

009/2007

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université De Blida

Département D'Aéronautique



## THEME

# **ETUDE ET MODELISATION DUNE AILETTE FAN CO2 DU REACTEUR JT8D ET AUTOMATISATION DU BANC DE CONTROLE A ULTRASON PAR IMMERSION**

## *Mémoire*

*De Fin D'études*

*En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur D'état en Aéronautique.*

*Option : STRUCTURE.*

**Fait par :**

Mr. BENCHIKH Rafik

Mr. DJEBARA Hamou

**Promoteur :**

Mr. TAHI Ali

**Encadreur :**

Mr. BENOMAR Aek.

Promotion 2006 - 2007

## Résumé

*La conception joue un rôle primordial dans le domaine de La modélisation c'est pour cette raison qu'on a utilisée logiciel CATIA. Dans notre recherche il nous a permis de reproduire l'ailette FAN CO2 et effectuer des analyses permettant de localiser les zones les plus dangereuses car susceptibles d'être fissurées.*

*Après nous avons poursuivi notre travail par une automatisation du banc de contrôle de manière à optimiser les paramètres temps, main d'œuvre qui influent bien entendu sur le coût de l'opération.*

## Summary

*The field concept plays a major and essential role in modelling process. All the more reason for going to use CATIA software. In our search this last allow us to reproduce a FAN blade compressor second stage and to make a many analysis in order to locate the area where are cracks.*

*Finally, we pursuer our work with an automation of the control blade seat in the purpose to optimize the following parameter: time, cost, number of worker...*

## ملخص

*إن عملية التصور تلعب دور هام وأساسي في مجال التصميم ، ولهذا السبب قمنا باختيار برنامج "كاتيا " . تمكنا في بحثنا هادا من اعادة إنتاج ايلات الضاغط الطابق الثاني ، وقمنا بالتحليل اللتي مكنتنا من تحديد المناطق الأكثر تعرضا للشقوق.*

*و في الأخير أتممنا عملنا بألية جهاز المراقبة وذلك من اجل ربح الوقت، اليد العاملة التي تأثر على ثمن العملية.*

# *Remerciements*

En premier lieu, nous tenons à manifester notre louange à DIEU, puisse-t-il nous guider toujours dans le droit chemin.

Durant la réalisation de ce travail, nous étions entourés et guidés par plusieurs personnes : ingénieurs, techniciens et enseignants, qui nous ont transmis leurs savoir faire et expériences pour surmonter les difficultés que nous avons rencontrés.

Au terme de ce travail nous tenons à remercier ;

Notre promoteur Mr A. TAHI, notre encadreur Mr A. BENOMAR, notre co-encadreur Mr S. ZEDEK, qui ont été à l'origine de ce travail et qui ont accepté de nous diriger. Qu'ils veuillent bien accepter l'expression de notre gratitude et le témoignage de notre profonde reconnaissance pour leur disponibilité pendant la réalisation de ce travail.

Les enseignants qui ont contribué à notre formation et qui ont accepté de juger ce travail :

Nous tenons à remercier le personnel administratif et technique D'AIR ALGERIE, notamment M<sup>elle</sup> M. MADANI CHERIF, Mr L. BOUDJADA, Mr SID ALI du service de métrologie, Mr HOUCINE du service NDT (les ultrasons) Mr SAID chef de département contrôle non destructif

Sans oublier le personnel de l'atelier de structures avions au niveau de la nouvelle base de maintenance Mr H. AIT YAHIA et Mr K. MESSIS.

Par la suite nous tenons à remercier chaleureusement Mme Y. ZEHRAOUI pour la mise en forme de la thèse, pour ses conseils, pour ses directives et ses remarques pertinentes.

*Rafik & Hamou*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

- ❖ *A mes parents qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même. Que dieu les protège et les garde ;*
- ❖ *A ma très chère sœur Sihem.*
- ❖ *A mes frères Fateh, Akrem et Bachir.*
- ❖ *A ma très chère tante Yasmina pour son soutien moral et matériel qu'elle trouve ici le témoignage de ma gratitude et mon respect, également à son mari et ses enfants.*
- ❖ *A mon petit neveu Yasser ; mes nièces Manar et Anfel.*
- ❖ *A ma très chère tante Leila, oncle Mahmoud et leur enfants sans exception ;*
- ❖ *A mes meilleur amis Nabil, Oussama, Djabar, Ramzi, Amine, Moh. ...*
- ❖ *A la mémoire de notre chère collègue et ami HAMIDA Tayeb qui nous a quitté au début de l'année, que DIEU le bénisse et l'éternise dans son paradis ;*
- ❖ *A mon binôme Hamou.*

*Rafik*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

- ❖ *A mes chers parents qui sont prêts à tout faire pour nous voir réussir dans la vie, qui m'ont donné le courage, la patience et le bon sens. Que dieu les protège.*
- ❖ *A mon frère et cher ami KHALED et sa famille, pour sa patience, encouragement et soutien, et pour tout ce qu'il a fait pour moi. Que Dieu me donne le courage et l'occasion pour témoigner ma reconnaissance.*
- ❖ *A mes adorables sœurs LILA, LUDMILA, pour leurs grands soutiens moraux; Que dieu les protège et les garde.*
- ❖ *A mes meilleures amies AMEL, HIND, NOURA, NADJOVA, SIHEM, CHAHINEZ, FATIHA, NACHIDA. Que je présente mes meilleurs souhaits et profonds respects.*
- ❖ *A mes meilleurs amis IMA, SALEH, HASSEN, SAMIR, SALIM, RABAH, MOURAD, NADJI, khilifa, NABIL, avec reconnaissance et amitié.*
- ❖ *A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.*
- ❖ *A la mémoire de mon très cher collègue et ami HAMIDA Tayeb qui nous a quitté au début de l'année, que DIEU le bénisse et l'éternise dans son paradis.*
- ❖ *A mon binôme RAFIK*

*Hamou*

## *Sommaire*

Introduction générale	1
<b>Chapitre I :</b>	
Rappels de cours de mécanique de rupture et contrôle non destructif	3
I-1- Mécanique de rupture	4
I-1-1- Introduction	4
I-1-2- Définition De La Mécanique de la rupture	4
I-1-3- Notion sur la mécanique de la rupture	4
I-1-4- Domaine de validité et d'emploi	5
I-1-5- Modes de sollicitations (mode d'ouverture des fissures)	5
I-2- contrôle non destructif	6
I-2-1- Introduction	
I-2-2- domaine d'expertise	6
I-2-3- Les différentes méthode d'inspection	7
I-2-3-1- Ressuage	
I-2-3-1-1- Principe de la méthode	
I-2-3-1-2- Principe de la phase de révélation	
I-2-3-1-3- Domaine d'application	7
I-2-3-1-4- Avantages et inconvénients de la méthode	8
I-2-3-2- Magnétoscopie	
I-2-3-2-1- Introduction	
I-2-3-2-2- Principe de la méthode	8
I-2-3-2-3- Magnétisation	9
I-2-3-2-4- Démagnétisation	9
I-2-3-2-5- Domaine d'application	10
I-2-3-2-6- Avantages et inconvénients de la méthode	
I-2-3-3- Radiographie	
I-2-3-3-1- Principe de la méthode	10
I-2-3-3-2- Domaines d'application	11
I-2-3-3-3- Avantages et inconvénients de la méthode	11
I-2-3-4- Courant de Foucault	12
I-2-3-4-1- Principe du contrôle par courant de Foucault	12
I-2-3-4-2- Domaine d'application	13
I-2-3-4-3- Avantages et inconvénients de la méthode	13
I-2-3-5- Ultrason	14
I-2-3-5-1- Introduction	
I-2-3-5-2- Génération des ultrasons	14
I-2-3-5-3- Principe de la méthode	15
I-2-3-5-4- Définition d'un palpeur	
I-2-3-5-5- Zone morte ou zone de silence	15
I-2-3-5-6- Différentes techniques de mise en œuvre	16
I-2-3-5-7- Domaine d'application	
I-2-3-5-8- Avantages et inconvénients de la méthode	16
I-3- Conclusion	17

## **Chapitre II :**

<b>Modélisation et études de l'ailette FAN CO2 du réacteur JT8D par éléments finis</b>	<b>18</b>
<b>II-1- Les éléments finis</b>	<b>19</b>
II-1-1- Introduction	19
II-1-2- Evolution de la méthode	20
II-1-3- Les différents types d'éléments finis	
II-1-4- Maillages volumique	
II-1-5- Maillage libre	20
II-1-6- Les méthodes de maillage	21
II-1-7- Les différentes étapes dans l'étude d'une structure	21
II-1-8- Création de la pièce	22
<b>II-2- digitalisation de l'ailette FAN CO2 du réacteur JT8D</b>	<b>23</b>
II-2-1- Introduction	
II-2-2- La machine	23
II-2-4- Fixation de l'ailette sur la table de la fraiseuse	24
II-2-4-1- L'isostatisme appliqué sur l'ailette	
II-2-4-2- Proposition d'un dispositif de fixation pour l'ailette	24
II-2-5- Le comparateur	25
II-2-6- Relevé des coordonnées du nuage de points	
II-2-6-a- Remise a zéro des déplacements XYZ	25
II-2-6-b- Méthode utilisée pour le relevé des coordonnées de points	26
II-2-7- Les dispositions prises pour le rattrapage de jeu	
II-2-8- La précision de mesure	26
II-2-9- Nuage de points	28
<b>II-3- Modélisation de l'ailette sur un logiciel de CFAO (CATIA)</b>	<b>36</b>
II-3-1-Introduction	
II-3-2-Présentation du logiciel	
II-3-2-a-Le module part design	
II-3-2-b-Le module d'analysis	36
II-3-3- La modélisation	37
II-3-3-1- Introduction de nuage de point	37
II-3-3-2- Création des lignes de contour	38
II-3-3-3- Génération du volume et application du matériau	38
II-3-4- Conclusion	39
<b>II-4- Etude Statique</b>	<b>40</b>
II-4-1- Introduction	
II-4-2- Conditions aux limites	
II-4-2-1- Les efforts appliqués	40
II-4-2-2- Calcul du contact entre le palier de l'ailette et l'axe de fixation CO2(deuxième étage compresseur)	41
II-4-3- Résultat de l'essai	43
II-4-3-1- Maillage appliqué	
II-4-3-2- Efforts et fixations	44
II-4-3-3- Données sur la matrice de rigidité	
II-4-3-4- Contrainte de VON MISES	46
<b>II-5 Conclusion</b>	<b>47</b>

<b><u>Chapitre III :</u></b>	
Etablissement des documents du banc de contrôle à ultrason par immersion	48
III-1 Mode de fonctionnement	49
III-1-1- Introduction	49
III-1-2 L'étalon	50
III-1-3 Positionnement du transducteur suivant Y	51
III-1-4 Le balayage selon l'axe X	52
III-2 Schéma cinématique du banc de contrôle	53
III-3 Dessin d'ensemble	
 <b><u>Chapitre IV :</u></b>	
Automatisation du mécanisme de déplacement du canon a ultrason	54
IV -1- Introduction	55
IV -2- Données et contrainte imposées	55
IV -3- Choix de mécanisme	57
IV -4- Choix des moteurs	
IV -4-1- Fonctionnement d'un moteur pas à pas	57
IV -4-2- Fonctionnement d'un moteur à courant continue	59
IV -4-3- Proposition des moteurs selon les déplacement X et Y	61
IV -5- Choix des commandes	62
IV -5-1 Commande du moteur pas à pas	62
IV -5-1-1 Proposition d'un système de commande	62
IV -5-1-2 Fonctionnement	63
IV -5-2 Command du moteur à courant continue	65
IV -5-2-1 Proposition d'un schéma électrique	65
IV -6 Proposition et modélisation de mécanisme selon X et Y	66
IV -6 -1- Selon l'axe Y	66
IV -6 -2- Selon l'axe X	68
IV -6 -2- 1- transmission vis écrou	68
IV -6 -2- 2- système de guidage a deux axes	71
IV -6 -3- Calcule d'engrenage	
IV -6 -4- Calcul des déplacements	
 Conclusion générale	75
 Bibliographie	77
 Annexes	78
Annexe 1 : schémas de définition	
Annexe 2 : document du banc de contrôle fournie par le constructeur	

## Liste des figures

- Figure 1.** : *Aéronef subissant une inspection non destructive*
- Figure 2.** : *Principe de la méthode du Ressuage*
- Figure 3.** : *Principe de la méthode de Magnétoscopie*
- Figure 4.** : *Principe de la méthode de radiographie*
- Figure 5.** : *Matériel radiographique de l'institut de recherche en aéronautique (IRA)*
- Figure 6.** : *Schéma du principe du contrôle par courant de Foucault*
- Figure 7.** : *Matériel automatisé pour un contrôle en temps réel par courants de Foucault*
- Figure 8.** : *Principe de la méthode des ultrasons*
- Figure 9.** : *Contrôle aux ultrasons d'une section du télémanipulateur d'une station spatiale dans la cuve à immersion*
- Figure 10.** : *Exemple de maillage libre*
- Figure 11.** : *Fraiseuse universelle ACIERA F3( Image réalisée avec le logiciel CATIA V5 R10)*
- Figure 12.** : *Racine de l'ailette en position isostatique*
- Figure 13.** : *Vue isométrique éclaté du dispositif de fixation*
- Figure 14.** : *Comparateur à l'origine du repère absolu*
- Figure 15.** : *Vue isométrique de l'ailette montée sur la fraiseuse*
- Figure 16.** : *Nuage de points introduits*
- Figure 17.** : *Contours obtenus*
- Figure 18.** : *Modélisation finale de l'ailette FAN CO2*
- Figure 19.** : *Conditions aux limites appliquées sur l'ailette*
- Figure 20.** : *Maillage appliqué*
- Figure 21.** : *Déplacement aux nœuds*
- Figure 22.** : *Maillage déformée avec une amplitude de déformation égale à 100x*
- Figure 23.** : *Répartition du champ de contrainte de VON MISES*
- Figure 24.** : *Répartition du Champ de contrainte de VON MISES avec une amplitude déformation égale à 100x*
- Figure 25.** : *Vue isométrique du banc de contrôle à ultrason par immersion*
- Figure 26.** : *L'axe PWA 46292 insérée dans le bloc de fixation du réservoir PWA 46293*
- Figure 27.** : *L'étalon ainsi que les fissures préfaites par un laser et leur tolérance*
- Figure 28.** : *Calibrage suivant Y du canon à ultrason*
- Figure 29.** : *Balayage suivant l'axe X*
- Figure 30.** : *Schéma cinématique du banc de contrôle*
- Figure 31.** : *Schéma cinématique du banc de contrôle avec mécanisme*
- Figure 32.a:** *Moteur pas à pas à aimant permanent*
- Figure 32.b:** *Moteur pas à pas à réluctance variable*
- Figure 33.** : *Collecteur du moteur à courant continue*
- Figure 34.** : *Système manuel de commande du moteur pas à pas*
- Figure 35.** : *Schéma électrique de commande du moteur pas à pas*
- Figure 36.** : *Vue éclaté du system de commande du moteur pas à pas*
- Figure 37.** : *Schéma électrique de commande du moteur à courant continue*
- Figure 38.** : *Vue isométrique du mécanisme proposé selon l'axe Y*
- Figure 39.** : *Mécanisme de transmission vis écrou*
- Figure 40.** : *Vue isométrique du Système de guidage à deux axes*

# *Introduction générale*

L'objectif principal requis par toute industrie est de produire de la qualité tout en assurant des bénéfices. Pour cela, il est nécessaire de s'assurer à tous les stades de la chaîne de fabrication de la qualité de tous les éléments et les assemblages des systèmes.

Dans le cadre de ce travail nous avons essayé de faire une étude en utilisant la méthode des éléments finis sur une ailette FAN CO2 du réacteur JT8D, couramment révisé par l'atelier H400 de la COMPAGNIE D'AIR-ALGERIE. Ces ailettes sont inspectées par un banc de contrôle non destructif qui date de janvier 1987, qui a été livré par les constructeurs PRATT&WHITNEY, tout en sachant que l'atelier H400 existe depuis 1996, ce banc est entièrement manuel, il exige une expérience et une maîtrise du personnel pour détecter les fissures. C'est pour cela que nous avons jugé, même nécessaire qu'une automatisation soit faite pour optimiser le temps d'inspection et la qualité tout en rendant le banc plus fiable. Nous avons essayé d'illustrer ce travail en 4 chapitres :

Dans le premier chapitre : nous avons procédé à un aperçu rapide sur la mécanique de la rupture et les différentes méthodes d'inspection des ruptures qui sont le contrôle non destructif.

Dans le deuxième chapitre : nous avons fait un rappel sur les éléments finis et en quoi consiste cette méthode. La digitalisation et la modélisation de l'ailette qui sont des étapes obligatoires pour un essai statique ou dynamique par la méthode des éléments finis, pour notre cas on a utilisé un logiciel de CFAO (CATIA) pour la modélisation et l'analyse statique.

Dans le troisième chapitre : nous avons établi tous les documents possibles concernant le banc, qui sont indispensables pour le chapitre qui suit. Ce chapitre va laisser des documents utiles pour d'autres études qui pourront concerner ce banc de contrôle.

Dans le quatrième chapitre : nous avons proposé un système d'automatisation du banc de contrôle pour faciliter la tâche et diminuer le temps d'exécution.

***Chapitre I :***  
***Rappels de cours de mécanique de***  
***rupture et contrôle non destructif***

## **I-1- Mécanique de la rupture :**

### **I-1-1- Introduction :**

Tout industriel admet qu'une fabrication exempte d'imperfections est impossible à réaliser. Comment définir un défaut avec une précision suffisante pour pouvoir l'introduire dans l'analyse de comportement de l'objet utilisé ? Comment établir des nuances que l'on pourrait apporter à ce terme entre anomalie admissible, imperfection nuisible, défectuosité nocive et défaut rédhibitoire ?

En effet, le défaut fait évoluer le produit vers un état de ruine. En présence de l'anomalie détectée, il est procédé à un calcul de sa taille critique et de sa vitesse de propagation

En pratique, toutes les pièces soumises à la fatigue contiennent des défauts, irrégularités de surface ou inclusions, qui provoquent des concentrations locales de contraintes conduisant à la formation de micro - fissures. [1]

L'origine de toute rupture est d'abord les fissures appelées criques dans le cas particulier des chambres de combustion qui travaillent à haute température, dont il faut connaître a priori les processus d'amorçage qui sont à l'origine de leur apparition.

Une crique est une fissure se produisant à chaud ou dont les causes d'amorçage existent à haute température, ce qui lie immédiatement leur domaine d'application à celui des matériaux réfractaires, en l'occurrence, celui des superalliages servant à la fabrication des accessoires du turboréacteur.

### **I-1-2- Définition de la mécanique de la rupture (MDR) :**

La mécanique de la rupture (MDR) se définit comme étant la science de l'étude du comportement mécanique d'une structure avec ses défauts macroscopiques. Elle permet de prévoir leur évolution jusqu'à la rupture complète de la structure qui est non prévisible par l'usage d'un critère classique de la résistance des matériaux.

### **I-1-3- Notion sur la mécanique de la rupture : [2]**

Dès 1920, Griffith montrait que la rupture d'un milieu élastique fragile pouvait être caractérisée par une variable appelée plus tard « taux de restitution d'énergie » dont la valeur critique, indépendante de la géométrie de la structure, était une caractéristique du matériaux. Cette approche, qualifiée de globale, n'a été généralisée et formellement construite à partir de la thermodynamique des processus irréversibles qu'au cours des années 1970.

Elle montrait que les phénomènes essentiels se situent au voisinage du front de fissure. Ceci est dû à la forte concentration de contrainte qui existe à la pointe des fissures et que l'analyse élastique linéaire traduit par des singularités du champ de contraintes.

L'étude de ces singularités a conduit G.R.IRWIN, en 1956, à définir des facteurs d'intensité des contraintes, correspondant à des cinématiques particulières du mouvement des fissures. Ces paramètres semi - locaux sont largement utilisés pour étudier la rupture fragile ou la rupture par fatigue des milieux bidimensionnels.

La mécanique de la rupture, partant de la constatation que les ruptures résultent le plus souvent de la présence de défaut. Soit créé au cours de la fabrication, soit apparu par divers mécanismes de rupture. Pour établir une relation entre les contraintes appliquées, la dimension d'une fissure et la ténacité du matériau c'est à dire la résistance qu'il oppose à la propagation des fissures, il existe deux mécanismes de rupture :

- Mécanisme de rupture brutale à basse température. Ils appartiennent à 3 catégories:
  - ❖ la rupture par clivage
  - ❖ rupture ductile
  - ❖ rupture inter granulaire.
- Mécanismes de rupture par fatigue, corrosion sous tension, fluage

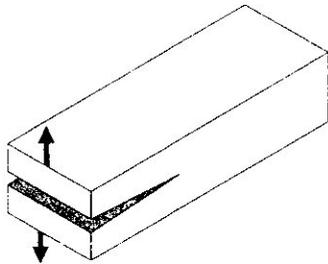
#### I-1-4- Domaine de validité et d'emploi :

La MDR est fondée sur une analyse élastique du champ des contraintes en petites déformations. Elle donne d'excellents résultats pour les matériaux élastiques fragiles comme les aciers à haute résistance, les verres, et dans une moindre mesure les bétons et les bois.

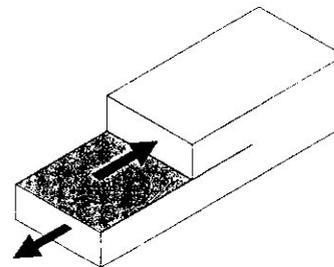
Avec l'intervention de la plasticité ou de la viscoplasticité, on entre dans le domaine de la mécanique non linéaire de la rupture. C'est le cas des matériaux ductiles comme les aciers à faible teneur en carbone, aciers inoxydables, certains alliages d'aluminium, et les polymères.

#### I-1-5- Modes de sollicitations (mode d'ouverture des fissures) : [2]

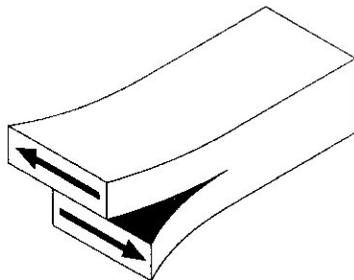
Les fissures peuvent se propager suivant plusieurs modes car le mode de sollicitation du solide fissuré est toujours modélisé à partir de la résultante du chargement, par rapport au plan de l'entaille ou de la fissure. La MDR distingue trois modes :



**Mode 1** : Mode d'ouverture



**Mode 2** : Mode cisaillement plan  
(Glissement plan)



**Mode 3** : Mode anti-plan  
(Glissement anti-plan)

Dans le cas d'un chargement uni axial, la propagation des fissures dépend ou se fait en mode 1, lorsque la contrainte de traction principale est perpendiculaire à la fissure, On a affaire au mode 2 lorsque une contrainte de cisaillement simple est appliquée le long du plan de la fissure, il y a combinaison de deux modes (mode mixte) lorsque les deux conditions précédentes sont remplies.

## I-2- contrôle non destructif :

### I-2-1- Introduction :

Le contrôle non destructif (CND) offre des services d'inspection faisant appel à des installations à la fine pointe de la technologie selon des projets de recherche et de développement concertés.

### I-2-2- Domaines d'expertise :

- ❖ Détection non destructive et mesure des défauts ou des dommages dans les matériaux métalliques et composites, le soudage, les joints collés et les composants aérospatiaux
- ❖ Caractérisation des matériaux (conductivité, modules d'élasticité, adhérence et mesure de l'épaisseur)
- ❖ Caractérisation par transducteur et établissement de profils par faisceau
- ❖ Traitement de signaux et d'images, fusion des données et reconnaissance des formes pour l'automatisation des inspections non destructives
- ❖ Balayage en surface et topographie visant à détecter des déformations, des perturbations, la répartition des contraintes, la corrosion, les criques, sont destinés à des examens judiciaires
- ❖ Recherche sur la corrosion
- ❖ Analyse d'efforts et des contraintes expérimentales complètes
- ❖ analyse de fiabilité
- ❖ Prédiction de la durée de vie fondée sur la tolérance aux dommages
- ❖ Calculs des intervalles d'inspection sécuritaires

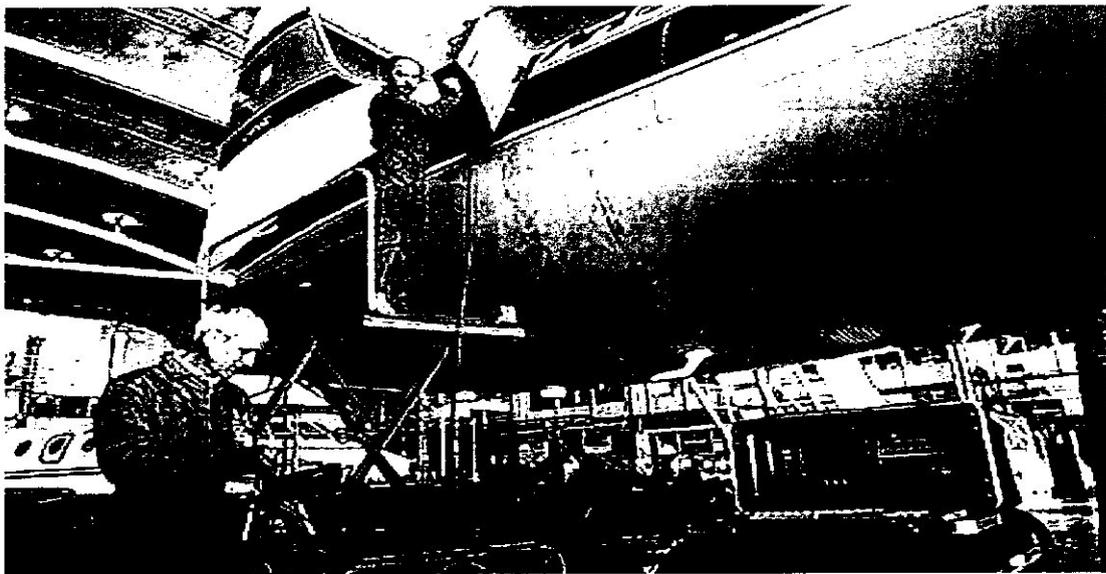


Figure 1. Aéronef subissant une inspection non destructive

### I-2-3- Les différentes méthodes d'inspection :

#### I-2-3-1- Ressuage :

##### I-2-3-1-1- Principe de la méthode :

Cette méthode consiste à soumettre d'abord la pièce, pendant un certain temps, à l'action d'un produit appelé pénétrant qui rentre dans les fissures de la surface; parfaitement dégraissée, grâce à des phénomènes de diffusion et d'absorption. Après le temps de pénétration, l'excès de pénétrant est éliminé par rinçage à l'eau. Ensuite, il faut sécher la pièce et lui appliquer un produit révélateur qui attire le liquide d'imprégnation retenue dans la fissure. La remontée obéit aux lois de la diffusion par capillarité. En attirant le pénétrant, le révélateur donne une indication renforcée des défauts sous les rayons ultraviolet.

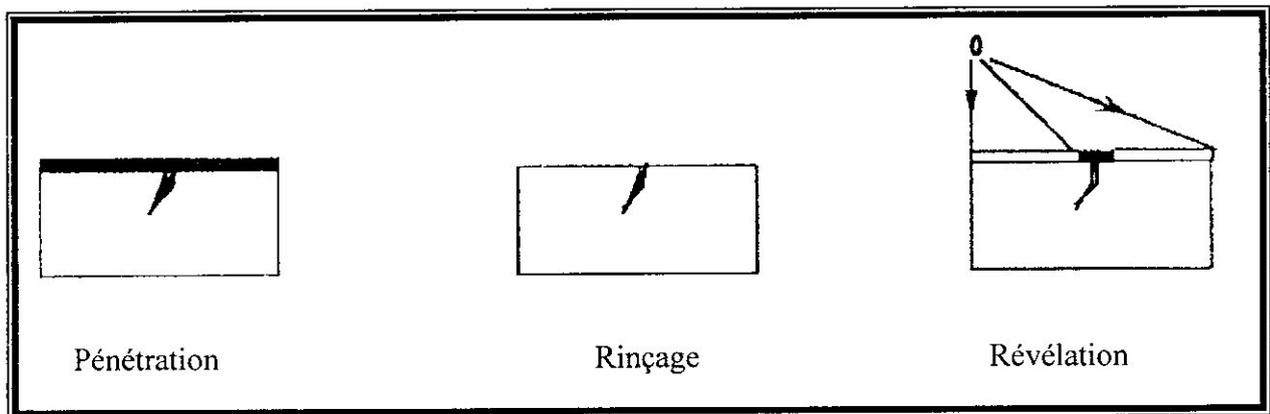


Figure 2. Principe de la méthode de Ressuage

##### I-2-3-1-2- Principe de la phase de révélation :

Le révélateur est constitué de poudre micronisée qui forme en surface de la pièce à contrôler un milieu poreux. Les interstices entre les grains forment un réseau de « capillaires » dans toutes les directions. Le ressuage du pénétrant dans le révélateur sera meilleur si les grains de révélateur sont de faibles dimensions.

##### I-2-3-1-3- Domaine d'application :

Cette méthode est utilisée sur les produits finis ou en cours d'utilisation lorsque le niveau de sollicitations mécaniques est important. C'est dans le secteur de pointe où la sécurité joue un rôle important, que la méthode trouve son plein épanouissement : à titre d'exemple, la révision des moteurs dans les compagnies aériennes ou le contrôle des soudures de tuyauterie primaire dans les centrales nucléaires. [3]

Il est possible d'établir des procédures de bonne exécution, adaptées aux matériaux contrôlés et à la nature des imperfections recherchées grâce :

- ❖ à la définition des étalons, pièce de nuance rigoureusement contrôlée et comportant des fissures artificielles.
- ❖ à la définition d'un indice de sensibilité à partir des étalons.
- ❖ au chiffrement des résultats et d'étude de l'influence des divers paramètres à partir de l'indice de sensibilité.

### **I-2-3-1-4- Avantages et inconvénients de la méthode : [8]**

#### **Avantages**

- ❖ Elle peut être effectuée sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux, de géométrie et de dimensions quelconques
- ❖ Bonne sensibilité de détection des défauts avec appréciation de leur longueur (la sensibilité de détection des défauts dépend de l'acuité visuelle et du seuil différentiel de contraste de l'opérateur, de l'état de surface et de la qualité du nettoyage de la pièce.
- ❖ L'ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure est de longueur minimale 0,5 mm, et une largeur de 10µm.
- ❖ autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce (l'orientation des défauts est sans influence).

#### **Inconvénients :**

- ❖ Les défauts doivent être débouchant et non obstrués (par de la graisse, la peinture, l'oxyde, la calamine, ou des contraintes résiduelles de compression); donc il est nécessaire d'effectuer un dégraissage et un décapage préalable soigné.
- ❖ les défauts détectés sont superficiels et non pas à l'intérieur du matériau.
- ❖ Les opérateurs doivent posséder une grande expérience.
- ❖ Hygiène et sécurité : utilisation de lumière ultraviolette, stockage et élimination de produits chimiques dont certains sont inflammables.

### **I-2-3-2- Magnétoscopie :**

#### **I-2-3-2-1- Introduction :**

A l'instar du ressuage, la magnétoscopie, qui ne s'applique qu'aux pièces ferromagnétiques, complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent. Peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté : elles sont trop fermées. [1]

Lorsque le ressuage est insuffisant à cause des défauts qui peuvent être à l'intérieur du matériau, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes : passage de courant électrique, passage de flux magnétique.

#### **I-2-3-2-2- Principe de la méthode :**

L'examen magnétoscopique consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie. Les défauts superficiels provoquent à leur endroit des fuites de champs magnétiques qui sont mises en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. Le champ magnétique crée un centre de gravité pour la pièce et les particules sont attirées par ce champ gravitationnel. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé.

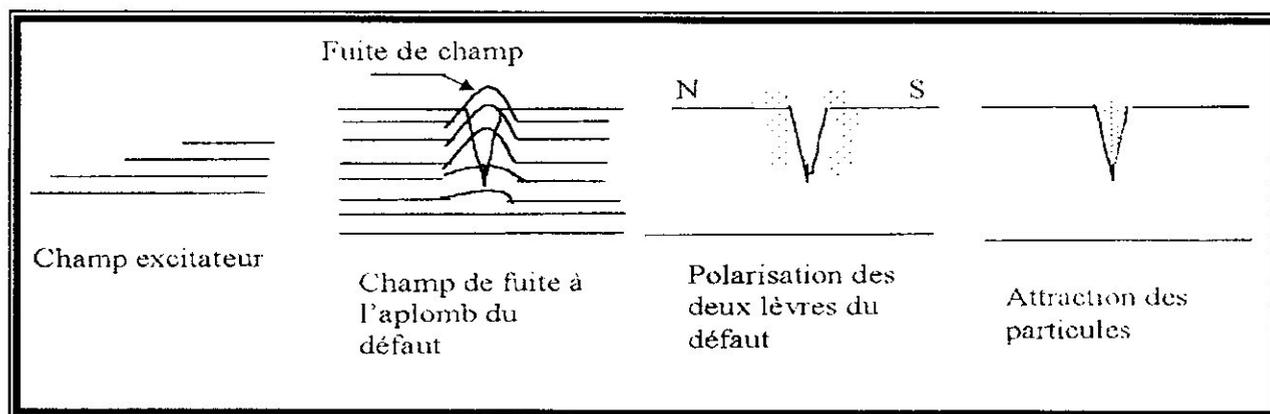


Figure 3. Principe de la méthode de **Magnétoscopie**

### I-2-3-2-3- Magnétisation : [4-5]

#### I-2-3-2-3-a- Magnétisation directe :

Un champ magnétique qui produit un champ dont les lignes, sont en général parallèles à la direction longitudinale de la pièce, champ particulièrement apte à détecter les défauts transversaux.

#### I-2-3-2-3-b- Méthode indirecte (par passage de courant) :

Elle produit un champ dont les lignes sont des révolutions autour de l'axe de la pièce et qui convient pour mettre en évidence les défauts longitudinaux. Le courant passe alors par la totalité de la pièce lorsque les électrodes sont placées à ses extrémités et si les dimensions le permettent. Dans le cas des pièces contrôlées en défilement, seule une partie de la pièce est parcourue par le courant, les électrodes étant réalisées au moyen de galets roulant la pièce.

Dans le cas des pièces de grandes dimensions la magnétisation peut se faire par des pièces de touches de dimensions suffisantes pour laisser passer l'intensité de courant nécessaire à la magnétisation. Cette méthode est commode, elle est utilisée par exemple pour le contrôle des soudures. La difficulté de la méthode réside dans la qualité incertaine de contact, en présence de calamines ou d'irrégularités de surface. Il peut se produire des magnétisations insuffisantes ou des surintensités locales, parfois nocives.

### I-2-3-2-4- Démagnétisation : [5]

Après arrêt de la magnétisation, les matériaux ferromagnétiques conservent une magnétisation rémanente, en l'absence de tout champ, plus ou moins importante en fonction de la nuance et du traitement thermique. Ce magnétisme rémanent peut être une gêne pour l'utilisation ultérieure des pièces : en usinage, avec des copeaux qui restent collés sur les pièces, au soudage à l'arc, par déviation de l'arc, en aéronautique, on est donc amené dans un certain nombre de cas à démagnétiser les pièces. La méthode de désaimantation consiste à faire passer la pièce dans un champ alternatif décroissant s'arrêtant à un champ nul, induction nulle. La pièce est placée dans une bobine soumise à un tel champ ou, plus couramment, la pièce passe dans un tunnel de désaimantation constitué par une bobine traversée par un courant de 50KHz. Le déplacement doit être suffisamment lent jusqu'à environ un mètre de la bobine.

**I-2-3-2-5- Domaine d'application : [1]**

La magnétoscopie est imposée pour la recherche des défauts en surface tels que : souillures, porosités, retassures, fissures et inclusions. Elle est appliquée sur les pièces en acier moulées, forgées exactement sur les congés de raccordement, naissances de Bossage et tubulures, les aubes et les chanfreins pour soudures. Elle est appliquée aussi sur les tôles et les tubes en acier ainsi que les joints en acier allié et surtout entre les différentes passes de soudage.

**I-2-3-2-6- Avantages et inconvénients de la méthode : [8]****Avantages :**

- ❖ La méthode est relativement simple de mise en oeuvre.
- ❖ Elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous adjacents (à 2 mm maximum), et une appréciation de leur longueur.
- ❖ Elle n'est pas coûteuse.
- ❖ Les défauts peuvent être matés ou obstrués.
- ❖ Rapidité relative d'obtention des résultats.
- ❖ Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

**Inconvénients :**

- ❖ La méthode ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.
- ❖ Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire et obligatoire pour les pièces exposées à un environnement sévère.
- ❖ Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur).
- ❖ Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- ❖ Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- ❖ Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- ❖ Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

**I-2-3-3- Radiographie :****I-2-3-3-1- Principe de la méthode :**

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale. Elle consiste à faire traverser la pièce par un faisceau de rayon X et à irradier un film placé derrière la pièce. La mise en évidence des défauts est assurée par une variation de densité optique sur le radiogramme (film radiographique irradié et développé), suite aux différences d'absorption des R-X entre une zone saine et une zone défectueuse. Cette méthode est applicable sur tous matériaux et permet de mettre en évidence des défauts internes. La détection de ces défauts sera d'autant plus aisée que l'orientation des défauts est parallèle au faisceau de rayons X.

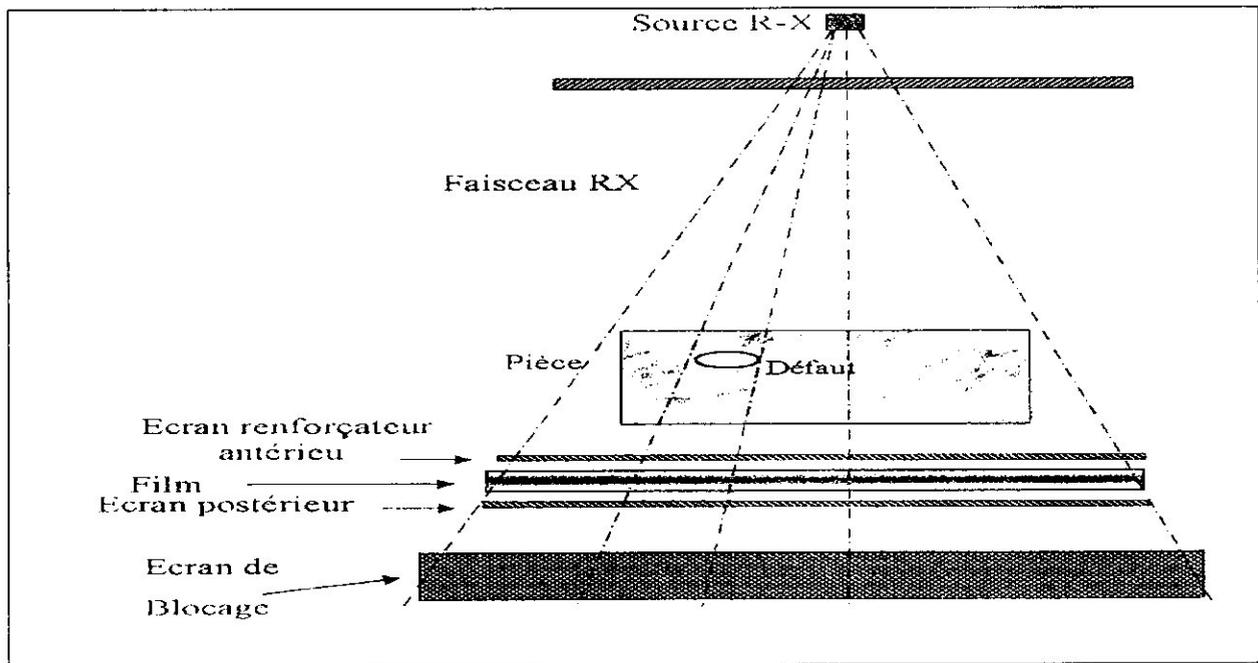


Figure 4. Principe de la méthode de radiographie

### I-2-3-3-2- Domaines d'application :

C'est la méthode la plus difficile à employer mais dont les résultats spectaculaires élargissent les domaines d'application de la radiographie industrielle. Elle est utilisée dans la chirurgie, dans l'art et en génie civil mais plus dans les secteurs de l'industrie. Dans des unités de production, des produits sont tributaires de la radiologie industrielle; par mis eux, citons : l'aéronautique, la construction navale, l'industrie chimique ou pétrolière, les centrales productrices d'électricité (hydraulique, thermiques à flamme ou nucléaires), les plates-formes de forage, la construction automobile, les pipelines, les matériaux composites, charpentes métalliques et les ancrages des téléphériques.

### I-2-3-3-3- Avantages et inconvénients de la méthode : [8]

#### Avantages :

- ❖ Détection surfacique ou volumique dans tous les matériaux.
- ❖ Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm
- ❖ Dimensionnement et identification possibles des défauts.
- ❖ Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques (appareils générateurs de rayons X à micro foyer et pièces minces).
- ❖ Conservation possible des radiogrammes plusieurs dizaines d'années (archivage).
- ❖ Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs d'environ 20 kg, possibilité de radiographier jusqu'à 80 mm d'acier avec l'iridium 192).

**Inconvénients :**

- ❖ La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, et de la sensibilité du film.
- ❖ Difficulté de localiser les défauts en profondeur ( $> 80\text{mm}$ ).
- ❖ Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, et radioprotection).
- ❖ L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.

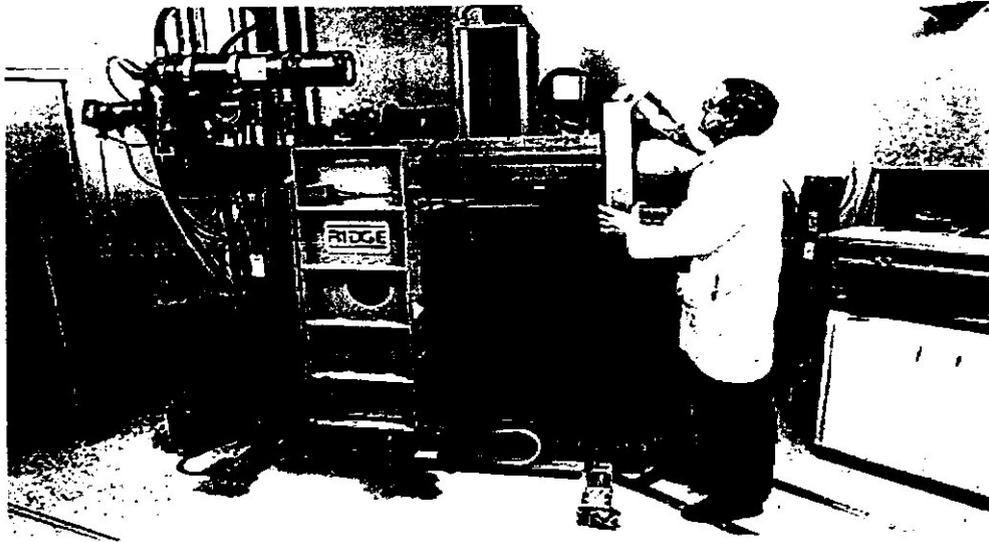


Figure 5. Matériel radiographique de l'institut de recherche en aéronautique (IRA).

**I-2-3-4- Courant de Foucault :****I-2-3-4-1- Principe du contrôle par courant de Foucault :**

Des courants en opposition de phases sont induits dans deux sections voisines du produit à contrôler (conducteur). En l'absence de défauts, en regard des deux bobines d'excitation, le système est équilibré.

La présence d'un défaut en regard des bobines modifie la répartition des courants induits et provoque un déséquilibre du système.

L'œil observe sur l'écran de visualisation une signature caractéristique du signal de déséquilibre au passage du défaut dans la bobine. Un capteur est caractérisé par son impédance électrique à vide (dans l'air).

Si maintenant un défaut est présent au sein de la pièce à contrôler, il perturbe la circulation des courants de Foucault. Cela se traduit par une variation de l'impédance électrique de la bobine

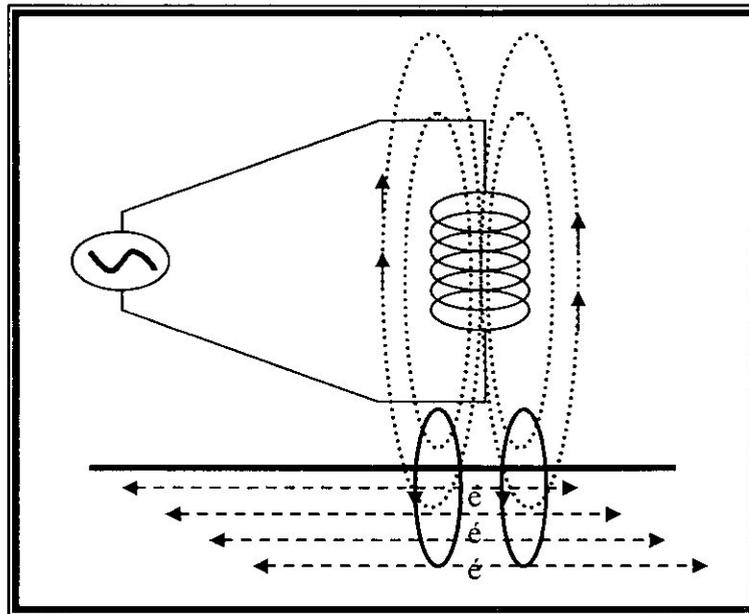


Figure 6. Schéma du principe du contrôle par courant de Foucault

#### I-2-3-4-2- Domaine d'application : [8]

Le contrôle par courant de Foucault est applicable :

- ❖ aux matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques tels que les aciers austénitiques, les cupronickels, et les Alliages a base de Ni.
- ❖ au contrôle de tôles minces
- ❖ au contrôle de filetages males ou femelles
- ❖ au contrôle de revêtements
- ❖ au contrôle de traitements thermiques des surfaces
- ❖ au contrôle de matériaux composites comportant des fibres conductrices, de même le rôle fondamental des propriétés magnétiques des nuances contrôlées autorise une dernière application non destructive et le tri des matériaux.

#### I-2-3-4-3- Avantages et inconvénients de la méthode

##### Avantages :

- ❖ Recherche de défauts situés à des profondeurs variables (de zéro à quelques mm)
- ❖ Les défauts peuvent être obstrués avec possibilité de contrôle automatique et en continu de pièces longues et profilées (tubes, barres, rubans, et feuillards).
- ❖ Permet d'effectuer des mesures dimensionnelles (profondeur de défaut, mesure d'épaisseur des revêtements non électro-conducteurs ou de conductivité très différente de celle du substrat).
- ❖ Permet le tri de pièces dont la conductivité électrique est différente (même alliage mais traitement thermique différent, nuances d'alliages mélangées accidentellement).
- ❖ Haute sensibilité de détection des défauts, une appréciation de la profondeur est possible ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure (longueur minimale 0.2 mm, largeur 1 mm).
- ❖ Autorise des vitesses de défilement élevées, le capteur n'est pas nécessairement au contact de la pièce.
- ❖ Parfaitement adapté aux contrôles de maintenance (tubes de générateurs de vapeur,

remontées mécaniques, ponts suspendus, et moteurs d'avions).

### **Inconvénients :**

Les courants de Foucault sont mis un peu en marge des autres procédés CND pour les raisons suivantes :

- ❖ Méthode de contrôle ne s'appliquant qu'à des matériaux électro-conducteurs
- ❖ Difficile à mettre en oeuvre pour l'examen complet de pièces de formes complexes (nécessite de fabriquer des sondes spécifiques)
- ❖ Méthode de contrôle local peu adaptée à des balayages rapides de surfaces importantes
- ❖ L'interprétation des signaux est délicate et nécessite une formation spécifique des opérateurs de niveau élevé.

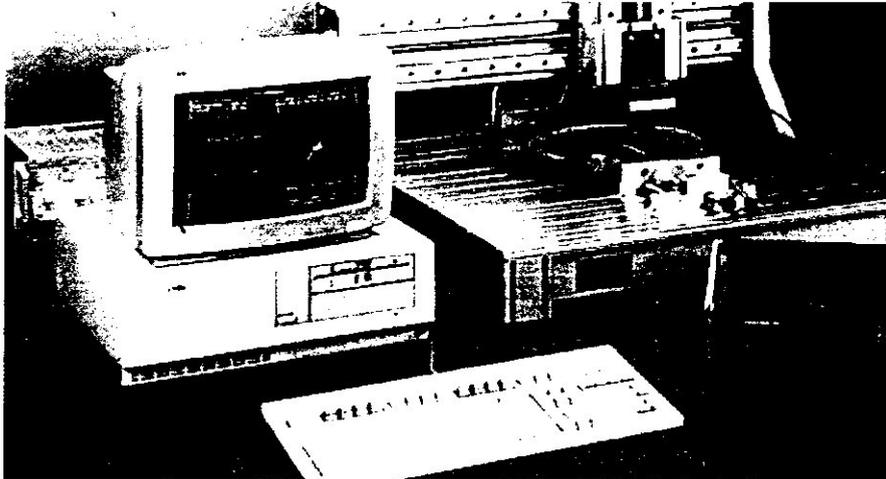


Figure 7. Matériel automatisé pour un contrôle en temps réel par courants de Foucault

### **I-2-3-5- Ultrason :**

#### **I-2-3-5-1- Introduction :**

Les techniques aux ultrasons servent à détecter et à mesurer des défauts internes, mesurer l'épaisseur des composants en céramique et en composites et à inspecter des soudures et des collages.

#### **I-2-3-5-2- Génération des ultrasons : [3-6-7]**

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques, elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu même et du type d'onde, plusieurs méthodes sont utilisées pour la génération des ondes ultrasonores, mais c'est l'utilisation des pastilles piézoélectriques, enfermées dans des boîtiers couramment appelés palpeurs, qui a permis le développement industriel des ultrasons

### I-2-3-5-3- Principe de la méthode :

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion, avec un ou plusieurs transducteurs, de l'onde sur une solution de continuité. L'amplitude relative et la position des indications ultrasonores sont prises en compte

Les contrôles par réflexion sur l'anomalie peuvent être directs ou indirects avec l'émission et la réception confondues ou séparées. Les principaux types d'ondes utilisés appartiennent aux modes :

- ❖ Longitudinal
- ❖ transversal

Leur propagation se fait perpendiculairement ou obliquement par rapport à la surface de contrôle. Le contrôle peut être manuel, automatique ou semi automatique; il peut se faire par contact, en immersion totale ou locale ou par d'autres moyens adaptés aux problèmes particuliers.

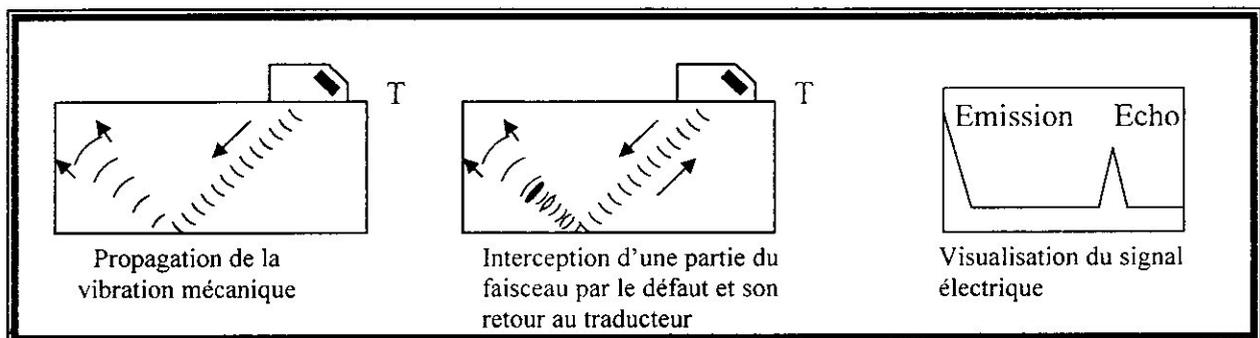


Figure 8. Principe de la méthode des ultrasons

### I-2-3-5-4- Définition d'un palpeur :

Il est constitué autour d'une pastille piézoélectrique (circulaire ou rectangulaire en céramique) dont les faces sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est posée sur un bloc amortisseur réalisé en matériau dense et très absorbant (exemple métal lourd ou sel métallique noyé dans une résine). L'ensemble de ces éléments et une bobine d'accorde sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique avec d'éventuels dispositifs de fixation du palpeur et une face de protection devant la pastille.

Cette face avant, joue un double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité, Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résine, carbures non métallisés).

### I-2-3-5-5- Zone morte ou zone de silence :

En contrôlant par réflexion les échos des défauts situés à proximité de la surface peuvent se superposer à l'écho d'entrée dans la pièce. Ces échos ne sont alors plus détectables. On appelle zone morte, l'épaisseur de matériau en surface où la détection des défauts est incertaine.

Un moyen pour réduire la zone morte est d'utiliser un transducteur très amorti. Les ultrasons subissent une atténuation qui est la somme de plusieurs facteurs :

**L'absorption :** elle est due aux frottements internes et à la conduction de chaleur. Elle augmente avec la fréquence.

**La diffusion :** les molécules renvoient les ultrasons dans toutes les directions, elle augmente avec la fréquence ou la largeur des grains

**La divergence du faisceau :** l'énergie des ultrasons se trouve répartie dans un volume plus grand.

Les ultrasons subissent également une atténuation liée aux variations d'impédance acoustique aux interfaces.

### I-2-3-5-6- Différentes techniques de mise en œuvre : [3-6]

#### a) contrôle par contact :

Le traducteur est directement placé sur la pièce, la liaison acoustique est assurée par un film d'agent de couplage qui est généralement de la graisse, une huile, une colle cellulosique ou des gels spéciaux.

#### b) contrôle par immersion :

Cette méthode se développe pour pallier les inconvénients de la méthode de contrôle par contact. Le traducteur est situé à une distance précise de la pièce qui varie selon les dimensions de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau.

Il existe deux techniques qui ne diffèrent que par leurs mises en œuvre :

- ❖ La méthode en immersion totale ou le traducteur et la pièce sont entièrement immergés dans une cuve de contrôle.
- ❖ La méthode en immersion locale ou le traducteur et la partie de la pièce à contrôler sont reliés entre eux par un volume de liquide, elle est employée lorsque la pièce ne peut pas être immergée complètement

### I-2-3-5-7- Domaine d'application : [8]

La méthode par transmission peut être utilisée pour :

- ❖ La recherche d'anomalies internes dont la forme, les dimensions ou l'orientation ne permet pas d'effectuer un contrôle par réflexion (fissures inclinées par rapport à la surface de contrôle.)
- ❖ Le contrôle des produits de faible épaisseur.
- ❖ Le contrôle des matériaux composites (matériaux monolithiques) : recherche de délaminages, inclusion, absences de séparateur et contrôle de taux de porosité.

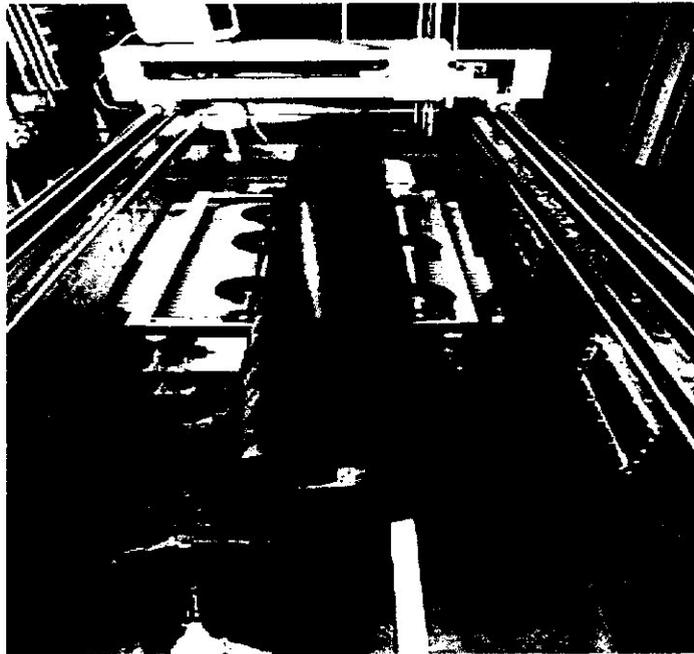
### I-2-3-5-8- Avantages et inconvénients de la méthode :

#### Avantages :

- ❖ Examen volumique.
- ❖ Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forgé).
- ❖ Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore).
- ❖ Localisation et dimensionnement des défauts.
- ❖ Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation.

**Inconvénients :**

- ❖ Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- ❖ Sensible à la géométrie (forme, rugosité, zones mortes).
- ❖ Eblouissement sous la surface (zone de silence).
- ❖ Sensible aux effets structure / anisotropie.
- ❖ Soumis à un couplage pièce / traducteur.
- ❖ Nécessite absolument l'utilisation de bloc de référence difficile à fabriquer.
- ❖ Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.



*Figure 9. Contrôle aux ultrasons d'une section du télémanipulateur d'une station spatiale dans la cuve à immersion*

**I-3- Conclusion :**

Le chapitre que nous venons de voir, nous a donné un bref aperçu sur la mécanique de la rupture et les différentes méthodes, techniques du contrôle non destructif. Par la suite nous allons nous intéresser au contrôle par les ultrasons et plus précisément les ultrasons par immersion qui sont le sujet de notre travail.

***Chapitre II :***  
***Modélisation et études de l'ailette FAN***  
***CO2 du réacteur JT8D par éléments finis***

## II-1- Les éléments finis

### II-1-1- Introduction : [9]

Il existe aujourd'hui de très nombreux domaines de la physique mais aussi de la chimie, de la biologie... Dans lesquels les outils de simulation numérique permettent de prévoir le comportement de ce qui est modélisé. Il est donc important de savoir passer de la réalité vers le modèle, puis d'interpréter les résultats issus du programme de simulation. Le modèle de la conception mécanique bénéficie lui aussi de la simulation numérique et de ses progrès. Les outils d'analyse, réservés aux spécialistes au début des années 1980, sont aujourd'hui largement répandus et intégrés tout au long de la démarche de conception. Les métiers du bureau d'études ont en effet sensiblement changé depuis quelques années : L'informatique a été introduite et la Conception Assistée par Ordinateur a remplacé la planche à dessin. Profitant des moyens informatiques mis en place et de leur puissance, on a petit à petit demandé aux techniciens de valider leur conception avec des outils numériques de plus en plus sophistiqués, souvent en lieu et en place d'abaques et de formulaires dont l'usage était de règle.

Pourquoi fait-on des simulations ? Dès la phase de pré-dimensionnement, la question qui se pose est la suivante : la structure conçue répond-elle au cahier des charges ? Cette question peut être formulée de la façon suivante : la structure aura-t-elle des déplacements et des contraintes admissibles sous les charges qui lui seront appliquées ? Des outils graphiques et des programmes d'analyse toujours plus efficaces permettent aux concepteurs des bureaux d'études de réaliser des calculs précis car la géométrie, les conditions aux limites, les caractéristiques des matériaux sont décrites plus finement que dans les formulaires. Les structures sont optimisées, grâce à l'apport de la simulation. Mais ces calculs ne donnent que les résultats de la simulation effectuée sur des modèles de la structure réelle. Et comme tous les modèles sont approchés, la solution numérique est aussi approchée.

Outre la conception de la pièce, le concepteur se trouve souvent confronté à deux types de problème : il doit idéaliser son modèle CAO en fonction du calcul qu'il souhaite réaliser, puis interpréter les résultats de la simulation en se posant la question de leur représentativité.

La plupart des calculs réalisés en bureau d'études reposent sur les hypothèses de la mécanique linéaire. Se restreindre à cette partie de la mécanique permet de traiter de très nombreux cas qui ne sont pas vraiment une limitation. Beaucoup de pièces se déforment peu sous charge, et sont soumises à des niveaux de contraintes que l'on souhaite inférieurs à la limite élastique des matériaux. On utilise d'ailleurs la notion de coefficient de sécurité pour tenter de se prémunir de toute incursion dans le domaine plastique, ce qui aurait pour effet de modifier irrémédiablement la structure.

Les grandes entreprises appliquent cette méthode pour des réalisations industrielles ; ces techniques sont maintenant à notre portée avec un ordinateur fonctionnant sous un logiciel d'éléments finis.

## II-1-2- Evolution de la méthode :

L'apparition des ordinateurs et les besoins de l'industrie aéronautique ont provoqué un développement rapide de la mécanique des structures entre 1950 et 1960. *Turner Clough* martin et *Top* introduisent en 1956 le concept d'élément fini, il représente un milieu continu élastique à deux dimensions par un assemblage de panneaux triangulaires sur lesquels les déplacements sont supposés varier linéairement. Le comportement de chaque panneau est caractérisé par une matrice de rigidité élémentaire. A partir de ces matrices, la technique classique de la mécanique des structures conduit à la solution, c'est à dire aux déplacements en tout point du milieu continu.

Dés 1960 la méthode des éléments finis subit un développement rapide dans plusieurs directions.

## II-1-3- Les différents types d'éléments finis : [9]

Il existe de nombreux types d'éléments finis, mais quand ils sont classés à partir des critères purement géométriques, ils n'appartiennent qu'à trois familles distinctes : les éléments de topologie 1D ou linéique regroupant barres et poutres, les éléments de topologie 2D dit surfacique regroupant les membranes et coques, et enfin les éléments de topologie 3D regroupant ce qui est communément appelé les éléments de volume. Les éléments axisymétriques sont particuliers et on peut les ranger dans les deux premières familles selon les cas.

Il existe pour chaque famille topologique des outils de maillage adaptés permettant de générer des éléments. Certains de ces outils sont implantés dans la plupart des pré-traitements, d'autre sont spécifiques. Un outil de maillage est généralement appelé « mailleur ».

## II-1-4- Mailleurs volumiques : [9]

Un élément de volume n'est bien sur représenté ni par sa fibre neutre ni par son feuillet moyen mais par sa géométrie complète. Il existe plusieurs types d'éléments de volume, de formes différentes : les hexaèdres, les prismes et les tétraèdres. Ils peuvent être définis au premier degré auquel cas toutes leurs arêtes sont rectilignes, ou au second degré auquel cas leurs arêtes peuvent être soit rectilignes soit curvilignes. Comme précédemment l'utilisateur choisit le degré et la prise en compte ou non des courbures, ce qui n'a pas d'incidence sur les techniques de maillage mais seulement sur les éléments eux-mêmes. Il existe différentes techniques de maillage qui permettent la génération des éléments de volume.

## II-1-5- Mailleur libre : [9]

La technique dite de « maillage libre » ou de « maillage tétraédrique » n'impose aucune contrainte particulière à l'utilisateur. Le domaine volumique à mailler peut comporter des trous ou non, le nombre de sommets c'est le nombre de nœuds sur chaque arête. A partir d'un maillage initial de la peau réalisé en éléments triangulaires, le mailleur construit des éléments vers l'intérieur du domaine. Le seul élément fini généré par cet outil de maillage est le tétraèdre (figure 10). Un des inconvénients majeurs de cette technique de maillage est que le nombre d'éléments générés dans un domaine est à *priori inconnu*. Il peut devenir disproportionné vis-à-vis de la précision requise.

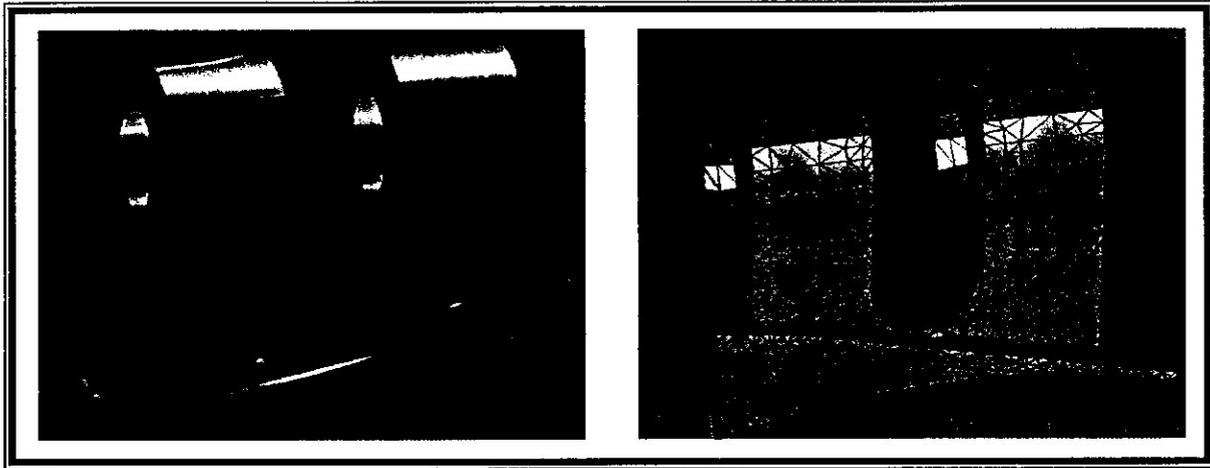


Figure 10. Exemple de maillage libre

### II-1-6- Les méthodes de maillage : [10]

La plupart des logiciels proposent différents algorithmes pour générer plus ou moins automatiquement des maillages. La phase de maillage est sans doute celle où on passe le plus de temps dans la définition d'un problème. Obtenir un «bon maillage» résulte d'une certaine expérience et d'une certaine intuition sur le résultat du calcul. On peut cependant dégager quelques règles générales à suivre :

- ❖ Dans un maillage surfacique, les mailles idéales sont les triangles équilatéraux et les carrés.
- ❖ Dans un maillage volumique, les mailles idéales sont les tétraèdres réguliers et les cubes.
- ❖ Le maillage ne doit pas être inutilement fin. Car plus le maillage est fin, plus le calcul est coûteux. On a à faire un compromis entre la finesse de la représentation géométrique et le coût du calcul.

Quand on a une intuition du résultat final on peut décider de mailler grossièrement dans certaines régions et plus finement dans d'autres.

### II-1-7- Les différentes étapes dans l'étude d'une structure : [10]

- ❖ Remplacer la structure à étudier par un ensemble d'éléments supposés liés les uns aux autres, en un nombre fini de points appelés points nodaux ou nœuds. Ces nœuds se trouvent aux coins des éléments ou tout le long de leurs frontières. Cette étape est appelée Maillage.
- ❖ Formulation des propriétés de chaque type d'élément (matrice de rigidité et de masse élémentaire)
- ❖ Assemblage de la propriété élémentaire (détermination des matrices globales).
- ❖ Vérification des conditions aux limites.
- ❖ Résolution du système d'équation obtenu, en général,  $\{F\} = [K] \cdot \{d\}$  pour une analyse statique qui relie les forces  $\{F\}$  et les déplacements  $\{d\}$  aux nœuds par l'intermédiaire de la matrice de rigidité.
- ❖ Manipulation et interprétation des résultats (exploitation).

**II-1-8- modélisation de la pièce :**

Pour que la méthode des éléments finis soit applicable, il faut avoir un modèle mathématique. Ce modèle qui est souvent de forme complexe exige un outil informatique pour le calcul, cependant l'obtention de la forme de cette pièce n'est pas tout le temps facile, c'est pour cela qu'un relevé de points sur la surface de la pièce est obligatoire vu sa complexité. Comme nous sommes confrontés dans notre travail au même problème nous avons procédé à une digitalisation de l'ailette FAN CO2 du réacteur JT8D.

## II-2- digitalisation de l'ailette FAN CO2 du réacteur JT8D

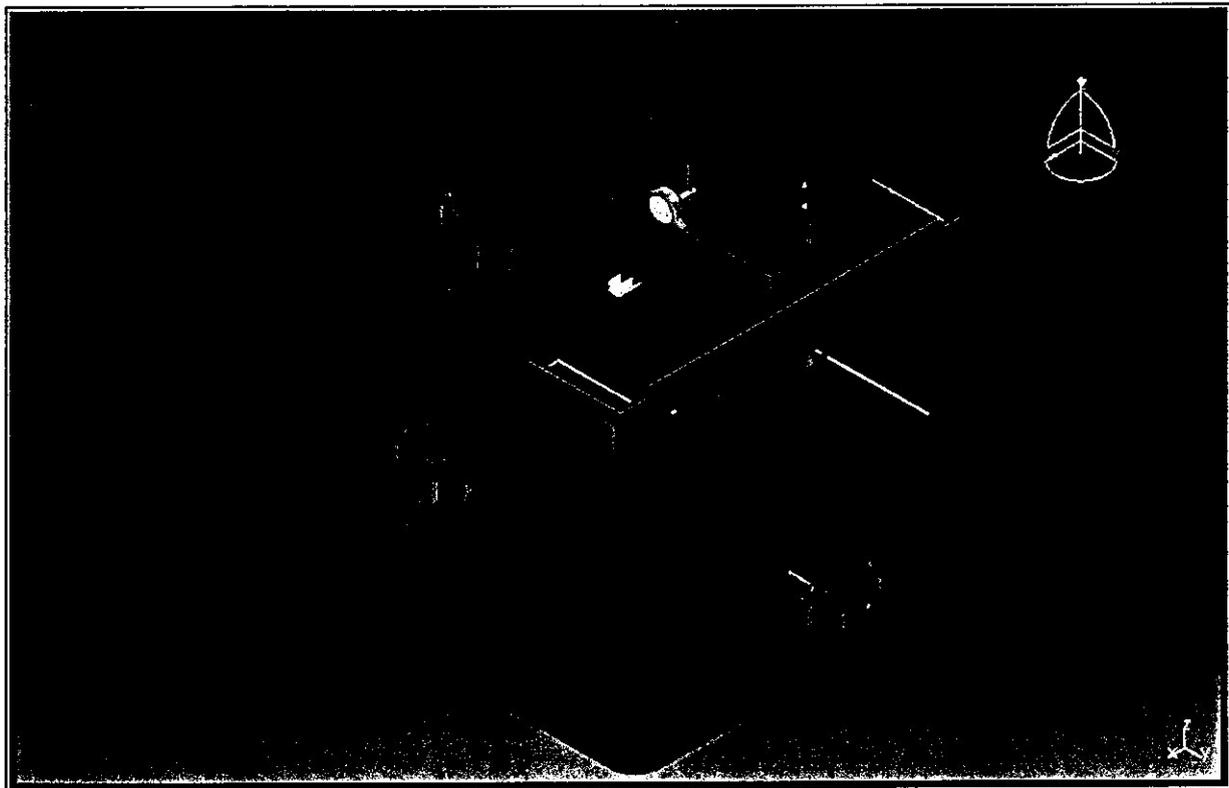
### II-2-1- Introduction

La digitalisation signifie le dimensionnement et le relevé du nombre optimum de points sur la surface de la pièce.

Pour effectuer la digitalisation de notre ailette à la forme gauche, il nous faut une machine de mesure tridimensionnelle de préférence optique afin d'obtenir des données très précises. En l'absence de cette machine, nous avons opté pour une fraiseuse universelle

### II-2-2- machine

Le travail a été réalisé sur une fraiseuse universelle récente en bloquant la rotation du mandrin. Nous allons remplacer l'outil de travail de cette dernière par un comparateur.



*Figure 11. Fraiseuse universelle ACIERA F3  
Image réalisée avec le logiciel CATIA V5 R10*

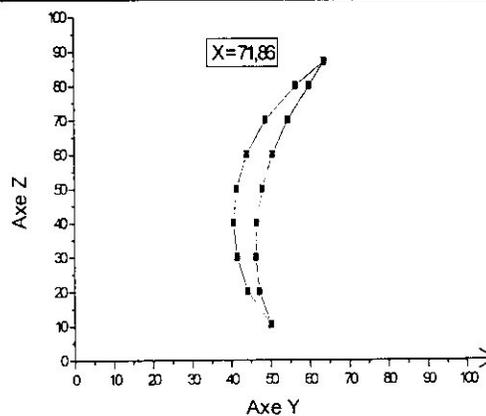
Pour le nuage de points on a adopté une numérotation des points de l'extrados et l'intrados suivants :

1S1ext : 1<sup>er</sup> point, section 1 de l'extrados

1S1int : 1<sup>er</sup> point, section 1 de l'intrados

**Section 1 Pour X = 71,68**

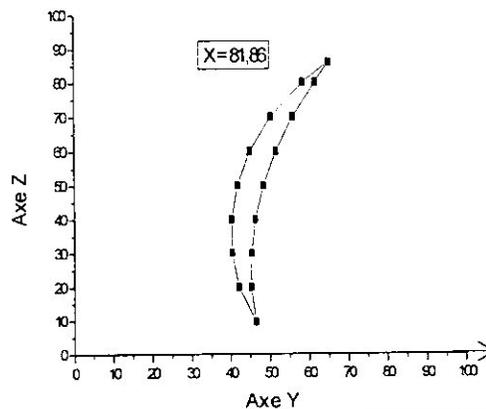
Points	Y	Z
1S1ext	63,8	87,08
2S1ext	56,58	80
3S1ext	48,9	70
4S1ext	44,12	60
5S1ext	41,52	50
6S1ext	40,7	40
7S1ext	41,66	30
8S1ext	44,26	20
9S1ext	50,16	10,36



Points	Y	Z
1S1int	63,8	87,08
2S1int	60,02	80
3S1int	54,56	70
4S1int	50,6	60
5S1int	48	50
6S1int	46,58	40
7S1int	46,4	30
8S1int	47,24	20
9S1int	50,16	10,36

**Section 2 Pour X = 81,68**

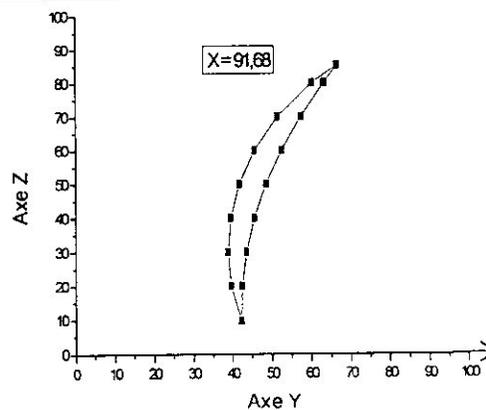
Points	Y	Z
1S2ext	65	86,1
2S2ext	58,44	80
3S2ext	50,32	70
4S2ext	45,02	60
5S2ext	41,84	50
6S2ext	40,32	40
7S2ext	40,44	30
8S2ext	42,12	20
9S2ext	46,5	9,6



Points	Y	Z
1S2int	65	86,1
2S2int	61,62	80
3S2int	55,92	70
4S2int	51,62	60
5S2int	48,44	50
6S2int	46,36	40
7S2int	45,38	30
8S2int	45,26	20
9S2int	46,5	9,6

**Section 3 Pour X = 91,68**

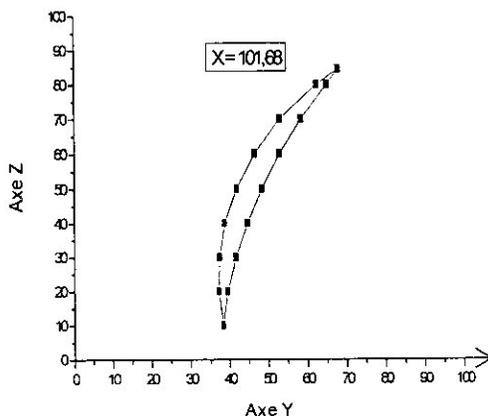
Points	Y	Z
1S3ext	66,48	85,24
2S3ext	60,16	80
3S3ext	51,56	70
4S3ext	45,7	60
5S3ext	41,82	50
6S3ext	39,64	40
7S3ext	38,92	30
8S3ext	39,68	20
9S3ext	42,28	9,7



Points	Y	Z
1S3int	66,48	85,24
2S3int	63,28	80
3S3int	57,42	70
4S3int	52,5	60
5S3int	48,58	50
6S3int	45,6	40
7S3int	43,6	30
8S3int	42,46	20
9S3int	42,28	9,7

**Section 4 Pour X = 101,68**

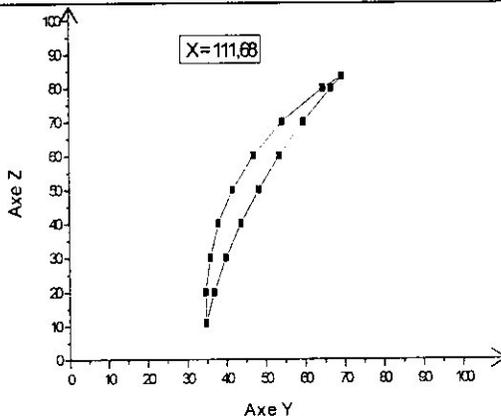
Points	Y	Z
1S4ext	67,84	84,44
2S4ext	62,44	80
3S4ext	53	70
4S4ext	46,5	60
5S4ext	41,92	50
6S4ext	38,74	40
7S4ext	37,4	30
8S4ext	37,18	20
9S4ext	38,3	10,02



Points	Y	Z
1S4int	67,84	84,44
2S4int	65	80
3S4int	58,44	70
4S4int	52,94	60
5S4int	48,4	50
6S4int	44,7	40
7S4int	41,74	30
8S4int	39,58	20
9S4int	38,3	10,02

**Section 5 Pour X = 111,68**

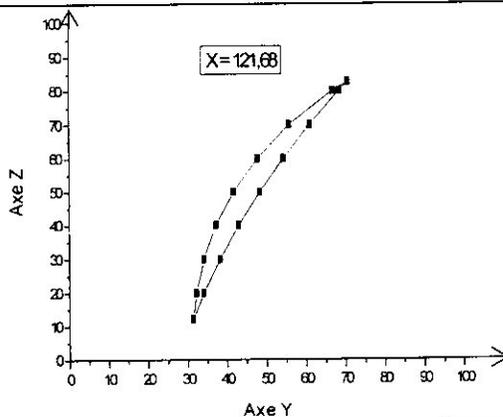
Points	Y	Z
1S5ext	69,4	83,5
2S5ext	64,68	80
3S5ext	54,38	70
4S5ext	47,12	60
5S5ext	41,78	50
6S5ext	38,04	40
7S5ext	35,92	30
8S5ext	34,66	20
9S5ext	34,76	10,96



Points	Y	Z
1S5int	69,4	83,5
2S5int	66,82	80
3S5int	59,78	70
4S5int	53,66	60
5S5int	48,4	50
6S5int	43,9	40
7S5int	40	30
8S5int	36,86	20
9S5int	34,76	10,96

**Section 6 Pour X = 121,68**

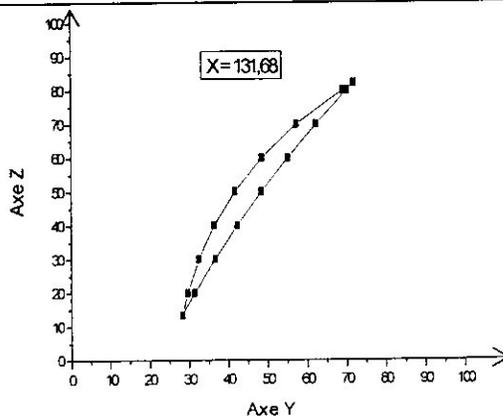
Points	Y	Z
1S6ext	70,68	82,78
2S6ext	66,9	80
3S6ext	55,84	70
4S6ext	47,88	60
5S6ext	41,78	50
6S6ext	37,28	40
7S6ext	34,12	30
8S6ext	32,2	20
9S6ext	31,4	12,2



Points	Y	Z
1S6int	70,68	82,78
2S6int	68,5	80
3S6int	61,04	70
4S6int	54,38	60
5S6int	48,44	50
6S6int	43,1	40
7S6int	38,34	30
8S6int	34,14	20
9S6int	31,4	12,2

**Section 7 Pour X = 131,68**

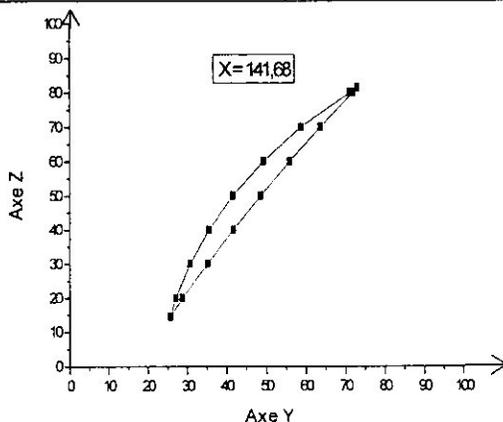
Points	Y	Z
1S7ext	71,9	82,1
2S7ext	69,08	80
3S7ext	57,34	70
4S7ext	48,62	60
5S7ext	41,74	50
6S7ext	36,46	40
7S7ext	32,46	30
8S7ext	29,64	20
9S7ext	28,32	13,5



Points	Y	Z
1S7int	71,9	82,1
2S7int	70,2	80
3S7int	62,34	70
4S7int	55,16	60
5S7int	48,48	50
6S7int	42,36	40
7S7int	36,66	30
8S7int	31,42	20
9S7int	28,32	13,5

**Section 8 Pour X = 141,68**

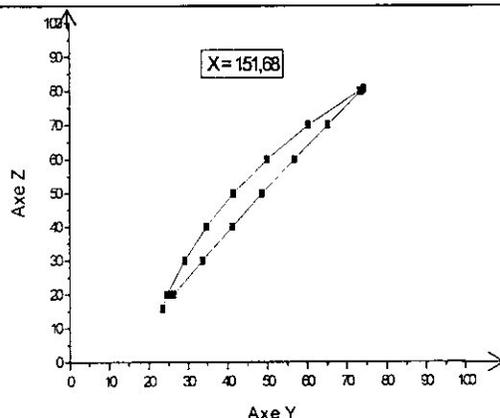
Points	Y	Z
1S8ext	73,12	81,4
2S8ext	71,28	80
3S8ext	58,86	70
4S8ext	49,3	60
5S8ext	41,64	50
6S8ext	35,58	40
7S8ext	30,8	30
8S8ext	27,1	20
9S8ext	25,8	14,64



Points	Y	Z
1S8int	73,12	81,4
2S8int	72	80
3S8int	63,76	70
4S8int	55,98	60
5S8int	48,56	50
6S8int	41,8	40
7S8int	35,2	30
8S8int	28,84	20
9S8int	25,8	14,64

**Section 9 Pour X = 151,68**

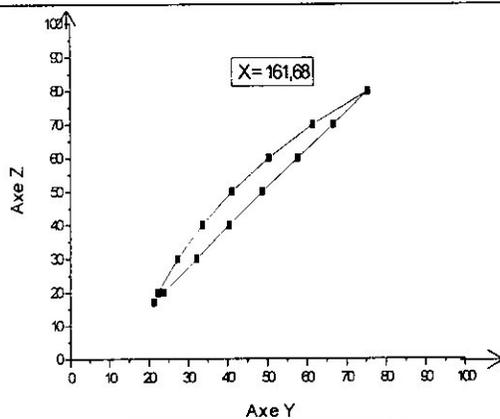
Points	Y	Z
1S9ext	74,3	80,7
2S9ext	73,4	80
3S9ext	60,34	70
4S9ext	49,94	60
5S9ext	41,48	50
6S9ext	34,68	40
7S9ext	29,12	30
8S9ext	24,64	20
9S9ext	23,5	15,8



Points	Y	Z
1S9int	74,3	80,7
2S9int	73,76	80
3S9int	65,24	70
4S9int	56,82	60
5S9int	48,66	50
6S9int	41,24	40
7S9int	33,74	30
8S9int	26,3	20
9S9int	23,5	15,8

**Section 10 Pour X = 161,68**

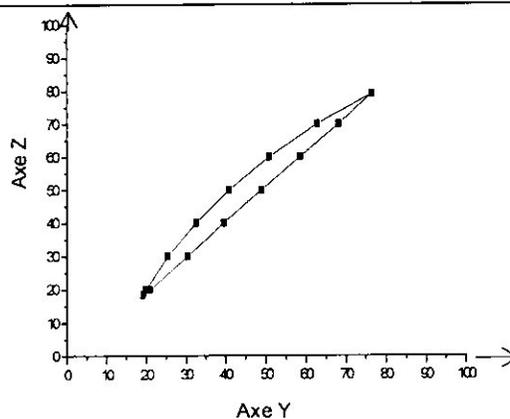
Points	Y	Z
1S10ext	75,48	79,91
2S10ext	61,6	70
3S10ext	50,42	60
4S10ext	41,2	50
5S10ext	33,64	40
6S10ext	27,32	30
7S10ext	22,26	20
8S10ext	21,32	17,08



Points	Y	Z
1S10int	75,48	79,91
2S10int	66,8	70
3S10int	57,82	60
4S10int	48,82	50
5S10int	40,5	40
6S10int	32,18	30
7S10int	23,78	20
8S10int	21,32	17,08

**Section 11 Pour X = 171,68**

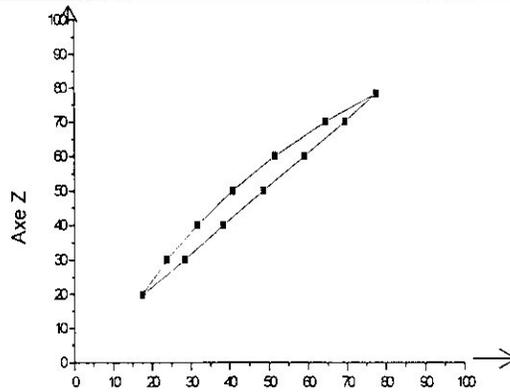
Points	Y	Z
1S11ext	76,6	79,1
2S11ext	62,86	70
3S11ext	50,88	60
4S11ext	40,92	50
5S11ext	32,58	40
6S11ext	25,5	30
7S11ext	19,94	20
8S11ext	19,3	18,4



Points	Y	Z
1S11int	76,6	79,1
2S11int	68,22	70
3S11int	58,6	60
4S11int	48,9	50
5S11int	39,62	40
6S11int	30,5	30
7S11int	20,98	20
8S11int	19,3	18,4

**Section 12 Pour X = 181,68**

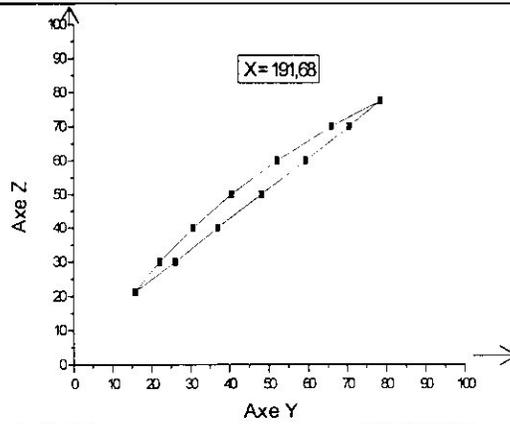
Points	Y	Z
1S12ext	77,6	78,28
2S12ext	64,44	70
3S12ext	51,54	60
4S12ext	40,76	50
5S12ext	31,64	40
6S12ext	23,82	30
7S12ext	17,5	19,84



Points	Y	Z
1S12int	77,6	78,28
2S12int	69,46	70
3S12int	59,04	60
4S12int	48,66	50
5S12int	38,46	40
6S12int	28,42	30
7S12int	17,5	19,84

**Section 13 Pour X = 191,68**

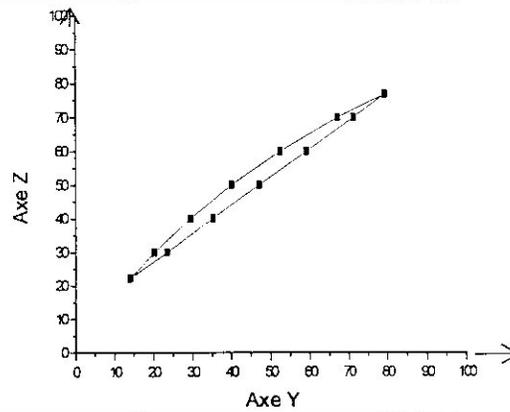
Points	Y	Z
1S13ext	78,5	77,5
2S13ext	65,96	70
3S13ext	52,12	60
4S13ext	40,56	50
5S13ext	30,66	40
6S13ext	22,1	30
7S13ext	15,8	21,2



Points	Y	Z
1S13int	78,5	77,5
2S13int	70,52	70
3S13int	59,3	60
4S13int	48,18	50
5S13int	37,04	40
6S13int	26,1	30
7S13int	15,8	21,2

**Section 14 Pour X = 201,68**

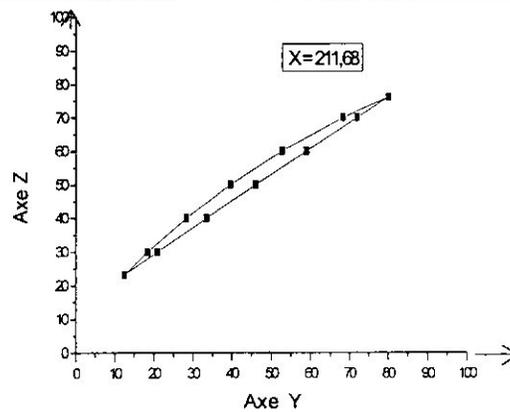
Points	Y	Z
1S14ext	79,3	76,8
2S14ext	67,12	70
3S14ext	52,46	60
4S14ext	40,12	50
5S14ext	29,5	40
6S14ext	20,22	30
7S14ext	14,08	22,26



Points	Y	Z
1S14int	79,3	76,8
2S14int	71,26	70
3S14int	59,16	60
4S14int	47,2	50
5S14int	35,24	40
6S14int	23,46	30
7S14int	14,08	22,26

**Section 15 Pour X = 211,68**

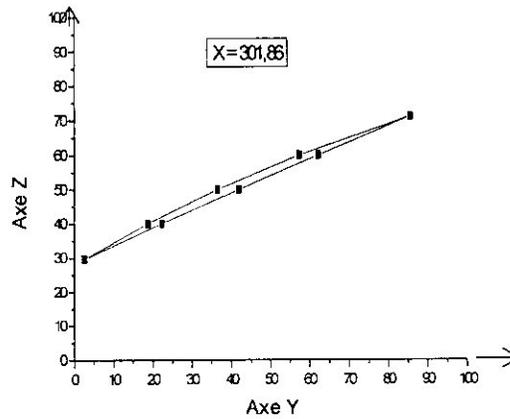
Points	Y	Z
1S15ext	80,06	76,14
2S15ext	68,32	70
3S15ext	52,82	60
4S15ext	39,68	50
5S15ext	28,32	40
6S15ext	18,36	30
7S15ext	12,48	23,2



Points	Y	Z
1S15int	80,06	76,14
2S15int	72	70
3S15int	59	60
4S15int	46,16	50
5S15int	33,46	40
6S15int	20,92	30
7S15int	12,48	23,2

**Section 24 Pour X = 301,68**

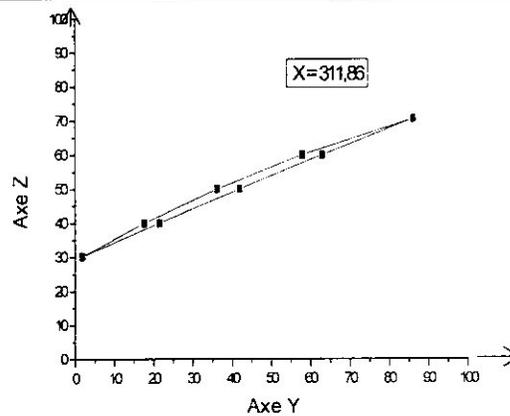
Points	Y	Z
1S24ext	85,6	71,1
2S24ext	57,4	60
3S24ext	36,54	50
4S24ext	18,78	40
5S24ext	2,64	29,64



Points	Y	Z
1S24int	85,6	71,1
2S24int	62,24	60
3S24int	41,96	50
4S24int	22,46	40
5S24int	2,64	29,64

**Section 25 Pour X = 311,68**

Points	Y	Z
1S25ext	86,1	70,6
2S25ext	57,96	60
3S25ext	36,2	50
4S25ext	17,66	40
5S25ext	1,8	30,26



Points	Y	Z
1S25int	86,1	70,6
2S25int	63,02	60
3S25int	41,86	50
4S25int	21,52	40
5S25int	1,8	30,26

Le nombre total des points relevés est de 409 pts.

## II-3- Modélisation de l'ailette sur un logiciel de CFAO (CATIA) :

### II-3-1-Introduction :

De nos jours, la CAO est devenue un outil incontournable dans la conception et la fabrication des produits. Elle est utilisée dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'automobile...etc. Il existe de nombreux logiciels de calcul des structures, mais le logiciel **CATIA** qui est présenté dans ce chapitre a la particularité d'avoir été réalisé sur des micro-ordinateurs. Les caractéristiques du logiciel et son mode d'utilisation sont bien adaptés à ce type de matériel

### II-3-2-Présentation du logiciel :

**CATIA** (Computer Aided Three-dimensional Interactive Applications; Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive d'Applications), développé par Dassault Systèmes, est un logiciel de CAO graphique interactif permettant de modéliser en 3D, de visualiser et d'analyser des éléments filaires, surfaciques et solides dans l'espace. Ce logiciel de CAO permet de créer et traiter divers types d'éléments dont les principaux sont les points, les lignes, les courbes, les plans, les surfaces, les volumes et les solides. **CATIA** permet aussi de réaliser des analyses géométriques et cinématiques, des contraintes (maillage) et des modèles développés. Le logiciel **CATIA** peut être utilisé pour une très grande variété d'applications: l'aéronautique, l'automobile, la conception de produits de consommation, les équipements électroniques, la robotique, la cinématique, l'étude des éléments finis, etc. C'est un système complet de CAO 2D et 3D. Ce logiciel est constitué d'une série de modules qui sont choisis suivant les besoins de l'utilisateur. Pour notre projet nous avons utilisé deux modules :

**PART DESIGN  
ANALYSIS**

#### II-3-2-a-Le module part design :

L'application **CATIA Part Design** permet de concevoir des pièces mécaniques en 3D avec une interface utilisateur souple et intuitive. Elle permet également de respecter les conditions de conception des pièces, quel que soit le niveau de complexité, du plus simple au plus avancé. Pour une bonne illustration on va prendre les principales tâches décrites dans la modélisation de l'ailette FAN CO2.

#### II-3-2-b-Le module analysis :

Le module d'analyse par Eléments finis du **CATIA** permet d'évaluer le comportement mécanique de pièces ou de structures complexes  
Les diverses étapes inséparables à l'analyse par éléments finis sont représentées dans le titre suivant, **étude statique**

### II-3-3- La modélisation :

Ouverture de l'atelier Part Design

#### II-3-3-1- Introduction de nuage de points :

Dans cette tâche, on introduit les points en deux étapes :

La première consiste à introduire les points données à la page 28 par leur coordonnée XYZ.

La deuxième étape commence par décaler des plans de références parallèles au plan absolu (YoZ), la valeur du décalage de chaque plan, est la coordonnée X de chaque section. Après avoir obtenu tous les plans on introduit les valeurs des points de l'intrados et l'extrados de chaque section pour le plan correspondant. (Voir Figure 16.)

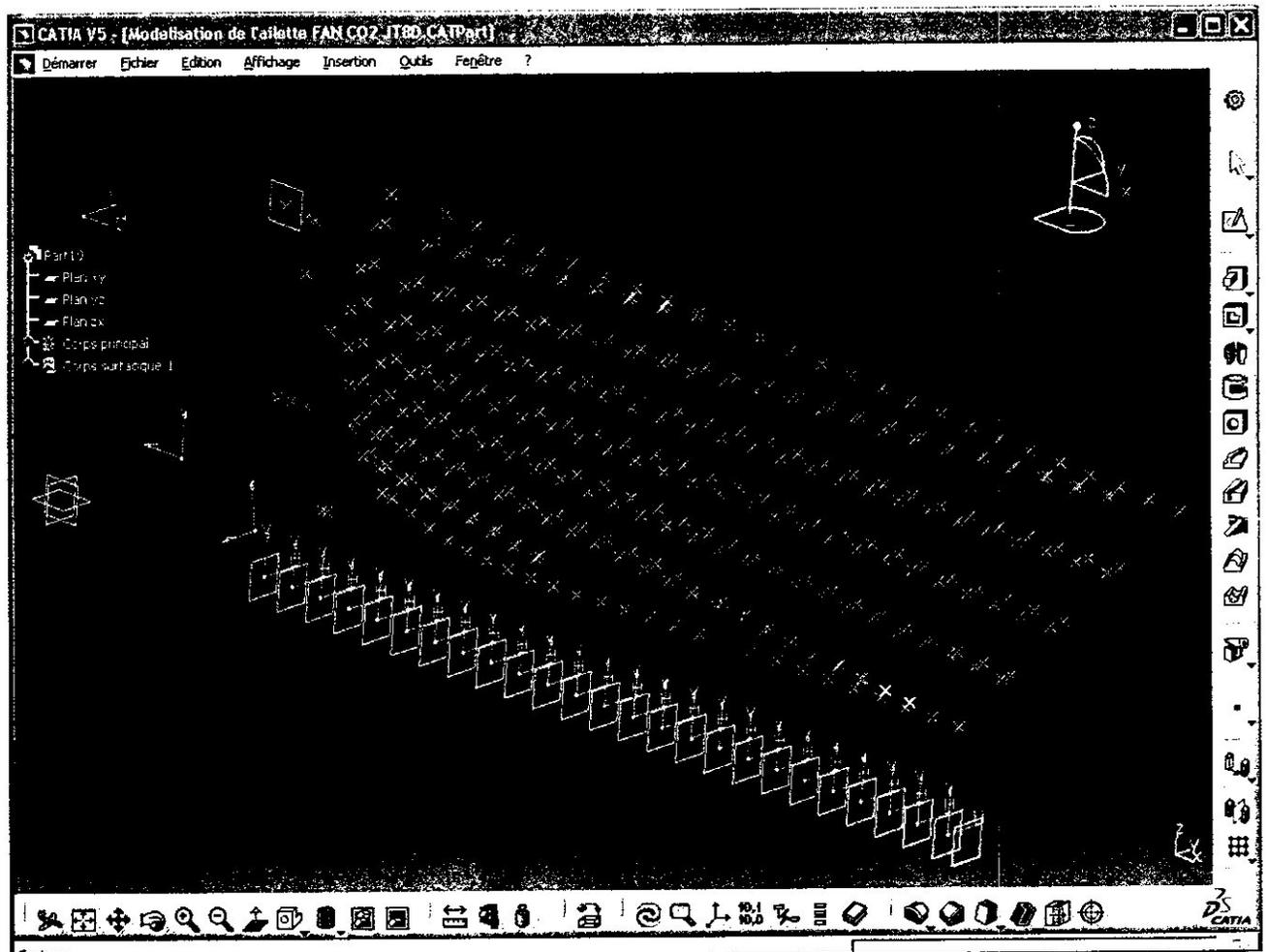


Figure 16. Nuage de points introduits

### II-3-3-2- Création des lignes de contour :

Pour la racine de l'ailette les contours sont de forme simple (cercle, ligne, arc de cercle), il suffit de dessiner des contours en utilisant la fonction *Esquisse*, mais pour les sections, le contour est obtenu avec des splines à la fin on obtient la forme qui est représenté sur la figure 17.

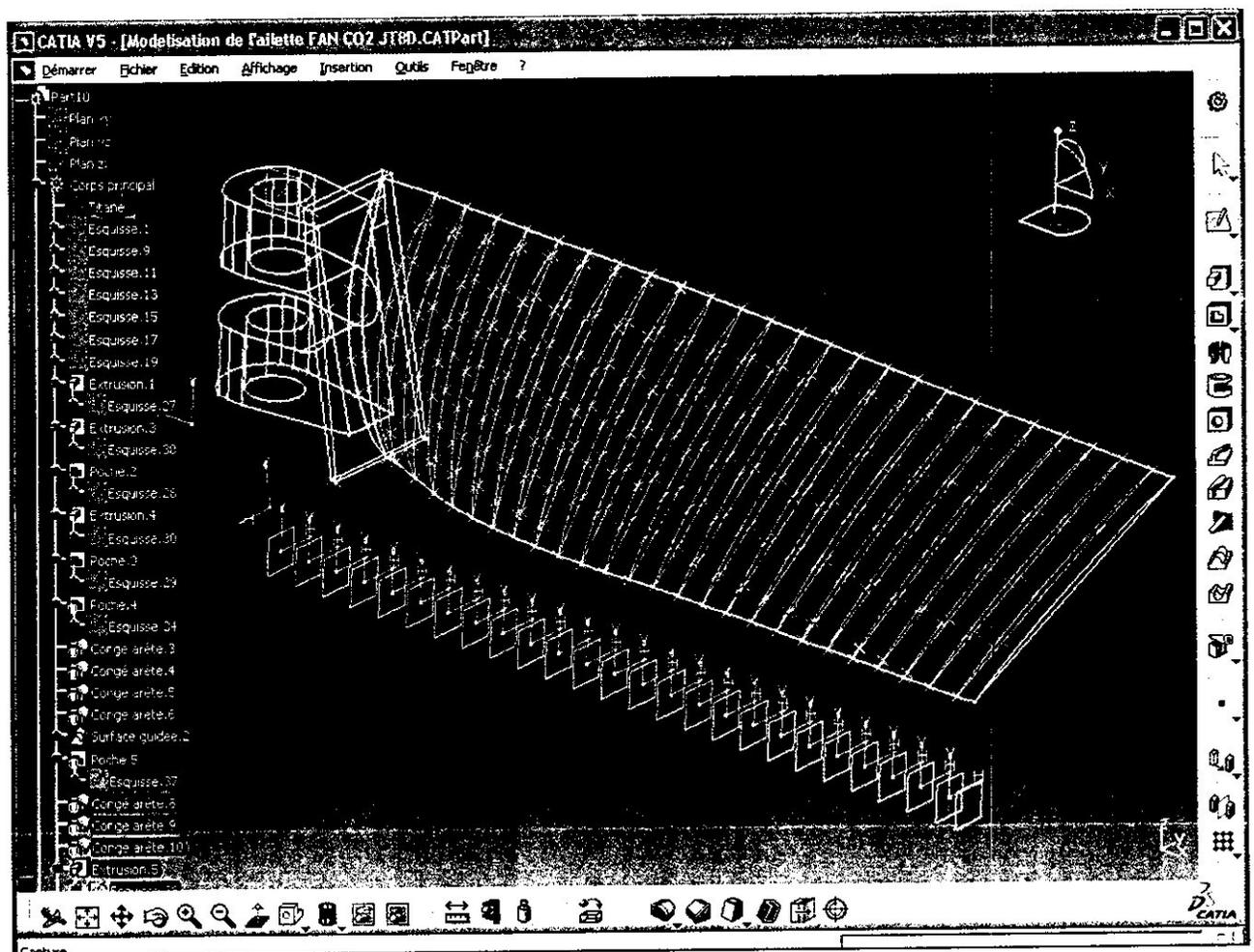


Figure 17. Contours obtenus

### II-3-3-3- Génération du volume et application du matériau :

Pour cette étape on a utilisé les fonctions *Extrusion*  et *Poche*  pour la racine de l'ailette après avoir dessiné des esquisses à partir des coordonnées des points.

Pour le reste du volume, la fonction *Surface guidée*  par section à contour fermé est la seule méthode pour l'obtention de la forme gauche de l'ailette. (Voir figure 18.)

L'application du matériau avec ses caractéristiques mécaniques est obligatoire pour des essais statiques.

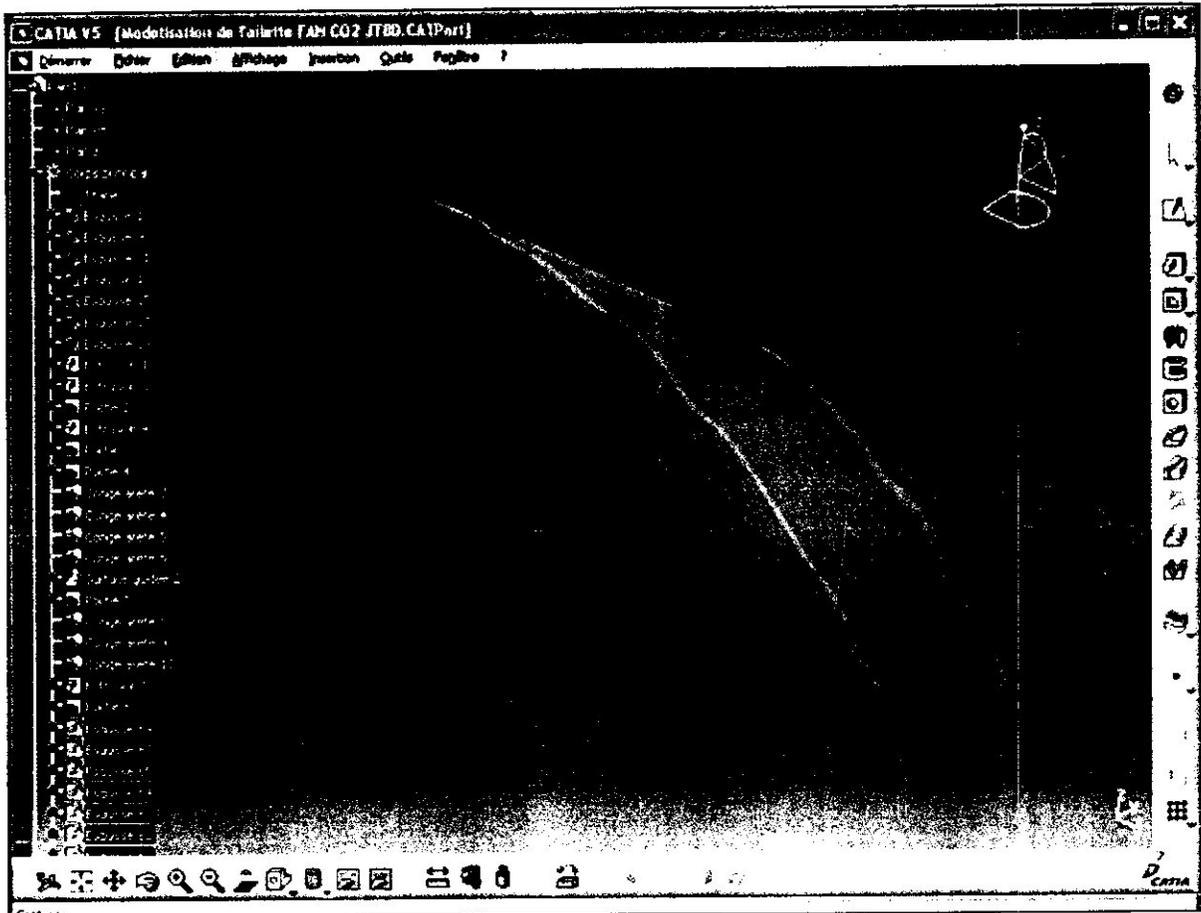


Figure 18. Modélisation finale de l'ailette FAN CO2

#### II-3-4- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter les différents stades de la modélisation de l'ailette, dans le but de définir les outils de dessin qu'offre le logiciel CATIA. Le logiciel CATIA a la particularité d'avoir tout un module consacré à la modélisation. Ce dernier est à son tour complété par un module d'analyse par éléments finis.

## II-4- Etude Statique :

### II-4-1- Introduction :

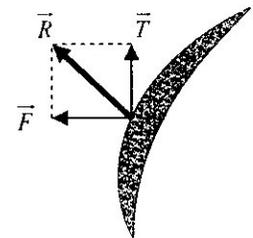
Les essais statiques ont pour but d'évaluer la résistance de l'ailette en utilisant des charges rencontrées couramment dans des conditions dynamiques normales

### II-4-2- Conditions aux limites :

#### II-4-2-1- Les efforts appliqués :

##### a- Effort aérodynamique :

L'ailette rotor se présentant comme un profil d'aile, nous aurons une force tangentielle T et une force axiale F selon le schéma ci-contre.



$$\vec{R} = \vec{T} + \vec{F}$$

##### Remarque :

Les efforts F et T créent des moments de flexion de l'ailette par rapport à la section où celle-ci est fixée au disque.

Dans notre cas la valeur T entre [100, 1000] et F entre [200, 2000] nécessaires pour nos calculs nous oblige à prendre le cas le plus défavorable où T=1000 N/m<sup>2</sup>, F=2000 N/m<sup>2</sup> (valeur communiqué par le service d'ENGINEERING d'AIR ALGERIE). T

##### b- Effort centrifuge :

Soit notre ailette d'une masse de 519 gr (que nous supposons concentrée en son centre de gravité) dont le centre de gravité se trouve à une distance de 28,4 cm de l'axe moteur ; ce moteur tourne à son régime maximum de 8000 tr/min. En nous rappelant que la force centrifuge a pour expression:

$$F_c = M \omega^2 R \text{ [Kgf] ; ou } M V^2 / R \text{ avec } V = \omega \times R = \frac{(\pi \times D \times N)}{60}; \quad \omega = \frac{\pi \times N}{30}$$

Ou :

M=masse [kg]

$\omega$  = vitesse angulaire [rad/s]

R = rayon [m]

Soit :

$$F_c = m \times \omega^2 \times R$$

$$F_c = [519 \times 10^{-3}] \times [\pi \times 8000 / 30]^2 \times [28,4 \times 10^{-2}].$$

$$F_c = 106966 \text{ N}$$

##### c- Efforts gyroscopiques : une ailette avec une masse concentrée au centre de gravité et un moment d'inertie négligeable.

Ces efforts non négligeables se manifestent surtout lors des manœuvres de l'aéronef, leur intensité dépendant de la rapidité des manœuvres (important principalement sur appareil militaire).

**d- Contrainte thermique :**

Ces dernières sont surtout dues aux variations brutales de température. Le couplage des contraintes thermiques et contrainte centrifuge peut entraîner une limitation en temps, donc d'utilisation, lors de l'étude des turbines.

**II-4-2-2-Calcul du Contact entre la racine de l'ailette fan et l'axe de fixation CO 2 (deuxième étage compresseur) : [11]**

Le contact se fait suivant un rectangle

Soit  $\|Q\|$  effort presseur par unité de longueur de génératrice

$$b = 2 \sqrt{Q \frac{K_1 + K_2}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} K_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \\ K_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \end{cases}$$

$$R_2 = R_1 + j \Rightarrow b = \sqrt{\frac{QR^2}{j} (K_1 + K_2)}$$

L'arbre est en acier :  $E_1 = 2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, \nu_1 = 0,266$

L'alésage est en alliage de Titan :  $E_2 = 1,14 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, \nu_2 = 0,34$

$E_1, E_2$  les modules de Young de

$\nu_1, \nu_2$  : les coefficients de poisson

$$K_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \Rightarrow K_1 = 1,49 \cdot 10^{-12}$$

$$K_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \Rightarrow K_2 = 1,14 \cdot 10^{-12}$$

Soit l'effort centrifuge.  $F_c = 106966 \text{ N}$

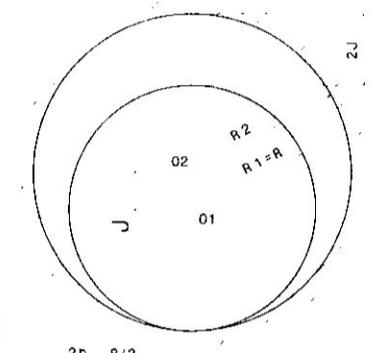
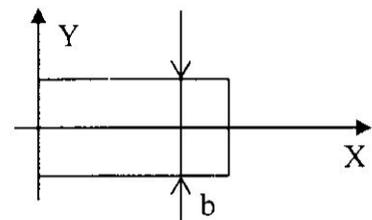
$l$  : la longueur de l'alésage,  $l = 42,3 \text{ mm}$

$$Q = \frac{F_c}{l} \Rightarrow Q = \frac{106966}{42,3} = 2529 \text{ N/mm}^2 = 2529000 \text{ N/m}^2$$

**Calcul du jeu :**

L'ajustement de montage est  $\Phi 17H7h6$  Avec  $\Phi 17H7_0^{+18}$  et  $\Phi 17h6_{-11}^0$   $J_{\max} = 29 \mu\text{m}$  et

$$J_{\min} = 0 \mu\text{m} \quad J = \frac{J_{\max} + J_{\min}}{2} = \frac{29 + 0}{2} = 14,5 \mu\text{m}$$



Arbre dans un palier

$$= \sqrt{\frac{QR^2}{j} (K_1 + K_2)} \Rightarrow b =$$

Figure 19. Conditions aux limites appliquées sur l'ailette

**II-4-3- Résultat de l'essai :**

**II-4-3-1- Maillage appliqué :**

**a- Maillage**

**b- Calcul de la structure**

**c- Types d'éléments**

Entité	Nombre	Nombre de noeuds	24444	Connectivité	Statistique
Noeuds	24444	Nombre d'éléments	116757	TE4	116757 (100,00%)
Eléments	116757	Nombre de D.D.L	73332		

Avec TE4 : tétraédrique à quatre nœuds

**d- Propriété du Matériau appliqué :**

<b>Matériau :</b>	Titane : alliage (6 % Al, 4 % V)
<b>Module de Young</b>	1,14e+011N/m2
<b>Coefficient de Poisson</b>	0,34
<b>Masse volumique</b>	4460 kg/m3
<b>Coefficient d'expansion thermique</b>	0,0000095
<b>Limite élastique</b>	8,25e+008N/m2

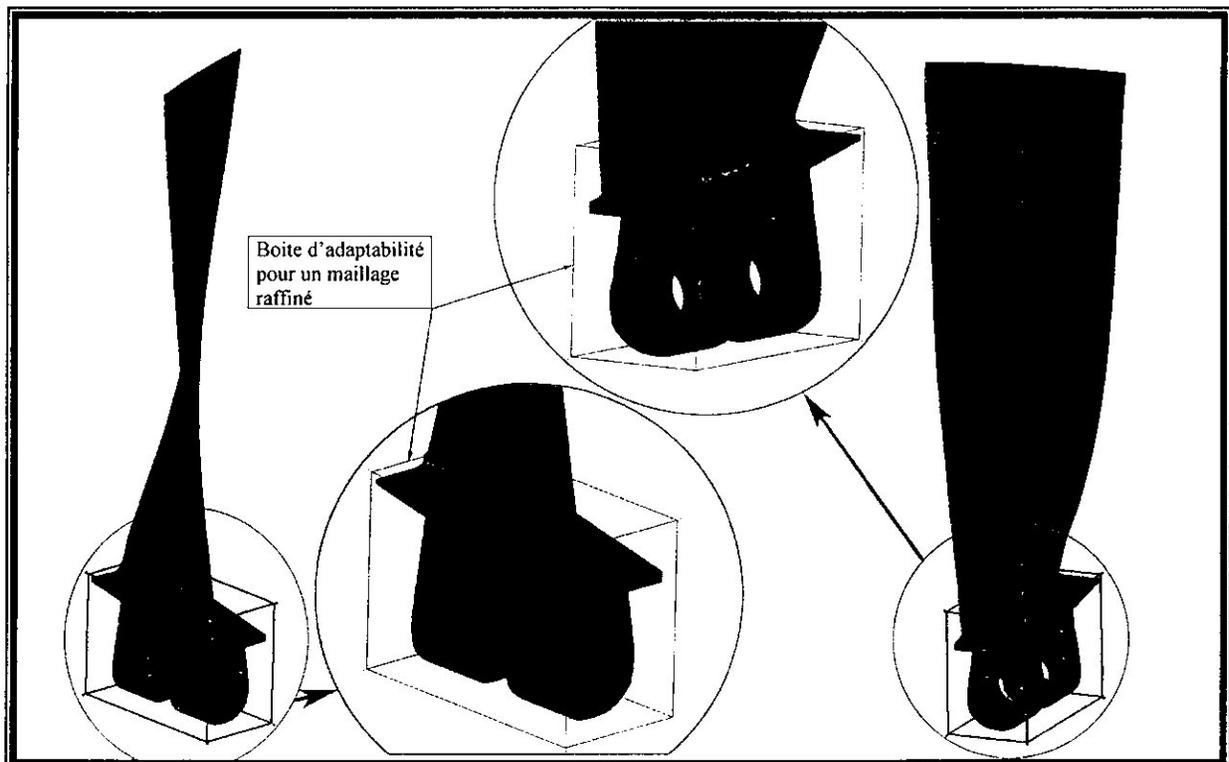


Figure 20. Maillage appliqué

**II-4-3-2- Effort et fixation :**

**a- En équilibre :**

Composantes	Forces Appliquées	Réactions	Résidus	Erreur Relative
Fx (N)	1.0315e+005	-1.0315e+005	5.9372e-009	2.6512e-012
Fy (N)	-4.5920e+002	4.5920e+002	2.3942e-010	1.0691e-013
Fz (N)	2.1283e+001	-2.1283e+001	-2.4729e-008	1.1043e-011
Mx (N.m)	-7.8040e+000	7.8040e+000	1.0680e-010	1.4942e-013
My (N.m)	5.1768e+003	-5.1768e+003	7.2723e-009	1.0174e-011
Mz (N.m)	-4.9013e+003	4.9013e+003	-1.1532e-009	1.6134e-012

**b- Calcul des FIXATIONS :**

Nombre de fixations ponctuelles 1332

**II-4-3-3- Données sur la matrice de rigidité :**

Nombre de lignes	73332
Nombre de coefficients	1490607
Nombre de blocs	3
Nombre maximum de coefficients par bloc	499998
Taille de la matrice	17.34 Mb

Déplacement :

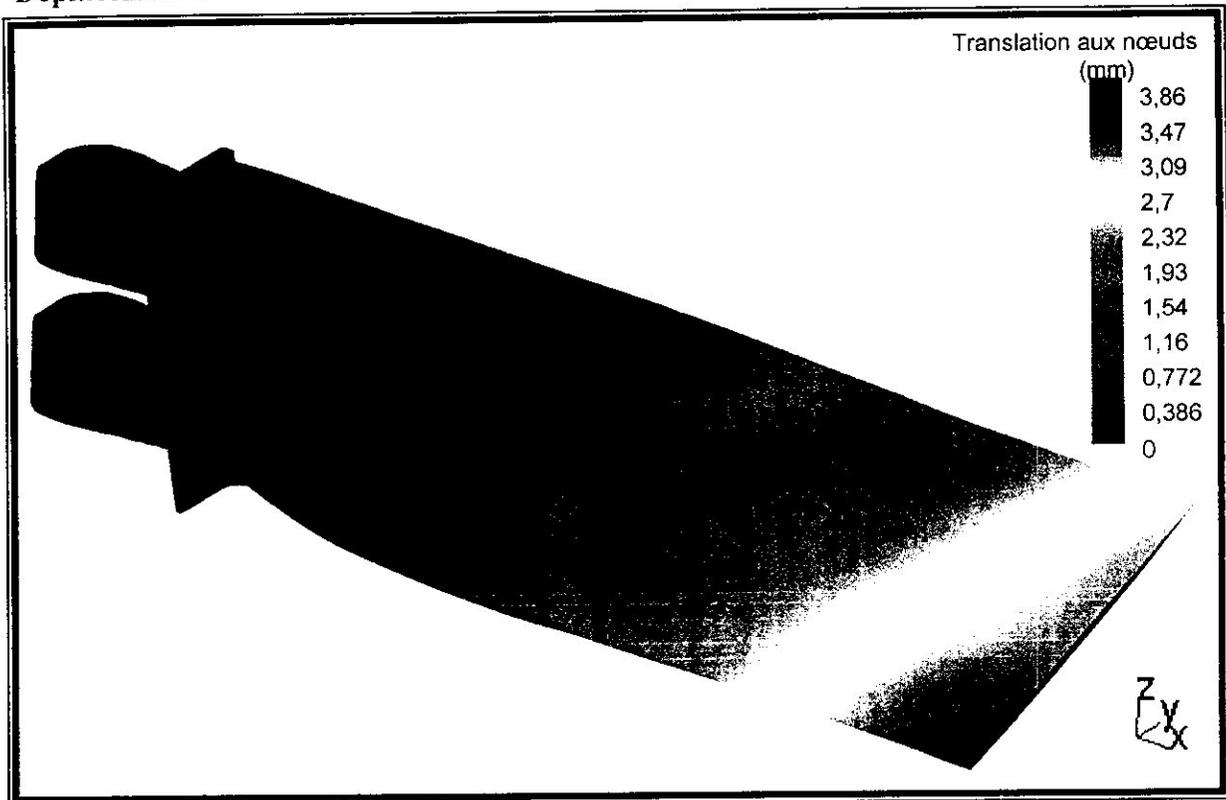


Figure 21. Déplacement aux nœuds

Le maillage déformé :

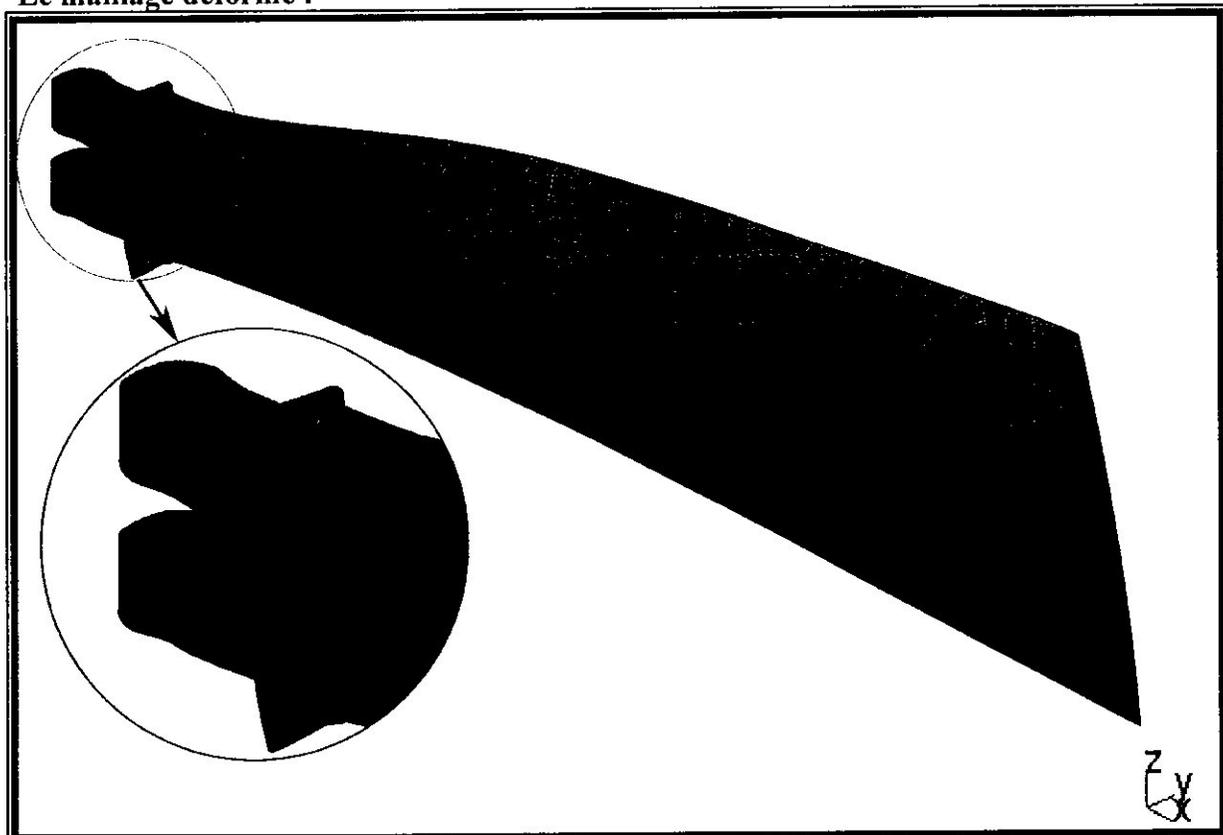


Figure 22. Maillage déformé avec une amplitude de déformation égale à 100x

## II-4-3-4- Contrainte de VON MISES :

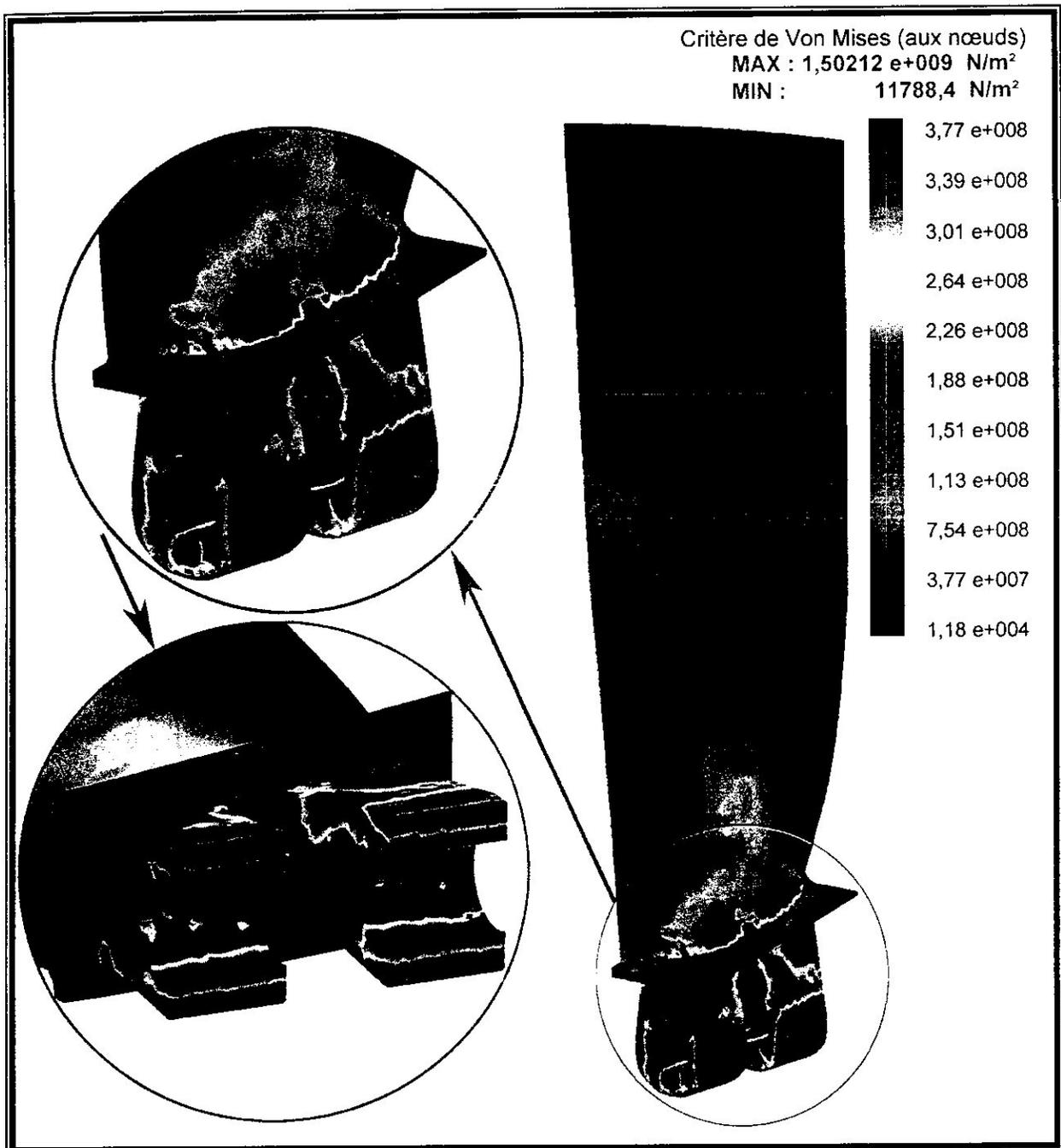


Figure 23. Répartition du champ de contrainte de VON MISES

$\sigma_{\max.} = 1,50212 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 (= 150 \text{ daN/mm}^2)$  .comme l'indique la figure ci-dessus sachant que la limite élastique  $R_e$  de la pièce étudiée (ailette FAN CO2) est de :  
 $R_e = 8,25e+008 \text{ N/m}^2 (= 82,5 \text{ daN / mm}^2)$ .

Le théorème de VON MISES énonce que pour un élément soumis aux contraintes principales  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , résiste en toute sécurité tant que :

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \leq 2 R_e^2$$

Et pour un coefficient de sécurité  $s=2$  la formule devient :

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \leq Re^2$$

$$150,212 \text{ daN/mm}^2 \leq (82.5)^2 \text{ daN/mm}^2 \Rightarrow 150,212 \text{ daN/mm}^2 \leq 6806,25 \text{ daN/mm}^2$$

Donc l'ailette résiste en toute sécurité

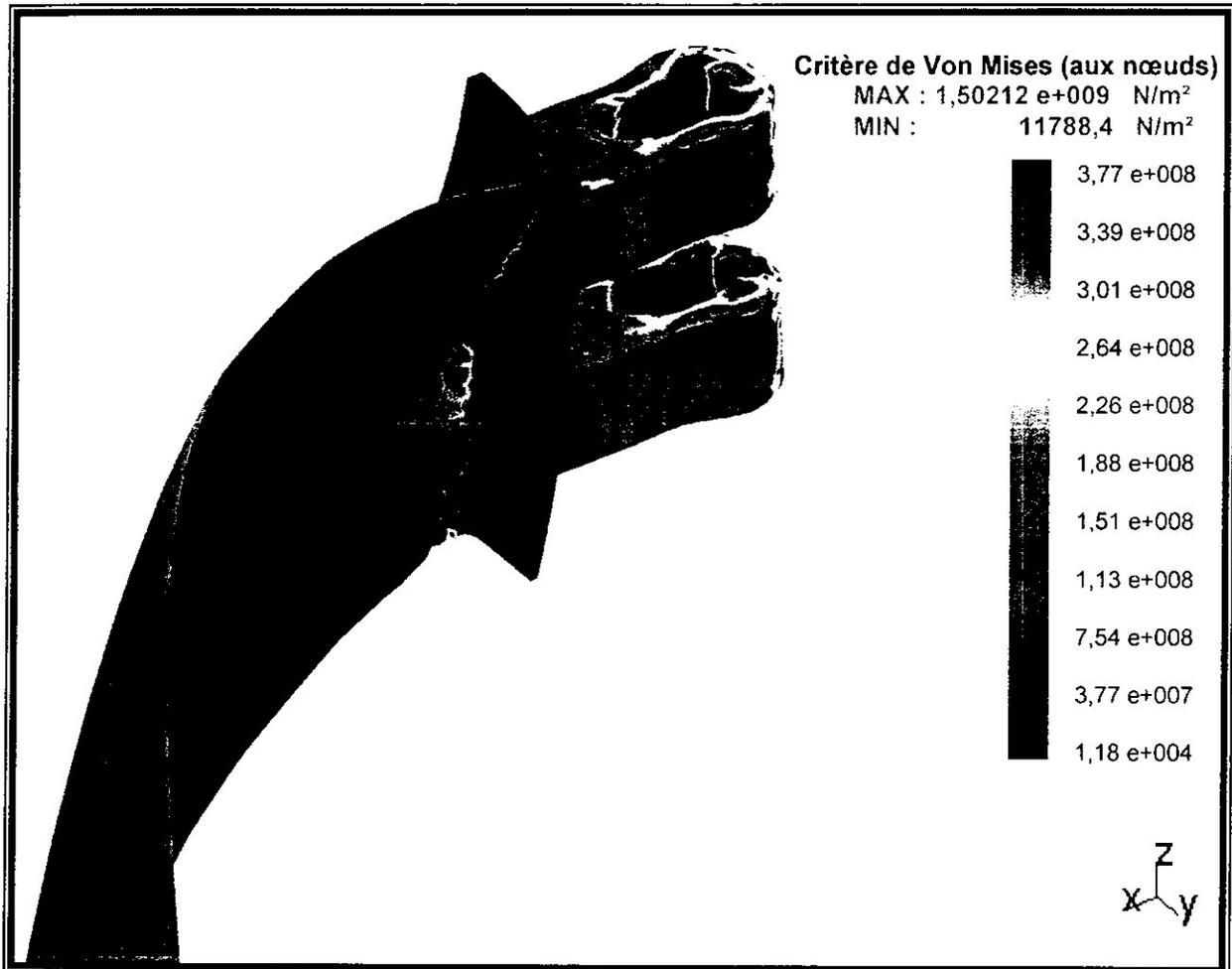


Figure 25. Répartition du Champ de contrainte de VON MISES avec une amplitude de déformation égale à 100x

## II-5 Conclusion

On constate que la distribution des contraintes sur l'ailette montre que celles maximales sont sur la circonférence du palier où apparaît la couleur rouge, quant aux faibles contraintes elles sont localisées au bout de l'ailette en bleu.

Cette étude nous a permis de localiser la zone la plus dangereuse sur laquelle nous devons effectuer notre contrôle.

Donc nous confirmons que la zone inspectée par le banc de contrôle est bien celle trouvée par l'étude que nous venons de mener.

***Chapitre III :***  
***Etablissement des documents du banc  
de contrôle à ultrason par immersion***

### III-1 Mode de fonctionnement :

#### III-1-1- Introduction :

A l'instar des différentes méthodes d'inspection dont le but est le contrôle non destructif, les ailette FAN CO2 sont inspectées en utilisant la méthode des ultrason par immersion (chapitre contrôle non destructif), cette méthode est basée sur la réception des échos des vibrations ultrasonores. Dans notre cas, le banc de contrôle dont nous allons expliquer le fonctionnement, utilise la même méthode (ultrason par immersion). [Annexe 2]

Comme la figure ci-dessous le montre, le bain à ultrason a deux guidage : l'un est selon l'axe X c'est l'axe de balayage pour la recherche d'éventuelle fissures ou bien criques terme couramment utilisé en aéronautique. L'autre guidage selon l'axe Y est utilisé pour rechercher la réflexion la plus haute des échos émis par le canon à ultrason en utilisant un étalon pour le calibrage de la position du canon à ultrason selon l'axe Y, à chaque fois que l'axe de montage est remplacé (Figure 25).

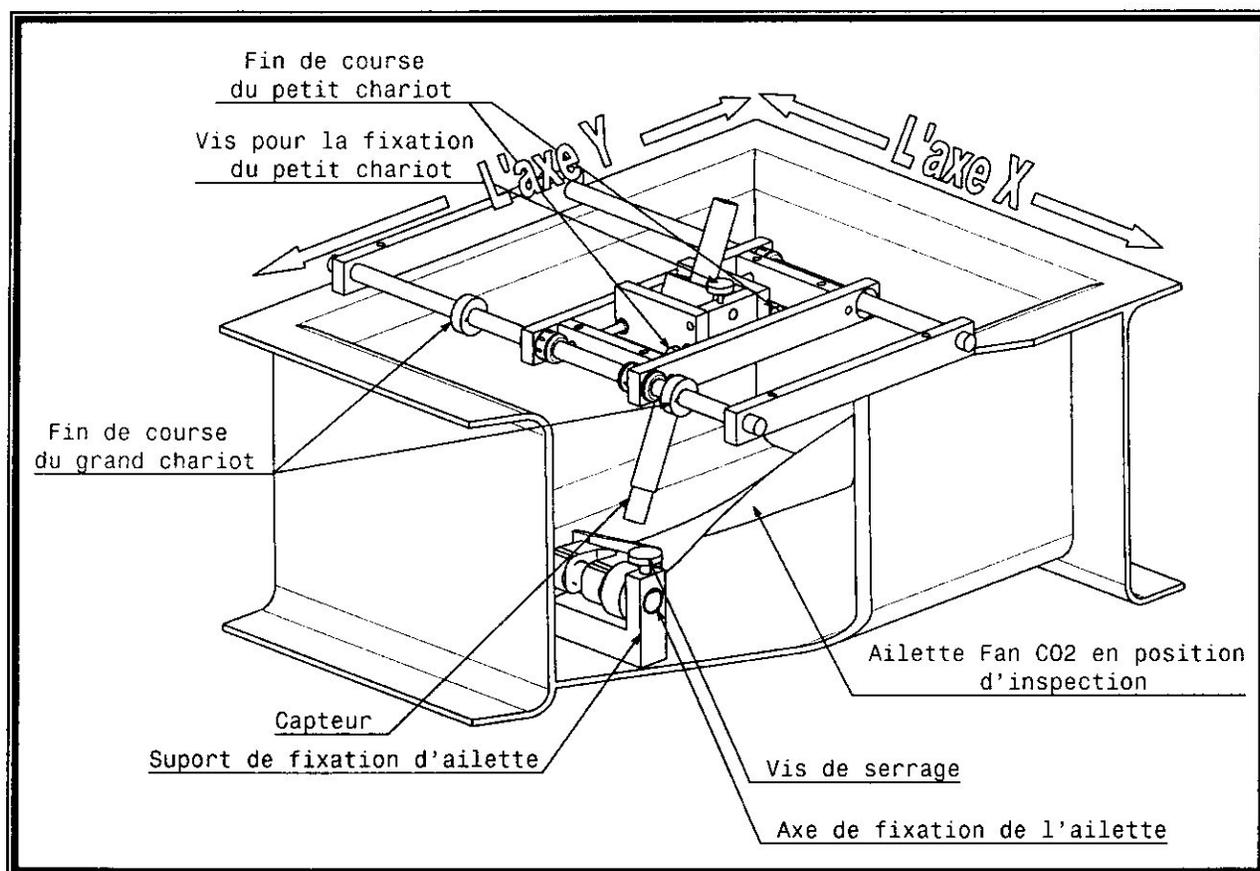


Figure 25. Vue isométrique du banc de contrôle à ultrason par immersion

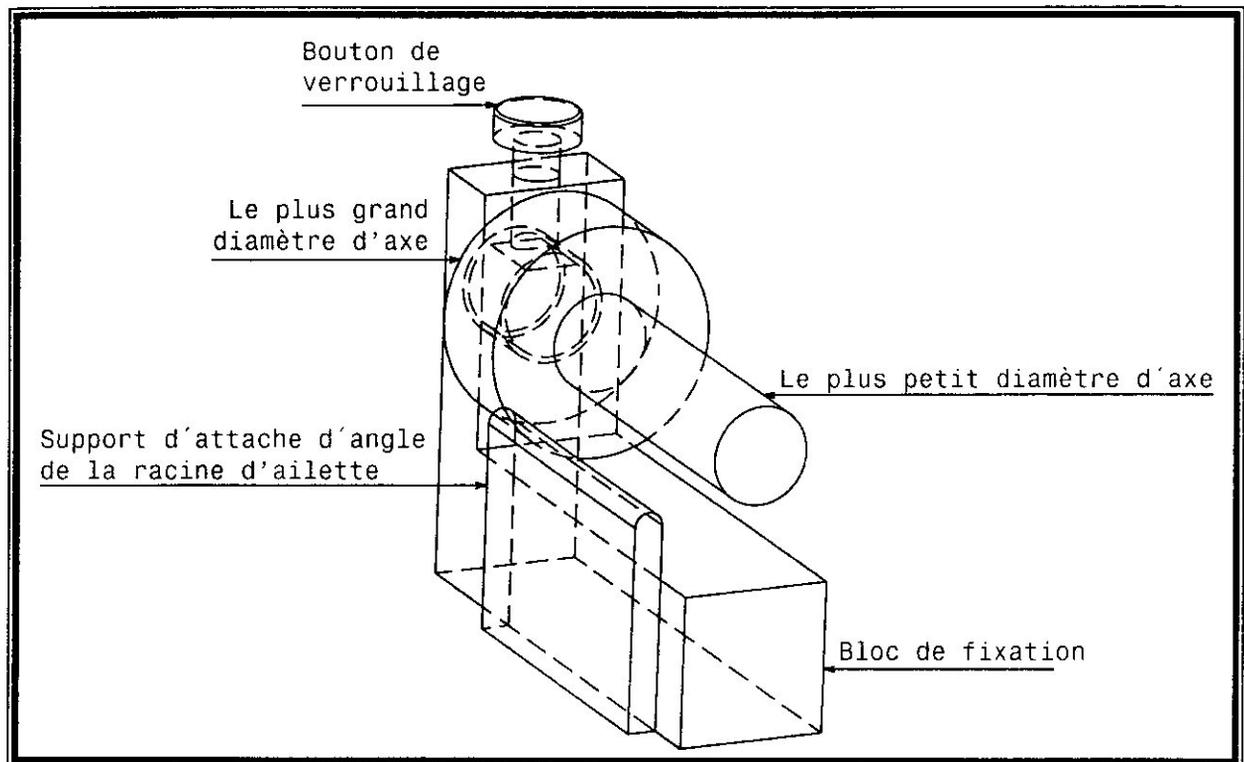


Figure 26. L'axe PWA 46292 inséré dans le bloc de fixation du réservoir PWA 46293

### III-1-2 L'étalon

Pour le calibrage du banc de contrôle selon l'axe Y, on a toujours besoin de l'étalon fourni par le constructeur. Comme la figure ci dessous le montre, l'étalon n'est qu'une ailette dont la partie supérieure est enlevée. Le palier de la racine contient des fissures préfaites par un laser : la où il y a un risque de fissuration comme le montre la figure 27.

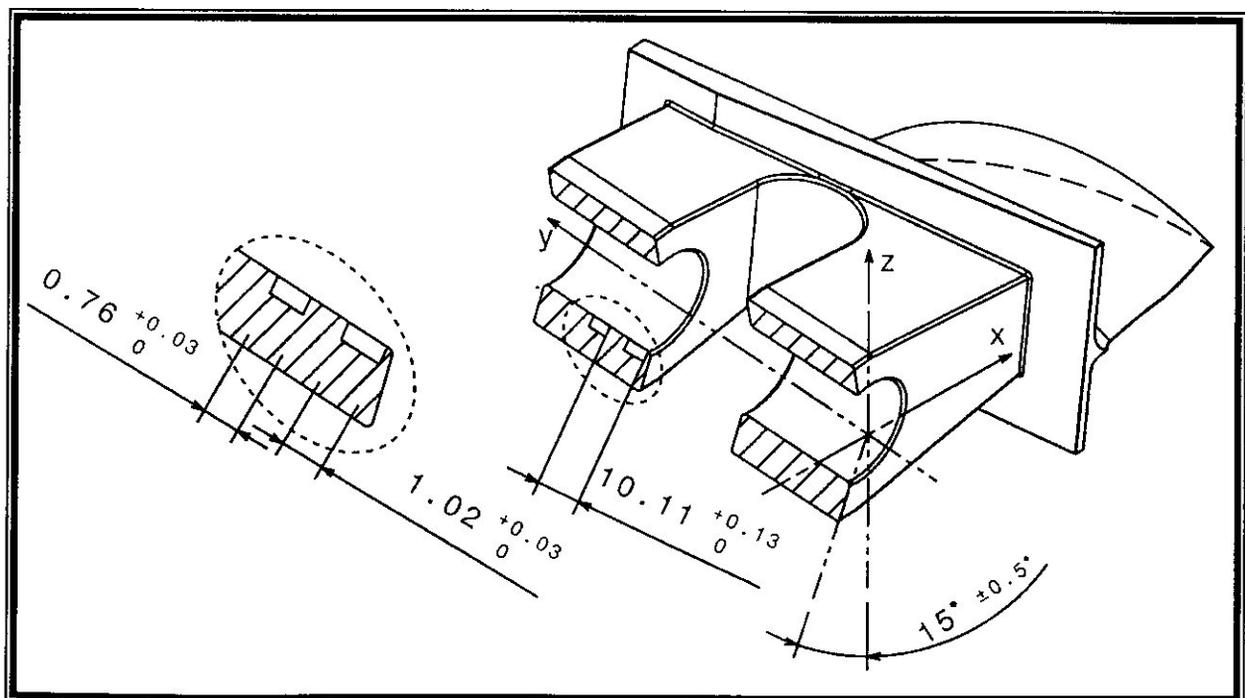


Figure 27. L'étalon ainsi que les fissures préfaites par un laser et leur tolérance

### III-1-3 Positionnement du transducteur suivant Y :

C'est un positionnement qui se fait à l'aide de l'étalon pour une meilleure réception de signal et pour cela le transducteur doit être déplacé selon l'axe X là où les deux fissures de l'étalon se situent comme la figure 28 le montre.

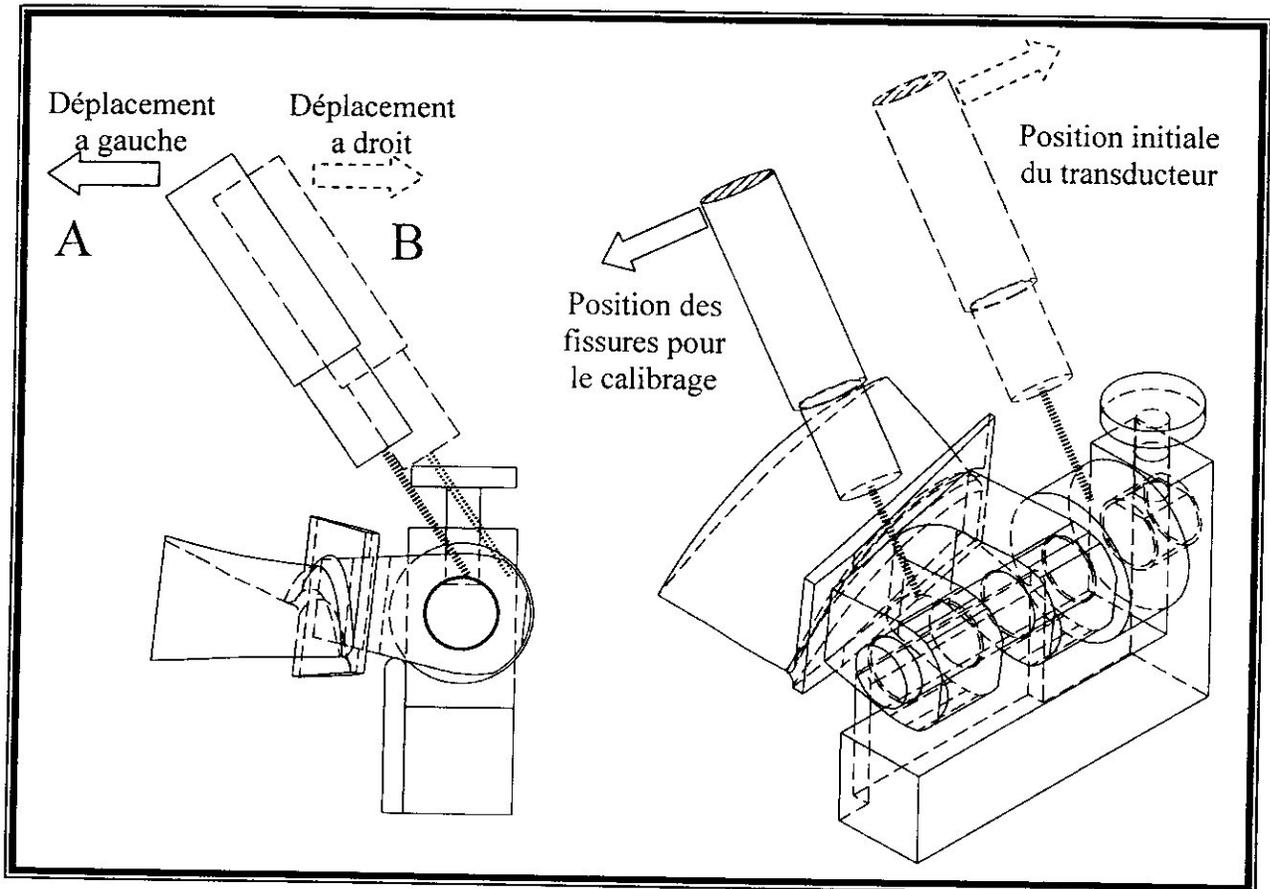


Figure 28. Calibrage suivant Y du canon à ultrason

### III-1-4 Le balayage selon l'axe X :

C'est une étape où on utilise les ailettes destinées à être inspectées, l'inspection commence après avoir reçu l'écho de départ assuré par le grand diamètre de l'axe de montage et un autre écho de fin d'inspection assuré par le petit diamètre. Le dernier confirme la fin de l'inspection du premier palier et le début de l'inspection du deuxième palier. À la fin du test il confirme l'achèvement de l'inspection d'un seul coté de l'ailette ; ensuite il suffit de retourner l'ailette et faire les mêmes démarches pour inspecter le coté opposé de cette dernière. Figure 29.

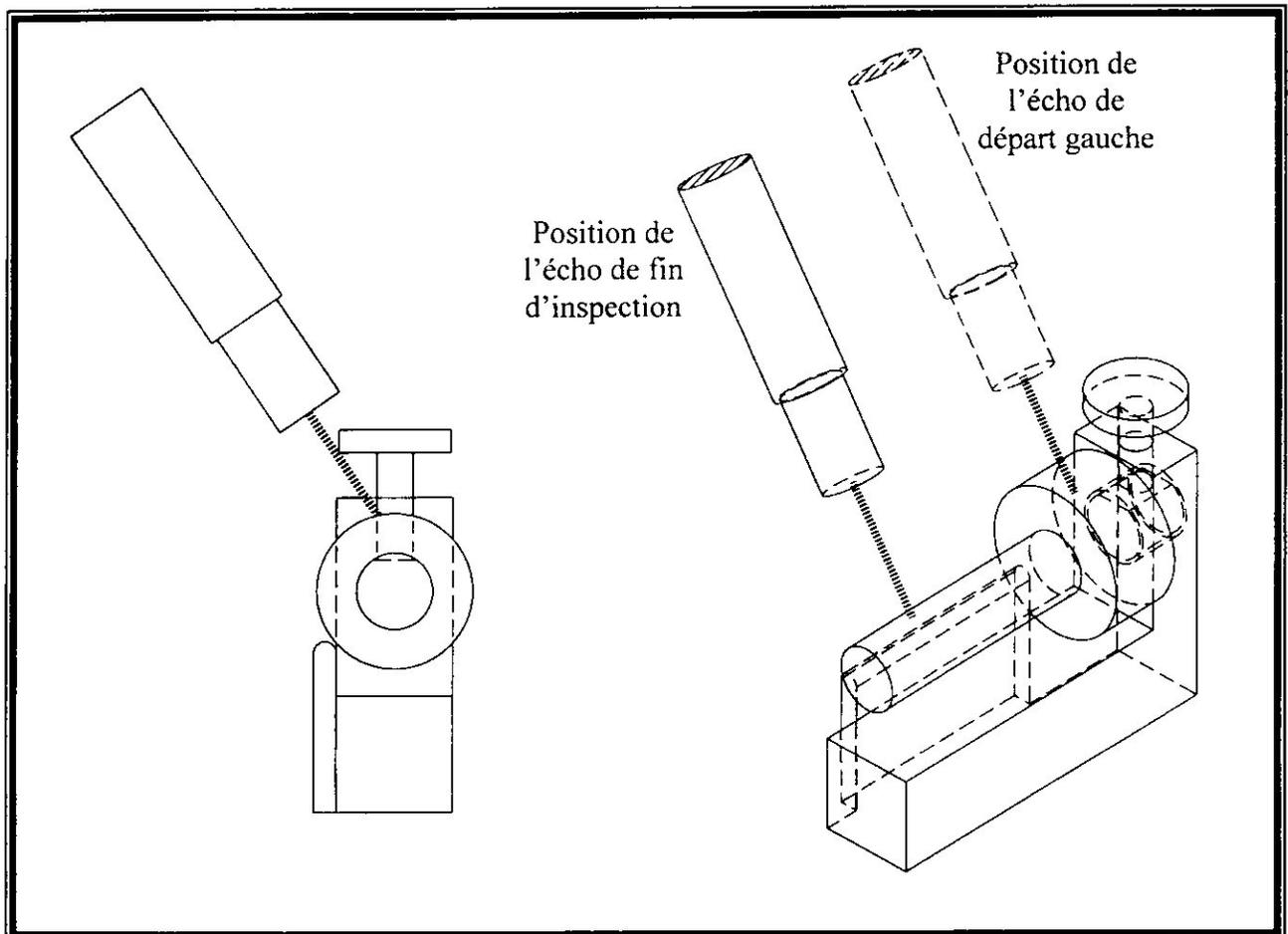


Figure 29. Balayage suivant l'axe X

III-2 Schéma cinématique du banc de contrôle :

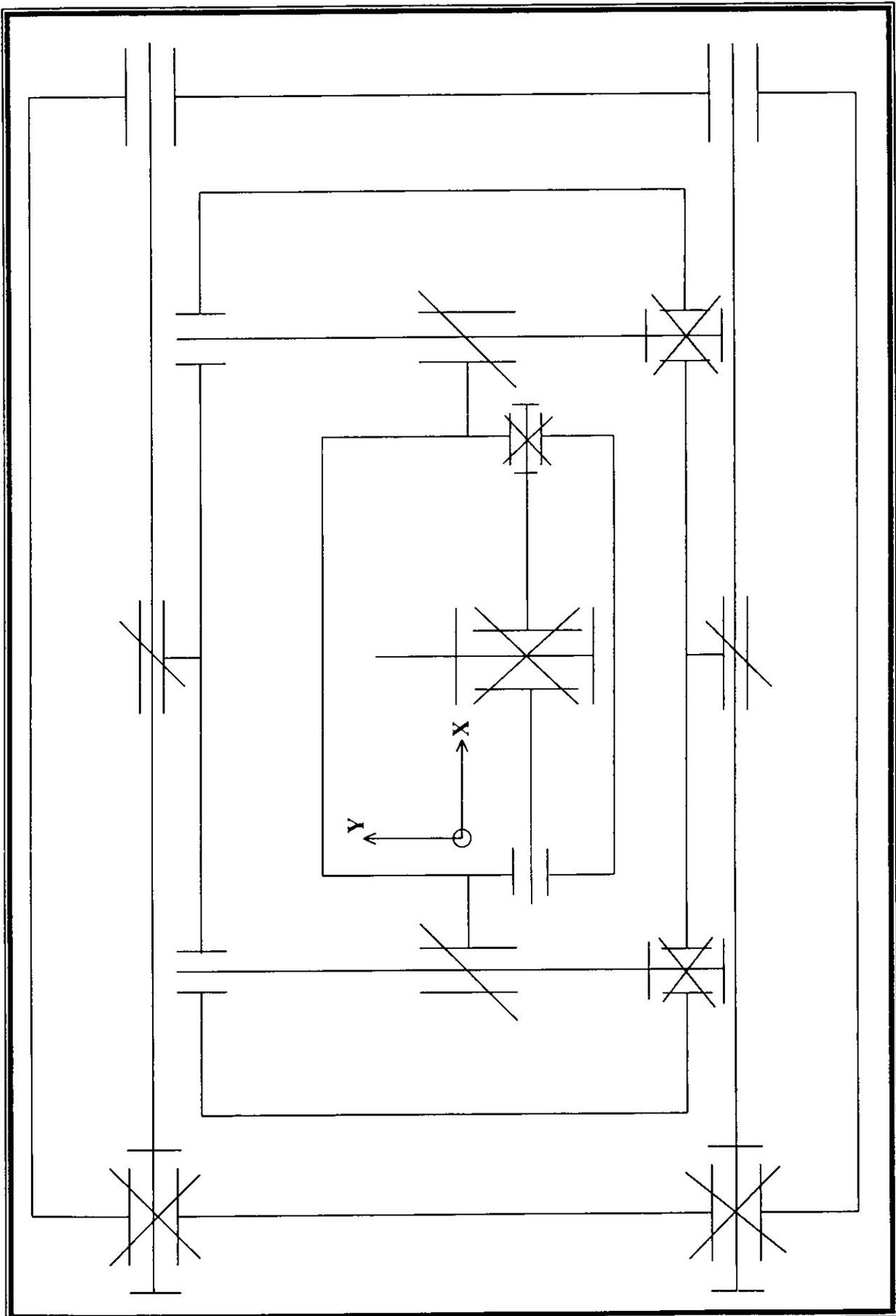


Figure 30. Schéma cinématique du banc de contrôle

*Chapitre IV :*  
*Automatisation du mécanisme de*  
*déplacement du canon à ultrason*

## IV -1- Introduction :

De nos jours la précision et le temps sont devenus des contraintes inévitables, du fait que la technologie évolue de jour en jour, sans oublier que la manipulation par l'être humain est limitée en précision. Pour être plus fiable, un système automatique est nécessaire, surtout quand il s'agit de l'Aéronautique un domaine où le doute et l'erreur sont impardonnables comme.

## IV -2- Données et contraintes imposées :

Pour notre cas c'est un banc de contrôle ultrasonore par immersion des ailettes FAN CO2 qui existe depuis janvier 1987. A ce jour il est encore manuel sans oublier que son utilité est énorme car les ailettes qu'il vérifie, se situent dans le deuxième étage où leur contact avec l'extérieur est inévitable, donc elles doivent être régulièrement vérifiées sans oublier que le disque (l'étage) contient 40 ailettes qui sont vérifiées des deux cotés du palier c'est pour cela qu'on a jugé qu'une automatisation du banc de contrôle est nécessaire pour plus de précision et pour un gain de temps afin de déceler les criques ( microfissures).

### a- Les données :

- Vitesse maximale d'inspection selon l'axe X est de  $V_{max} = 6,35$  mm/s
- Rechercher la plus grande réflexion des ultrasons selon l'axe Y
- Les dimensions géométriques du banc de contrôle
- La course d'inspection  $C_x = 80$  mm
- La course pour rechercher la meilleure réflexion  $C_y = 6$  mm
- Les forces résistantes au déplacement selon X et Y sont négligeables

### b- Les contraintes imposées :

- Le choix judicieux des matériaux est nécessaire car le banc de contrôle travaille dans un milieu corrosif.
- Le banc est certifié par le constructeur Pratt & Whitney donc on a pas le droit de faire aucun usinage.
- Le banc est transportable à main donc le mécanisme doit être le plus Léger possible.

Schéma cinématique du banc de contrôle avec mécanisme

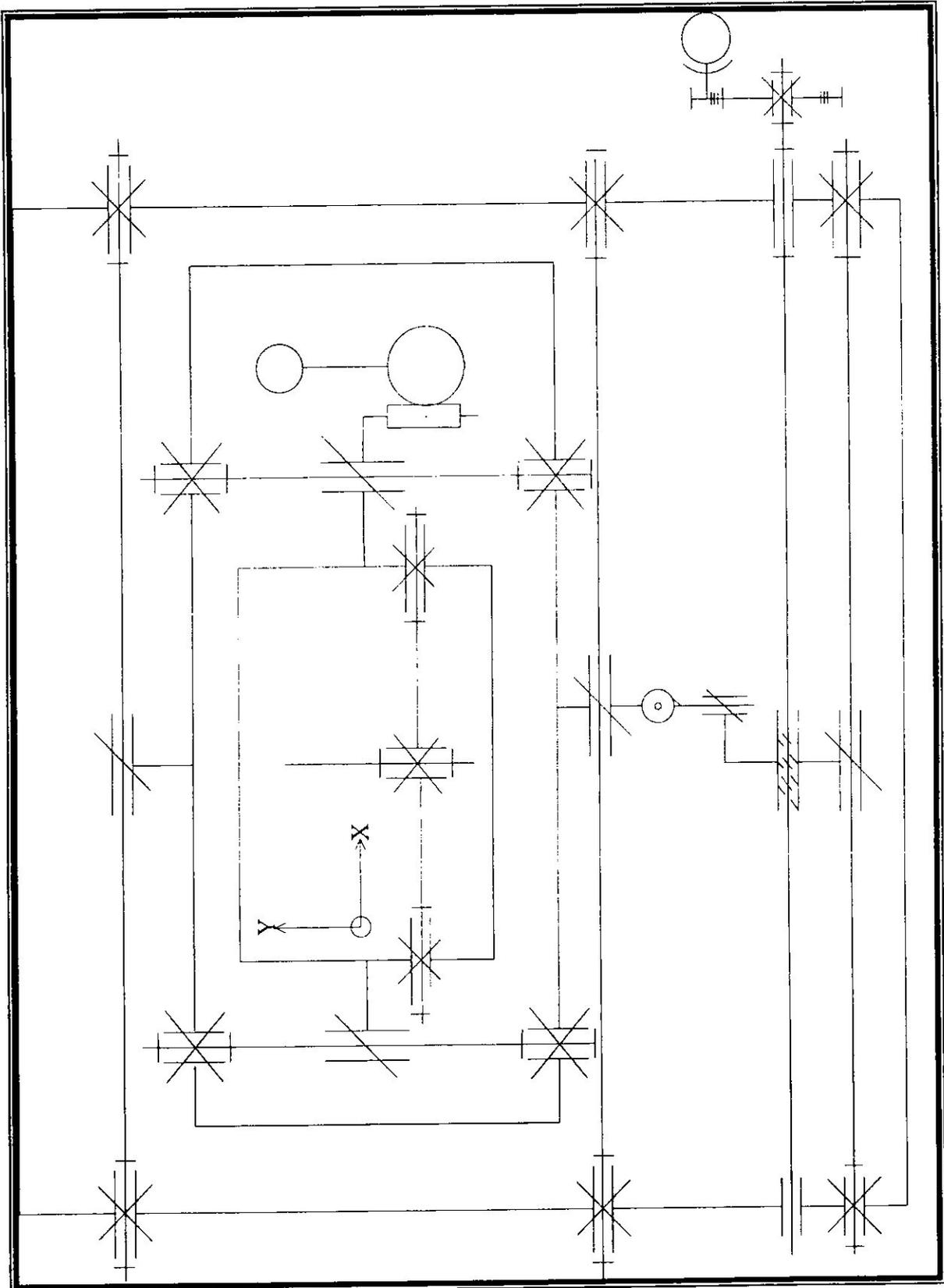


Figure 31. Schéma cinématique du banc de contrôle avec mécanisme

### IV -3- Choix du mécanisme :

#### a- Suivant l'axe X :

Pour un balayage adéquat les mécanismes les plus utilisés sont :

- Le balayage par vis écrous.
- Le balayage par courroie crantée.

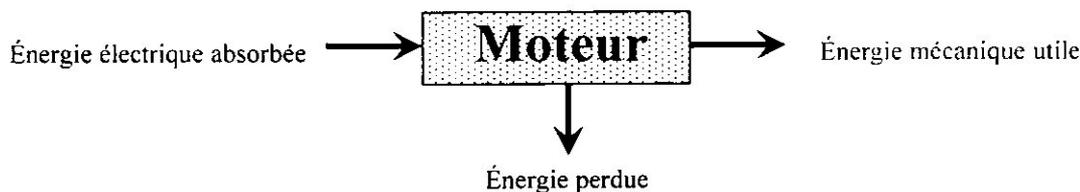
Notre choix s'est porté sur le système vis écrous à cause des contraintes imposées comme le déplacement et la certification du constructeur. En outre la transmission vis écrou est un réducteur, il suffit seulement de choisir le bon pas de filetage. En associant la transmission vis écrou avec un axe de guidage le mécanisme devient autonome et adaptable.

#### b- Suivant L'axe Y :

A cause de l'encombrement des pièces et l'espace restreint le mécanisme que l'on juge le plus efficace est un mécanisme à transmission par crémaillère qui est simple de conception et peu encombrant.

### IV -4- Choix des moteurs :

Le moteur à courant continu où bien pas à pas, est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique avec quelques pertes.



#### IV -4-1- Fonctionnement d'un moteur pas à pas :

Ce type de récepteur est constitué d'un rotor à aimant permanent ou en matériau ferromagnétique et d'un stator présentant plusieurs faces (*Figure 32.*).

Dans le cas d'un aimant permanent, chaque phase du stator est successivement alimentée, le rotor se positionne de telle façon qu'il aligne son champ magnétique avec celui développé par le stator dans chacune des positions correspondantes (4 dans les cas de la *figure32.a*).

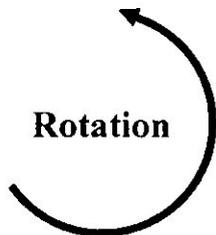
Dans le cas d'un moteur pas à pas à réluctance variable le rotor se positionne pour offrir la moindre réluctance au champ magnétique développé par l'un des enroulements statoriques.

Un moteur pas à pas à 3 phases comportant un stator à 12 pôles (4 par phase) et un rotor à 8 pôles situés à  $45^\circ$  est représenté dans la *figure 32.b*. On constate qu'étant donné la position occupée par le rotor, la prochaine impulsion provoquera un déplacement de  $15^\circ$ , soit la moitié de l'angle que font deux pôles successifs du stator, vers la gauche ou la droite suivant que cette impulsion est envoyée à la phase 3.

D'une façon générale, le sens de rotation est imposé par la séquence de distribution comme l'indique le tableau suivant.

Phases successivement alimentées.

- Phase 1
- Phase 2
- Phase 3
- Phase 1
- Phase 2
- Phase 3
- Phase 1
- Phase...
- Phase...



Phases successivement alimentées

- Phase 1
- Phase 3
- Phase 2
- Phase 1
- Phase 3
- Phase 2
- Phase 1
- Phase...
- Phase...

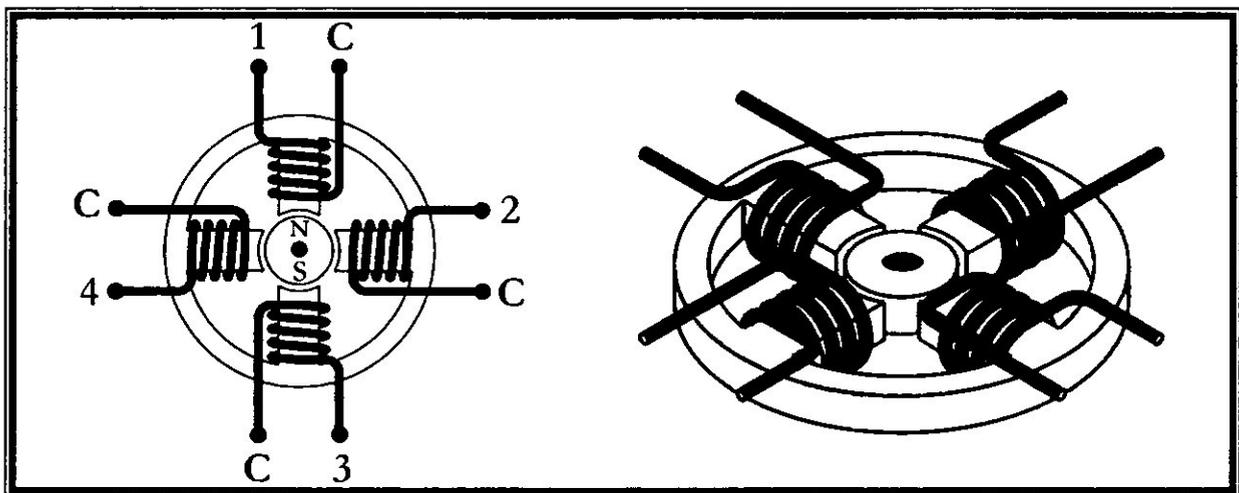
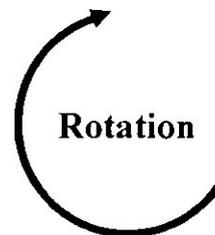


Figure 32.a. Moteur pas à pas à aimant permanent

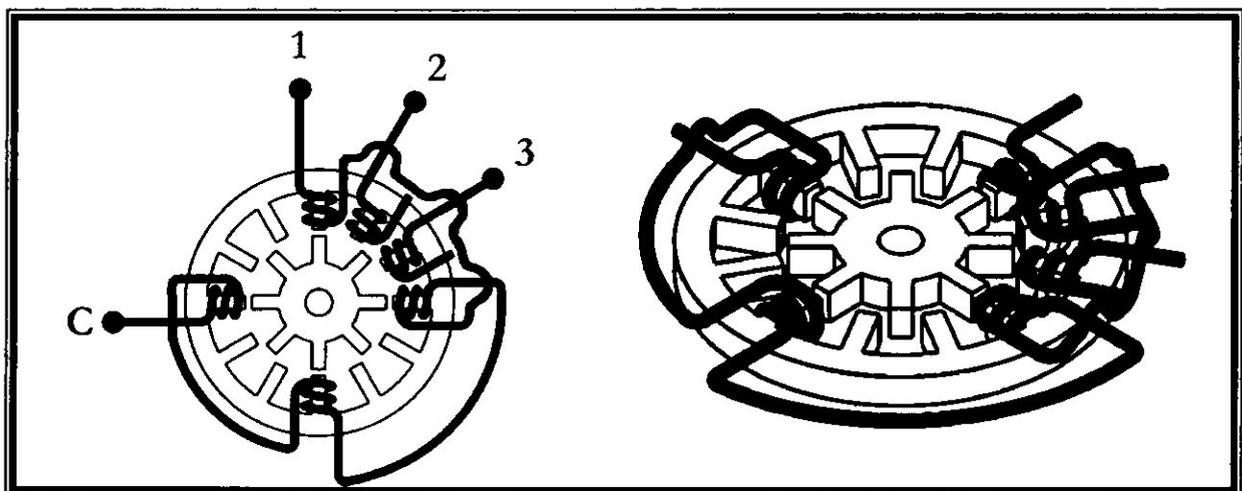


Figure 32.b. Moteur pas à pas à réluctance variable

On trouve couramment des pas de  $15^\circ$  avec une vitesse de rotation maximale de 600 pas/s et un couple de 100 à 0,02 N.m, mais également des pas de  $1,8^\circ$ , avec des vitesses de rotation de 600 pas/s et un couple de 0,1 N.m

Un réducteur sera généralement employé pour obtenir des pas plus petits. Ces récepteurs peuvent donc fournir des couples élevés. De plus, on notera qu'une seule impulsion est nécessaire, d'une durée de l'ordre de 100  $\mu$ s, pour effectuer un pas et que les balais sont éliminés (grande fiabilité).

#### IV -4-2- Fonctionnement d'un moteur à courant continu :

Si une machine à courant continu est branchée à une source de tension, elle se met à fonctionner en moteur électrique, c'est à dire à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. La propriété de ces machines électriques c'est de fonctionner soit en générateur ou en moteur, elle est appelée la réversibilité.

Le moteur électrique fut inventé en 1834 par l'académicien russe B.S.Jacobi. En 1838, Jacobi employa son moteur électrique pour propulser des bateaux. Il utilisa une batterie de piles pour l'alimenter.

Il a conçu le type de collecteur des machines à courant continu qui, dans ses traits essentiels, est encore employé de nos jours. Malgré l'existence des moteurs à courant alternatif de constitution plus simple et plus commode en exploitation, les moteurs à courant continu sont très employés dans la pratique. L'avantage essentiel de ces moteurs est la possibilité de réglage étendu de la vitesse qui permet de les employer sur les véhicules de transport électriques, sur les engins de levage, dans les différents schémas de régulation et de commande automatique ... etc.

Le principe de fonctionnement des moteurs à courant continu est basé sur l'interaction du courant circulant dans l'enroulement de l'induit avec le champ magnétique créée par les pôles des électroaimants. En conséquence, pour le couple du moteur on peut écrire :

A une vitesse de rotation constante, le couple développé par le moteur est égal au couple résistant de la charge mécanique appliquée sur l'arbre du moteur :

$$C_m = C_r$$

Un moteur dans lequel on aurait changé simultanément le sens du courant dans l'enroulement de l'induit et dans l'enroulement des pôles tournera dans le même sens qu'auparavant. Selon le mode de branchement de l'enroulement d'excitation par rapport à l'enroulement de l'induit.

#### Fonction des collecteurs dans les moteurs à courant continu

Les conducteurs de l'enroulement de l'induit qui sont parcourus par le courant se trouvent dans le champ magnétique créé par les pôles et subissent l'action d'une force qui les repousse hors du champ. Pour que l'induit tourne dans un sens déterminé, il faut que le sens du courant dans chacun des conducteurs soit inversé au fur et à mesure que chacun d'eux sort de la zone d'action d'un pôle, pour franchir la ligne neutre puis rentrée dans la zone d'action du pôle suivant.

L'inversion du sens du courant dans les conducteurs de l'enroulement de l'induit du moteur au moment où ils franchissent la ligne neutre est assurée par le collecteur. La fonction du collecteur est expliquée par la *figure 33*. Un conducteur plié de façon à former une spire est introduit dans un champ magnétique. Les extrémités de la spire sont soudées aux lames du collecteur a et b sur lesquelles frottent les balais. Le balai gauche est connecté au "plus" du réseau et le balai droit au "moins" du réseau. Dans la position I le courant du réseau arrive à la

lame du collecteur a, puis passe par le conducteur supérieur 1 de la spire en s'éloignant du conducteur inférieur 2 de la spire (la connexion arrière du cadre n'est pas indiquée sur le schéma), il arrive à la lame du collecteur b et retourne dans le réseau. En appliquant la règle de la main droite nous trouvons que la spire aura tendance à tourner dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre. Dans la position II la spire se trouve sur la ligne neutre. Les lames du collecteur ne contactent pas les balais et la spire n'est parcourue par aucun courant. La spire franchit la ligne neutre par inertie. En outre, les autres conducteurs de l'induit qui ne sont pas sur la ligne neutre à cet instant, continuent à produire un couple et aident la spire sans courant à franchir la position neutre. Dans la position III, le côté 1 de la spire est placé sous l'autre pôle et le sens du courant dans le conducteur a été inversé. La même chose se produit avec le côté 2 de la spire, maintenant sous le balai positif se trouve la lame du collecteur b et sous le balai négatif la lame du collecteur a. En appliquant la règle de la main droite on est sûr que le sens de rotation de la spire ne change pas, suivant le sens inverse des aiguilles d'une montre.

En conséquence, dès que le conducteur en mouvement franchit la ligne neutre, la lame de collecteur connectée à ce conducteur quitte le balai d'une polarité et arrive au balai ayant l'autre polarité.

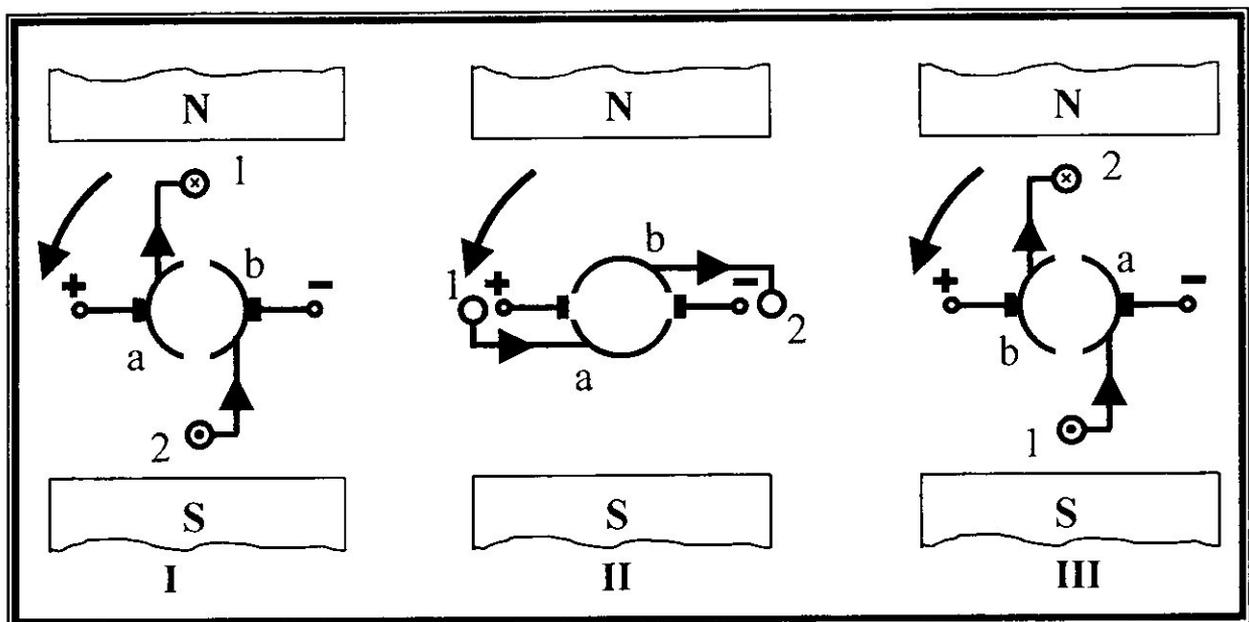


Figure 33. Collecteur du moteur à courant continu

### IV -4-3- Proposition des moteurs selon les déplacement X et Y :

#### a- Suivant X :

Au moment du balayage selon l'axe X de la pièce à inspecter, nous assurons une continuité de mouvement du chariot qui supporte le transducteur à ultrason. Si nous utilisons un moteur pas à pas nous allons obtenir une discontinuité du mouvement (risque d'omission de certaines zones), qu'elle que soit la réduction du mouvement que nous allons apporter au moteur, sachant que la vitesse de balayage est de 6 mm/min.

#### b- suivant Y :

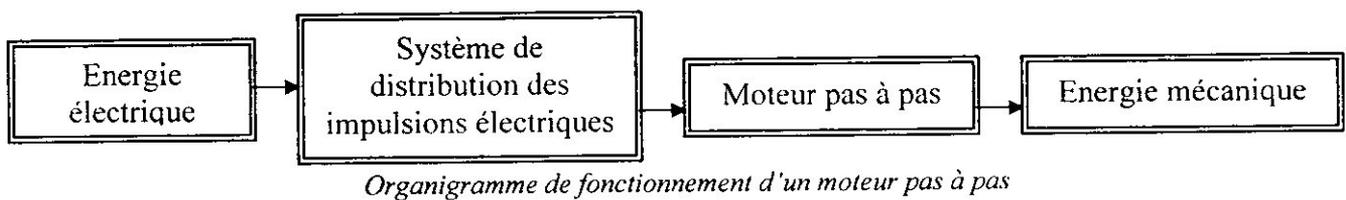
Ce déplacement dans le but de capter la plus haute amplitude du signal, sachant que le transducteur doit être perpendiculaire à la surface à inspecter. De plus, la course du transducteur à ultrason est de 6mm. Nous allons chercher manuellement la réflexion maximale du signal à l'aide d'un visionnement sur l'écran de l'oscilloscope. Le chariot peut se déplacer vers l'avant comme vers l'arrière selon l'axe Y. Nous avons opté pour le moteur pas à pas pour sa précision de déplacement ainsi que son sens de rotation. Donc, on peut avoir l'amplitude maximale tout en observant l'écran de l'oscilloscope.

#### IV -5-1 Commande du moteur pas à pas :

Le système de commande est la relation entre le moteur et la source électrique. Il se trouve généralement sous forme digitale et parmi les méthodes de commandes des moteurs pas à pas on peut utiliser l'outil informatique pour générer des signaux et à l'aide d'une interface on peut le piloter, Cette méthode sollicite la présence d'un micro-ordinateur ou bien l'équivalent.

On peut piloter un moteur pas à pas en distribuant l'impulsion aux pôles du moteur de la façon expliquée auparavant.

Pour notre cas on propose un système manuel de distribution des signaux électriques pour donner une souplesse à l'utilisateur car il doit chercher la meilleure réception tout en gardant les yeux sur le moniteur de l'échographe.



#### IV -5-1-1 Proposition d'un système de commande :

Ce système qui fonctionne manuellement sert à distribuer des impulsions au moteur pour qu'il tourne à droite ou à gauche. Sa vitesse de rotation dépend de la rotation de la molette du système de commande.

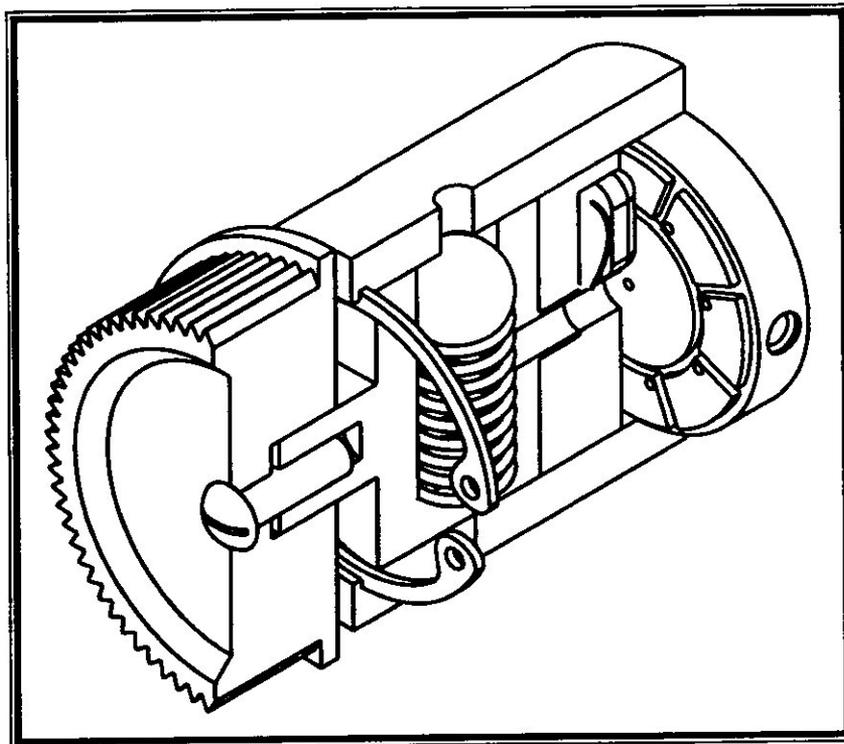


Figure 34. Système manuel de commande du moteur pas à pas

**IV -5-1-2 Fonctionnement :**

La rotation de la clavette autour de l'axe Z permet de passer le courant du pôle positif aux différents pôles du moteur pas à pas, donc à une rotation plus au moins rapide, elle permet de générer des impulsions au moteur.

Les pôles 1-5, 2-6, 3-7 et 4-8 sont reliés pour augmenter la précision du système telle qu'une rotation de 45° pour nous donner une impulsion, c'est-à-dire un pas du moteur. Et ce avec un moteur de 1,8° de pas on obtient une réduction du mouvement de 25 fois, sans l'apport d'un réducteur qui contient des engrenages de réduction de mouvement.

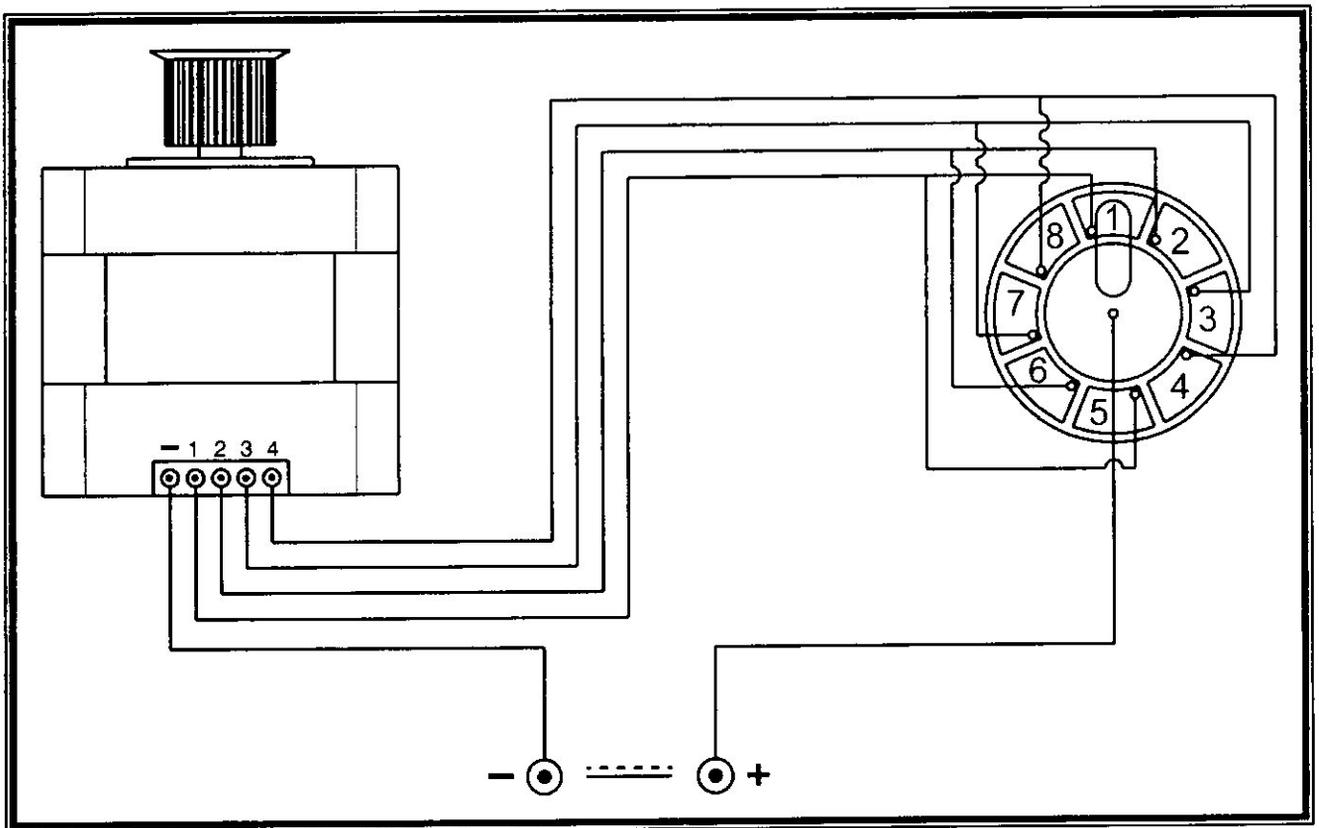
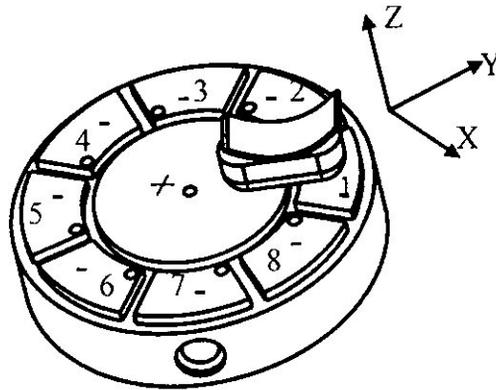


Figure 35. Schéma électrique de commande du moteur pas à pas

Une couche de cuivre① (circuit imprimé) collée sur un disque qui lui sert de support vu sa faible épaisseur doit être solidaire avec le carter④. La rotation de la molette③ est transmise à la clavette⑦ par le biais des deux pièces⑤ et⑥, la pièce⑥ est réalisée en plastique pour des raisons d'isolation. Quant à la pièce⑤, en l'associant avec l'ensemble bille ressort② elle nous permet d'avoir un positionnement chaque 45°.

La lame ressort ⑧ assure le contact entre la clavette⑦ et la couche de cuivre①.

L'anneau élastique⑨ assure le logement des pièces à l'intérieur du carter ④

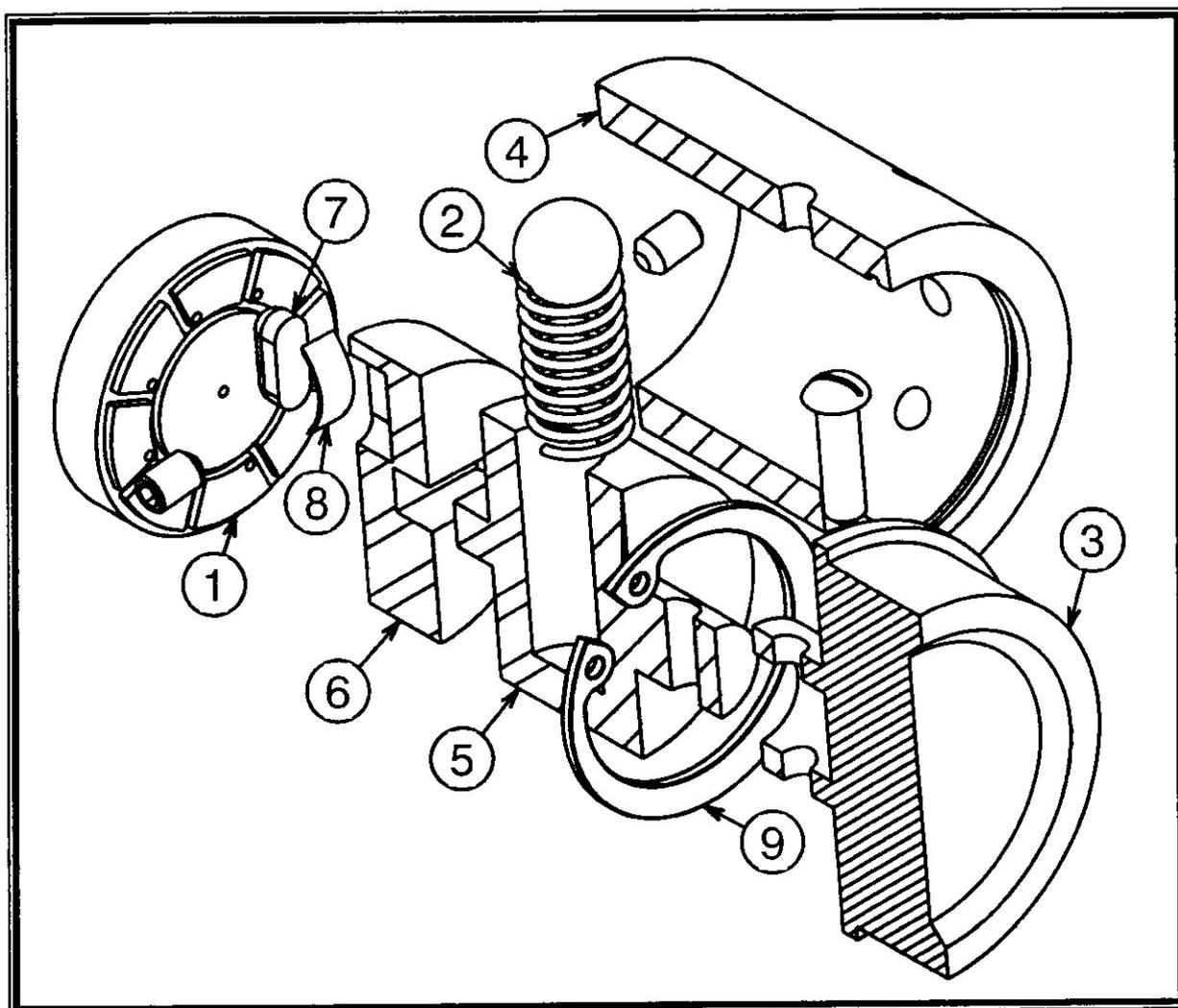


Figure 36. Vue éclatée du système de commande du moteur pas à pas

IV -5-2 Commande du moteur à courant continu :

IV -5-2-1 Proposition d'un schéma électrique :

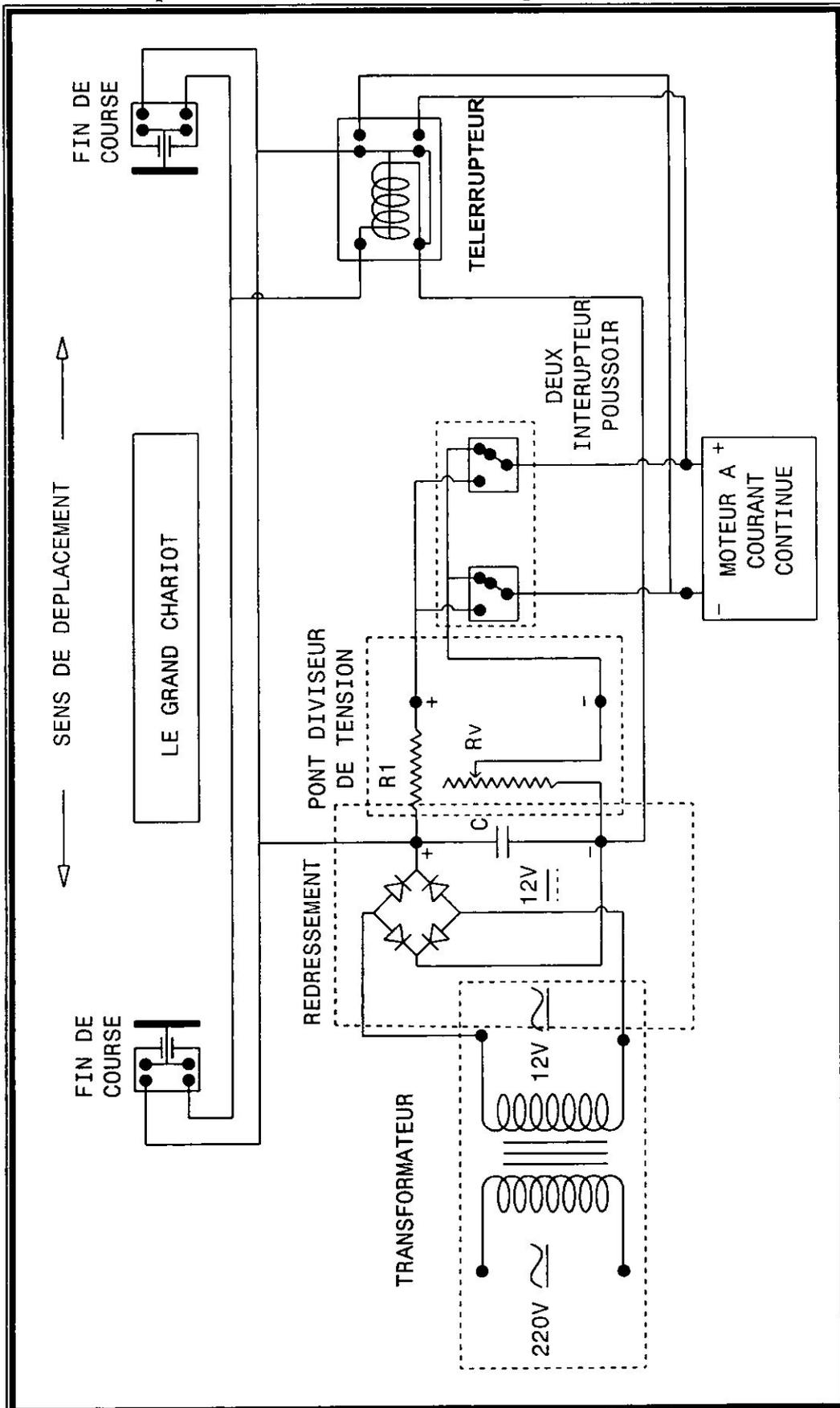


Figure 37. Schéma électrique de commande du moteur à courant continu

## IV -6 Proposition et modélisation du mécanisme selon X et Y :

### IV -6 -1- Selon l'axe Y :

Le mécanisme que l'on propose se compose de deux pièces sans compter le moteur comme la figure ci dessous le montre, c'est une simple transmission par crémaillère.

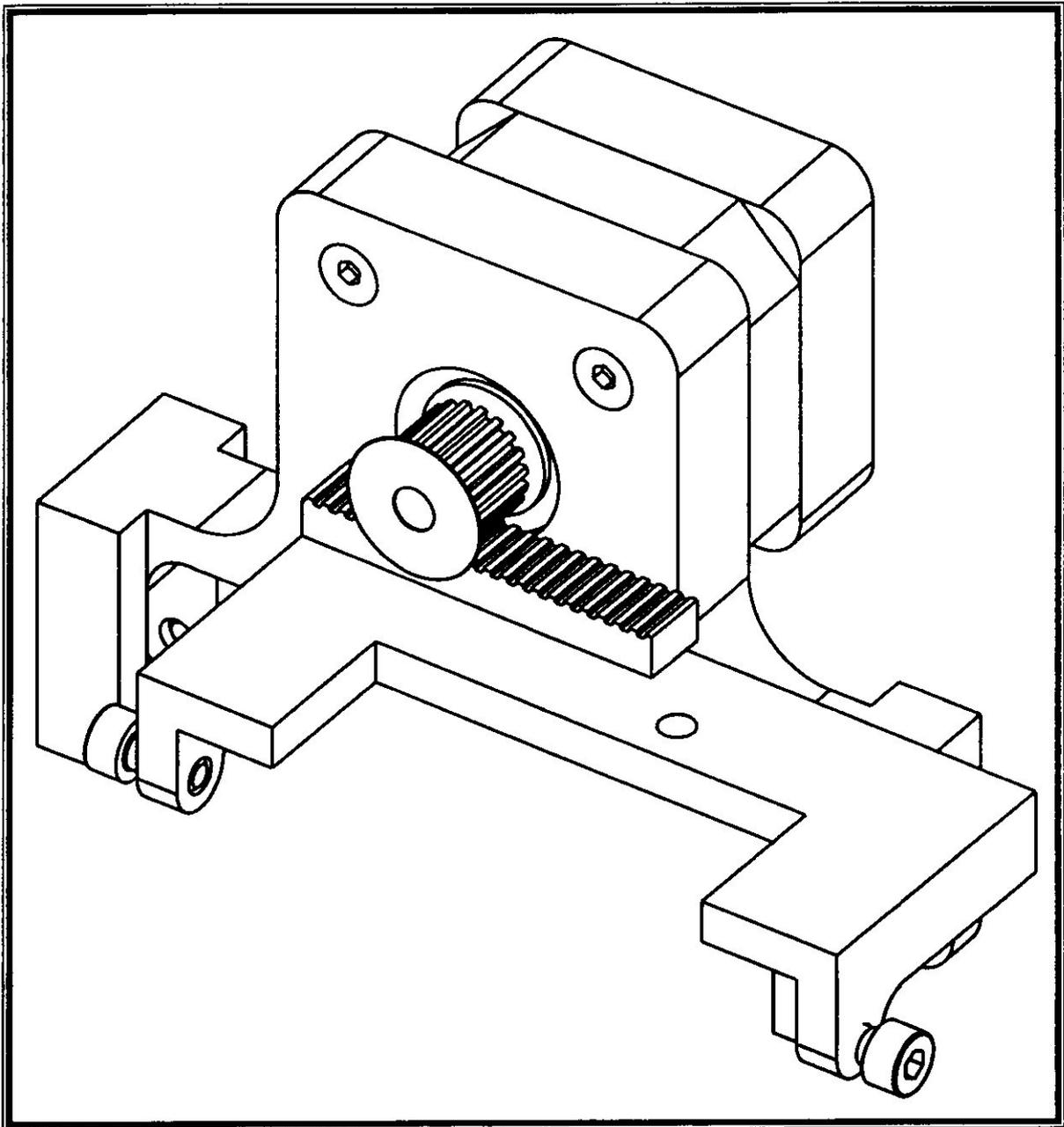
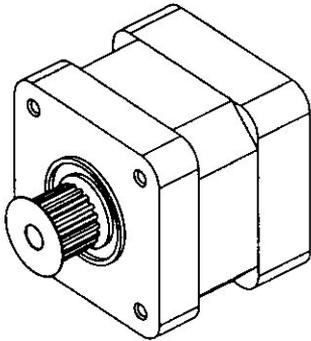
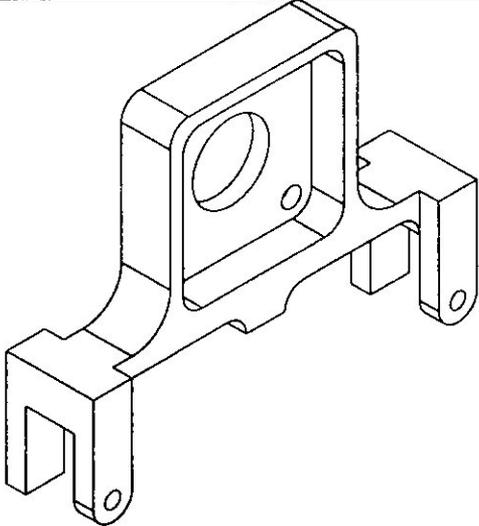
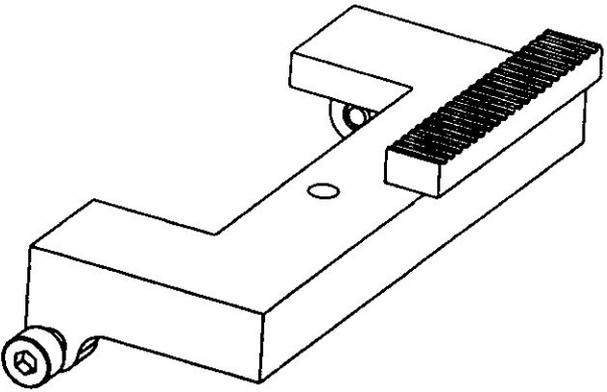


Figure 38. Vue isométrique du mécanisme proposé selon l'axe Y

**Tableau des pièces du système de translation :**

N° pièce	rôle de chaque pièce	Dessin de la pièce en 3D
1	<p>C'est un moteur pas à pas qui sert à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Il fonctionne en courant continu. Son fonctionnement est lié au distributeur des signaux (page 63).</p>	
2	<p>C'est le support du moteur sur le grand chariot. Il est conçu de telle façon qu'il n'influe pas sur le fonctionnement du bain, il doit être fabriqué en aluminium pour respecter les contraintes exigées du poids.</p>	
3	<p>C'est la pièce qui assure la transmission du moteur au petit chariot, c'est le même matériau qu'on a utilisé dans la pièce 2 pour la même raison déjà citée.</p>	

**IV -6 -1- Selon l'axe X :**

Le mécanisme qu'on va proposer est constitué de deux systèmes :

**IV -6 -2- 1- transmission vis écrou :**

Pour respecter les contraintes imposées nous avons été obligés de proposer un mécanisme qui a son propre guidage et ses propres supports comme la figure ci dessous le montre.

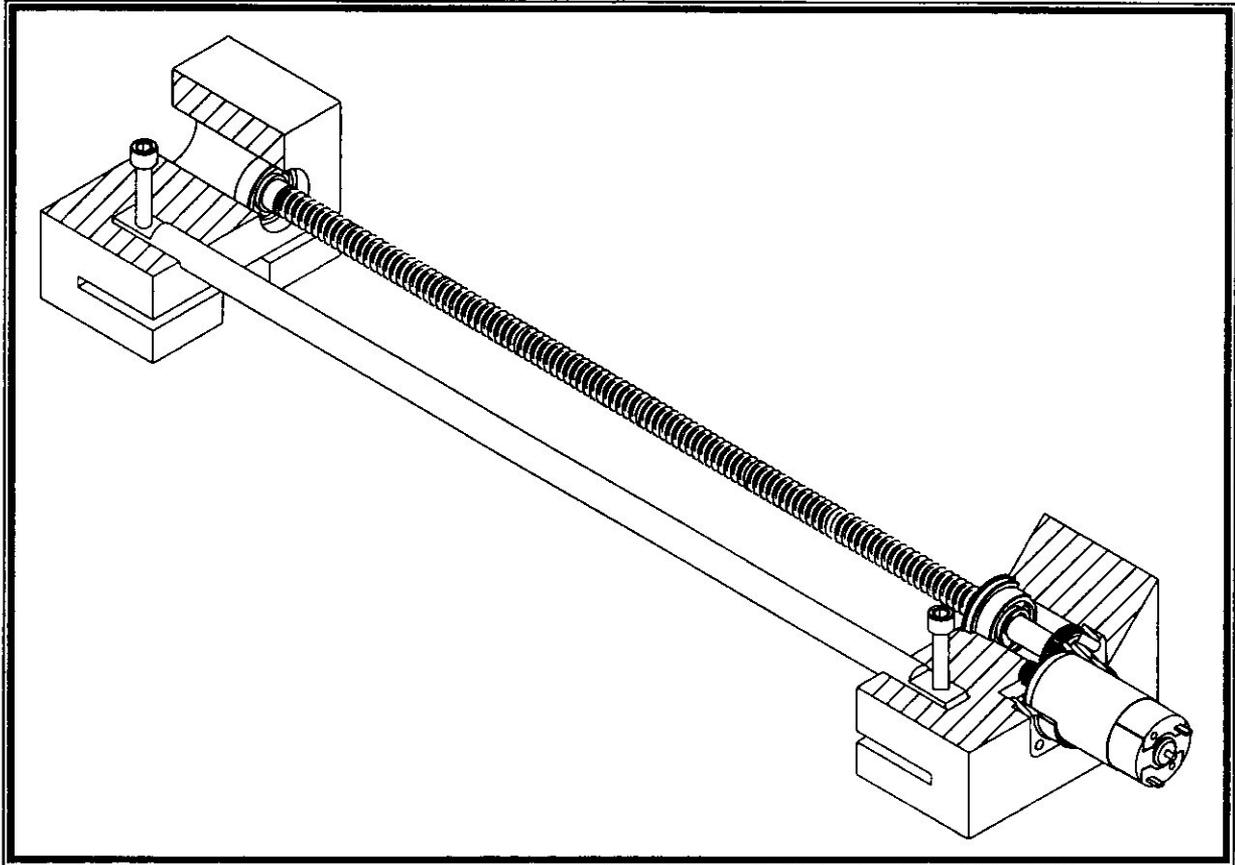
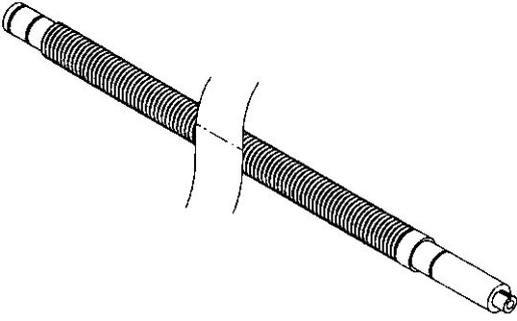
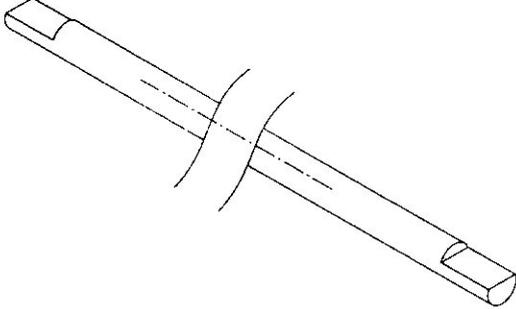
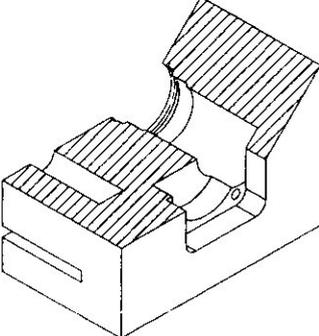
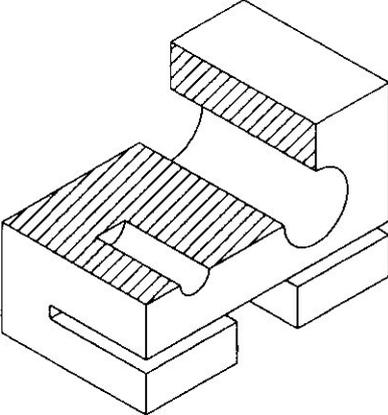
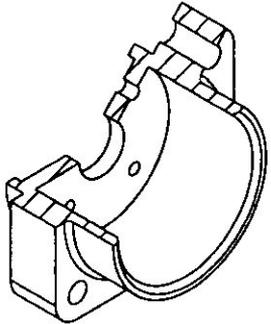
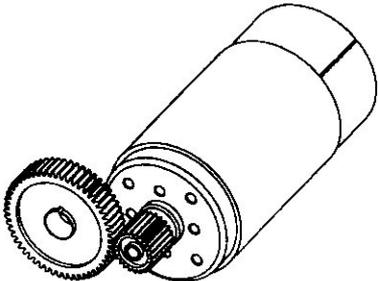
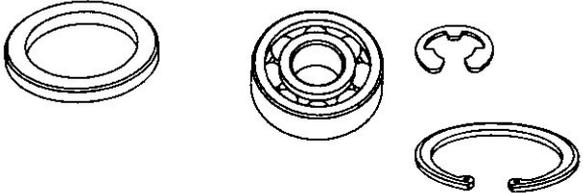


Figure 39. Mécanisme de transmission vis écrou

Tableau des pièces du système de translation :

N° pièce	rôle de chaque pièce	Dessin de la pièce en 3D
1	<p>axe fileter M12 avec pas fin (<math>p=1,25\text{mm}</math>). Il sert à transformer le mouvement de rotation transmis par le moteur en un mouvement de translation à l'aide d'un simple écrou. Il contient des gorges et des épaulements pour le montage des roulements et un pignon.</p>	
2	<p>Axe de guidage avec deux méplats servant à bloquer la rotation des deux supports à l'aide d'une vis de serrage de chaque côté (figure 39).</p>	
3	<p>Support de fixation sur le bain pour recevoir l'axe de guidage, l'axe fileter, le moteur, le pignon, roulements, les cales et les anneaux élastiques.</p>	
4	<p>Support de fixation sur le bain pour assurer le parallélisme entre l'axe de guidage et l'axe fileter, pour un bon fonctionnement du mécanisme.</p>	

<p>5</p>	<p>Support pour faciliter le montage du moteur, en cas de défaillance, la maintenance consiste à enlever seulement le moteur sans avoir à démonter tout le système.</p>	
<p>6</p>	<p>Moteur à courant continu avec un réducteur pour mieux contrôler la rotation de la vis.</p>	
<p>7</p>	<p>Cales, roulements et anneaux élastiques servant à immobiliser l'axe fileté sur les supports de fixation pour laisser un seul degré de liberté (la rotation selon l'axe X).</p>	

### IV -6 -2- 2- système de guidage à deux axes

Comme il nous a été imposé de ne faire aucune modification sur le banc de contrôle, alors les défauts de parallélisme entre le déplacement du grand chariot et le mécanisme proposé sont inévitables (dû au montage). Pour corriger ces défauts tout en assurant le bon fonctionnement du mécanisme sans avoir un blocage, on a proposé un système de guidage comme le montre la figure ci dessous.

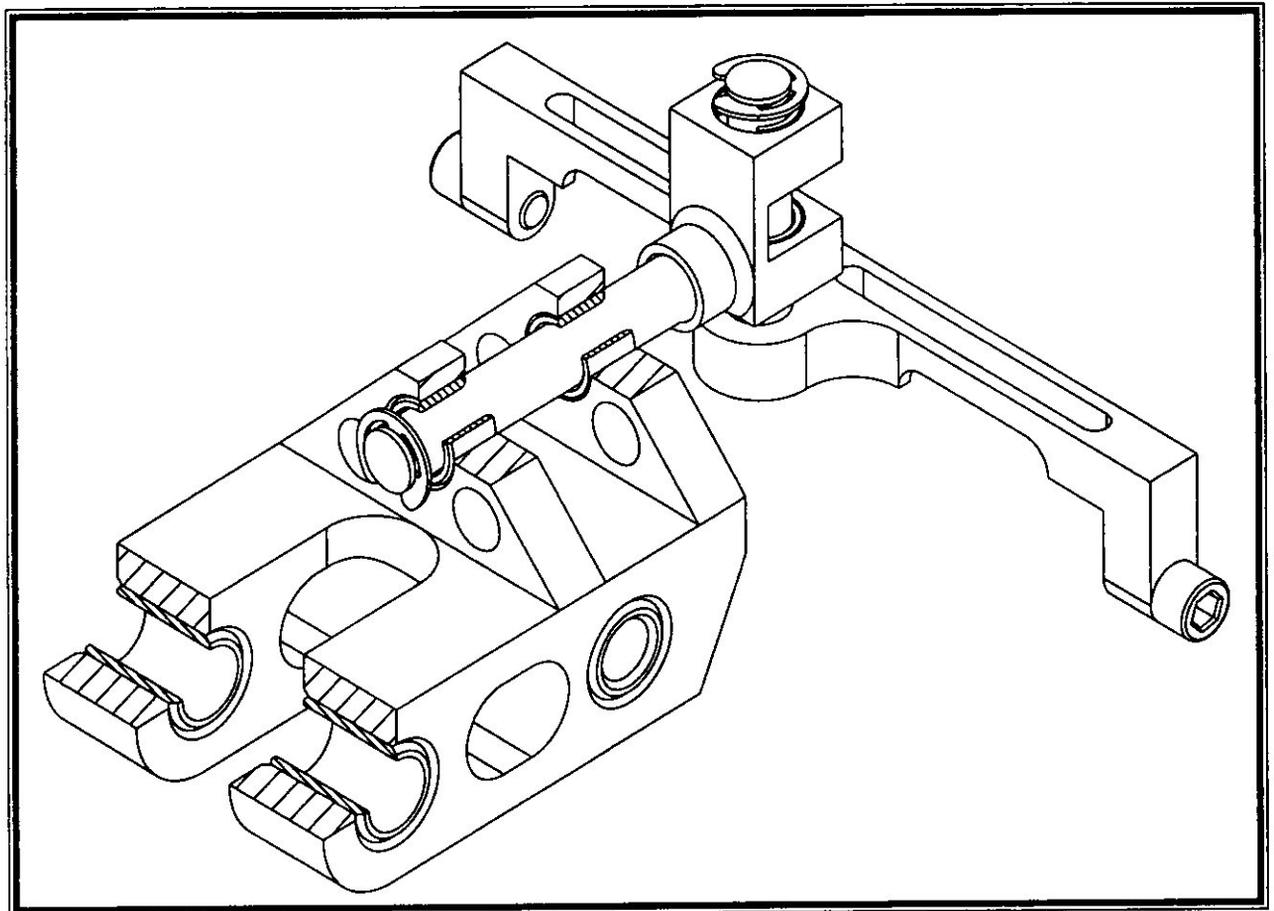
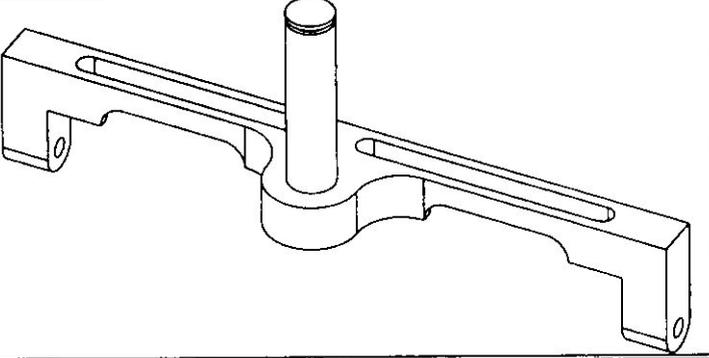
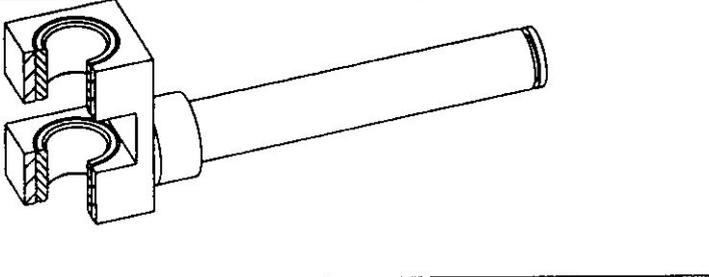
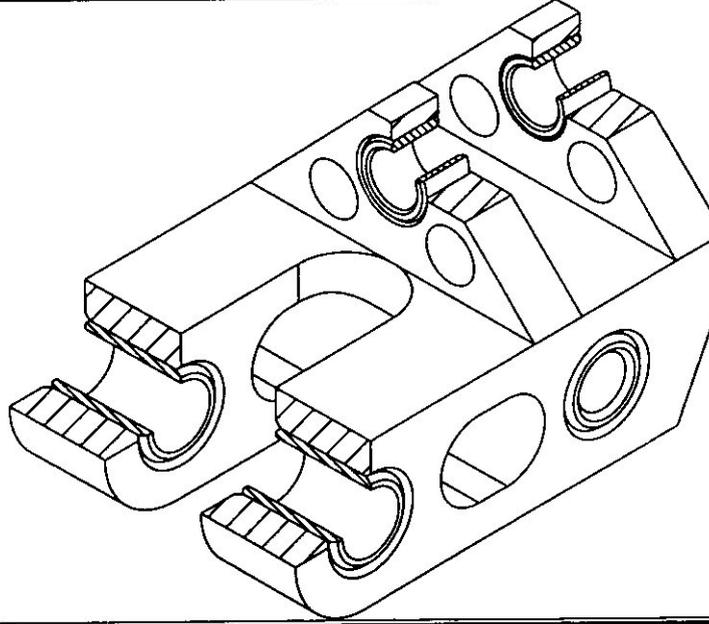
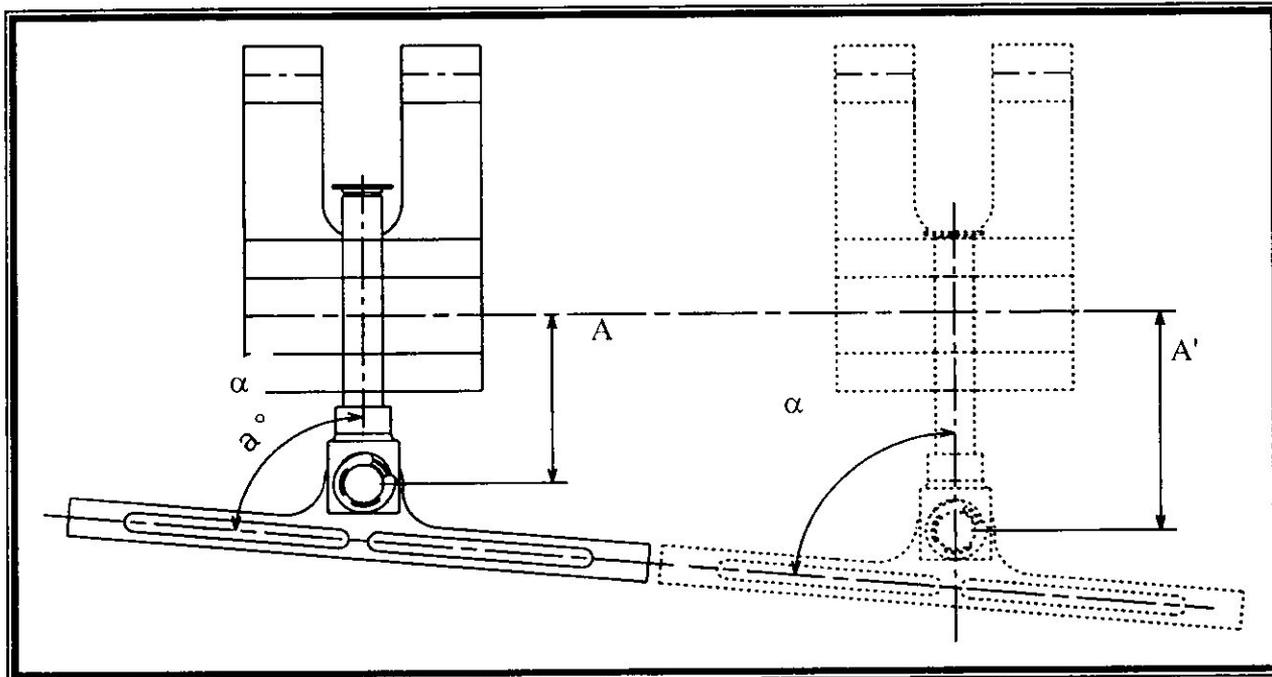


Figure 40. Vue isométrique du Système de guidage à deux axes

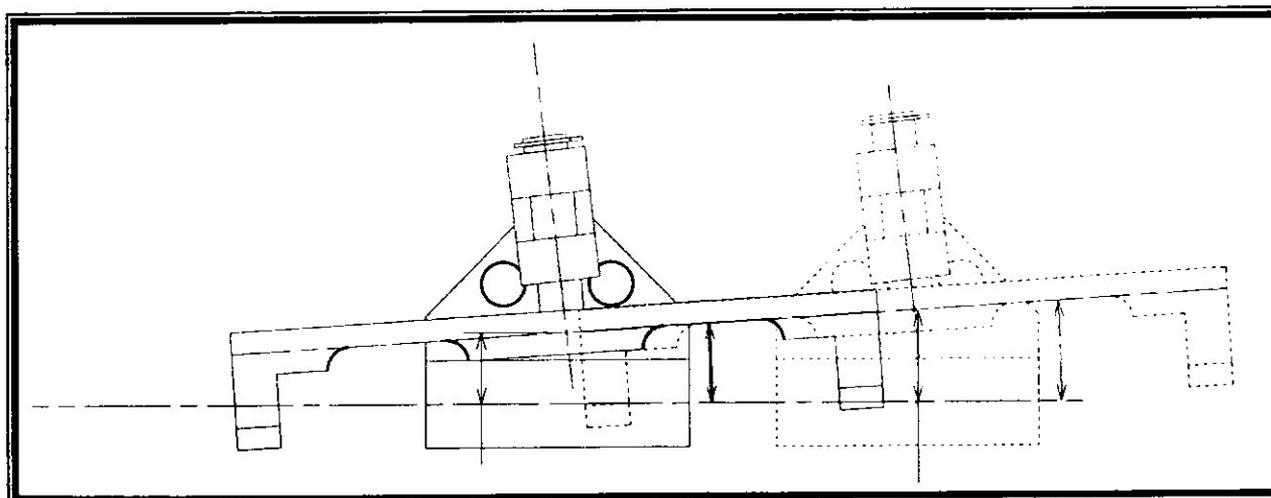
N°pièce	rôle de chaque pièce	Dessin de la pièce en 3D
1	Support adaptable sur le grand chariot en aluminium, un axe de guidage est emmanché dans son extrémité.	
2	Pièce en aluminium contenant des bagues en bronze pour des impératifs de frottement et d'usure, à son extrémité un axe de guidage est emmanché.	
3	Pièce en aluminium qui sert à transformer le mouvement de rotation de la vis du mécanisme en translation à l'aide de la bague fileter, les deux bagues de guidage sont faites en bronze, ainsi que les deux autres bagues situées en haut de la pièce.	
4	Anneau élastique qui sert comme fin de course.	

**Fonctionnement :**

Pour le défaut de parallélisme suivant le plan (XoY) comme le montre la figure ci dessous, la rotation entre la pièce 1 et 2, la translation entre la pièce 2 et 3 en corrige le défaut.



Pour le défaut de parallélisme suivant le plan (XoZ) comme le montre la figure ci dessous, la translation entre la pièce 1 et 2, la rotation entre la pièce 2 et 3 en corrige le défaut.



**IV -6 -3- Calcul d'engrenage : [13]**

Pour la réduction du moteur à courant continu on a pris une réduction  $i = 2,25$  et un module  $m = 0,8$  donc :

$$i = \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{Z_A}{Z_B} \text{ Pour } i = 2,25 \text{ on a : } \frac{Z_A}{Z_B} = \frac{27}{12} = \frac{54}{24} = \dots$$

**Pour le pignon du moteur :**

$$d = m \cdot Z = 0,8 \times 12 = 8 \text{ mm}$$

$$d_a = d + 2m = 8 + 2 \times 0,8 = 9,6 \text{ mm}$$

$$d_f = d - 2,5m = 8 - 2,5 \times 0,8 = 6 \text{ mm}$$

**Pour le pignon de l'axe fileter :**

$$D = m \cdot Z = 0,8 \times 27 = 21,6 \text{ mm}$$

$$D_a = D + 2m = 21,6 + 2 \times 0,8 = 23,2 \text{ mm}$$

$$D_f = D - 2,5m = 21,6 - 2,5 \times 0,8 = 19,6 \text{ mm}$$

**Calcul d'entraxe :**

$$a = \frac{d + D}{2} = \frac{m \cdot Z_A}{2} + \frac{m \cdot Z_B}{2} = \frac{m(Z_A + Z_B)}{2} = \frac{8 + 21,6}{2}$$

$$a = 15,6 \text{ mm}$$

**Pour la crémaillère : le module  $m = 0,8$**

Pour le pignon du moteur :  $d = 12 \text{ mm}$ .

$$d = m \cdot Z \Rightarrow Z = \frac{d}{m} = \frac{12}{0,8} = 15 \text{ dent}$$

$$d_a = d + 2m = 12 + 2 \cdot 0,8 = 13,6 \text{ mm}$$

$$d_f = d - 2,5m = 12 - 2,5 \cdot 0,8 = 10 \text{ mm}$$

$$P = \pi \cdot m = 3,14 \cdot 0,8 = 2,512 \text{ mm}$$

**IV -6 -4- Calcul des déplacements :**

**Pour la transmission vis écrou :**

$$P = 1,25 \text{ mm}$$

$$i = 2,25$$

$$V_{\max} = 6,35 \text{ mm/s}$$

$$\omega_{\text{moteur}} = \frac{V_{\max} \times 60}{P} \times i = \frac{6,35 \times 60}{1,25} \times 2,25 = 685,8 \text{ Tr/min}$$

Le moteur à courant continu choisi ne doit pas dépasser les 685 Tr/min en balayage d'inspection .

**Pour la transmission par crémaillère :**

Le moteur pas à pas a un pas de  $1,8^{\circ} = 0,031$  rad pour chaque impulsion

Le déplacement qui correspond à chaque impulsion est de :

$$\delta = \frac{d}{2} \times \alpha = \frac{12}{2} \times 0,031 = 0,2 \text{ mm/impulsion}$$

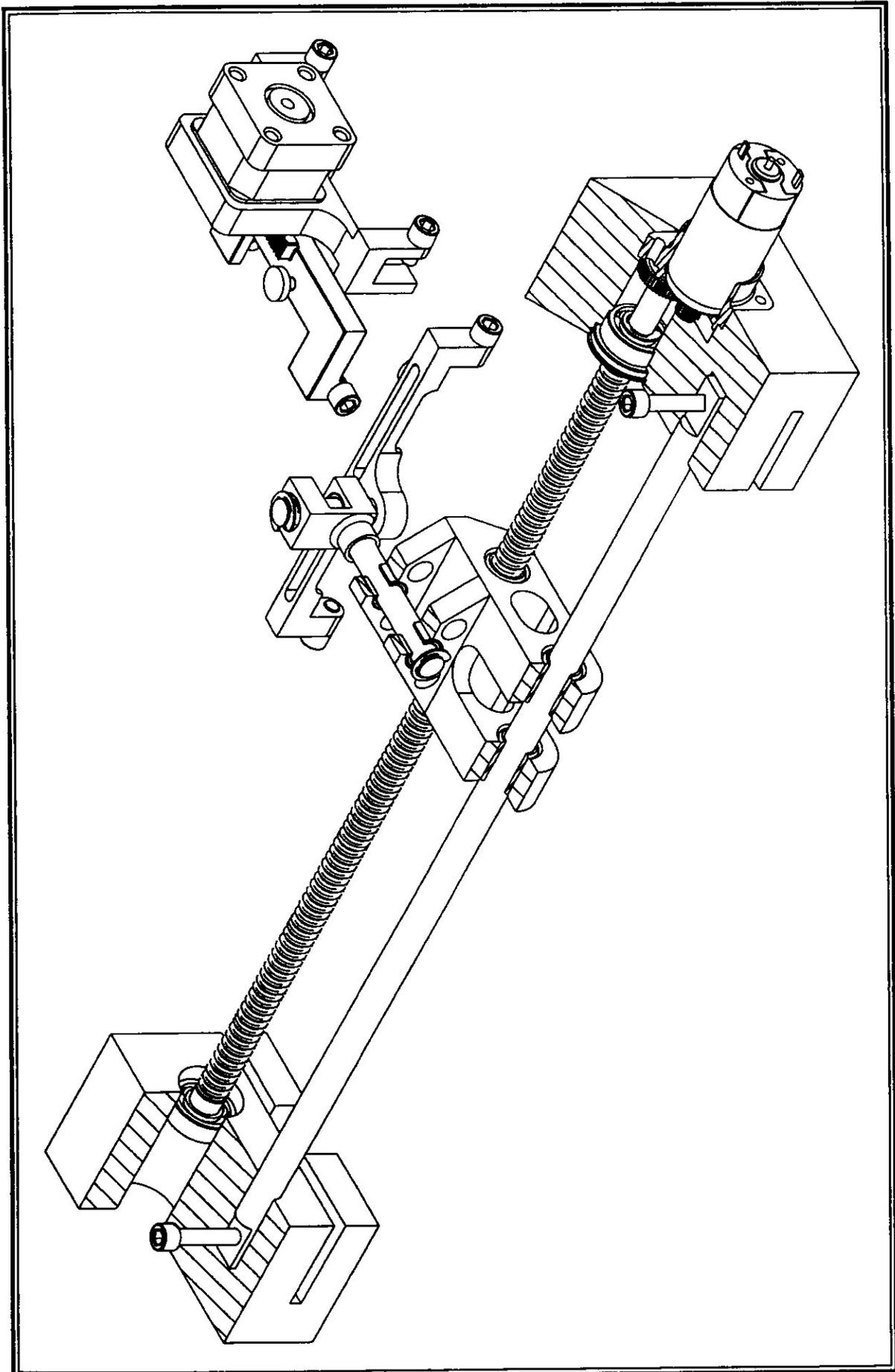


Figure 41. Vue isométrique globale du mécanisme proposé

## *Conclusion générale*

A la lumière de cette étude, nous avons pu prendre connaissance d'un domaine très vaste qui est celui des contrôles non destructifs.

Ces méthodes sont d'une importance primordiale dans la détection des défauts. Ceci nous permet de prévoir la rupture et la destruction des pièces.

Dans ce projet nous avons eu l'occasion d'utiliser nos connaissances fondamentales et plus précisément d'appliquer la méthode des éléments finis, qui a prouvé cette fois et comme d'habitude sa puissance dans le domaine des calculs d'approches physiques des structures complexes ; Et pour avoir une approche de la réalité avec une précision acceptable, nous avons utilisé l'outil informatique qui a été un facteur indispensable pour ce genre d'étude.

Pour cela nous avons opté pour CATIA : un logiciel de CAO qui contient dans son programme un module d'analyse des structures (étude statique et modale) par la méthode des éléments finis. Il nous a permis de modéliser notre ailette, et de faire un essai statique. Après l'avoir modélisé, nous avons abordé un essai statique qui consiste à vérifier la résistance aux chargements. Les résultats que nous avons obtenus nous ont permis de voir la distribution des contraintes, de localiser les différentes zones dangereuses dans l'ailette avec des valeurs de contraintes et de déformations. Cela nous a permis aussi d'apporter aux personnels d'AIR ALGERIE une confirmation quant à la nécessité d'inspection comme ils le font déjà, cette zone bien précise qui est le pied de l'ailette.

Notre travail ne s'est pas arrêté à ce stade, car on a établi les documents nécessaires pour le banc du contrôle : mode de fonctionnement, dessin d'ensemble, schéma cinématique. On a également proposé un système d'automatisation qui

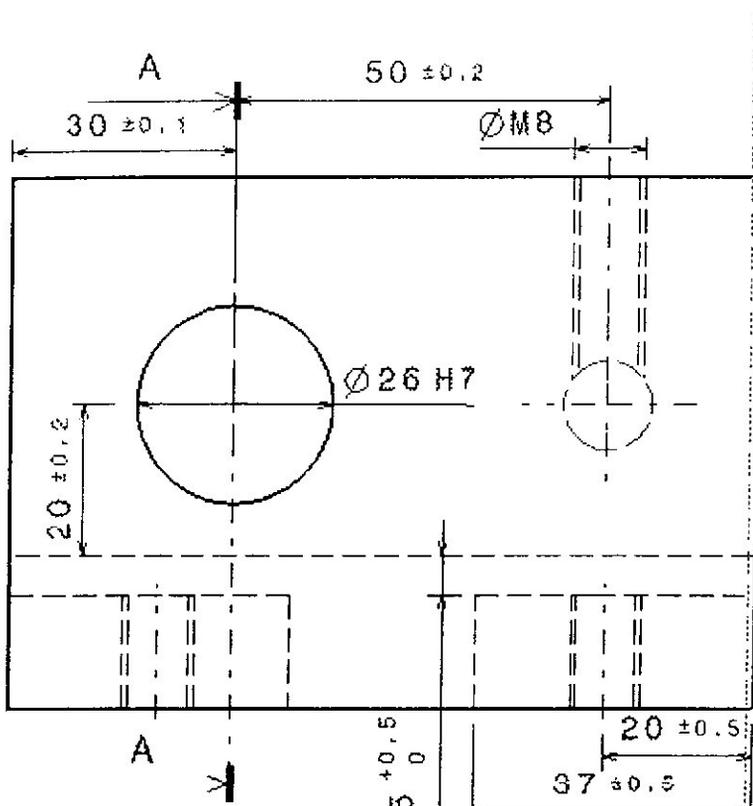
convient pour l'utilisation d'une des méthodes NDT, celle des ultrasons par immersion.

Cette proposition va permettre aux personnels de détecter les éventuelles criques sur les ailettes FAN CO2 avec précision et rapidité.

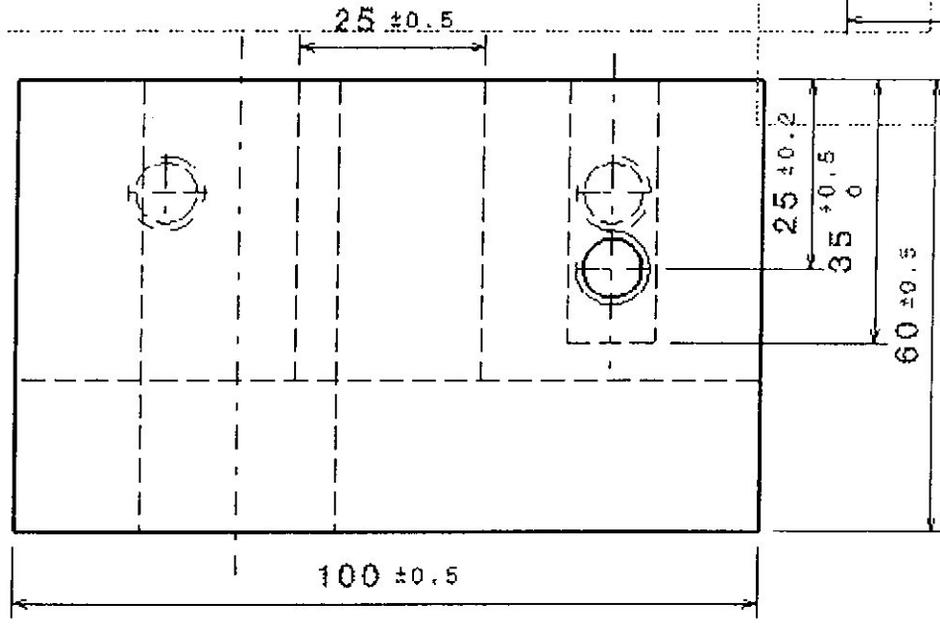
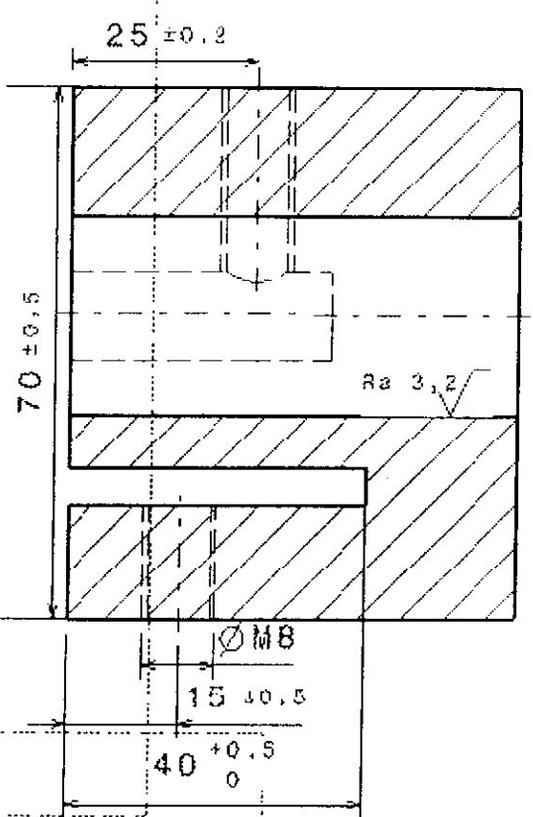
Ce travail n'est pas figé, mais il peut être repris par d'autres étudiants afin de développer les différents aspects de cette étude que nous n'avons pas eu la chance de traiter à savoir l'étude dynamique et l'automatisation complète du mécanisme qui peut être repris par les étudiants spécialisés en installation pour coordonner entre l'acquisition des ultrasons et le déplacement du canon à l'aide d'un logiciel ou une interface électronique. Sans oublier nos collègues de propulsion qui pourront utiliser la digitalisation que nous avons réalisé pour étudier la forme de l'ailette, l'étude de l'écoulement secondaire, la déformation élastique et plastique, le refroidissement...etc.

Finalement nous sommes satisfaits de ce travail dans lequel nous avons essayé de répondre à un besoin industriel et qui nous a permis d'approfondir nos connaissances.

*ANNEXES*



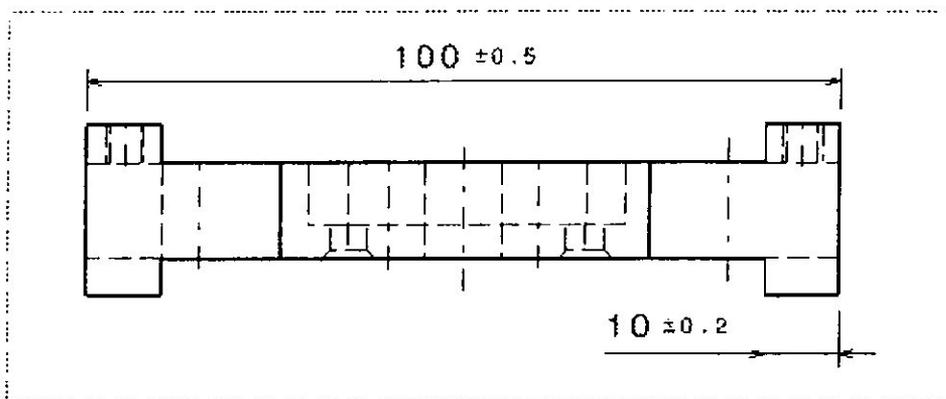
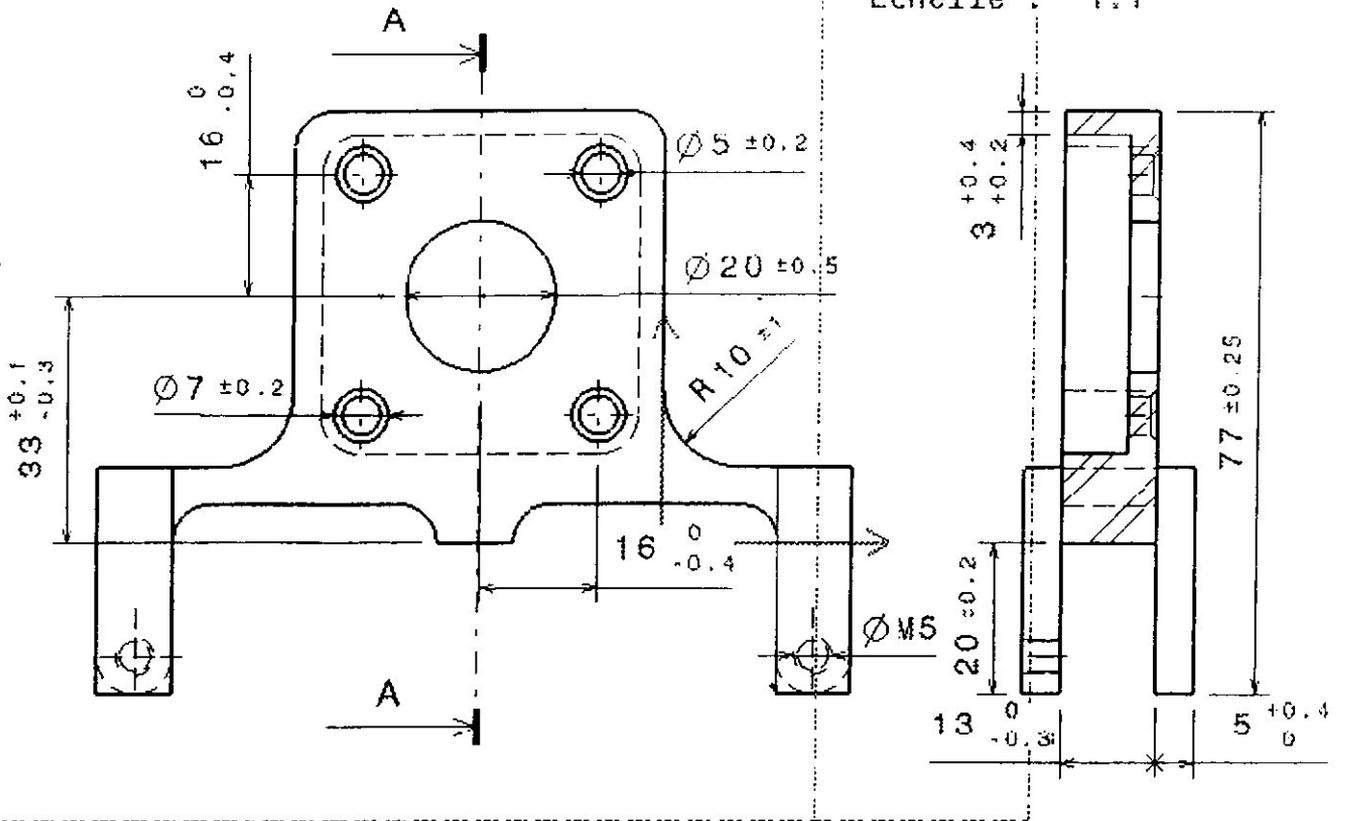
Coupe A-A  
Echelle 1x



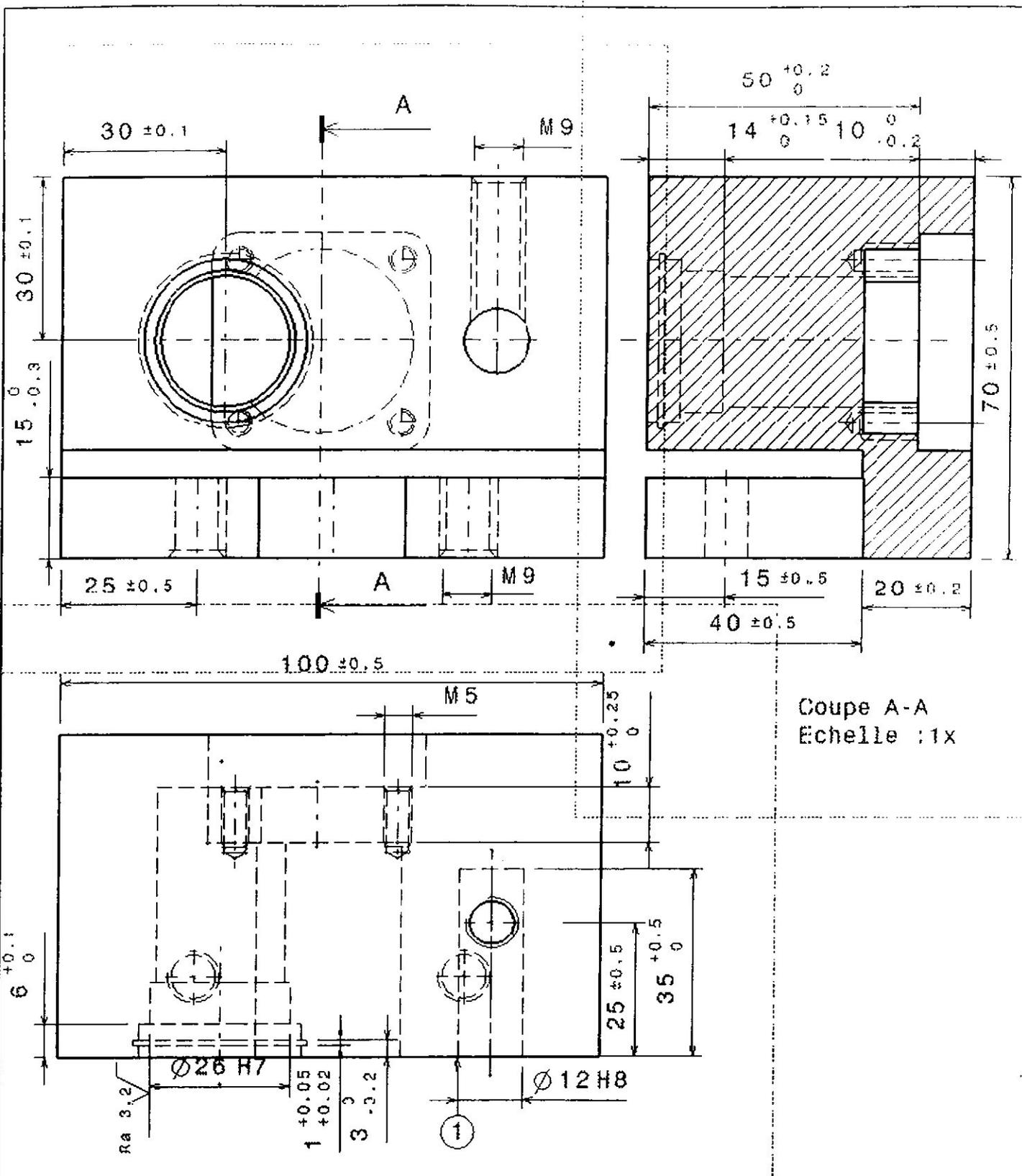
Rugosité 6,3 sauf précision.

1 : 1	<b>PIECE</b>	Dessiné par : R. BENCHIKH H. DJEBARA
	D.A.B	Promoteur : A. TAHI
A4	P.F.E	Encadreur : A. BENOMAR

Ccupe A-A  
Echelle : 1:1



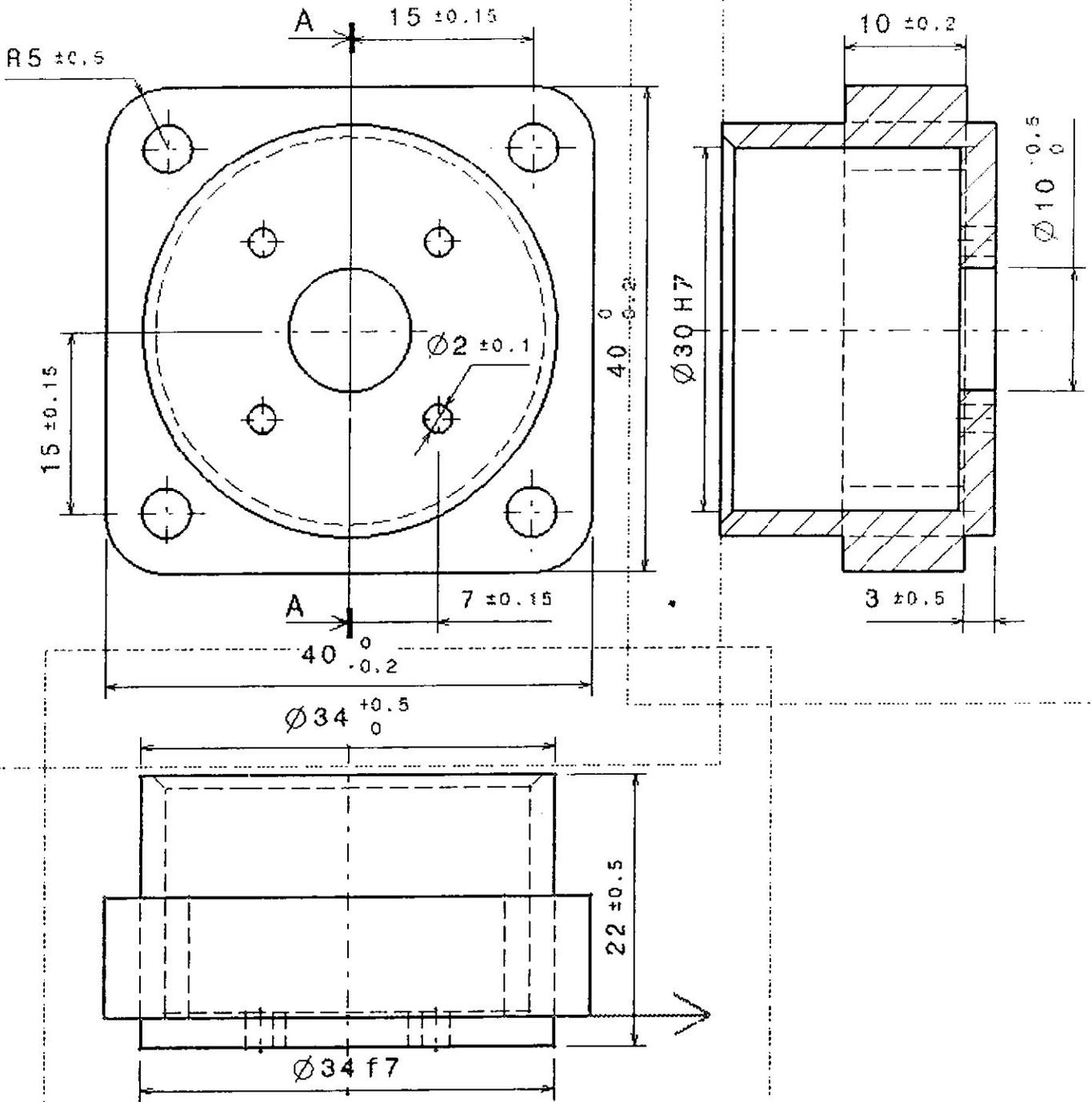
1:1	<b>Support Moteur</b>	Dessiné par: R. BENCHIKH H. DJEBARA
	D.A.B	Promoteur: A. TAHI
A4	P.F.E	Encadreur: A. BENOMAR



Rugosité 6,3, sauf précision.

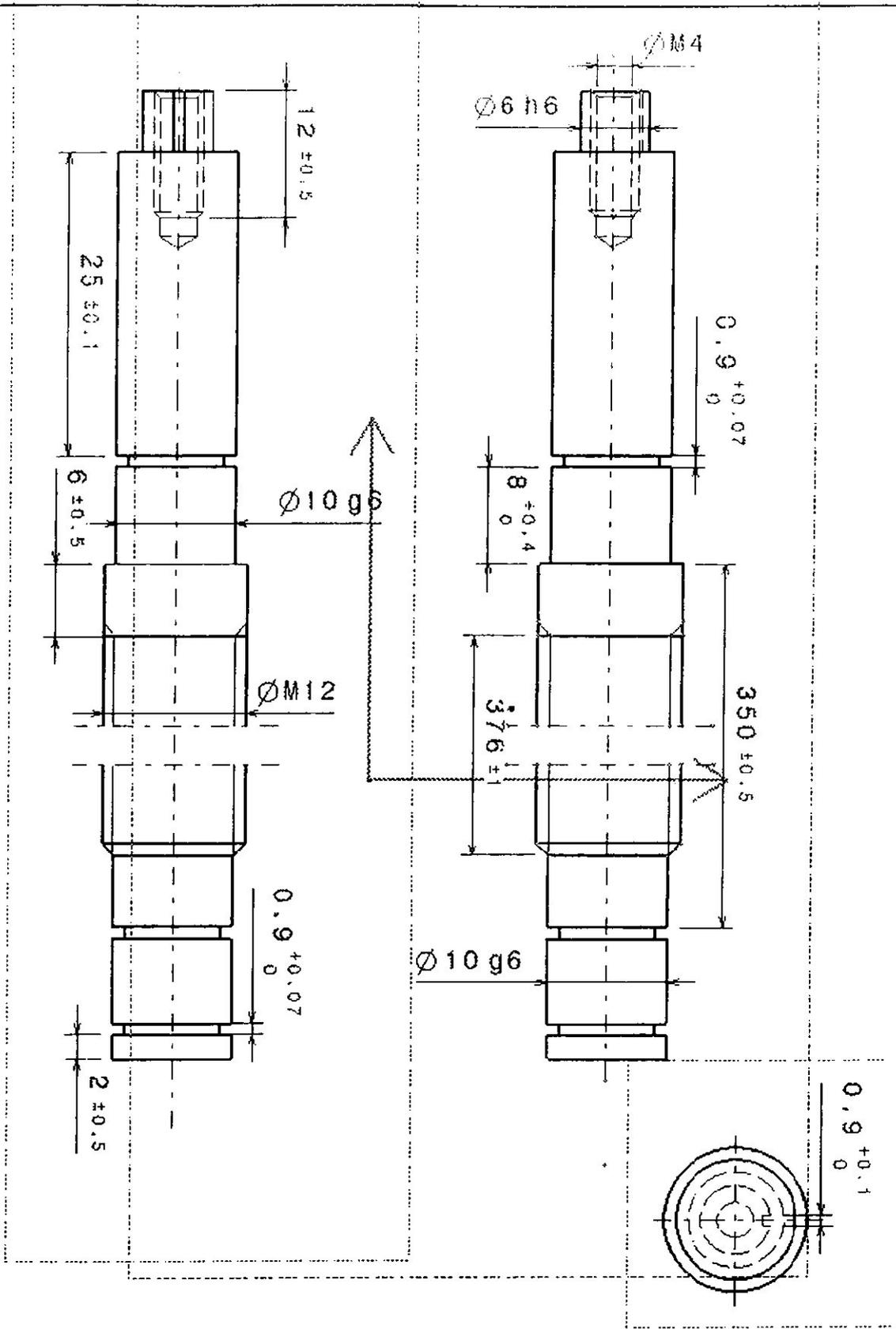
1: 1	PIECE	Dessiné par: R.BENCHIKH H.DJEBARA
	D.A.B	Promoteur: A. TAHI
A4	P.F.E	Encadreur: A. BENOMAR

Coupe A-A  
Echelle 2x

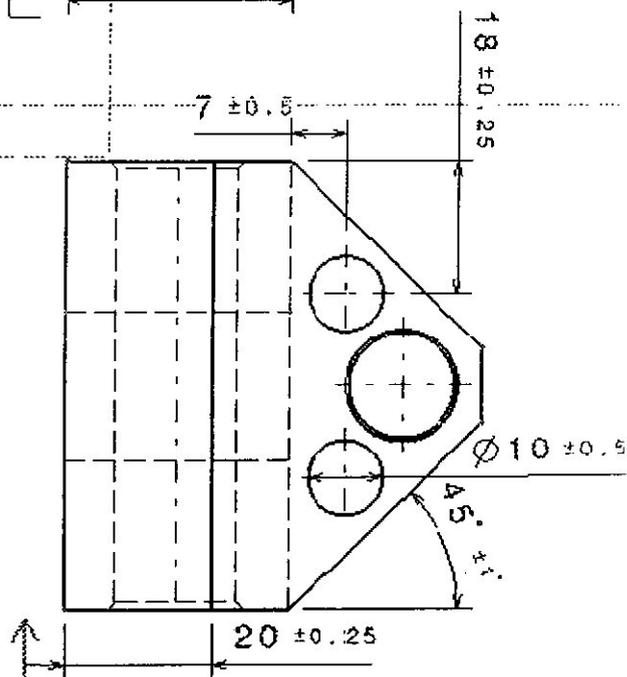
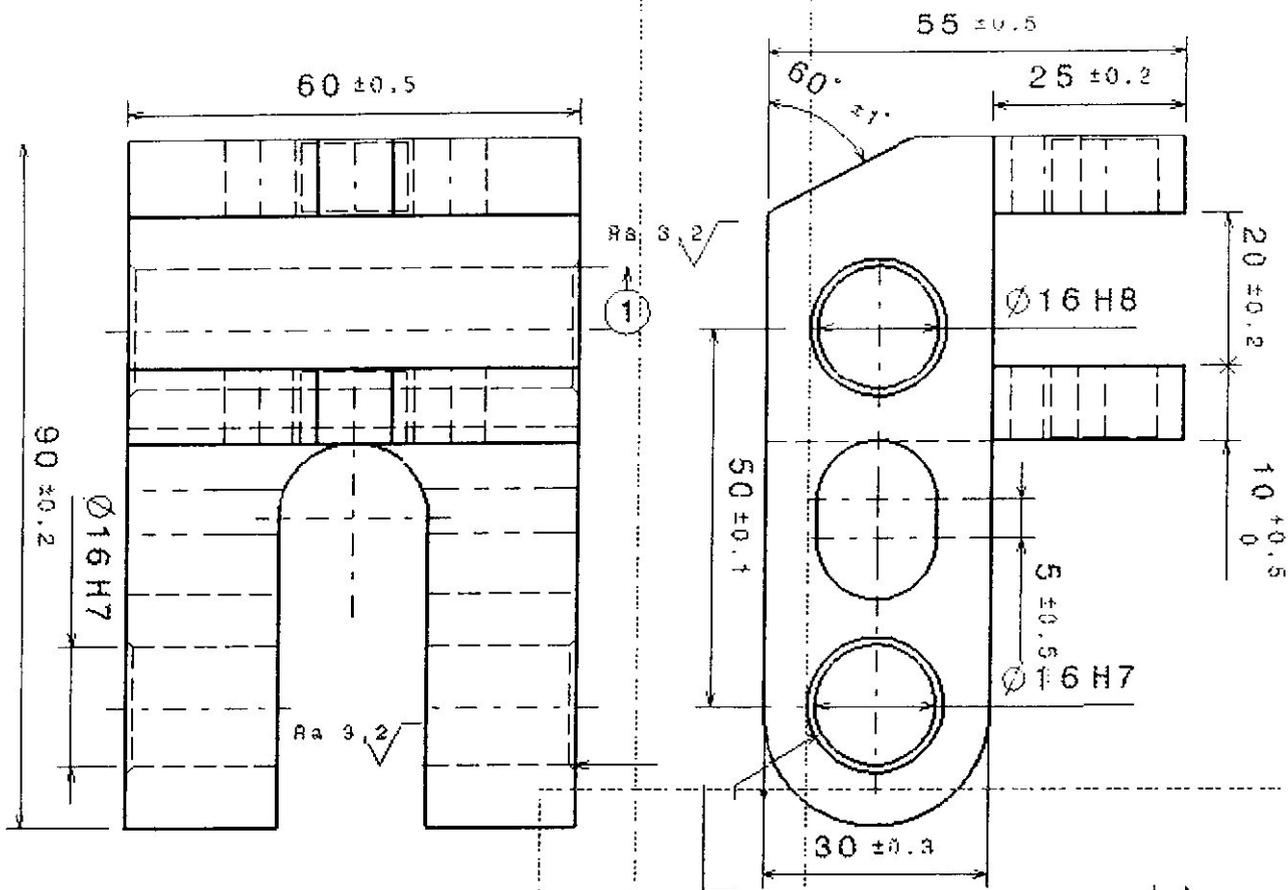


Rugosité 6,3 sauf précision.

1 : 2	<b>Support moteur</b>	Dessiné par : R. BENCIKH H. DJEBARA
	D.A.B	Promoteur : A. IAHI
A4	P.F.E	Encadreur : A. BENOMAR



2:1	AXE FILTE	Dessiné par: R. BENCHIKH H. DJEBARA
	D.A.B	Promoteur: A. TAHI
A4	P.F.E	Encadreur A. BENOMAR

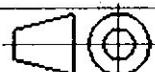


Rugosité 6,3 sauf précision.

2 : 1

PIECE

Dessiné par :  
R. BENCIKH  
H. DJEBARA



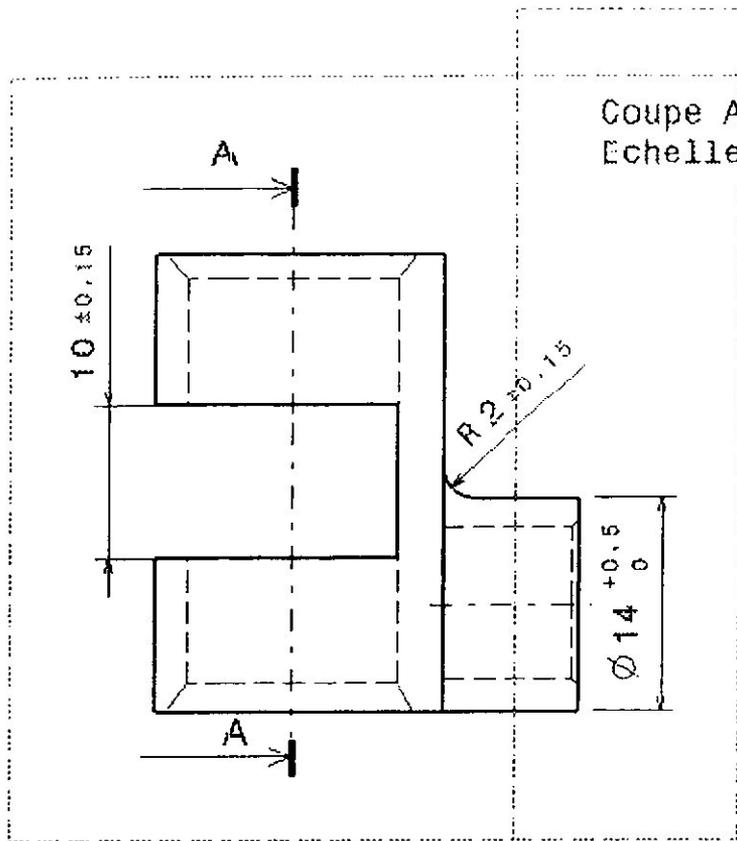
D.A.B

Promoteur :  
A. TAHI

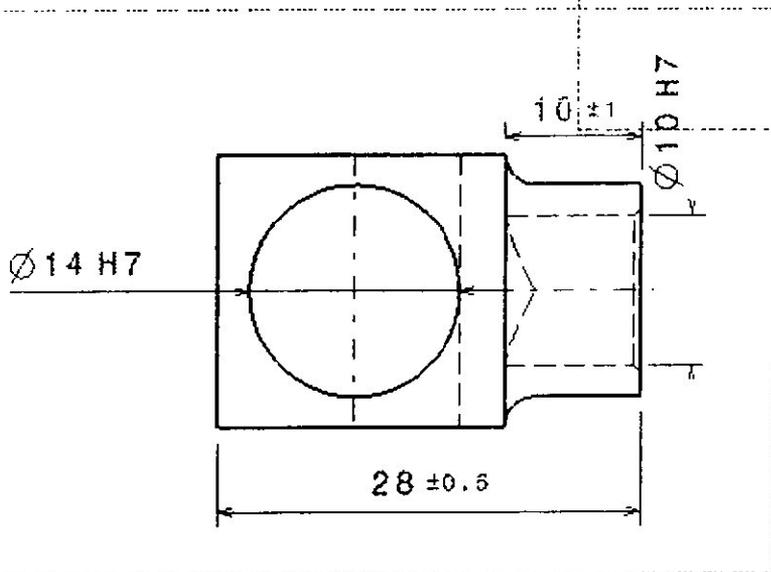
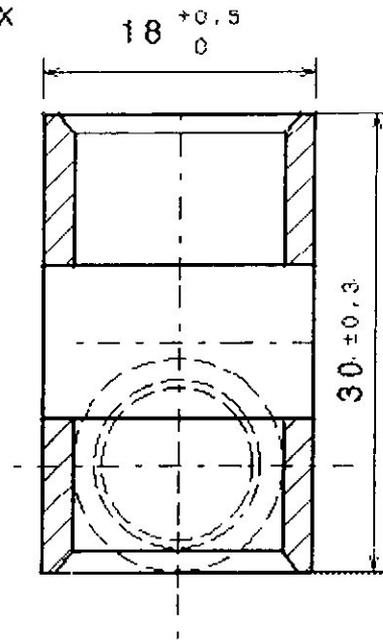
A4

P.F.E

Encadreur :  
A. BENOMAR



Coupe A-A  
Echelle 2x



2:1

Support d'axe

Dessiné par:  
R. BENCHIKH  
H. DJEBARA



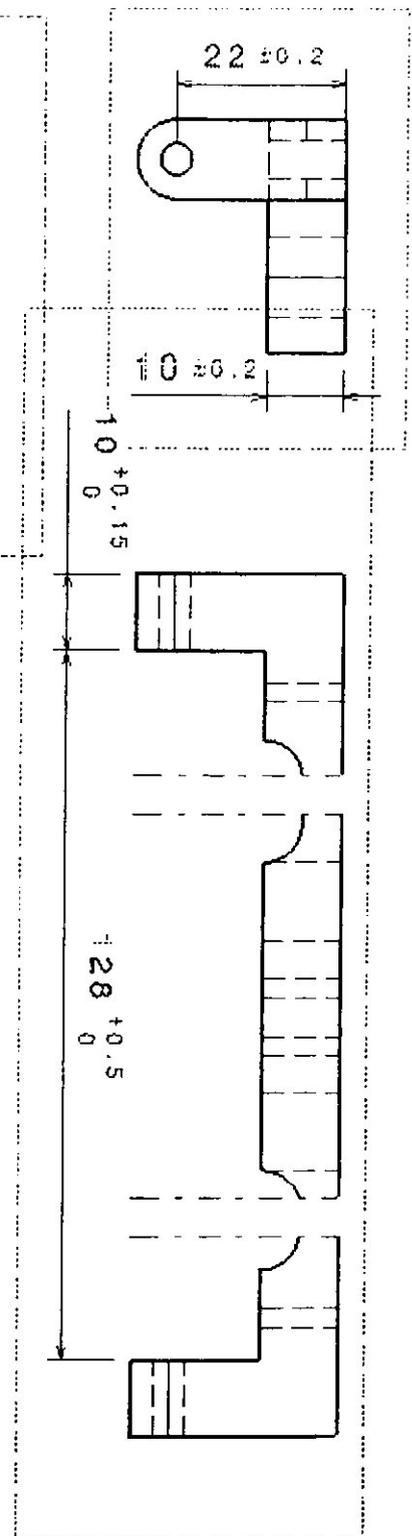
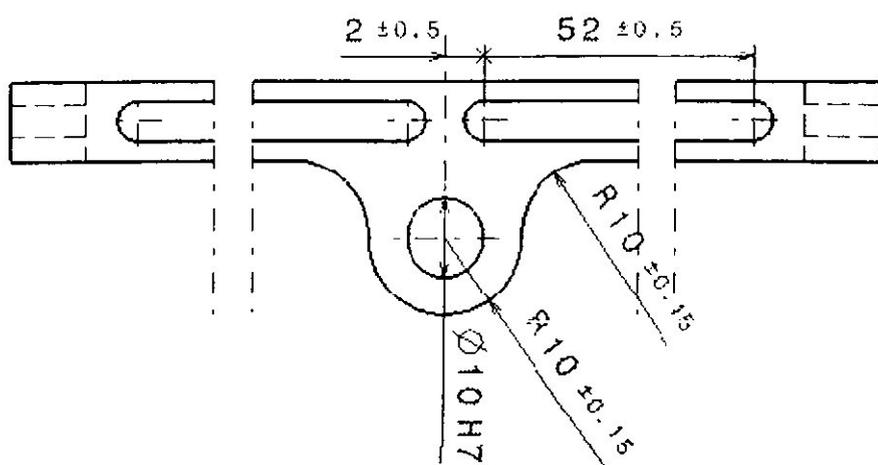
D.A.B

Promoteur:  
A. TAHI

A4

P.F.E

Encadreur  
A. BENOMAR



1:1

### Support d'axe

Dessiné par:  
R. BENCHIKH  
H. DJEBARA



D.A.B

Promo teur:  
A. TAHI

A4

P.F.F

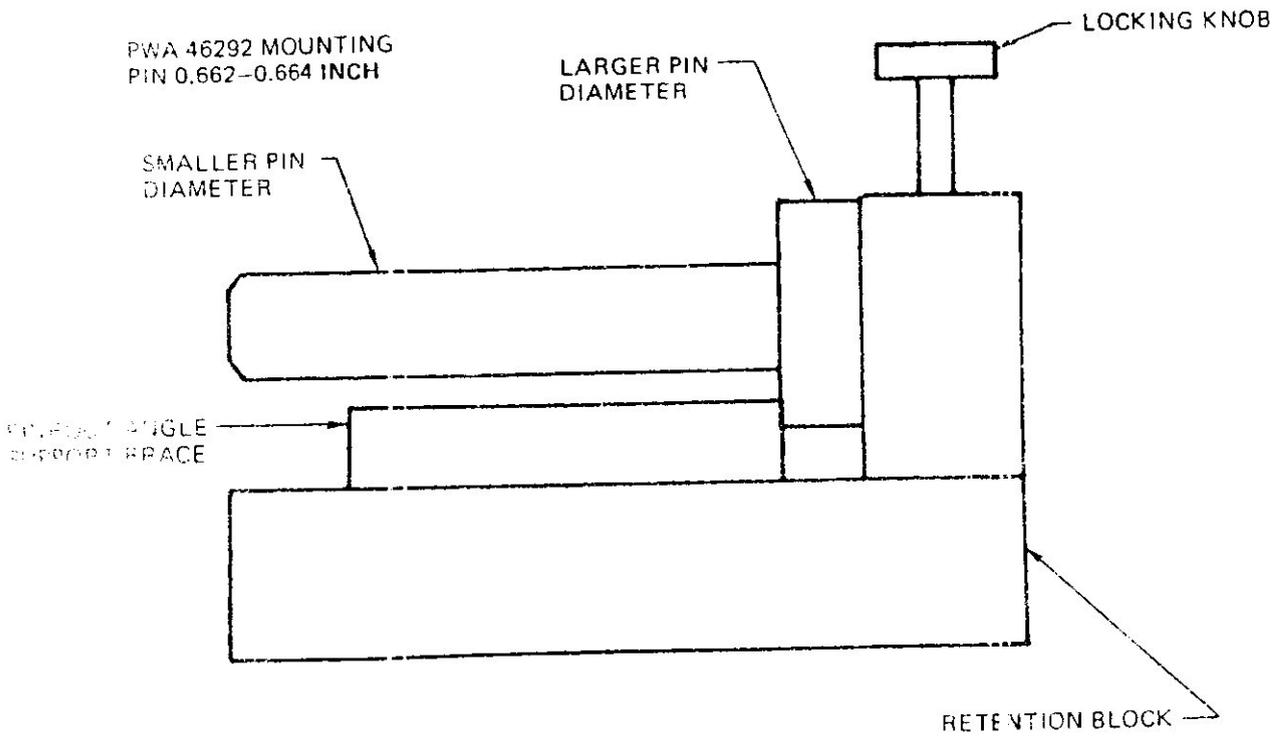
Encadreur  
A. BENOMAR

Pratt & Whitney

JT8D ENGINE MANUAL (PN 481672 - RESTRUCTURED)

COMPRESSOR BLADES, SECOND STAGE - INSPECTION-02

INSERT MOUNTING PIN TO BUTT LARGER DIAMETER  
AGAINST RETENTION BLOCK AND SECURE WITH  
LOCKING KNOB



L-87699

Insertion Of Mounting Pin Into  
Blade Holding Fixture  
Figure 801 (Sheet 1)  
(Task 72-33-23-27-001-A)

**72-33-23**

INSP-02  
Page 802  
OCT 1/91  
000

APP 9, 9A, 11, 15, 15A, 17, 17A, 17R, 17AR



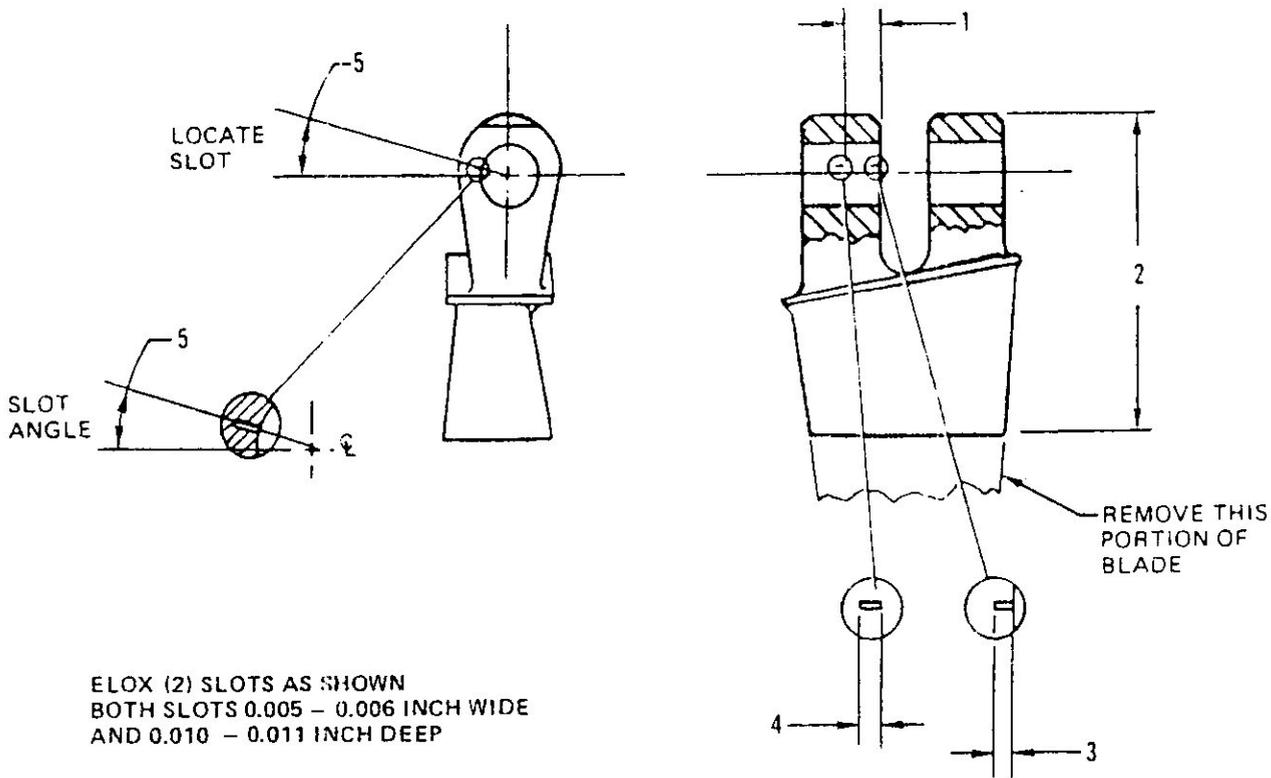




Pratt & Whitney

JT8D ENGINE MANUAL (PN 481672 - RESTRUCTURED)

COMPRESSOR BLADES, SECOND STAGE - INSPECTION-02



L-87702

1. 0.393 - 0.403 Inch
2. 3.700 Inch
3. 0.040 - 0.041 Inch
4. 0.030 - 0.031 Inch
5.  $15^\circ \pm 1^\circ$

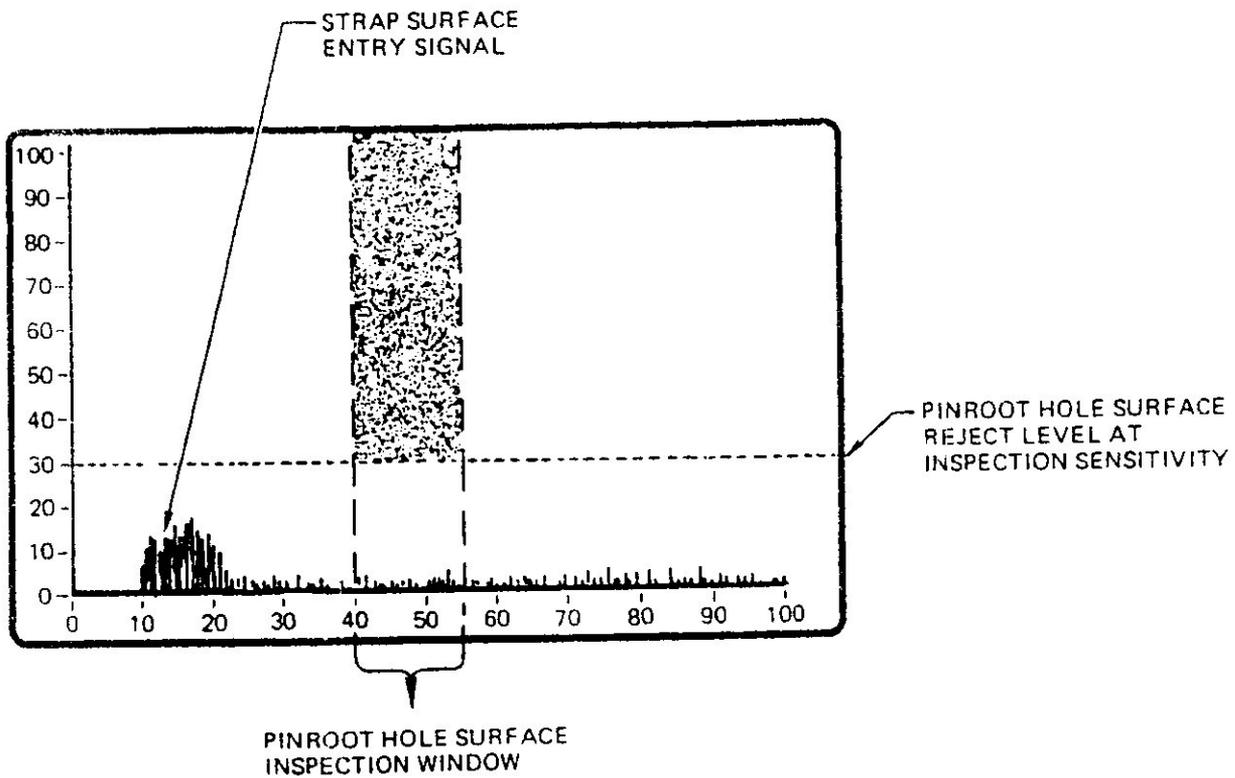
Sensitivity Setting Standard  
Showing Elox Slot Locations  
Figure 801 (Sheet 5)  
(Task 72-33-23-27-001-A)

**72-33-23**

INSP-02  
Page 806  
FEB 1/89  
000

EFF: -9, 9A, 11, 15, 15A, 17, 17A, 17R, 17AR

FRAN & WINDLEY  
JT8D ENGINE MANUAL (PN 481672 - RESTRUCTURED)  
COMPRESSOR BLADES, SECOND STAGE - INSPECTION-02



L-87703

Inspection Window And Rejection  
Criteria  
Figure 801 (Sheet 6)  
(Task 72-33-23-27-001-A)

**72-33-23**  
INSP-02  
Page 807  
AUG 1/98  
000

EFF: -9, 9A, 11, 15, 15A, 17, 17A, 17R, 17AR

R  
R

## *Bibliographie*

- [1] **A. AHMED BEN YAHIA**, *cours mécanique de la rupture TEC 337*
- [2] **1- GERARD FORESZ**, *choix d'une méthode de contrôle, AFNOR, janvier 1992*
- [3] **9- A. LAMBERT, J. RIVENEZ et G. WACHE**, *les contrôle non destructifs (généralité), AFNOR - CETIM, 1994.*
- [4] **18- JL. VIDAL**, *Magnétoscopie (niveau I), centre de formation et de perfectionnement, bureau VIRITAS, juillet 1990.*
- [5] **19- JL. VIDAL**, *Magnétoscopie (NDT Expert), NIVEAU II, Bureau VIRITAS, 2002*
- [6] **22- BLONDET**, *Ultrasons (NDT Expert), Niveau II, P.*
- [7] **23- Ultrasons (Carnet technique)**, *impression SGS, Edition 05, 1957*
- [8] **27** <http://www.cofrend.com/fr/framecon.htm>.
- [9] **J-C. GRAVEUR et D. MARCEAU**, *de la CAO au calcul, Dunod Paris 2001*
- [10] **ML. MOUSSAOUI**, *cours éléments finis TEC 345*
- [11] **T. SAYAH**, *cours mécanique de contact TEC 373*
- [12] **A-CHEVALIER**, *Guide du dessinateur industriel, Hachette, (1974) Edition N°05.*
- [13] **A-CHEVALIER**, *Guide du dessinateur industriel, Hachette, (1999).*