesse des principaux outils de forgeage, avec les particularités qui leur sont liées.

Pour minimiser l'augmentation de la contrainte d'écoulement liée à l'augmentation de la vitesse de déformation, il faudrait utiliser des presses lentes. Mais alors le temps de contact avec les outillages nécessairement maintenus à moins de 400°C pour ne pas dégrader leurs caractéristiques conduirait à un refroidissement rapide et important de la pièce en titane, donc à une augmentation de la contrainte d'écoulement.

En pratique il existe deux types d'équipements bien adaptés au matriçage du titane, d'une part les pilons et presses rapides en forgeage conventionnel, d'autre part les presses lentes utilisées en matriçage isotherme, c'est-à-dire, avec les matrices maintenues à la température de matriçage.

Choix de matériaux pour matrices

Le matériau des matrices dans lesquelles sont formées les pièces doit supporter les conditions d'effort et de température requises par le mode de forgeage.

Par rapport au forgeage des aciers, les critères de choix du matériau tels que tenue à l'érosion, tenues à la fatigue thermique et mécanique demeurent valables. Toutefois, les contraintes dues au forgeage sont supérieures : elles peuvent atteindre et même dépasser 500 MPa suivant la complexité de la forme et la température de fin de forgeage.

Les postes de travail sont étudiés en réduisant les temps de manutention et de manipulation, qui sont particulièrement néfastes pour le titane, dont les intervalles de température de forgeabilité sont réduits par rapport à ceux des aciers.

Lorsque le forgeage a lieu au marteau-pilon, il faut veiller à ce que la puissance de l'engin soit adaptée à la taille des pièces, à la fois suffisante pour obtenir l'effet de forgeage nécessaire, mais non surabondante afin de ne pas provoquer de surchauffe de la pièce dans les conditions de travail adiabatiques qui sont liées à ce type d'outillage.

En effet, l'élévation de température d'un élément déformé est approximativement :

$$\Delta\theta = \frac{\sigma}{\rho c} \bar{\epsilon} \quad \text{en négligeant l'échauffement dû aux}$$

frottements et en considérant que tout le travail plastique se transforme en chaleur.

σ (Pa) contrainte moyenne d'écoulement

$\bar{\epsilon}$ déformation généralisée

ρ (kg/m³) masse volumique

c (J/kg.K) capacité thermique massique

Le tableau ci-dessous compare les valeurs des caractéristiques de l'alliage *TiAl6V* et de l'acier *15CrMoV6* et indique les échauffements caractéristiques lors du forgeage. On voit que, du fait notamment de sa capacité thermique volumique plus faible et de sa forte contrainte d'écoulement lors des déformations rapides, les élévations de température peuvent être importantes au pilon, ce qui peut amener des dépassements de température de transus en mode de forgeage $\alpha + \beta$, ou un grossissement exagéré de grains en mode β . Il convient donc d'adapter la puissance du pilon à la taille de la pièce et de contrôler la cadence de forgeage.

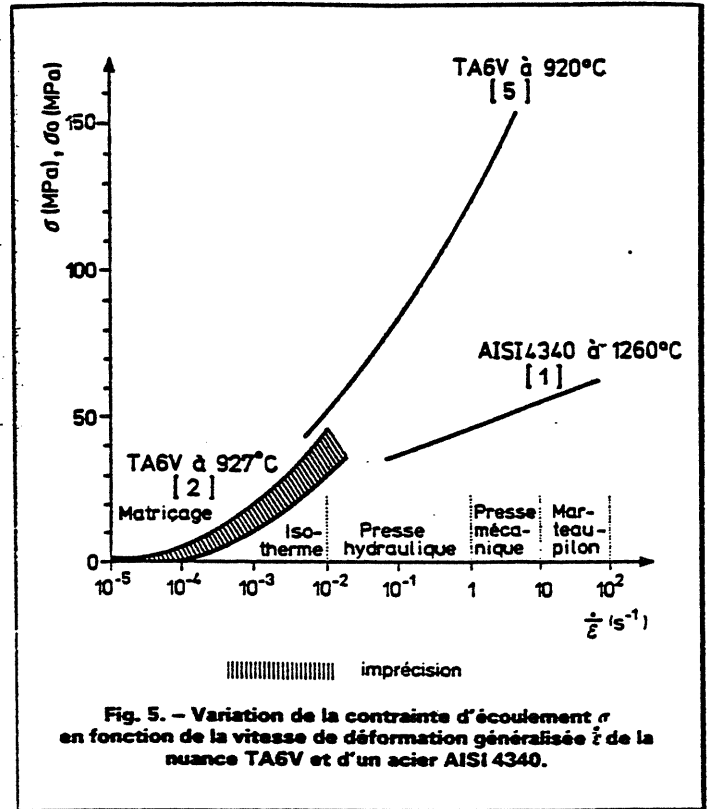


Fig. 5. - Variation de la contrainte d'écoulement σ en fonction de la vitesse de déformation généralisée $\dot{\epsilon}$ de la nuance TA6V et d'un acier AISI 4340.

Comportements comparés de l'alliage *TiAl6V* et de l'acier *15CrMoV6*

Métal	Conductivité thermique λ (w/m.K)	Capacité thermique volumique $\rho.c$ (J/m ³ .K)	Coefficient d'émissivité	Diffusivité thermique $a = \frac{\lambda}{\rho.c}$ (m ² .s ⁻¹)	Échauffement caractéristique	
					au pilon °C	à la presse hydraulique °C
<i>TiAl6V</i> à 900°C	18	3,3 x 10 ⁶	0,72	5,45 x 10 ⁻⁶	85	40
acier <i>15CrMoV6</i> à 1100°C	30	4,95 x 10 ⁶	0,68	6,1 x 10 ⁻⁶	45	30

Test de torsion en plasticité

Conditions de l'essai (figure 1) :

Une éprouvette cylindrique (L,R) est amarrée par des mors à deux arbres, un est fixe et l'autre est entraîné à vitesse constante. Le moteur d'entraînement permet d'effectuer des tests à différentes vitesses. La zone d'essai de l'éprouvette est portée à la température d'essai.

On mesure :

- le nombre de tours N effectués à l'instant de la rupture,
- la vitesse angulaire $\dot{\theta}$,
- le couple instantané C,
- la température T (essai effectué en conditions isothermes).

Ce test est bien adapté (figure 2) pour la caractérisation du comportement viscoplastique des matériaux, il permet d'atteindre de grandes valeurs de déformation avant rupture et il autorise une variation aisée de la vitesse de déformation.

Indications :

⇒ les composantes du vecteur vitesse de déplacement du point M sont :

$$u_{\bar{x}} = 0 ; u_{\bar{y}} = r\dot{\phi}z ; u_{\bar{z}} = 0 ;$$

avec $\dot{\phi} = \frac{\dot{\theta}}{L}$ vitesse angulaire unitaire et $\phi = \frac{\theta}{L}$ angle de torsion unitaire.

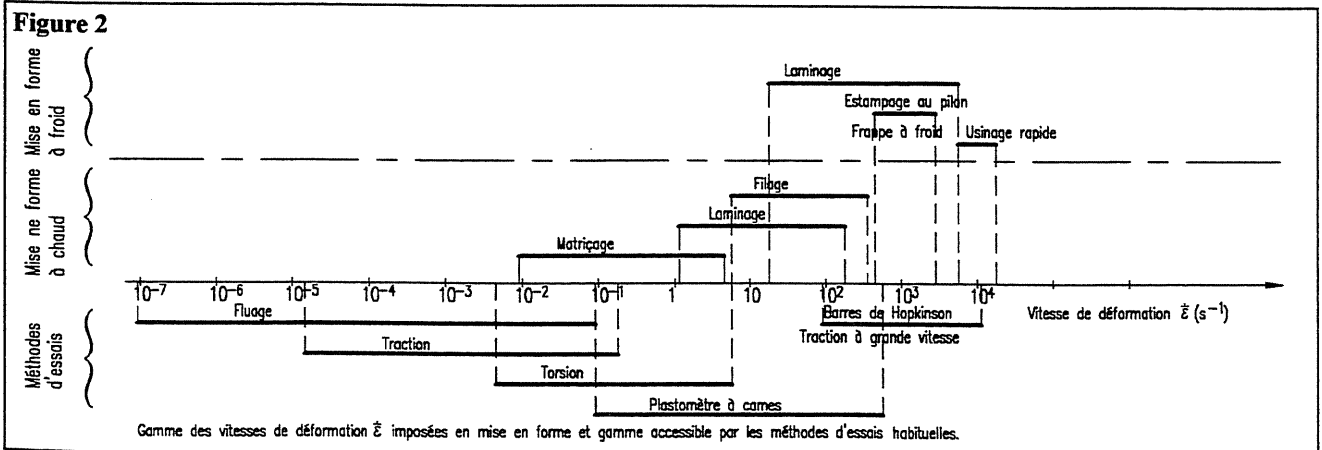
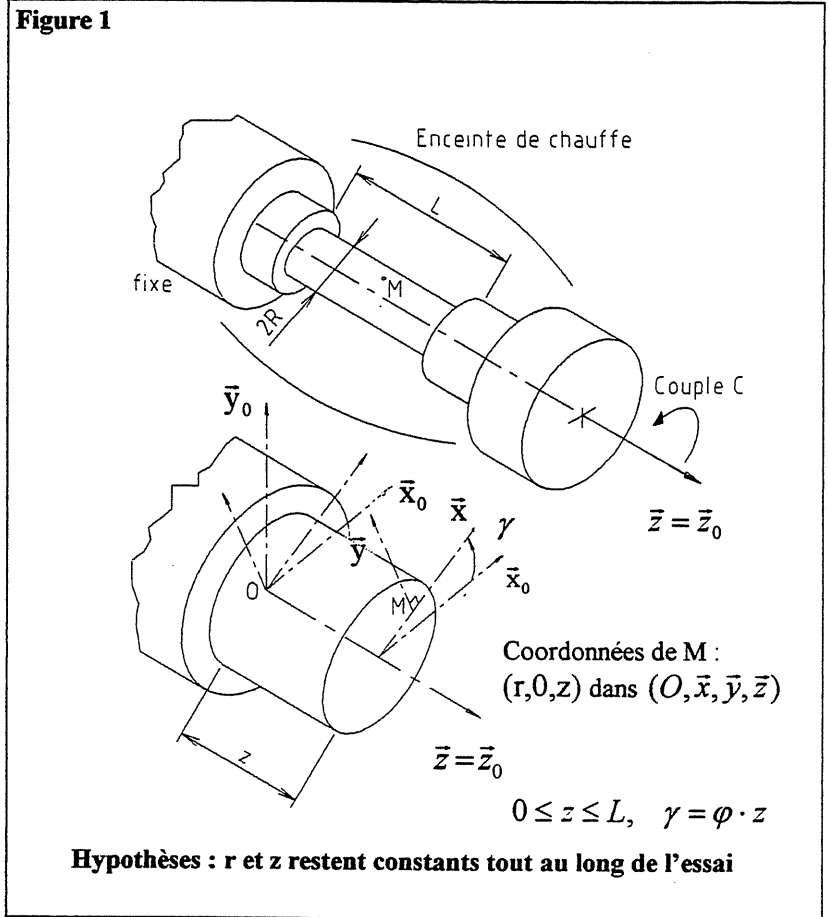
⇒ la contrainte tangentielle en M est reliée à σ_0 (seuil d'écoulement) par le critère de plasticité,

elle dépend de $\dot{\bar{\epsilon}}$ et de $\bar{\epsilon}$

$$\frac{d\tau(r)}{dr} = \frac{\partial \tau}{\partial \bar{\epsilon}} \times \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} \times \frac{\partial \dot{\bar{\epsilon}}}{\partial r}$$

⇒ le critère de plasticité, pour les conditions de l'essai, donne au point M : $\sigma_{0(r)} = \sqrt{3} \tau(r)$

à la périphérie $\sigma_{0(R)} = \sqrt{3} \tau_{(R)}$ (Von Misès)



Modèle de comportement du matériau retenu dans le logiciel de simulation.

Loi de NORTON-HOFF
(comportement viscoplastique tridimensionnel)

⇒ La contrainte d'écoulement σ_0 dépend de la vitesse de déformation.

$$\sigma_0 = (\sqrt{3})^{m+1} K (\dot{\bar{\epsilon}})^m \quad ; \quad K = \frac{\sigma_0}{(\sqrt{3})^{m+1} (\dot{\bar{\epsilon}})^m}$$

avec : **K** : consistance du matériau, la valeur de K dépend de m.
m : coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation.

⇒ Le logiciel utilise aussi la loi d'ajustement de la consistance K en fonction de n (sensibilité à l'érouissage) et β (coefficient de correction en température).

$$K_{(T, \bar{\epsilon})} = K_0 (\bar{\epsilon} + \bar{\epsilon}_0)^n e^{\frac{\beta}{T}}$$

⇒ Le tenseur des vitesses de déformation est défini par :

$$[\dot{\epsilon}] = [\dot{\epsilon}_{ij}] \text{ avec } \dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad ; \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad ; \quad u_{\bar{x}} = \frac{dU_{\bar{x}}}{dt} \text{ noté } u \quad ; \quad V_{\bar{y}} \text{ selon } \bar{y} \text{ et } W_{\bar{z}} \text{ selon } \bar{z}$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \dot{\epsilon}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad ; \quad \dot{\epsilon}_{yz} = \dot{\epsilon}_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad ; \quad \dot{\epsilon}_{zx} = \dot{\epsilon}_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad ;$$

⇒ Rappel : lois de comportement unidimensionnel

Dans le cas d'un matériau isotrope obéissant par exemple au critère de von Misès, on appelle loi de comportement la relation existant entre la contrainte d'écoulement σ , la vitesse et la quantité de déformation.

Ces deux paramètres sont définis par les grandeurs : $\dot{\bar{\epsilon}}(t) = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ et $\bar{\epsilon} = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}}(t) dt$ appelées

respectivement *vitesse de déformation généralisée* et *déformation généralisée*.

⇒ Cas de la traction uniaxiale d'une éprouvette d'axe $0, \bar{z}$:

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{V_T}{L} \quad (V_T : \text{vitesse de traction, } L : \text{longueur de l'éprouvette})$$

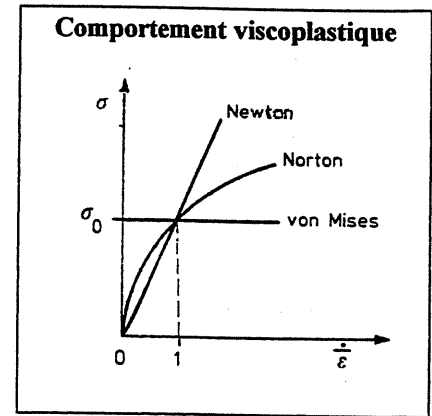
le tenseur des vitesses de déformation s'écrit $[\dot{\epsilon}] =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{V_T}{2L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{V_T}{2L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{V_T}{L} \end{bmatrix}$$

d'où $\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(2 \frac{V_T^2}{4L^2} + \frac{V_T^2}{L^2} \right)} = \frac{V_T}{L}$ et $\bar{\epsilon} = \int_0^t \frac{V_T}{L} dt = \int_0^t \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$, L_0 longueur initiale de

l'éprouvette.

On retrouve les définitions usuelles de la vitesse de déformation et de la déformation rationnelles en traction, ce qui justifie l'introduction du facteur 2/3 dans la définition de $\dot{\bar{\epsilon}}$. La relation $\sigma = \bar{f}(\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon})$ peut être déterminée par différents essais de laboratoire : traction, compression, torsion,...



Machine d'essai : entraînement par moteur à courant continu et réducteur avec asservissement de vitesse

Plage de vitesses : 10^{-3} à 1500 tr/mn

Couple maximal : 50 Nm

Four à induction hautes fréquences pour les essais à chaud :

1300°C max. dont la vitesse maximale de montée en température est de 1000°C/mn

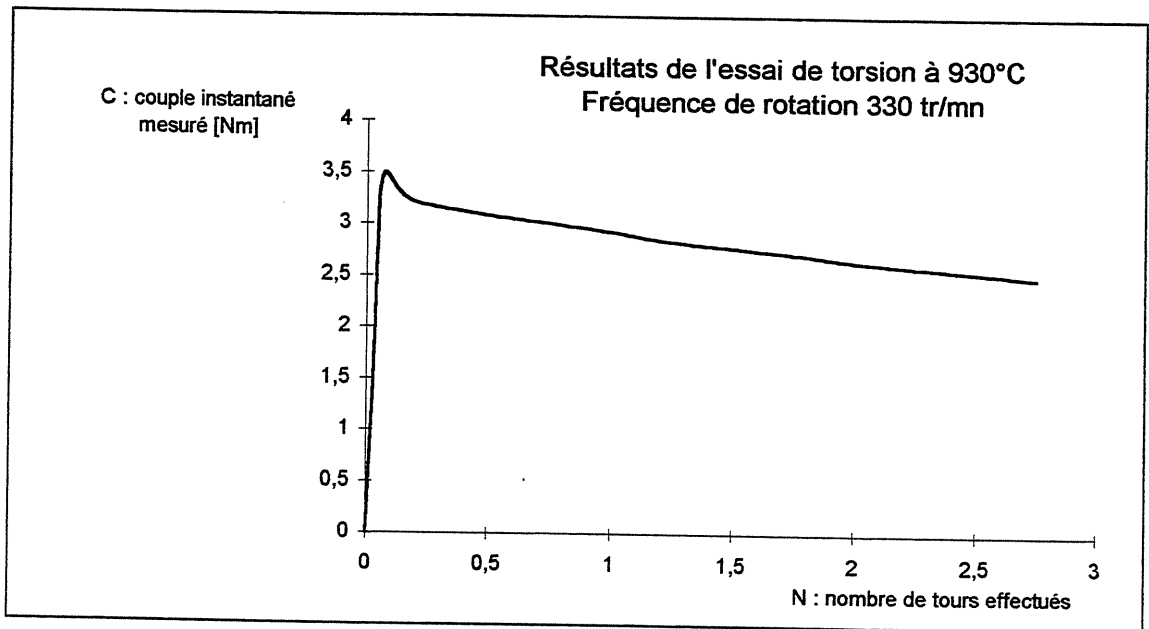
Écart de température toléré ΔT : $\pm 1\%$ de la température de l'essai

Matière éprouvette : TiAl6V état recuit, structure équiaxe de type $\alpha + \beta$ homogène

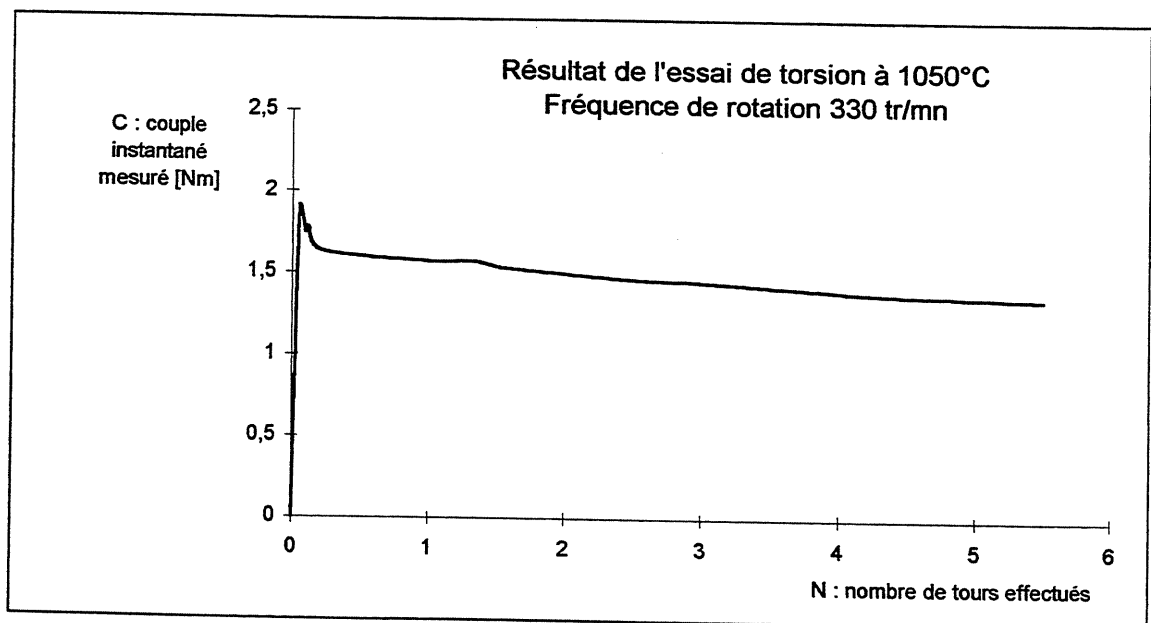
Éprouvette : dimensions de la zone utile [L = 15 mm ; R = 3 mm]

L'éprouvette est placée dans un tube de quartz, elle est protégée par une circulation de gaz argon haute pureté.

Conditions d'essai : domaine de déformation ($\alpha + \beta$)



Conditions d'essai : domaine de déformation (β)



Dépouillement des essais :

le couple maximal enregistré est à prendre en compte pour la détermination de la consistance K

Hypothèses :

- le matériau est homogène et isotrope
- toute la zone utile de l'éprouvette est plastifiée
- la déformation est uniforme dans l'éprouvette
- les sections transversales restent droites
- pour la vitesse de déformation retenue le phénomène de recristallisation dynamique reste très faible

Simulation de l'obtention « directe » du brut en une opération unique
- limitée à la partie axisymétrique de la pièce -

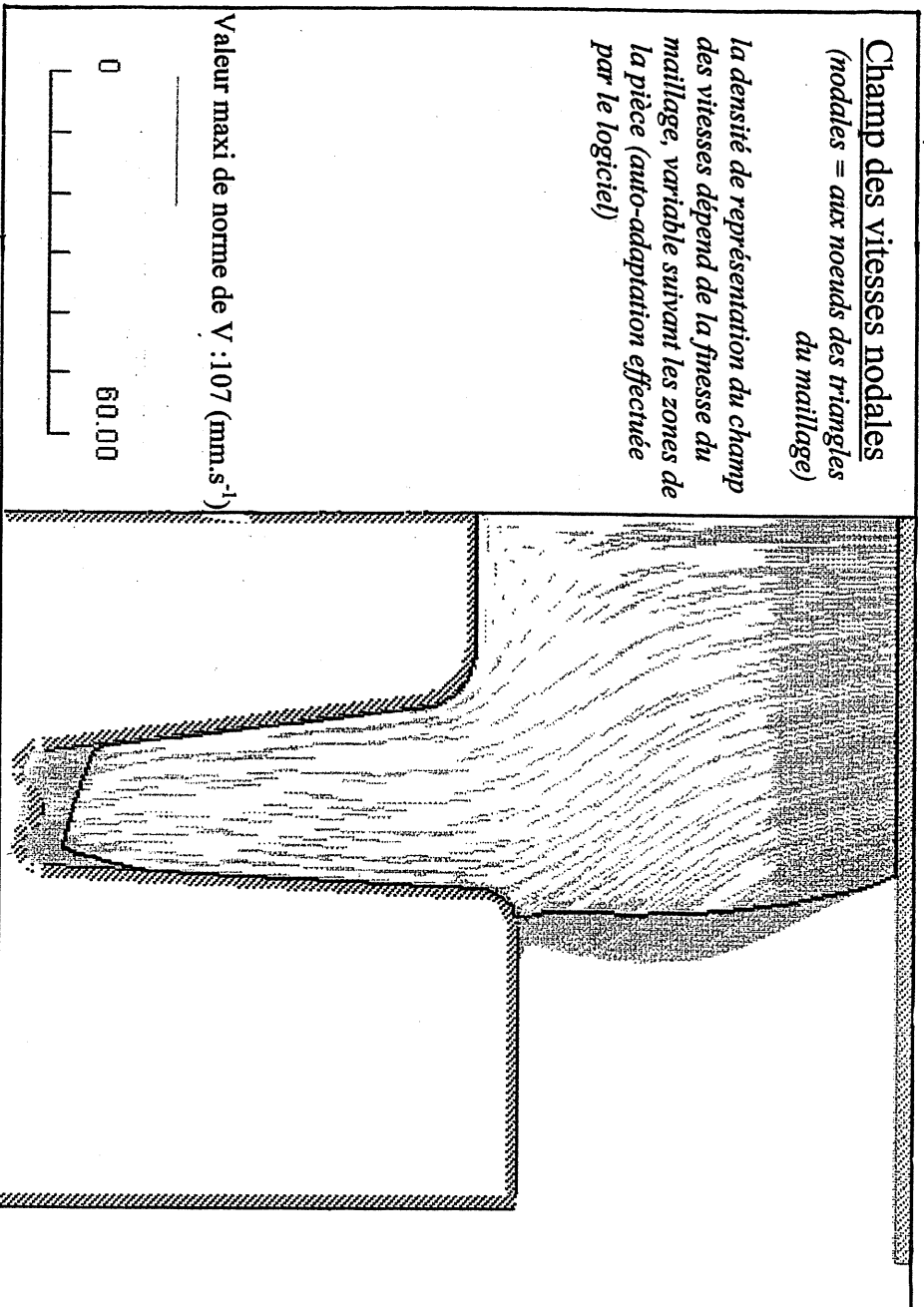
Document réponse partie A - **DRA1**

INTERPRETATION DES RESULTATS

Les représentations ci-dessous correspondent à une distance entre matrices de $h = 70\text{mm}$

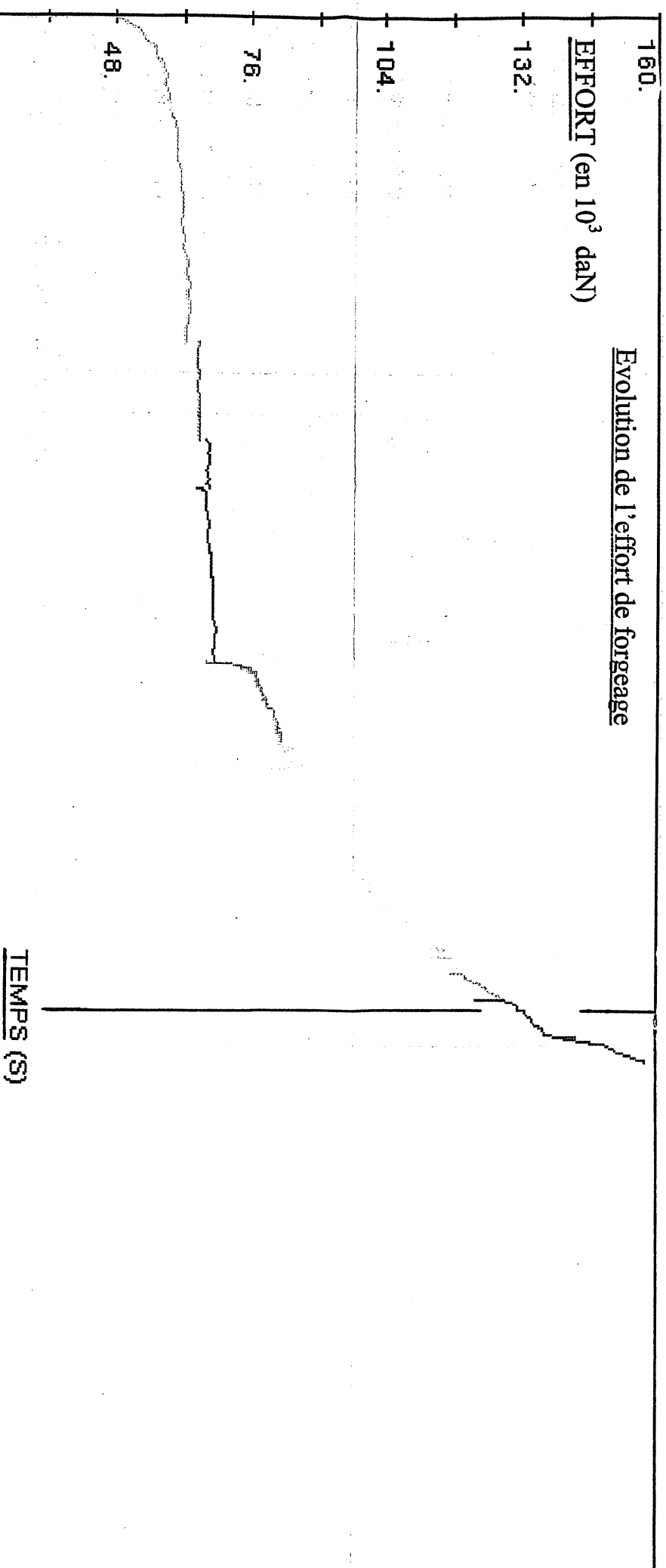
Champ des vitesses nodales
(nodales = aux noeuds des triangles du maillage)

La densité de représentation du champ des vitesses dépend de la finesse du maillage, variable suivant les zones de la pièce (auto-adaptation effectuée par le logiciel)

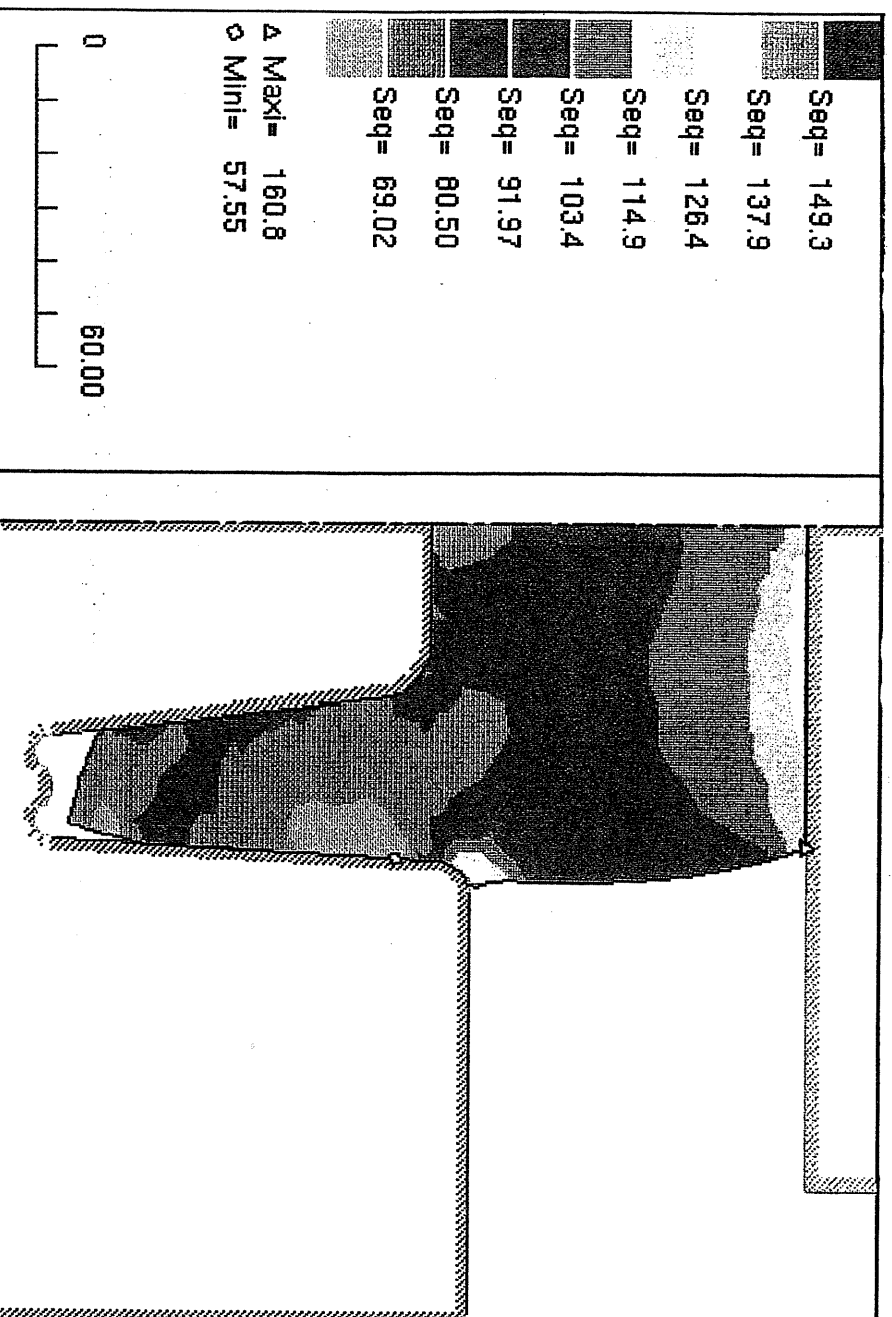


- Conditions retenues pour la simulation:
- lopin de départ $\varnothing 100$, longueur 184, matière TA6V
 - température pièce $T = 930^\circ\text{C}$.
 - température outillage $T_{\text{out}} = 350^\circ\text{C}$
 - vitesse relative des matrices $V_{\text{out}} = 100\text{mm.s}^{-1}$

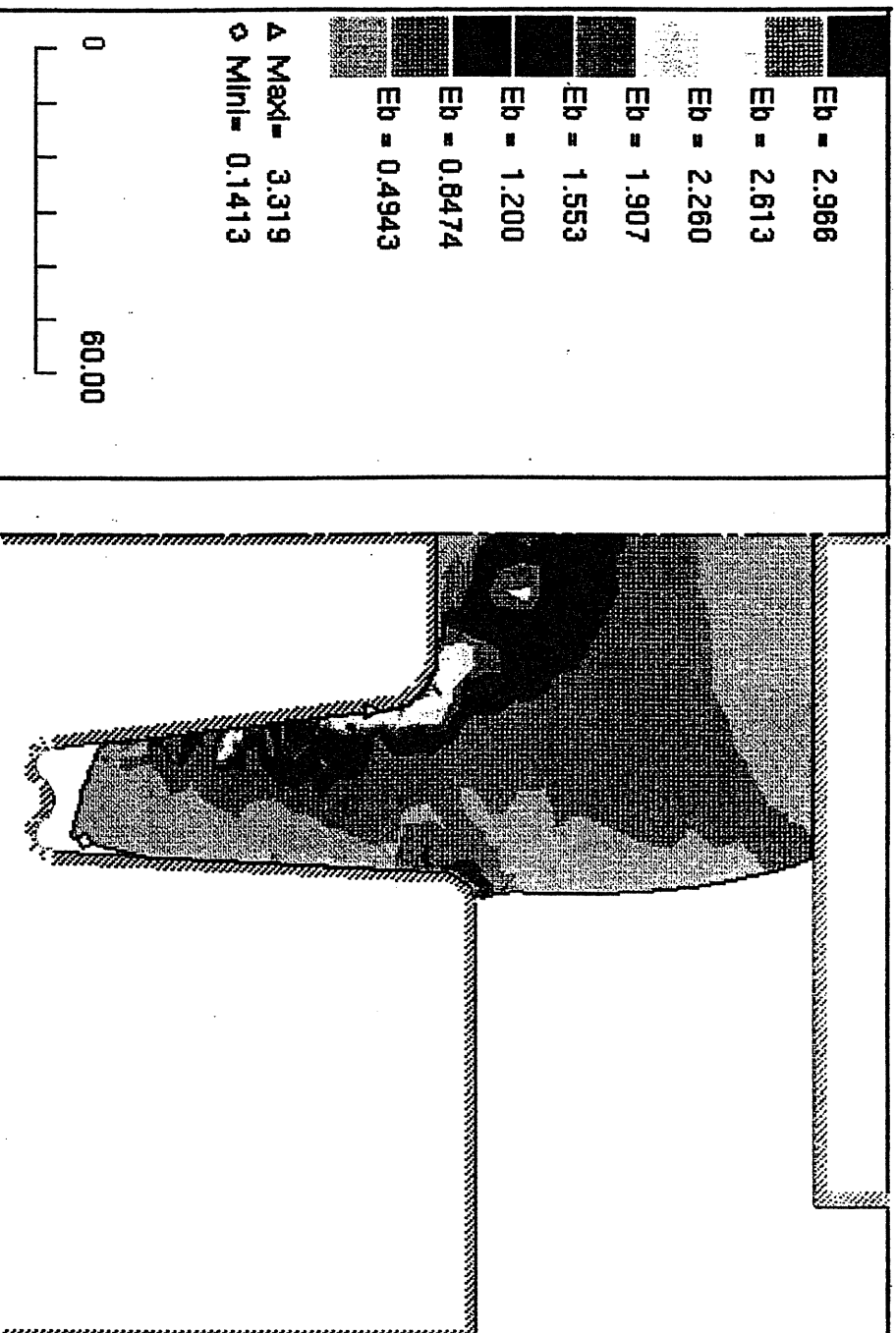
Evolution de l'effort de forgeage



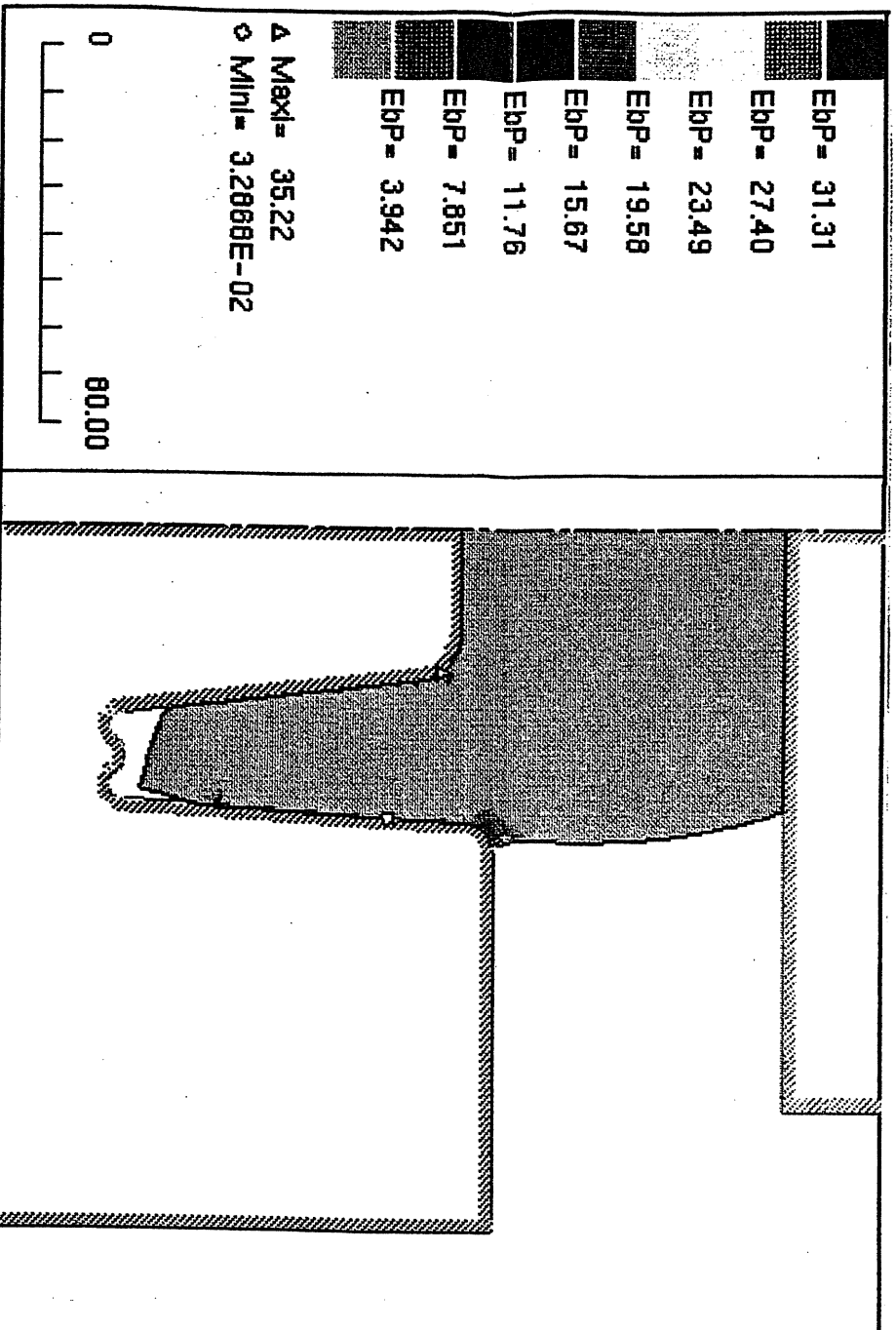
Répartition des contraintes équivalentes (σ_{eq} notée ici S_{eq} exprimée en Mpa)



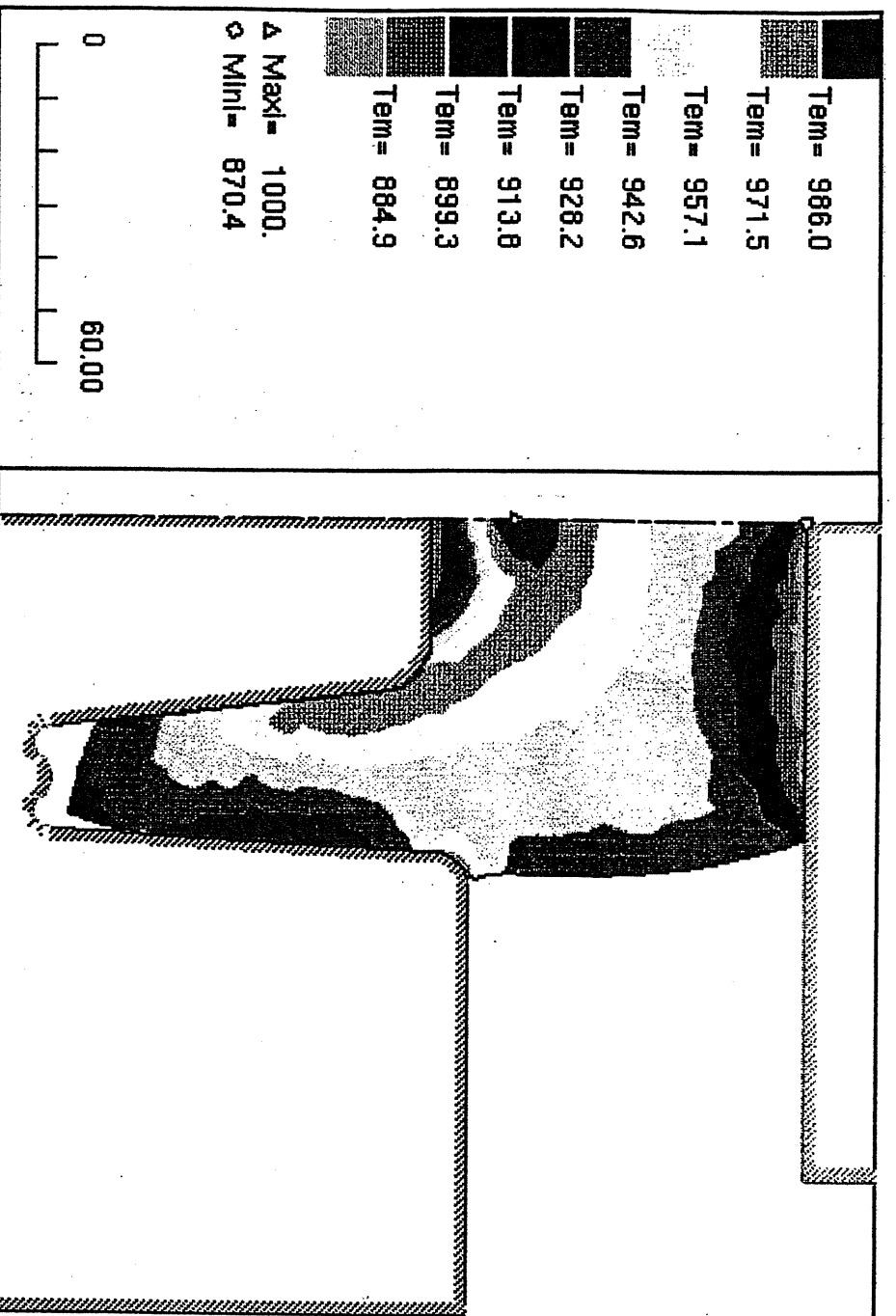
Répartition de la déformation généralisée ($\bar{\epsilon}$ notée ici E_b exprimée sans unité)



Répartition de la vitesse de déformation généralisée ($\dot{\bar{\epsilon}}$ notée ici E_{bp} exprimée en S^{-1})



Répartition de température (T notée ici T_{em} exprimée en °C)



Les représentations ci-dessous correspondent à une distance entre matrices de $h = 70\text{mm}$

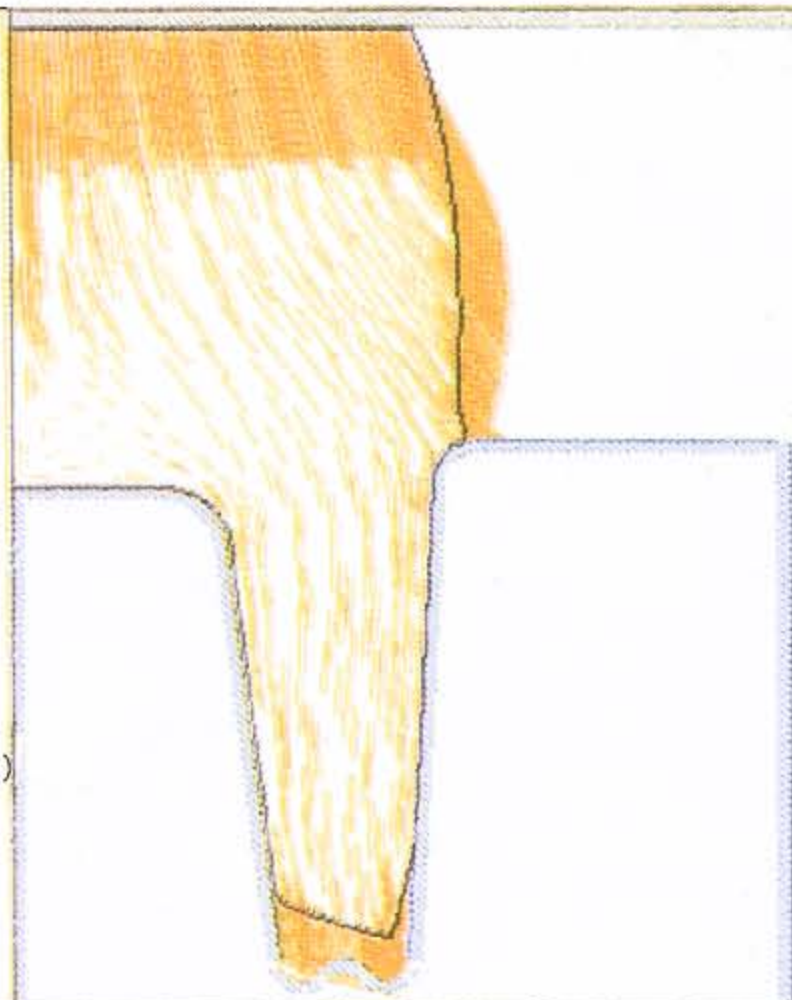
INTERPRETATION DES RESULTATS

Champ des vitesses nodales

(nodales = aux noeuds des triangles du maillage)

la densité de représentation du champ des vitesses dépend de la finesse du maillage, variable suivant les zones de la pièce (auto-adaptation effectuée par le logiciel)

Valeur maxi de norme de V : 107 (mm.s⁻¹)



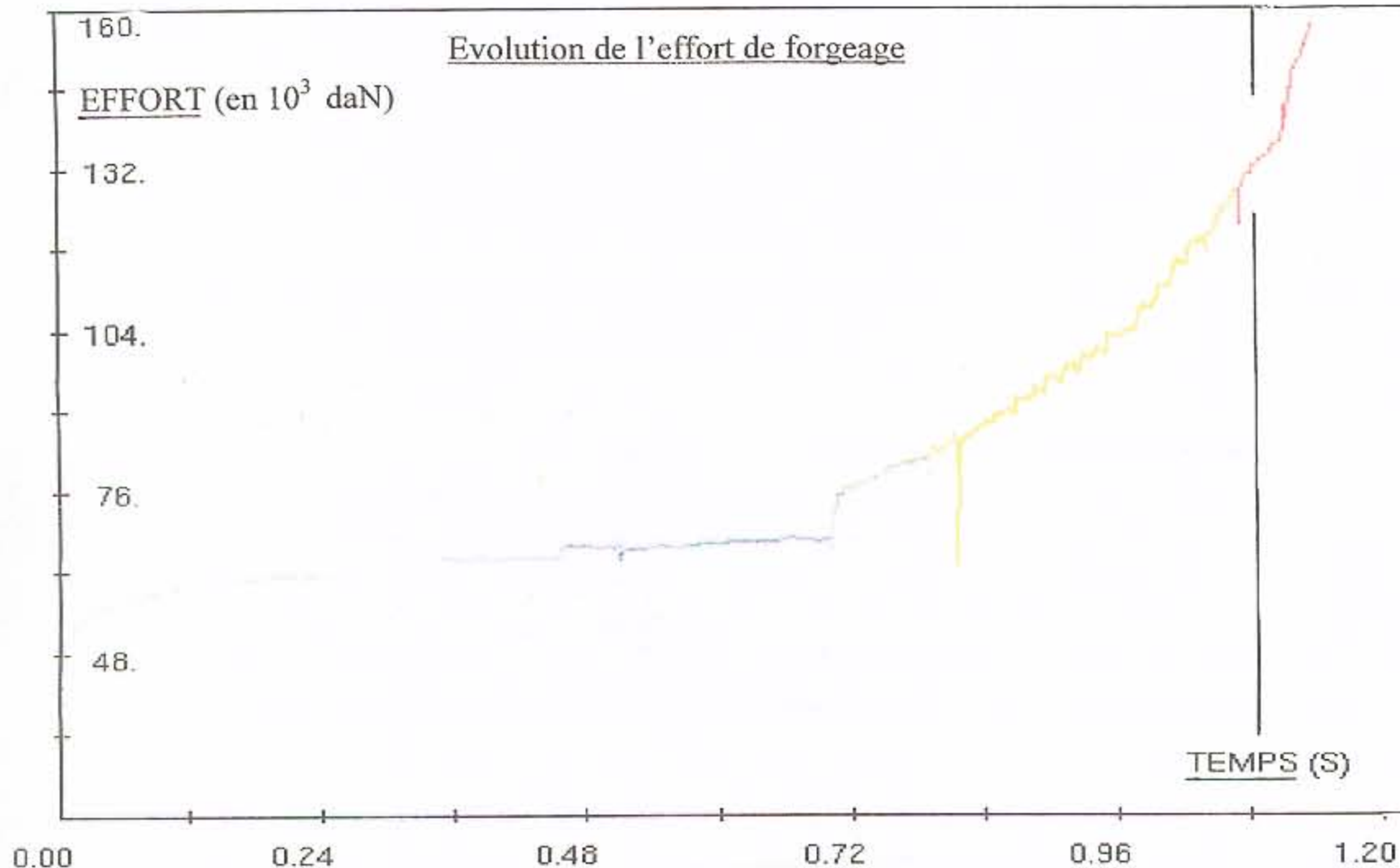
Conditions retenues pour la simulation:

- lopin de départ $\varnothing 100$, longueur 184, matière TA6V
- température pièce $T = 930^\circ\text{C}$
- température outillage $T_{out} = 350^\circ\text{C}$
- vitesse relative des matrices $V_{out} = 100\text{mm.s}^{-1}$

Evolution de l'effort de forgeage

EFFORT (en 10³ daN)

TEMPS (S)

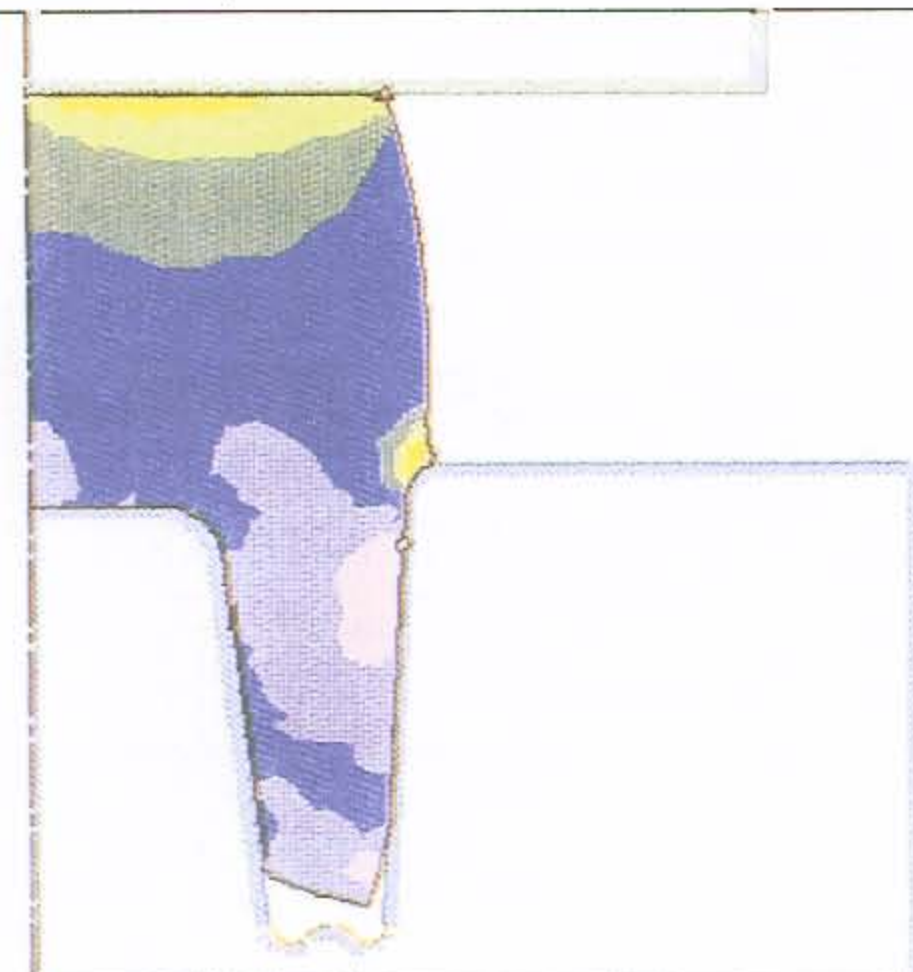


Répartition des contraintes équivalentes (σ_{eq} notée ici S_{eq} exprimée en Mpa)

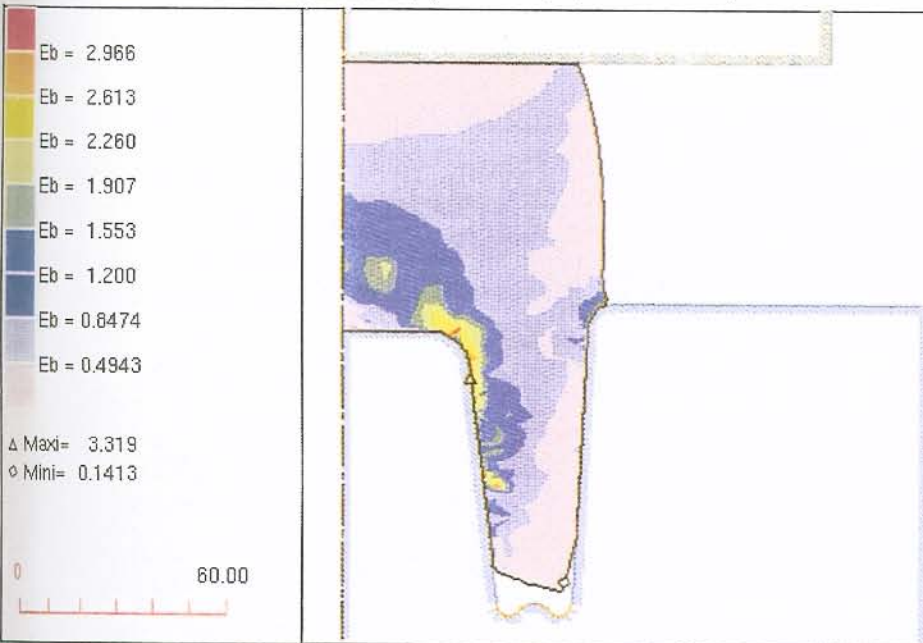
- Seq= 149.3
- Seq= 137.9
- Seq= 126.4
- Seq= 114.9
- Seq= 103.4
- Seq= 91.97
- Seq= 80.50
- Seq= 69.02

Δ Maxi= 160.8
 \circ Mini= 57.55

0 60.00



Répartition de la déformation généralisée ($\bar{\epsilon}$ notée ici E_b , exprimée sans unité)



Répartition de la vitesse de déformation généralisée ($\dot{\bar{\epsilon}}$ notée ici E_{bP} , exprimée en S^{-1})



Répartition de température (T notée ici T_{em} , exprimée en $^{\circ}C$)

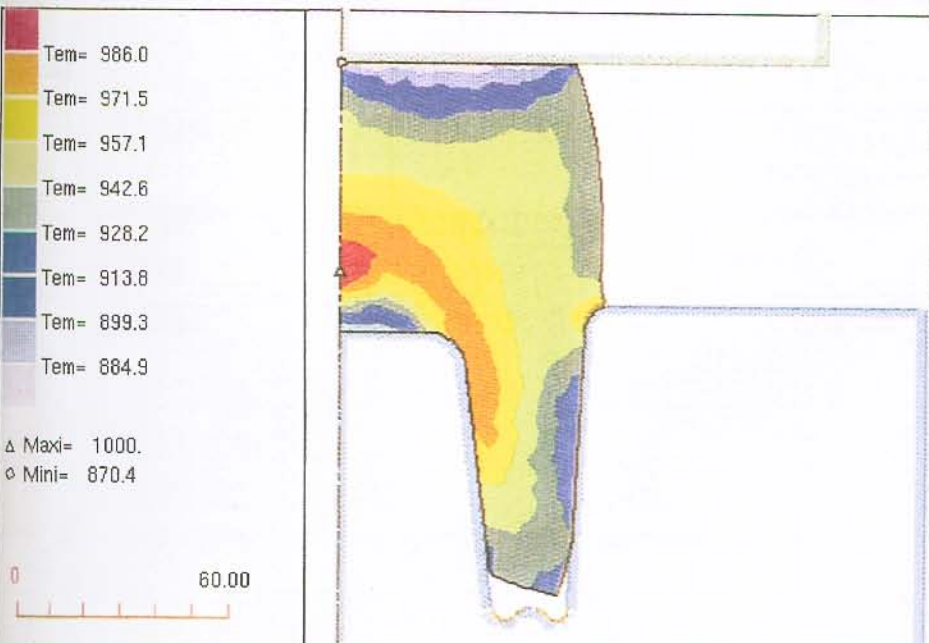


figure 1

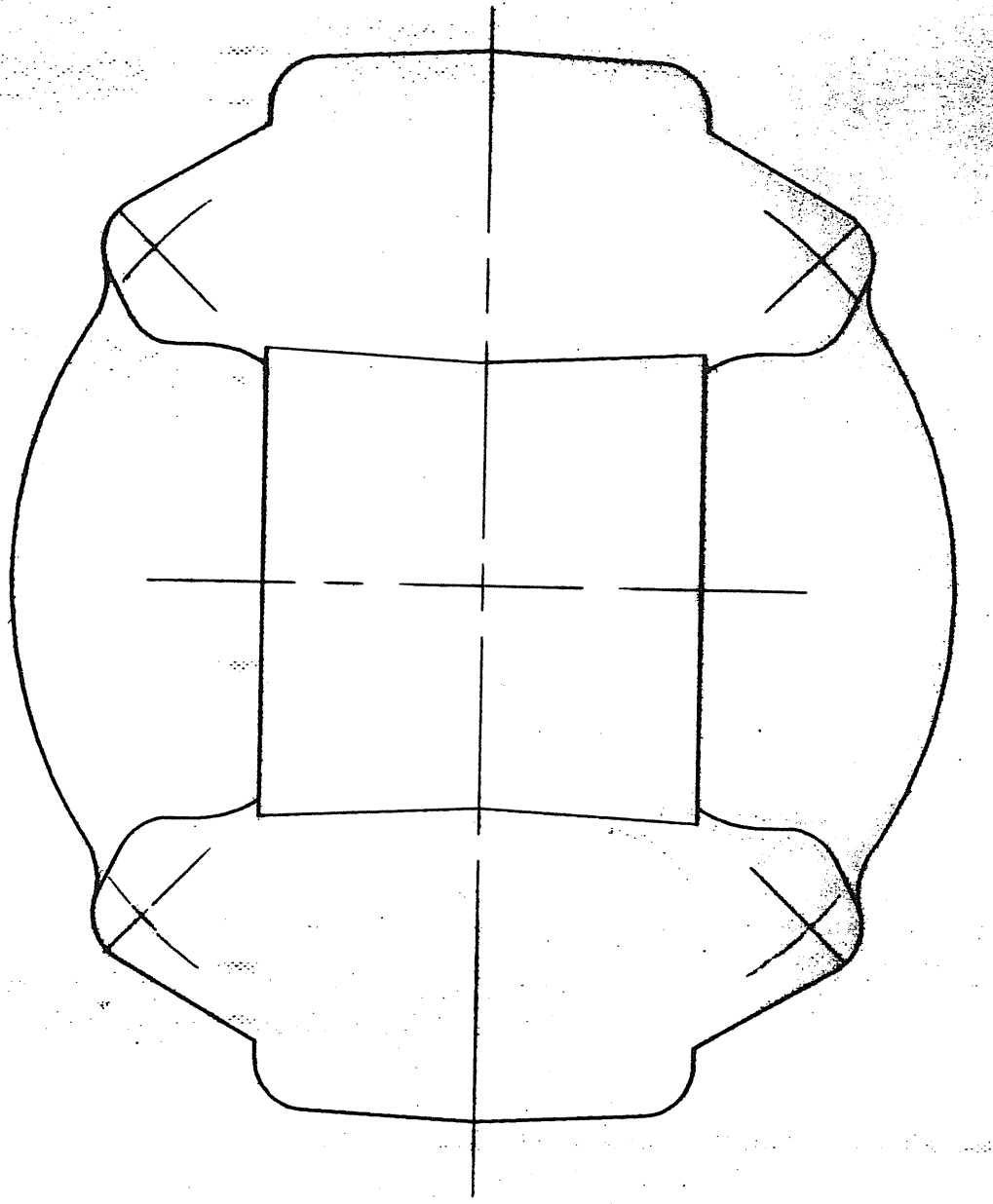
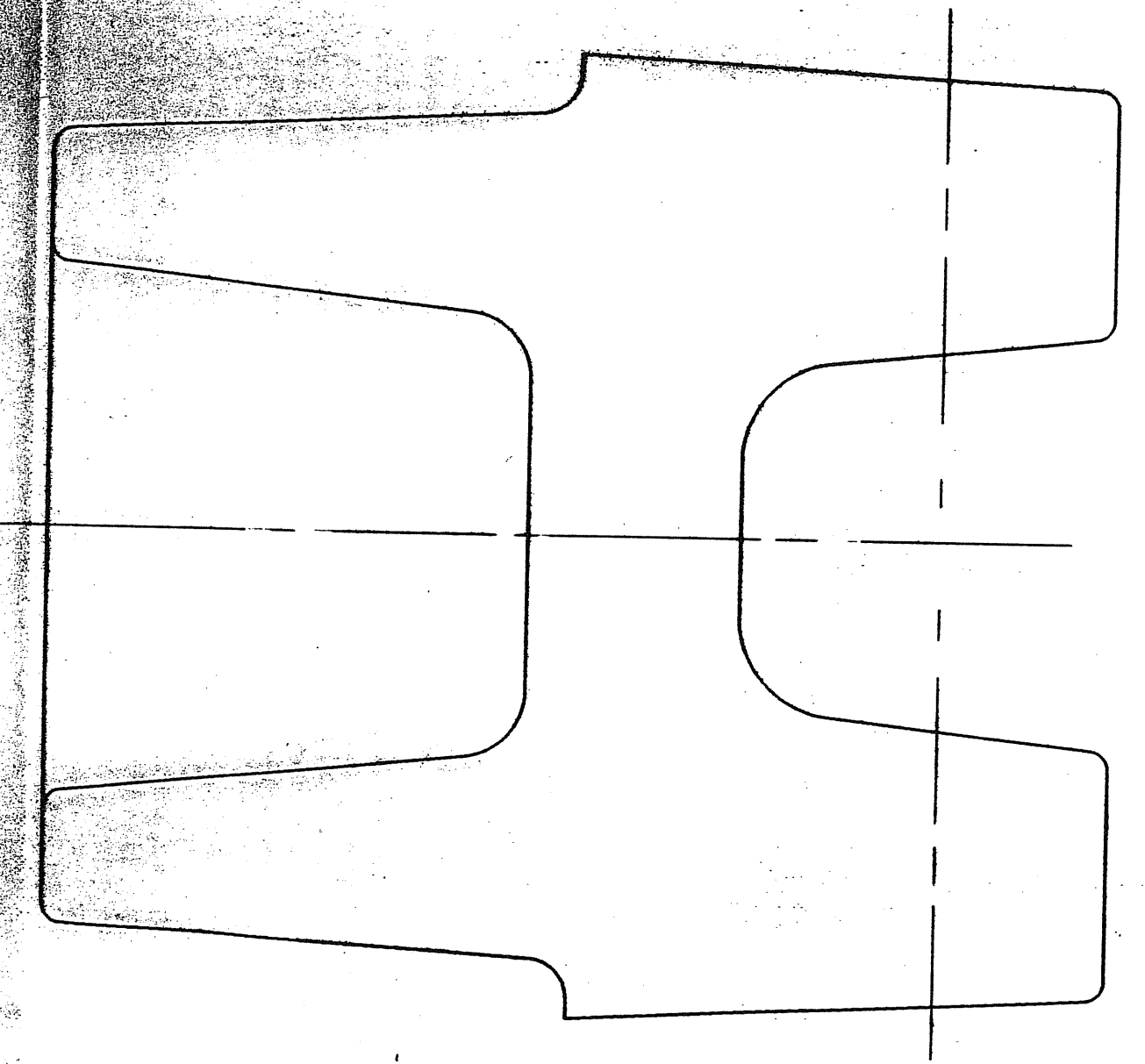
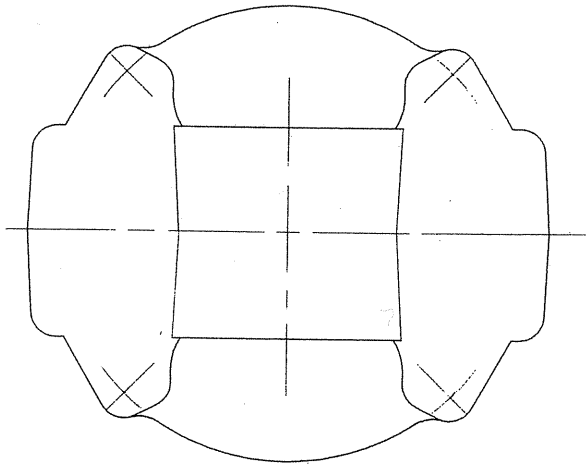
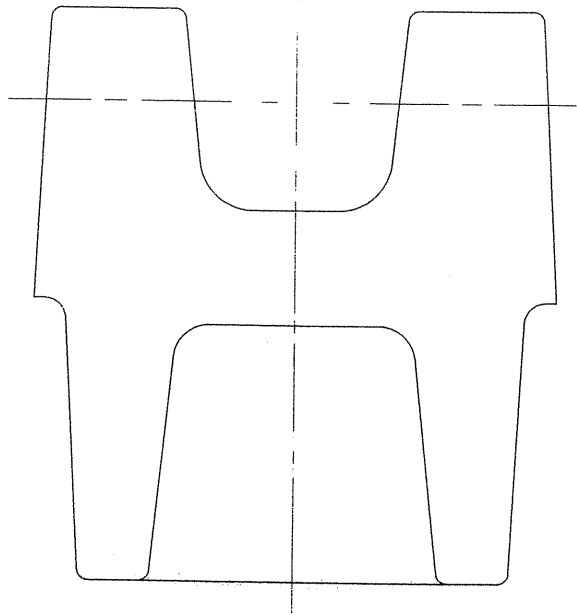


figure 2

figure 1

figure 2



PARTIE B

ÉTUDE DU PROCESSUS DE FABRICATION

Cette chemise comprend :

Texte du sujet (pages de 1/3 à 3/3).

Documents Techniques à utiliser en partie B

DTB1: Présentation du foret type 3/4.

DTB2: Présentation du capteur d'effort de coupe.

Documents réponses partie B

DRB1 : Positionnement en phase 20

DRB2 : Dessin d'un porte-pièce

DRB3 : Comparaison de deux procédés d'alésage phase 60

PARTIE B - TEXTE DU SUJET - Page 1/3

QB1 - Synthèse du processus associé à l'obtention des surfaces A, B et filetage M90x200

(Réponse sur document DRB1)

Le document 4 montre que les surfaces A, B et filetage M90x200 sont :

- ébauchées en début de processus de fabrication (phase 30)
- utilisées comme surface de mise en position en phases (50,60,70)
- finies en phase 80.

Justifier le choix de ce processus.

QB2 - Étude de la mise en position en première phase d'usinage

(Réponse sur document réponse DRB1)

Définir la mise en position pièce en 1^{ère} phase d'usinage tournage (phase 20).

Pour cela :

- Symboliser les éléments de mise en position en précisant les degrés de mobilités supprimés (figure 1),
- Effectuer un croquis représentant les éléments utilisés pour matérialiser la mise et le maintien en position (figure 2),
- Préciser le mode opératoire à suivre pour installer le porte-pièce sur la machine et la pièce sur le porte-pièce.

NOTA : la solution retenue devra permettre le respect du positionnement relatif des surfaces usinées par rapport aux surfaces brutes selon la spécification du dessin de définition. Il n'est pas demandé de calcul justificatif.

QB3 - Étude de l'organisation de la phase 60Conception d'un porte-pièce *(Réponse sur document réponse calque DRB2)*

Effectuer le dessin d'un montage porte-pièce permettant de matérialiser la mise en position et le maintien en position retenus en phase 60 sous-phase 1 (voir DOCUMENT 4 Nomenclature des phases). (Dessin effectué au crayon et aux instruments, à l'échelle 1:1)

Faire apparaître :

- les surfaces de liaison pièce / porte-pièce,
- les surfaces de liaison porte-pièce / machine,
- les surfaces de référence éventuelles sur le porte-pièce,
- la cotation d'aptitude à l'emploi,
- une nomenclature succincte indiquant les caractéristiques requises ainsi que les matériaux et traitements éventuels retenus pour les pièces principales.

Tournez la page S.V.P.

QB4 - Étude de l'obtention des alésages de diamètre 25,4 H8 en phase 60.

(Réponse sur document réponse DRB3)

On envisagera successivement l'obtention de ces alésages par les 2 procédés suivants :

- Procédé 1 :
- usinage du premier côté ($\varnothing C$)
 - rotation plateau
 - usinage du deuxième côté ($\varnothing D$)

- Procédé 2 :
- usinage des alésages ($\varnothing C$ et $\varnothing D$) en ligne.

QB41 - Proposer pour chaque procédé une démarche permettant de satisfaire les spécifications dimensionnelles et géométriques relatives aux alésages $\varnothing 25,4$ H8.

On précisera par des explications et des croquis de mise en situation :

- les opérations d'installation du porte-pièce étudié en QB3 sur la machine (prise d'origine, prise de référence,...).
- les opérations d'usinage en précisant les outils et trajectoires associées.

QB42 - Recenser pour chaque procédé les causes d'écarts sur le positionnement relatif des quatre alésages $\varnothing 25,4$ entre-eux.

Nota : le contrôle des spécifications relatives à ces alésages sera abordé dans la partie C du sujet.

QB5 - Étude de l'obtention des 3 trous $\varnothing 6$ H8.

Le procédé retenu pour réaliser ces perçages profonds fait appel au foret type 3/4 présenté dans le Document DTB1. Ces usinages sont effectués en phase 50 sur centre de fraisage alésage CN à broche horizontale. Le centrage du foret sera assuré par un "trou pilote" réalisé dans la même phase.

QB51 - Analyse de la technique retenue

(Réponse sur copie)

Définir les facteurs conditionnant la qualité du trou obtenu avec cette technique.

On précisera pour cela les opérations élémentaires associées à la réalisation des "trous pilotes" et des trous profonds (déplacements, changements d'outils,...)

QB52 - Détermination et choix des conditions de coupe pour le foret type 3/4

(Réponse sur copie)

Le contrôle de la vitesse d'avance pendant l'opération de perçage au foret type 3/4 est assuré par adjonction d'un capteur des actions mécaniques de coupe intégré au porte-outil, défini sur le document DTB2.

Le liquide de coupe est injecté au travers du corps du foret par l'intermédiaire d'un dispositif d'alimentation avec joint tournant intégré également au porte-outil.

QB521 - À partir des renseignements donnés sur DTB1 déterminer pour l'opération effectuée :

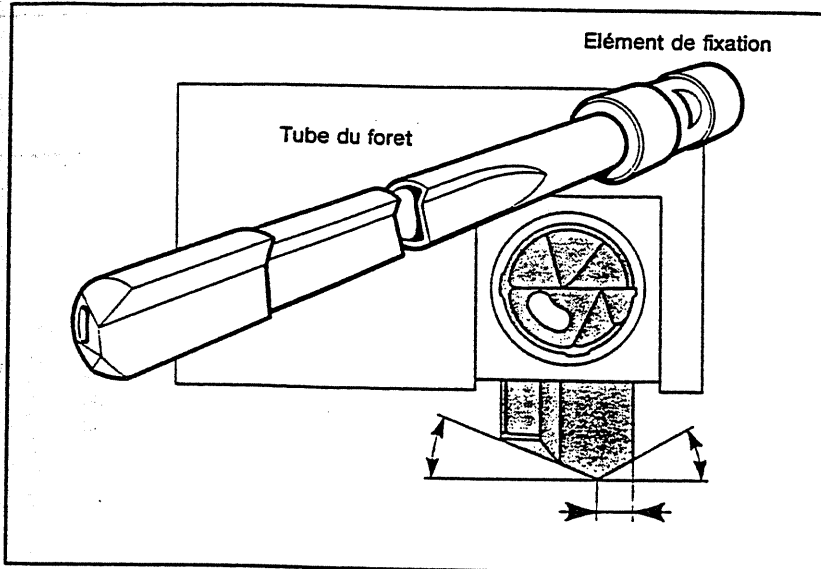
- l'angle de coupe normal γ_n
- l'angle de direction d'arête κ_r
- la largeur de coupe a_p
- les conditions de lubrification : (nature du lubrifiant, pression, débit, dispositif de lubrification associé).

QB522 - Sachant que : $V_c = 25$ m/min, $f = 0,02$ mm/tr, $k_{c0,4} = 3000$ MPa (3 fois R_r)

Déterminer l'effort de pénétration global axial F_{ga} afin de pouvoir fixer une valeur de consigne sur le moniteur du contrôleur d'effort.

QB523 - Proposer un schéma de la chaîne d'acquisition et de transmission du signal et expliquer le mode de raccordement au directeur de commande numérique.

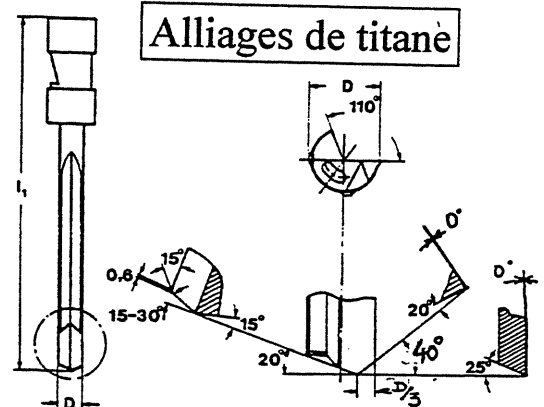
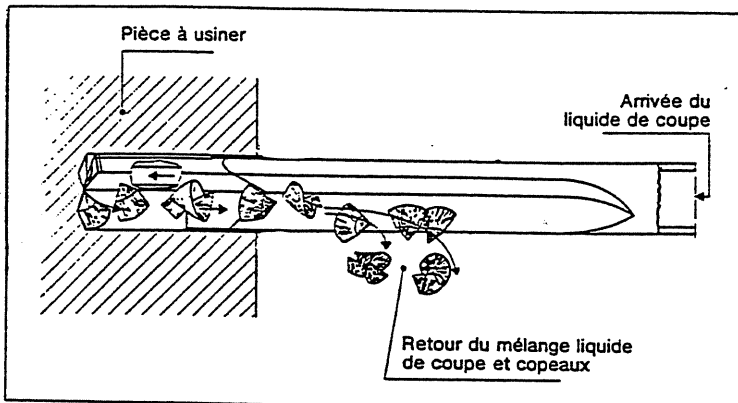
QB524 - Indiquer les risques particuliers associés à un mauvais contrôle éventuel de l'avance dans cette opération compte tenu de la technique employée et du matériau de la pièce.



Forets 3/4

Les forets 3/4 SANDVIK COROMANT couvrent la plage de diamètres 3 à 20 mm. Ces outils permettent d'obtenir des tolérances et un fini de surface d'une qualité telle qu'un usinage de finition, sous la forme d'un réalésage, n'est normalement pas nécessaire.

Le foret 3/4 se compose d'un embout carbure monobloc à une seule lèvre, d'un tube et d'un porte-foret. L'embout brasé sur le tube, comporte un orifice pour l'alimentation du liquide de coupe. L'évacuation des copeaux se fait via la rainure en V à 110° située sur le tube. Le tube porte-embout est disponible en différentes longueurs et comporte le même type de rainure en V que l'embout carbure monobloc. Ces forets sont rectifiés sur le diamètre selon une tolérance ISO h5, ce qui, pour les plus grands diamètres, donne une tolérance de +0.000 -0.005 mm. La conicité du foret sur l'arrière est d'environ 0.006 mm/10 mm, ce qui procure une dépouille suffisante. Il est parfois recommandé d'avoir une conicité supérieure pour le forage de l'acier inoxydable. Le foret 3/4 est fourni avec ou sans porte-foret. Le porte-foret, qui est brasé sur le tube est disponible en différentes versions. Par le biais d'un adaptateur, le foret 3/4 peut être monté sur des porte-forets non conformes au standard Sandvik. En d'autres termes, le même outil peut être utilisé sur des machines avec montages différents. L'adaptateur n'est pas livré avec l'outil standard mais peut être commandé séparément.



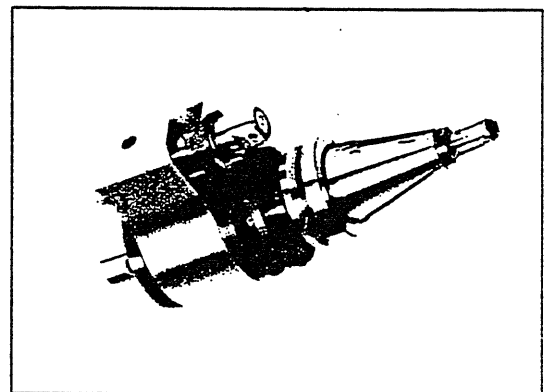
Alliages de titane

Avantages

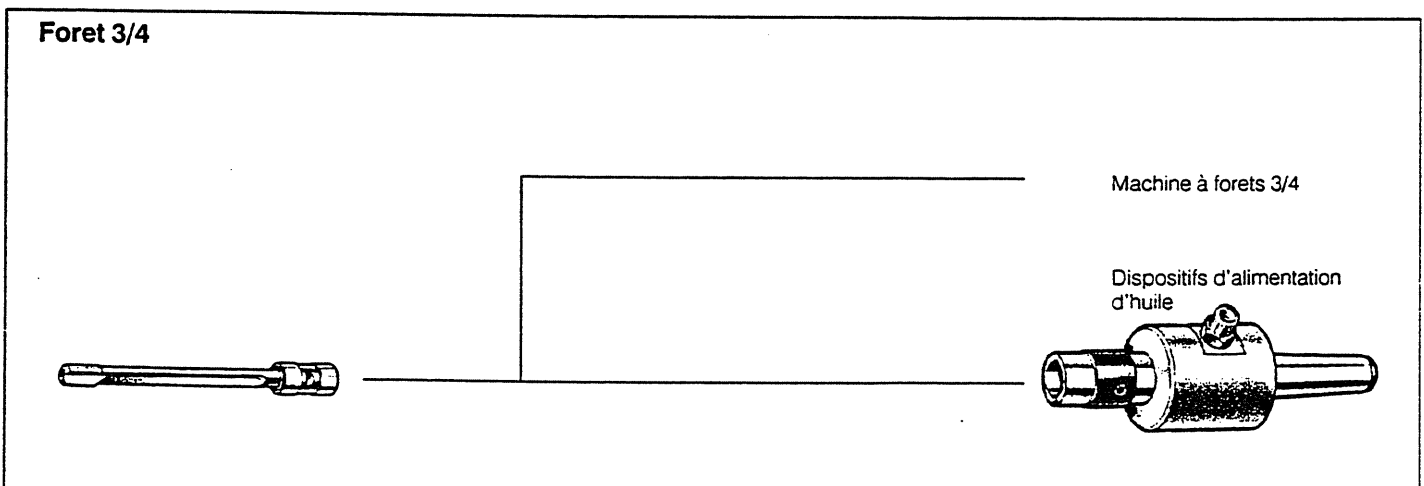
- Outil économique pour le forage de précision de trous de faible diamètre.
- Obtention de bons états de surface et de tolérances serrées, ce qui élimine la nécessité d'opérations de finition.
- Convient au forage de trous courts ou longs.
- Convient pour forage de trous profonds sur C.U.
- Utile lorsque la rupture des copeaux présente des problèmes.

Caractéristique

- Une nuance carbure peut être recommandée selon la matière à forer.



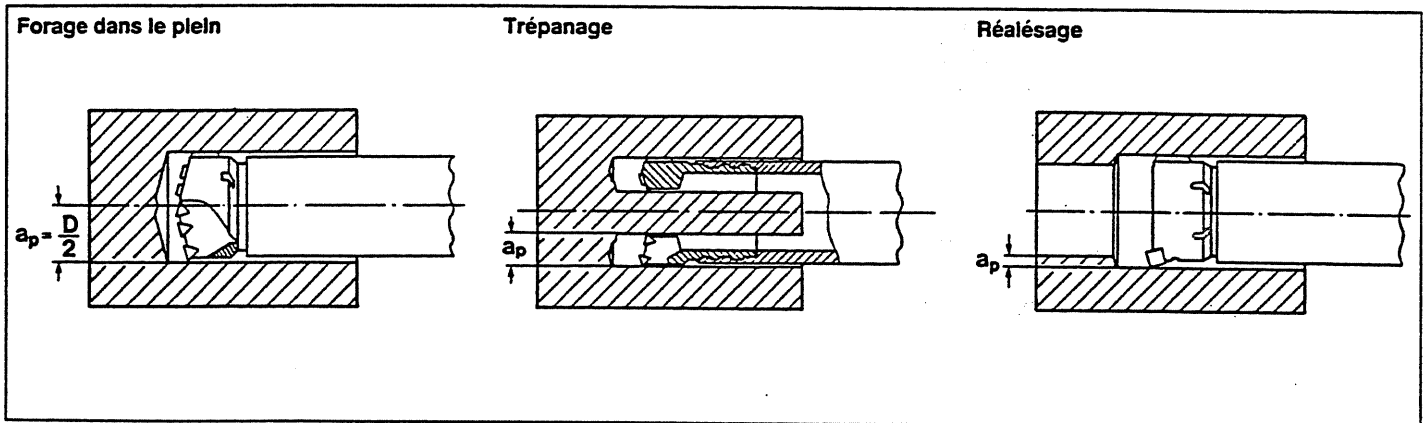
Dispositif d'alimentation d'huile de foret 3/4 pour changement d'outil automatique



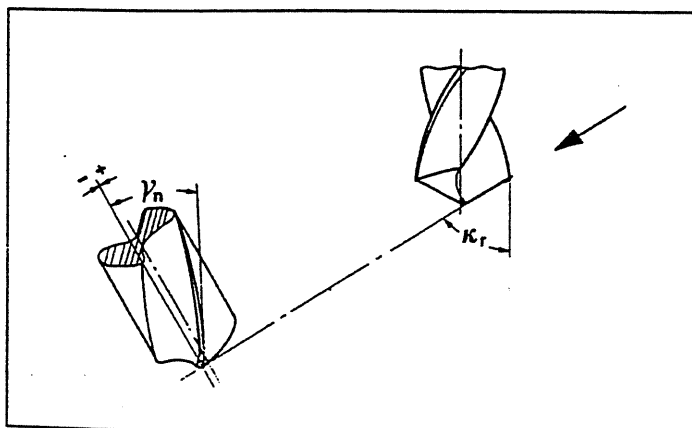
Symboles et formules relatifs au forage

Symbole ISO	Ancien symbole	Signification	Unité
V_c	v	Vitesse de coupe	m/min
n	n	Vitesse de broche	tr/min
D	D	Diamètre de forage	mm
v_f	s'	Vitesse d'avance	mm/min
f	s	Avance par tour	mm/tr
f_z	s_z	Avance par dent	mm/z
k_c	k_s	Force de coupe spécifique	N/mm ²
$k_{c0.4}$	$k_{s0.4}$	Force de coupe spécifique pour $f_z = 0,4$	N/mm ²
k_{cfz}	k_{sm}	Force de coupe spécifique corrigée	N/mm ²
F_f	-	Force d'avance	N
$F_f \mu$	-	Force d'avance due au frottement	N
M_c	-	Couple	Nm
$M \mu$	-	Couple dû au frottement	Nm
P_c	P	Puissance nette (puissance de coupe)	kW
$P \mu$	-	Puissance due au frottement	kW
a_p	a	Profondeur de coupe	mm
κ_r	-	Angle de l'arête de coupe de l'outil	Degrés
γ_n	-	Angle de coupe normal de l'outil	Degrés
q	Q	Débit de liquide de coupe	l/min
p	p	Pression du liquide de coupe	Mpa

Profondeur de coupe, a_p




Angle de l'arête de coupe de l'outil, κ_r
 Angle de coupe normal de l'outil, γ_n



Force de coupe spécifique corrigée, k_{cfz}

$$k_{cfz} = k_{c0.4} \left(\frac{0,4}{f_z \times \sin \kappa_r} \right)^{0.29} \times \left(1 + \frac{6 - (\pm \gamma_n)}{100} \right)$$

Forets avec ételles de guidage	
	 Forets 3/4
Vitesse de coupe	$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$ m/min
Vitesse d'avance	$v_f = f \times n$ mm/min
Force d'avance¹⁾	$F_t + F_{t\mu} = 0,65 \times a_p \times f \times k_{ctz} \times \sin \kappa_r$ (N)
Couple¹⁾	$M_c + M_{\mu} = \frac{D \times f \times k_{ctz} \times a_p}{2000} \left(1,17 - \frac{a_p}{D} \right)$ (Nm)
Puissance nette¹⁾	$P_c + P_{\mu} = \frac{a_p \times f \times k_{ctz} \times v_c}{60 \times 10^3} \left(1,17 - \frac{a_p}{D} \right)$ kW

P_c = Puissance nette en kW

P_{μ} = Force de frottement

a_p = Largeur de coupe en mm

f = Avance par tour en mm

k_{ctz} = Force spécifique de coupe en N/mm²

v_c = Vitesse de coupe en m/min

La puissance nécessaire calculée correspond à un outil neuf, sans aucune usure. Pour un outil normalement usé, la puissance nécessaire est 10-30% plus élevée, selon la taille du foret. ¹⁾ Formules ne comprenant pas les valeurs à vide de force d'avance, couple et puissance.

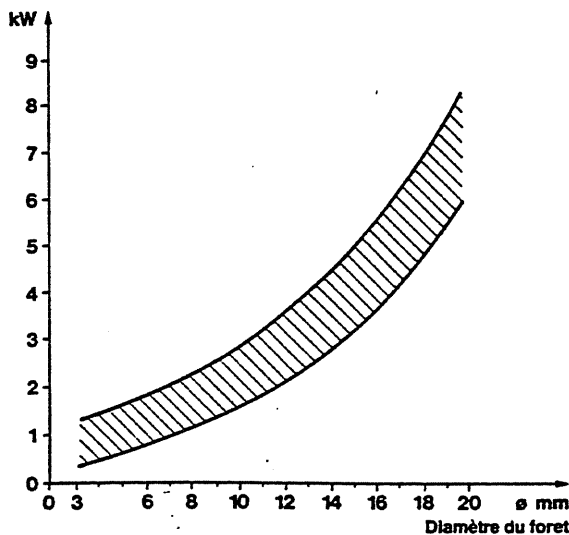
Graphiques des forets 3/4 428.9

Les graphiques présentent des valeurs nominales, qui ne constituent pas des recommandations absolues mais doivent au besoin être adaptées en fonction des conditions d'usinage, par exemple de la matière à forer.

Les puissances indiquées sont des puissances nettes. N'oubliez pas de tenir compte du rendement de la machine et de l'usure de l'arête de coupe.

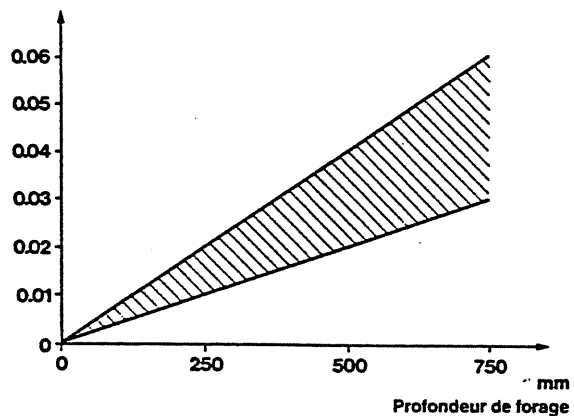
Puissance nette

$$P_c + P_{\mu} = \frac{a_p \times f \times k_{ctz} \times v_c}{60 \times 10^3} \left(1,17 - \frac{a_p}{D} \right) \text{ kW}$$

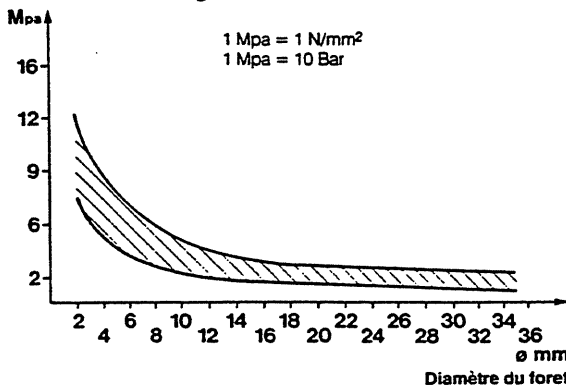


Rectitude du forage

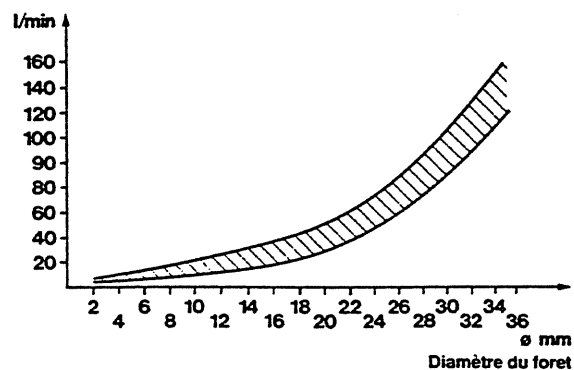
Rectitude, mm



Pression d'arrosage



Débit d'arrosage



Présentation du capteur d'effort de coupe

IntelliTool est un investissement rentable permettant d'augmenter la sécurité d'usinage et de réduire les coûts de production en

- surveillant les opérations critiques telles que perçage, taraudage, etc.
- évitant les bris d'outils coûteux
- réduisant les temps-morts
- diminuant les risques d'endommagement de la pièce et les retouches éventuelles

IntelliTool permet de surveiller individuellement n'importe quelle opération d'usinage préalablement sélectionnée. Quelques semaines suffisent généralement à amortir votre investissement.

IntelliTool fait appel aux avantages bien connus de la technique des jauges de contraintes, à savoir une excellente sensibilité et compensation thermique. La proximité immédiate du capteur par rapport à l'arête de coupe à surveiller procure une excellente précision et une détection presque instantanée des variations d'usinage. En fonction de l'application, IntelliTool surveille la poussée, la force radiale et le couple. Le traitement des signaux de force et de couple est effectué par l'unité de contrôle TM2000.

Ce capteur comporte un préamplificateur intégré et un microprocesseur logés dans l'adaptateur d'outil (voir croquis). Aucune modification de la broche n'est requise.

Les cônes de base Varilock permettent un interfaçage rapide et aisé sur les différents cônes de broche.

Le système comprend :

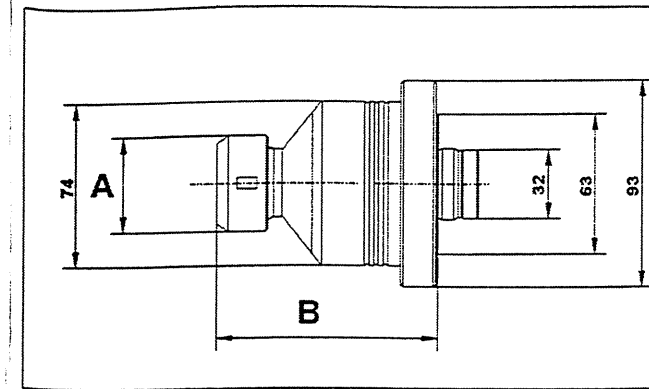
- le porte-outil avec capteur intégré
- la tête de transmission du signal et l'interface
- le moniteur TM2000

Seul le transmetteur fixe doit être monté sur la machine.

INFORMATIONS TECHNIQUES

IntelliTool pour opération de perçage

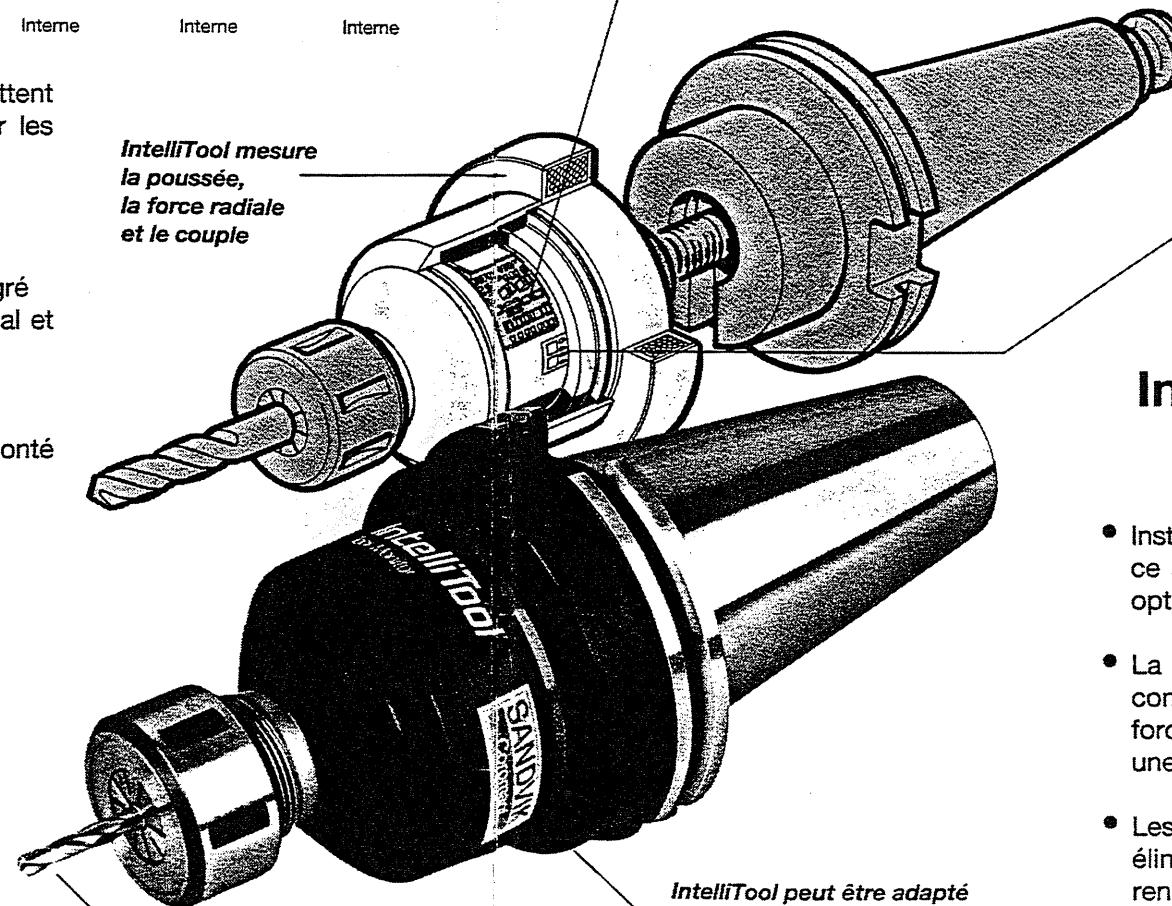
IntelliTool FS5100	Petite Capacité	Moyenne Capacité	Grande Capacité
Taille foret, mm	1 - 6	5 - 16	10 - 25
Gamme de forces			
<i>Nominale:</i> Axiale	5 kN	10 kN	20 kN
Radiale	1 kN	2 kN	4 kN
Couple	100 Nm	100 Nm	200 Nm
<i>Minimale:</i> Axiale	8 N	60 N	120 N
Radiale	10 N	10 N	15 N
Couple	0,4 Nm	0,5 Nm	1,0 Nm
Dimensions, mm	(A) Ø 43 (B) 100	Ø 43 100	Ø 60 115
Poids approximatif	1,7 kg	1,7 kg	2,1 kg
Vitesse max. de la Broche	6000 Tr/min	6000 Tr/min	6000 Tr/min
Accouplement	Varilock Taille 63	Varilock Taille 63	Varilock Taille 63
Mandrin à pinces	Ortlieb Taille 1	Ortlieb Taille 1	Ortlieb Taille 2
Pinces (non fournies avec IntelliTool)	*	*	*
Clé à ergot (non fournie avec IntelliTool)	*	*	*
Lubrification	Interne	Interne	Interne



L'électronique intégrée traite et numérise les signaux du capteur.

IntelliTool mesure la poussée, la force radiale et le couple

Les jauges de contraintes intégrées directement derrière l'outil procurent une excellente précision de contrôle.

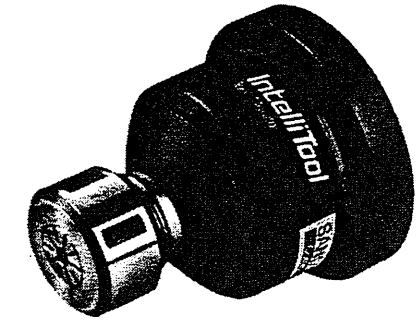


IntelliTool permet la surveillance de perçages à partir d'1 mm de Ø.

IntelliTool peut être adapté pour équiper n'importe quel type de broche machine (avec cônes ISO, DIN, MAS, etc) par l'intermédiaire des cônes de base Varilock correspondants.

Document DTB2

IntelliTool pour opérations de perçage



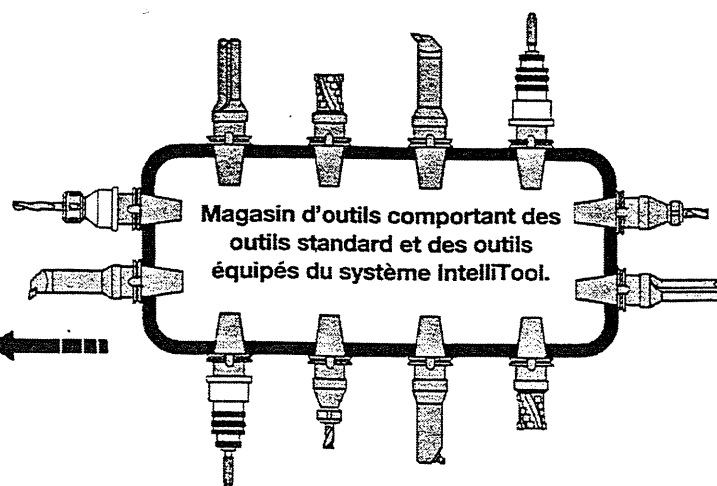
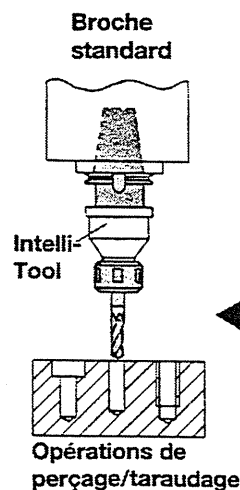
Equippé d'un mandrin à pince Ortlieb, DIN 6388 et d'un accouplement Varilock taille 63.

Références de commande	Plage de surveillance Ø du foret, mm	Taille de pince
391.15FSFA -16 A63 100	2 à 6	1
391.15FSMA -16 A63 100	5 à 16	1
391.15FSRA -25 A63 115	10 à 25	2

IntelliTool pour protection optimale

Principaux avantages :

- Installé directement derrière l'outil, ce système garantit une qualité optimale des signaux.
- La surveillance individuelle ou combinée de la poussée, de la force radiale et du couple offre une excellente flexibilité.
- Les signaux numérisés du capteur éliminent les risques d'interférence provoqués par les copeaux ou le liquide de coupe.
- Programmation de l'armoire machines réduite au minimum grâce à l'identification automatique du capteur.
- Capacité de surveillance : jusqu'à 999 outils ou opérations différents.
- Facilité d'adaptation sur n'importe quel type de machine sans modification de la broche.
- Activation automatique de la surveillance dès qu'un outil IntelliTool est monté sur la broche.



Les outils équipés d'IntelliTool peuvent être stockés dans les magasins avec d'autres outils. La surveillance est activée automatiquement dès qu'un outil IntelliTool est monté sur la broche machine.

Document réponse DRB1

Question QB1 : Analyse du processus associé à l'obtention des surfaces A, B et filetage M90x200

Justifications

Question QB2 : Figure 1 - Étude de la mise en position en phase 20

Analyse de la suppression des degrés de liberté

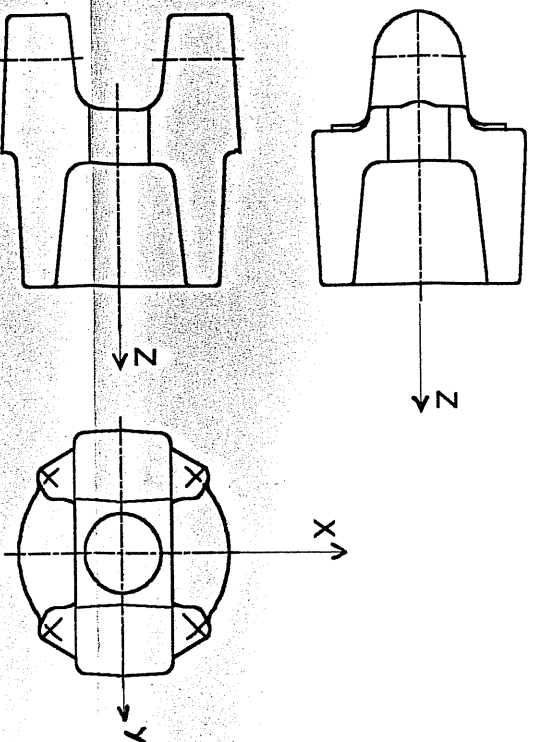


Figure 2 - Croquis représentant les éléments utilisés pour matérialiser la mise et le maintien en position
- (vues en plan ou en perspective au choix)-

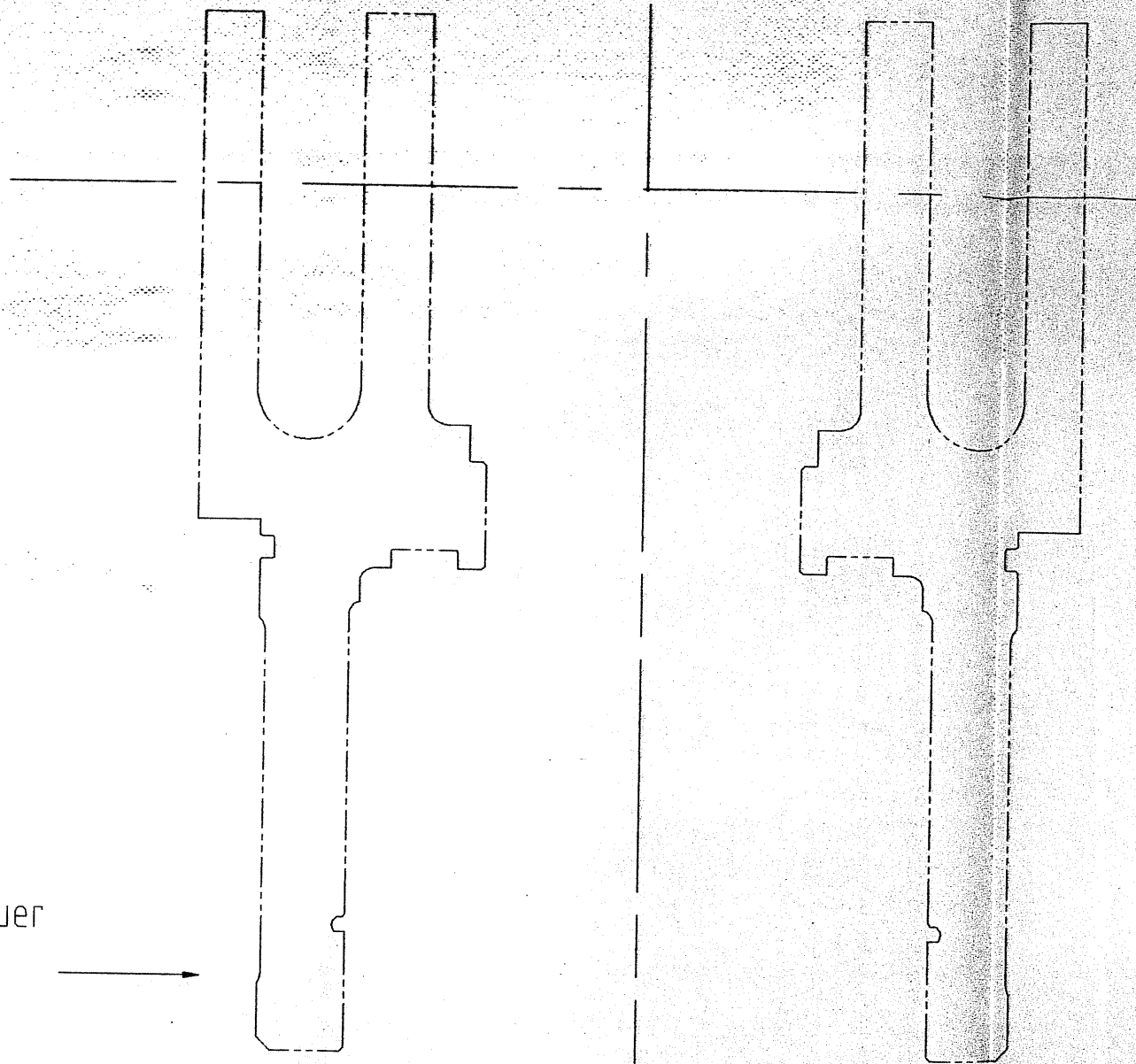
Définition du mode opératoire :

Installation porte-pièce sur machine

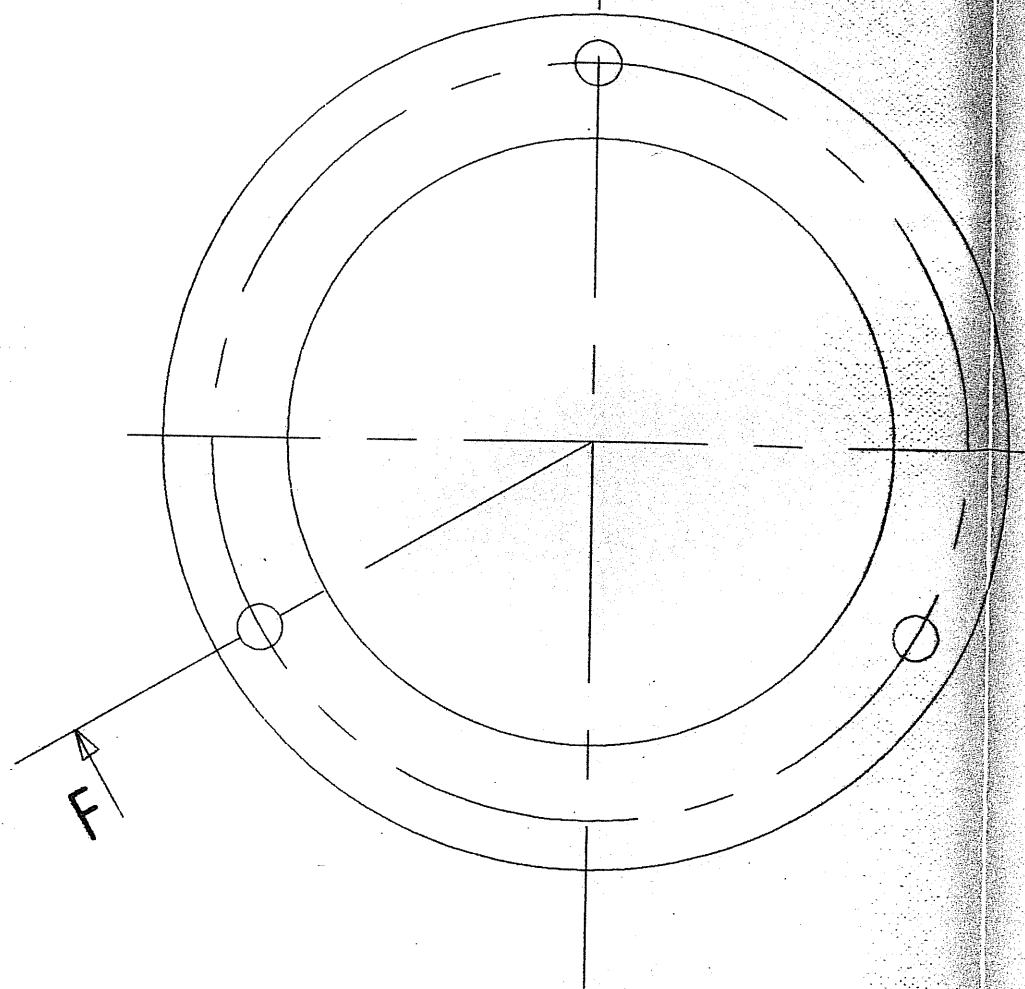
Installation pièce sur porte-pièce

DOCUMENT REPONSE DRB2

Coupe partielle
selon F à effectuer
dans cette zone

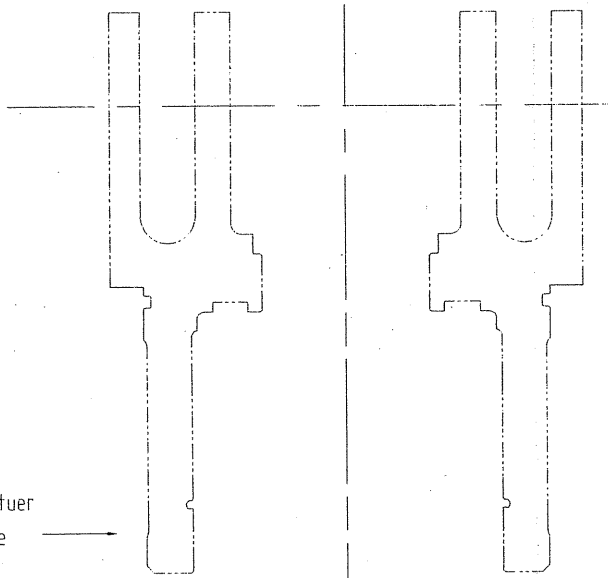


Surface supérieure de la palette
Largeur rainures : 16H7
Espacement : $100 \pm 0,02$
Trou central $\phi 30H6$

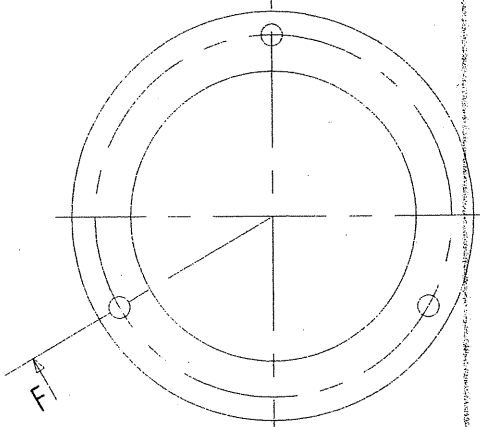


Zone commentaires : Nomenclature partielle

Coupe partielle
selon F à effectuer
dans cette zone

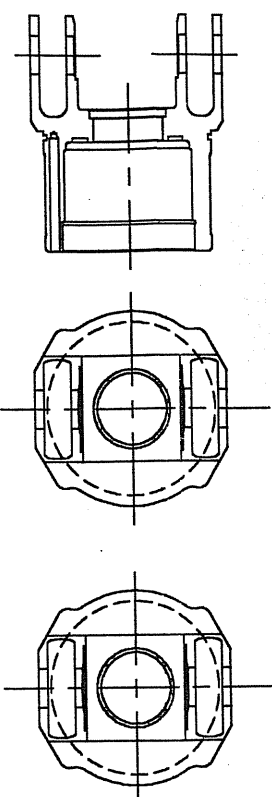
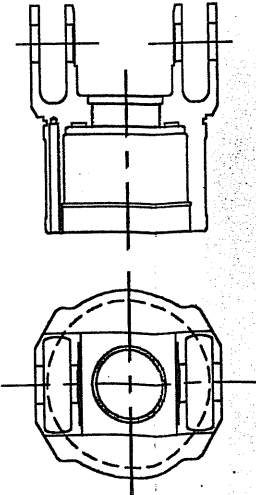


Surface supérieure de la palette
Largeur rainures : 16H7
Espacement : $100 \pm 0,02$
Trou central $\varnothing 30H6$



Zone commentaires Nomenclature partielle

Document réponse DRB3

	<p><u>Opérations :</u> installation du porte-pièce sur la machine</p>	<p><u>Opérations d'usinage</u> conditions de coupe, trajectoires</p>	<p><u>Figures à compléter :</u> Représenter les éléments intervenant dans le positionnement de la pièce et dans la génération des surfaces en faisant apparaître leurs écarts de position et d'orientation relatifs</p>	<p><u>Causes d'écarts géométriques</u> positionnement relatif des 4 alésages entre eux</p>
<p>P R O C É D É 1</p>				
<p>P R O C É D É 2</p>				

PARTIE C

CONTRÔLE DES SPÉCIFICATIONS - MÉTROLOGIE

Cette chemise comprend :

Texte du sujet (pages 1/2 et 2/2).

Documents Techniques à utiliser en partie C

DTC1 : Caractéristiques techniques du robot de mesure.

DTC2 : Mise en situation des opérations de mesurage.

DTC3 : Feuilles de résultats de mesure

Documents réponses partie C

DRC1 : Interprétation des spécifications

DRC2 : Gamme de mesurage (à compléter).

PARTIE C - TEXTE DU SUJET - Page 1/2

Présentation :

On se propose d'étudier le contrôle des caractéristiques géométriques relatives aux alésages $\varnothing 25,4$. Les opérations de mesurage sont effectuées sur robot 4 axes (présenté document DTC1) dans la configuration représentée sur le document DTC2 figure 1.

Les étapes associées aux questions successives correspondent aux maillons du schéma directeur de la classification récente des normes dans le domaine de la Spécification Géométrique des Produits : matrice G.P.S. (Geometrical Product Specification) rappelée ci-dessous.

Elles doivent permettre de vérifier la cohérence entre les spécifications établies et le procédé de mesurage retenu pour la détermination des écarts associés.

Tableau GPS :

Maillon n°	1	2	3	4	5	6
Caractéristique géométrique de l'élément	Indication dans la documentation du produit	Définition des tolérances Valeurs théoriques	Définition des caractéristiques ou paramètres de l'élément réalisé	Évaluation des écarts de la pièce Comparaison avec les limites de la tolérance	Exigences pour l'équipement de mesure	Exigences d'étalonnage Étalons d'étalonnage

Questions :QC1 - Définition des tolérances (maillon numéro 2 - G.P.S.) Réponse sur DRC1

Donner l'interprétation des spécifications relatives aux alésages $\varnothing 25,4$ en complétant les parties concernées du document réponse DRC1.

QC2 - Évaluation des écarts

Réponse sur DRC2 (Recto Verso)

Les document DTC2 et DRC2 présentent la méthode de mesure (incomplète) et donnent les caractéristiques et paramètres des éléments extraits (maillon numéro 3 - G.P.S.)

Le document DTC3 donne des résultats de mesure effectués sur pièce d'essai.

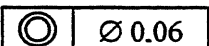
On se propose à partir de cela d'effectuer l'évaluation des écarts suivants : (maillon numéro 4 - G.P.S.)

zone commune

QC21 - Écarts relatifs à la spécification 

- Proposer une détermination des écarts à comparer aux limites de tolérance à partir des opérations déjà effectuées (1 à 18) ou d'opérations complémentaires à définir.

Associer une figure explicative.

QC22 - Écarts relatifs à la spécification 

QC22.1 Définir la suite des opérations à mettre en œuvre pour déterminer les écarts à comparer aux limites de tolérance. Ces opérations devront correspondre à des fonctionnalités logicielles de base (calcul de distance, calcul d'angle, projection, intersection, ...)


Associer figure(s) explicative(s).

QC22.1 (Réponse au verso du document DRC2)

Pour chacune des opérations précédentes définir l'exploitation mathématique des paramètres (points, vecteurs) associés aux différents éléments, effectuée par le logiciel. (donner les expressions littérales sans effectuer de calcul)

QC23 - Écarts relatifs à la spécification $\varnothing 25,4 H8(E)$ (Réponse au verso du document DRC2)

Peut-on vérifier cette spécification à partir des relevés effectués ? (à traiter sur l'élément 3 par exemple) (Explications et figures associées) .

QC3 - Détermination de l'incertitude associée aux résultats de la mesure de l'écart de coaxialité.  $\varnothing 0,06$ (maillon numéro 5 - G.P.S.) (Réponse sur feuille de copie)

QC31 - Définition des principales composantes de l'incertitude

- QC31.1 Identifier, par analyse chronologique du processus de mesure les phénomènes qui peuvent générer des erreurs sur le résultat de mesure (composantes aléatoire et systématique).
- QC31.2 Préciser à ce propos la méthode de repérage de la position relative du palpeur par rapport à l'axe du plateau rotatif.
- QC31.3 Déterminer parmi ces erreurs celles qui sont (ou peuvent être) compensées partiellement et préciser le mode de correction utilisé.

QC32 - Évaluation des composantes principales de l'incertitude

Proposer une évaluation ou une estimation des principales composantes d'incertitude à partir de votre analyse personnelle, des données du document DTC1 et des résultats de mesure du document DTC3.

Nota : On retiendra le classement en type A ou en type B selon le mode d'évaluation précisé en annexe ci-dessous.

Chaque composante évaluée sera exprimée sous la forme d'un écart type.

QC33 - Calcul de l'incertitude composée

- Calculer l'incertitude-type composée associée à la mesure de l'écart de coaxialité à partir des évaluations de type A et B.
- En déduire l'incertitude élargie, en prenant un facteur d'élargissement $k = 2$.

QC34 - Aptitude du processus de mesure (Capabilité)

- QC34.1 Comparer la valeur de l'incertitude associée à la mesure avec la tolérance de la spécification considérée et en tirer des conclusions.
- QC34.2 Proposer un mode de cotation de l'écart d'alignement des deux alésages C et D (évolution de la spécification de coaxialité) qui permette, avec un mode opératoire de mesure similaire, d'aboutir à une incertitude de mesure plus faible. (Justifier votre proposition)

QC4 - Exigence de vérification ou d'étalonnage (maillon numéro 6 - GPS)

QC41 - Proposer une méthode permettant la vérification de l'incidence de la précision du plateau tournant sur l'exactitude de la mesure à effectuer (coaxialité de deux alésages).

Annexe : Définitions (NFX 06-044 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure)

1 incertitude-type

incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type

2 évaluation de Type A (de l'incertitude)

méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations

3 évaluation de Type B (de l'incertitude)

méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autre que l'analyse statistique de séries d'observations

4 incertitude-type composée

incertitude-type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou les covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs

5 incertitude élargie

grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande

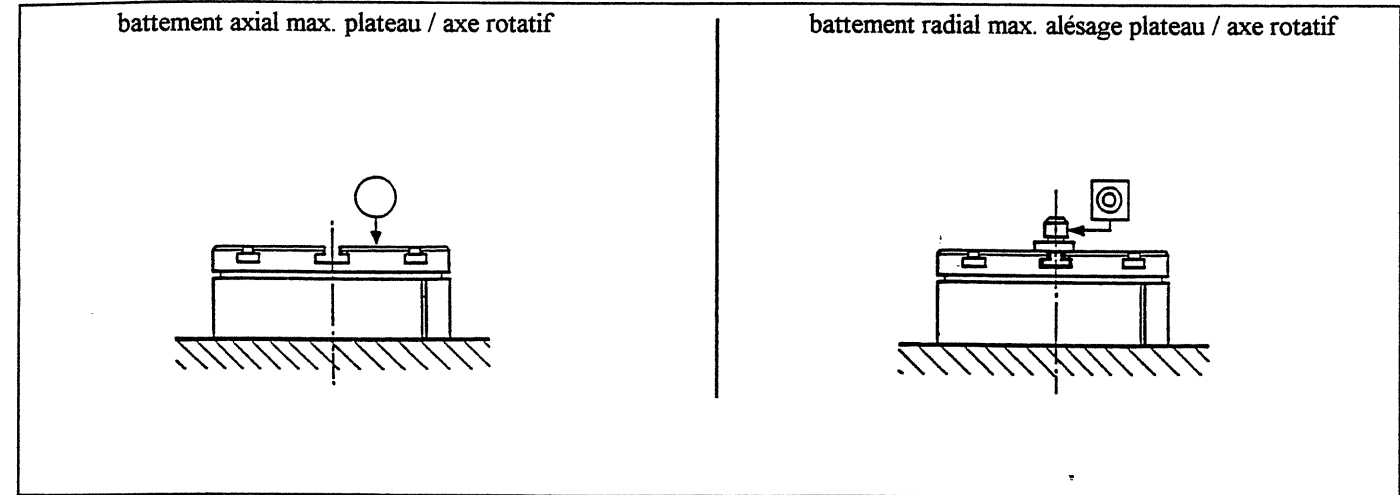
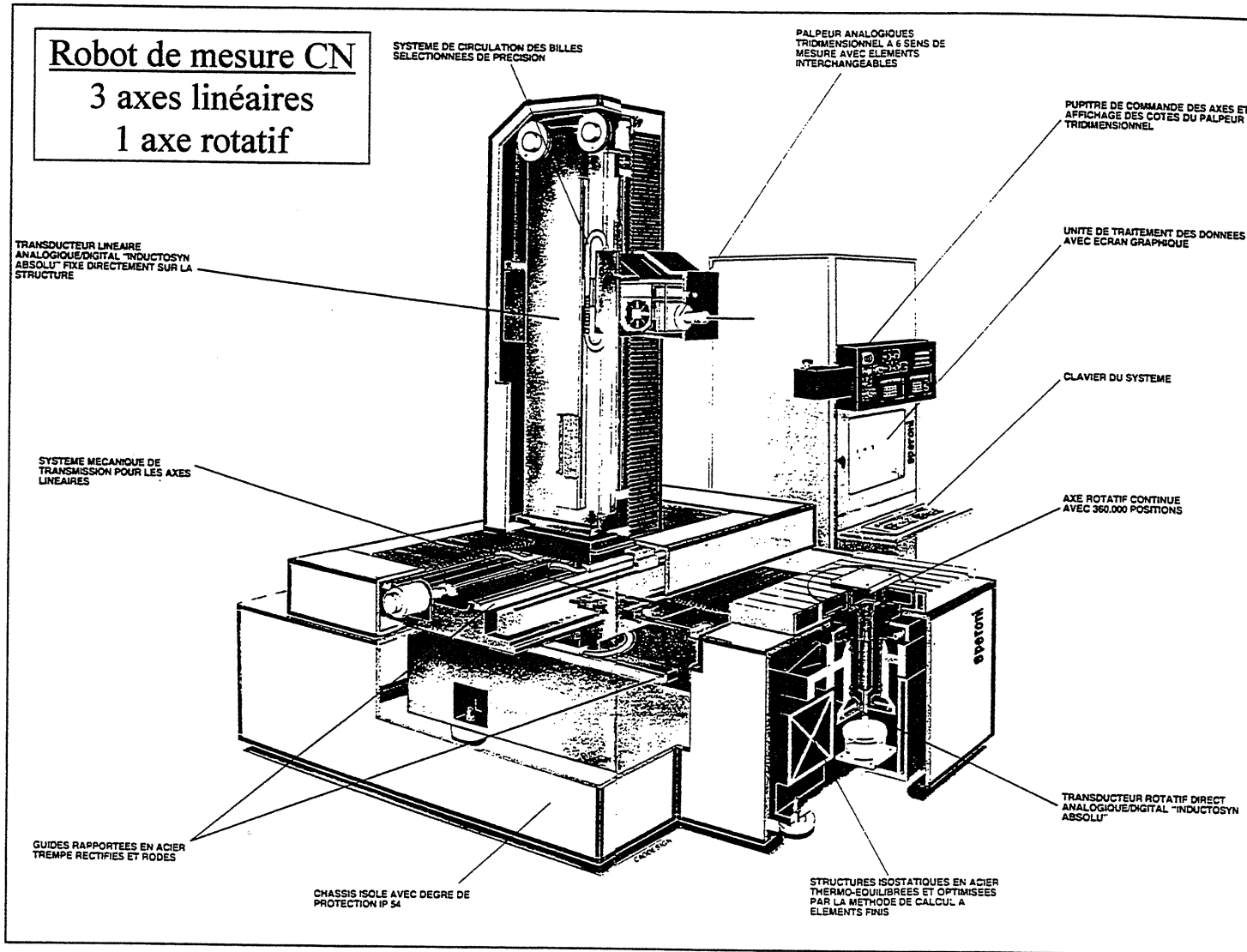
Note : la fraction peut être considérée comme la probabilité ou le niveau de confiance de l'intervalle

6 facteur d'élargissement

facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude-type composée pour obtenir l'incertitude élargie

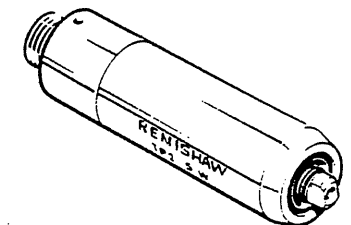
Note : un facteur d'élargissement k a sa valeur typiquement comprise entre 2 et 3

Remarque : Le classement en Type A ou B privilégie la méthode d'évaluation et ne constitue pas un substitut aux termes « aléatoires » et « systématiques ». Cette classification ne signifie pas qu'il existe une différence quelconque de nature entre les composantes résultant des deux types d'évaluation.



Caractéristiques techniques du capteur

CAPTEUR TP2-5W DE TYPE DYNAMIQUE



sens de détection omnidirectionnel	$\pm x, \pm y, \pm z$
répétabilité unidirectionnelle max. (2σ)	0,35 μm
variation de la précourse sur 360° (plan X_M, Z_M) (cette valeur peut être réduite si la procédure de contrôle est identique à la procédure d'étalonnage)	$\pm 2 \mu\text{m}$
valeur de tarage (réglable)	7 à 15 cN

Précourse du palpeur

Palpeur avec stylet de 50 mm.

Caractéristiques techniques du robot de mesure

Précision : mesure de distances	erreur maximale d'indication
- le long des axes linéaires	$U_1 = \pm(3 + L/200) \mu\text{m}$ (L en mm)
- dans le volume	$U_3 = \pm(5 + L/150) \mu\text{m}$ (L en mm)
Axe rotatif	
- précision angulaire	erreur maximale d'indication : $\pm 2,5''$
- battement axial	écart maximal : 3 μm
- battement radial	écart maximal : 3 μm
- oscillation du plan de table (battement angulaire)	écart maximal : 3 ''
Résolution du système	sur les axes linéaires : 0,000125 mm sur l'axe rotatif : 0,000125°

Caractéristiques techniques du stylet

bille rubis $\varnothing 3 \text{ mm}$	sphéricité : 0,15 μm	tolérance sur \varnothing : $\pm 2 \mu\text{m}$	état de surface $R_a = 0,025 \mu\text{m}$
tige céramique $\varnothing 2 \text{ mm}$	Rigidité $\leq 0,5 \mu\text{m} / \text{cN}$		

Document DTC2

Figure 1

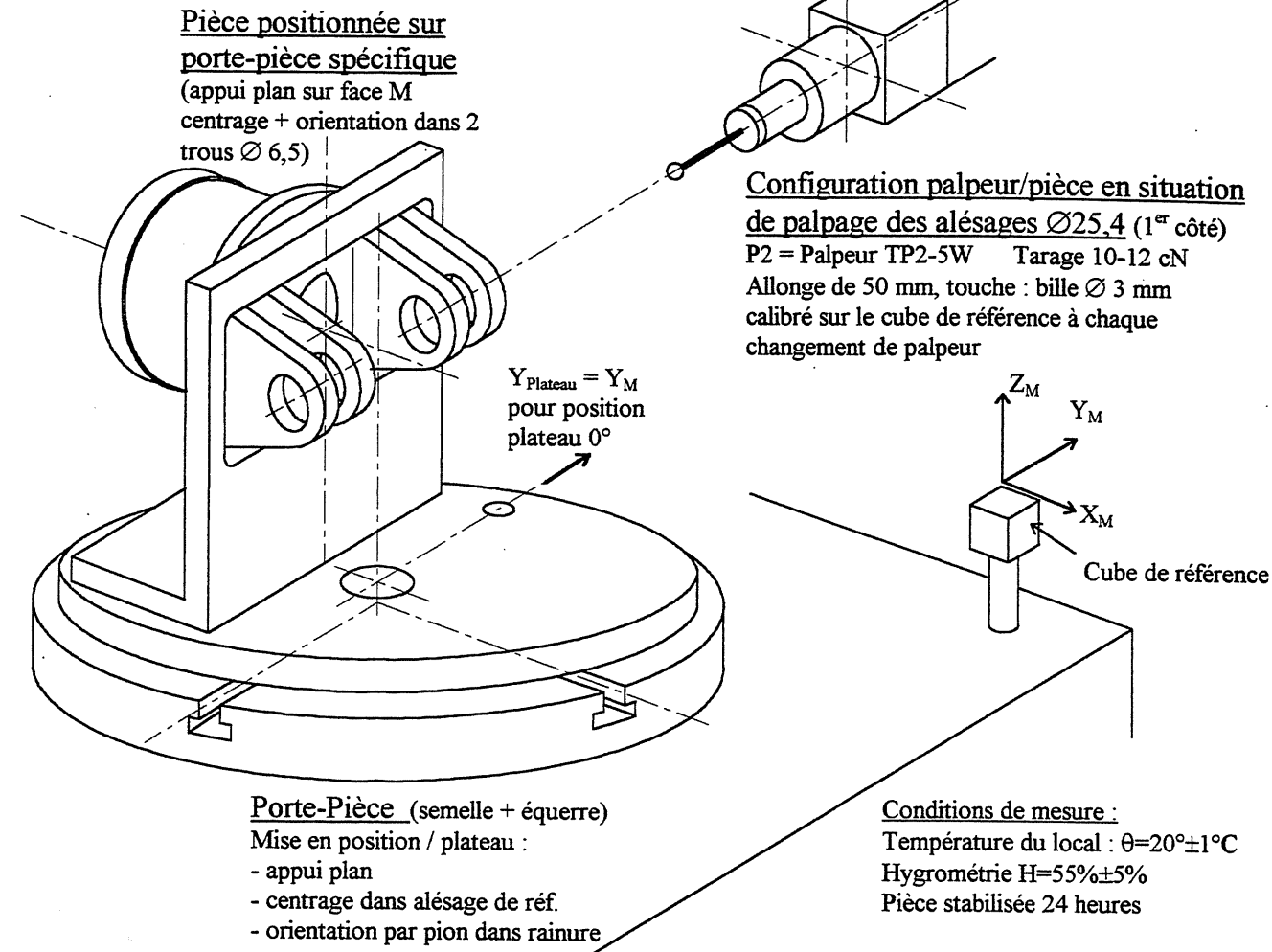
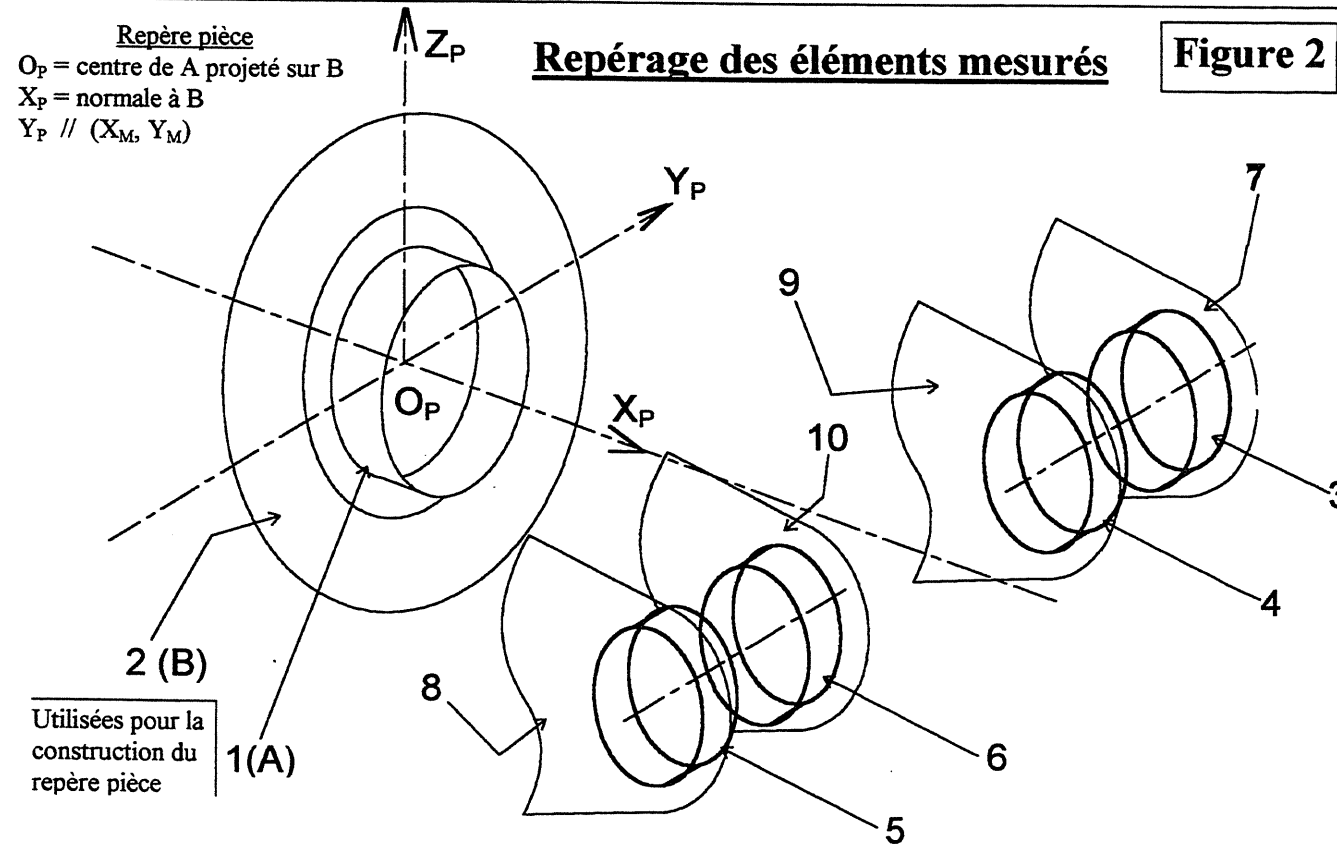
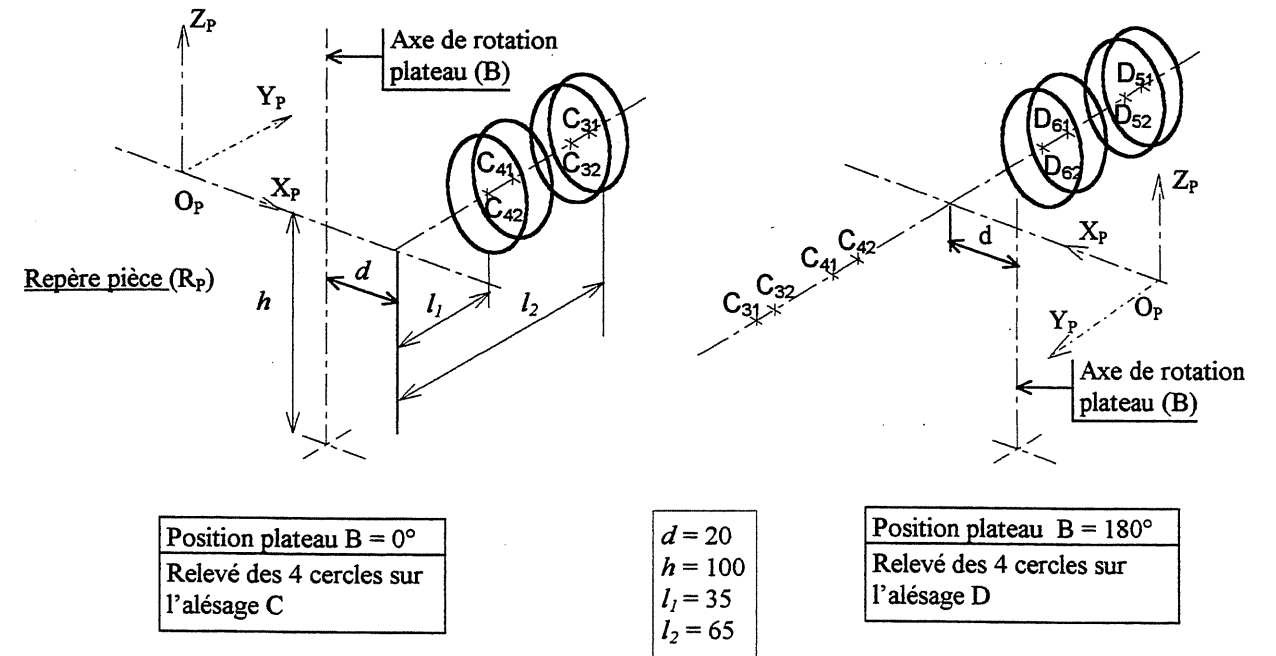


Figure 3 Configurations pour le mesurage des alésages C et D



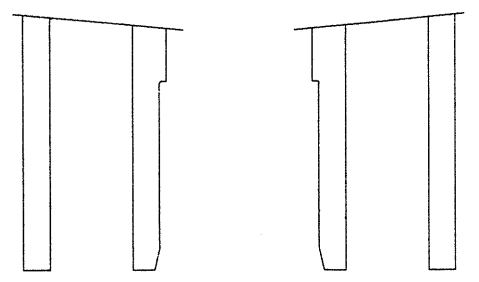
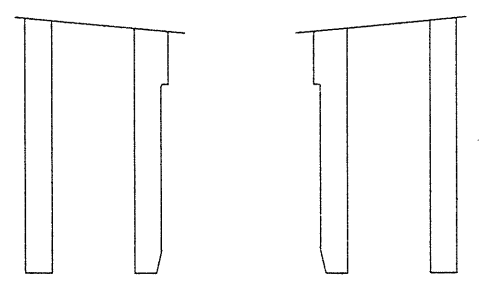
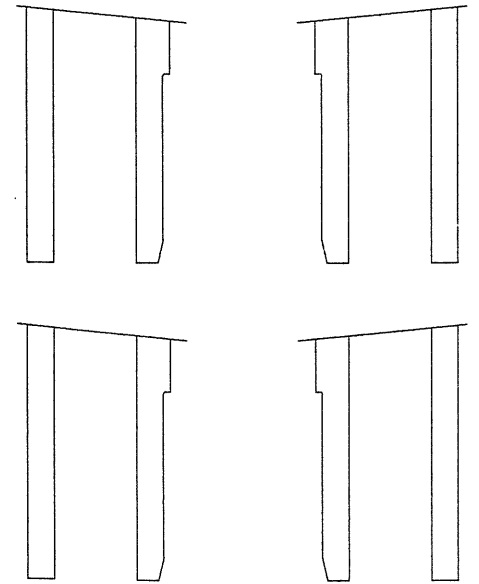
Dans le but d'effectuer une évaluation d'incertitude
chaque mesure a été répétée 5 fois dans les mêmes conditions

Éléments mesurés	Diamètre mesuré	Écart de forme	Position du centre	
Élément 3 Cercle 3-1 mesuré en 8 points dans la section S31	mesure n°1 : 25,4233	0,0103	C ₃₁ (X= 57,3271 ; Y= 64,0992 ; Z= -0,0769)	
	mesure n°2 : 25,4264	0,0071	C ₃₁ (X= 57,3226 ; Y= 64,0992 ; Z= -0,0757)	
	mesure n°3 : 25,4256	0,0074	C ₃₁ (X= 57,3218 ; Y= 64,0997 ; Z= -0,0752)	
	mesure n°4 : 25,4258	0,0067	C ₃₁ (X= 57,3206 ; Y= 64,0992 ; Z= -0,0752)	
	mesure n°5 : 25,4261	0,0069	C ₃₁ (X= 57,3199 ; Y= 64,0987 ; Z= -0,0737)	
Élément 3 Cercle 3-2 mesuré en 8 points dans la section S32	mesure n°1 : 25,4220	0,0050	C ₃₂ (X= 57,3085 ; Y= 59,9999 ; Z= -0,0708)	
	mesure n°2 : 25,4226	0,0054	C ₃₂ (X= 57,3040 ; Y= 59,9994 ; Z= -0,0725)	
	mesure n°3 : 25,4277	0,0105	C ₃₂ (X= 57,3064 ; Y= 59,9999 ; Z= -0,0720)	
	mesure n°4 : 25,4280	0,0102	C ₃₂ (X= 57,3069 ; Y= 59,9997 ; Z= -0,0723)	
	mesure n°5 : 25,4275	0,0098	C ₃₂ (X= 57,3063 ; Y= 59,9994 ; Z= -0,0713)	
Élément 4 Cercle 4-1 mesuré en 8 points dans la section S41	mesure n°1 : 25,4278	0,0041	C ₄₁ (X= 57,2449 ; Y= 39,9989 ; Z= -0,0593)	
	mesure n°2 : 25,4290	0,0052	C ₄₁ (X= 57,2403 ; Y= 39,9989 ; Z= -0,0610)	
	mesure n°3 : 25,4280	0,0052	C ₄₁ (X= 57,2403 ; Y= 39,9984 ; Z= -0,0606)	
	mesure n°4 : 25,4277	0,0055	C ₄₁ (X= 57,2385 ; Y= 39,9989 ; Z= -0,0611)	
	mesure n°5 : 25,4274	0,0052	C ₄₁ (X= 57,2386 ; Y= 39,9989 ; Z= -0,0593)	
Élément 4 Cercle 4-2 mesuré en 8 points dans la section S42	mesure n°1 : 25,4094	0,0127	C ₄₂ (X= 57,2100 ; Y= 35,9997 ; Z= -0,0580)	
	mesure n°2 : 25,4109	0,0118	C ₄₂ (X= 57,2047 ; Y= 35,9997 ; Z= -0,0595)	
	mesure n°3 : 25,3993	0,0161	C ₄₂ (X= 57,2034 ; Y= 35,9991 ; Z= -0,0577)	
	mesure n°4 : 25,3988	0,0111	C ₄₂ (X= 57,2074 ; Y= 35,9997 ; Z= -0,0576)	
	mesure n°5 : 25,4087	0,0107	C ₄₂ (X= 57,2064 ; Y= 35,9987 ; Z= -0,0559)	
Élément 5 Cercle 5-1 mesuré en 8 points dans la section S51	mesure n°1 : 25,4221	0,0028	C ₅₁ (X= 56,7417 ; Y= -64,0012 ; Z= -0,0085)	
	mesure n°2 : 25,4237	0,0024	C ₅₁ (X= 56,7378 ; Y= -64,0012 ; Z= -0,0110)	
	mesure n°3 : 25,4242	0,0004	C ₅₁ (X= 56,7359 ; Y= -64,0022 ; Z= -0,0113)	
	mesure n°4 : 25,4252	0,0014	C ₅₁ (X= 56,7364 ; Y= -64,0022 ; Z= -0,0108)	
	mesure n°5 : 25,4231	0,0020	C ₅₁ (X= 56,7357 ; Y= -64,0032 ; Z= -0,0100)	
Élément 5 Cercle 5-2 mesuré en 8 points dans la section S52	mesure n°1 : 25,4277	0,0112	C ₅₂ (X= 56,7607 ; Y= -59,9010 ; Z= -0,0096)	
	mesure n°2 : 25,4272	0,0105	C ₅₂ (X= 56,7592 ; Y= -59,9010 ; Z= -0,0126)	
	mesure n°3 : 25,4269	0,0098	C ₅₂ (X= 56,7582 ; Y= -59,9020 ; Z= -0,0128)	
	mesure n°4 : 25,4270	0,0118	C ₅₂ (X= 56,7557 ; Y= -59,9015 ; Z= -0,0128)	
	mesure n°5 : 25,4265	0,0098	C ₅₂ (X= 56,7560 ; Y= -59,9025 ; Z= -0,0120)	
Élément 6 Cercle 6-1 mesuré en 8 points dans la section S61	mesure n°1 : 25,4221	0,0096	C ₆₁ (X= 56,8247 ; Y= -40,0979 ; Z= -0,0171)	
	mesure n°2 : 25,4224	0,0081	C ₆₁ (X= 56,8182 ; Y= -40,0979 ; Z= -0,0198)	
	mesure n°3 : 25,4235	0,0095	C ₆₁ (X= 56,8165 ; Y= -40,0974 ; Z= -0,0196)	
	mesure n°4 : 25,4218	0,0092	C ₆₁ (X= 56,8145 ; Y= -40,0974 ; Z= -0,0203)	
	mesure n°5 : 25,4206	0,0081	C ₆₁ (X= 56,8163 ; Y= -40,0984 ; Z= -0,0193)	
Élément 6 Cercle 6-2 mesuré en 8 points dans la section S62	mesure n°1 : 25,4246	0,0015	C ₆₂ (X= 56,8505 ; Y= -36,0008 ; Z= -0,0216)	
	mesure n°2 : 25,4263	0,0004	C ₆₂ (X= 56,8452 ; Y= -36,0008 ; Z= -0,0236)	
	mesure n°3 : 25,4240	0,0007	C ₆₂ (X= 56,8427 ; Y= -36,0023 ; Z= -0,0238)	
	mesure n°4 : 25,4238	0,0020	C ₆₂ (X= 56,8425 ; Y= -36,0043 ; Z= -0,0243)	
	mesure n°5 : 25,4242	0,0005	C ₆₂ (X= 56,8436 ; Y= -36,0028 ; Z= -0,0238)	

Élément construit	Point associé	Vecteur unitaire associé			
Élément construit AC	avec mesures n°1 : avec mesures n°2 : avec mesures n°3 : avec mesures n°4 : avec mesures n°5 :	\vec{n}_C (cx= -0,003993 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000664) \vec{n}_C (cx= -0,004012 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000444) \vec{n}_C (cx= -0,004049 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000625) \vec{n}_C (cx= -0,003989 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000629) \vec{n}_C (cx= -0,003985 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000647)			
	Élément construit AD	avec mesures n°1 : avec mesures n°2 : avec mesures n°3 : avec mesures n°4 : avec mesures n°5 :	\vec{n}_D (cx= -0,003868 ; cy= -0,999992 ; cz= 0,000463) \vec{n}_D (cx= -0,003745 ; cy= -0,999993 ; cz= 0,000444) \vec{n}_D (cx= -0,003719 ; cy= -0,999993 ; cz= 0,000435) \vec{n}_D (cx= -0,003709 ; cy= -0,999993 ; cz= 0,000473) \vec{n}_D (cx= -0,003780 ; cy= -0,999993 ; cz= 0,000476)		
		Écart de coaxialité C/D	avec les mesures n°1 : avec les mesures n°2 : avec les mesures n°3 : avec les mesures n°4 : avec les mesures n°5 :	0,0839 0,1101 0,1158 0,1168 0,1073	
			Écart de coaxialité D/C	avec les mesures n°1 : avec les mesures n°2 : avec les mesures n°3 : avec les mesures n°4 : avec les mesures n°5 :	0,0962 0,0833 0,0830 0,0893 0,0877

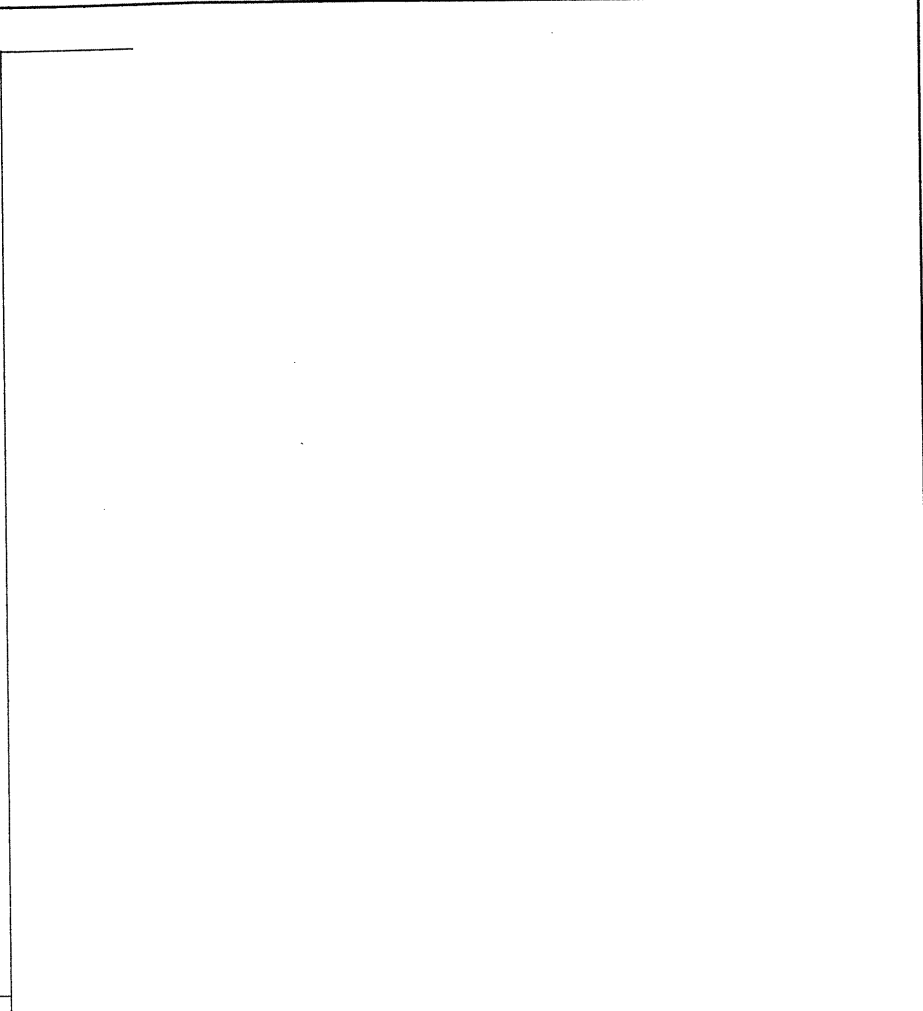
DOCUMENT RÉPONSE DRC1

Analyse des spécifications

Spécification	Type	Interprétation de la spécification préciser - l'élément de référence (quand il existe) - la zone de tolérance - l'entité assujettie à la zone de tolérance	Figures représentant, <u>dans le cas du boîtier</u> , les écarts limités par la spécification (vues 2D à compléter ou vues 3D à créer) Représenter des <u>écarts probables</u> associés au procédé d'usinage de ces surfaces										
$\varnothing 25,4 \text{ H8} \textcircled{\text{E}}$ $\varnothing 25,4 \text{ H8} = 25,4 \text{ }_0^{+33} \mu\text{m}$													
<p>zone commune</p> <table border="1" data-bbox="371 1050 578 1102"> <tr> <td>—</td> <td>$\varnothing 0,02$</td> </tr> </table>	—	$\varnothing 0,02$											
—	$\varnothing 0,02$												
<table border="1" data-bbox="371 1554 578 1606"> <tr> <td>$\textcircled{\text{C}}$</td> <td>$\varnothing 0,06$</td> </tr> </table> <p>Nota : cette spécification recouvre une double exigence</p> <table border="1" data-bbox="341 1858 578 1900"> <tr> <td>D</td> <td>$\textcircled{\text{C}}$</td> <td>$\varnothing 0,06$</td> <td>C</td> </tr> </table> <table border="1" data-bbox="341 1911 578 1963"> <tr> <td>C</td> <td>$\textcircled{\text{C}}$</td> <td>$\varnothing 0,06$</td> <td>D</td> </tr> </table>	$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$	D	$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$	C	C	$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$	D			
$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$												
D	$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$	C										
C	$\textcircled{\text{C}}$	$\varnothing 0,06$	D										

DOCUMENT RÉPONSE DRC2

Gamme de mesurage (à compléter)

N° d'opération	Éléments mesurés	Nombre de points palpés	Palpeur utilisé	Position plateau	Éléments construits	Paramètres (associés aux éléments) sélectionnés pour sortie sur P.V. de mesure	Repère d'affichage	Figures explicatives associées aux opérations (à partir de 17) (Utiliser pour désigner les différents éléments les notations définies sur la figure 3 du document DTC2)	Chiffrage des écarts à partir de la série de mesures n°1 donnée sur document DTC3. Conclusions ?
01	Cylindre 1 (A)	16 (2 sections)	P1	B = -90°		Diamètre Écart de forme	R _M		
02	Plan 2 (B)	16	P1	B = -90°			R _M		
03					Point O _p = projection « centre » cylindre 1 sur plan 2				
04					<u>Création repère pièce R_p</u> - axe principal X _p normale à Plan 2 - axe secondaire Y _p = Y _M - origine : O _p				
05	Cercle 3-1 *	8	P2	B = 0°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre C ₃₁	R _p		
06	Cercle 3-2	8	P2	B = 0°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre C ₃₂	R _p		
07	Cercle 4-1	8	P2	B = 0°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre C ₄₁	R _p		
08	Cercle 4-2	8	P2	B = 0°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre C ₄₂	R _p		
09	Cercle 5-1	8	P2	B = 180°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre D ₅₁	R _p		
10	Cercle 5-2	8	P2	B = 180°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre D ₅₂	R _p		
11	Cercle 6-1	8	P2	B = 180°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre D ₆₁	R _p		
12	Cercle 6-2	8	P2	B = 180°		Diamètre - Écart de forme Coordonnées du centre D ₆₂	R _p		
13	Plan 7	4	P2	B = 90°					
14	Plan 9	4	P2	B = 90°					
15	Plan 10	4	P2	B = 90°					
16	Plan 8	4	P2	B = 90°					
17					Droite Δ _C = droite construite à partir des 4 centres C ₃₁ , C ₃₂ , C ₄₁ , C ₄₂				
18					Droite Δ _D = droite construite à partir des 4 centres D ₅₁ , D ₅₂ , D ₆₁ , D ₆₂				

* On choisit de relever 2 cercles sur chaque portion d'alésage (voir figures 2 et 3 Document DTC2). Nota : l'écartement entre ces cercles est choisi maximal de façon à représenter au mieux l'étendue physique de chaque portion d'alésage.