

UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE METHODES DE FABRICATION

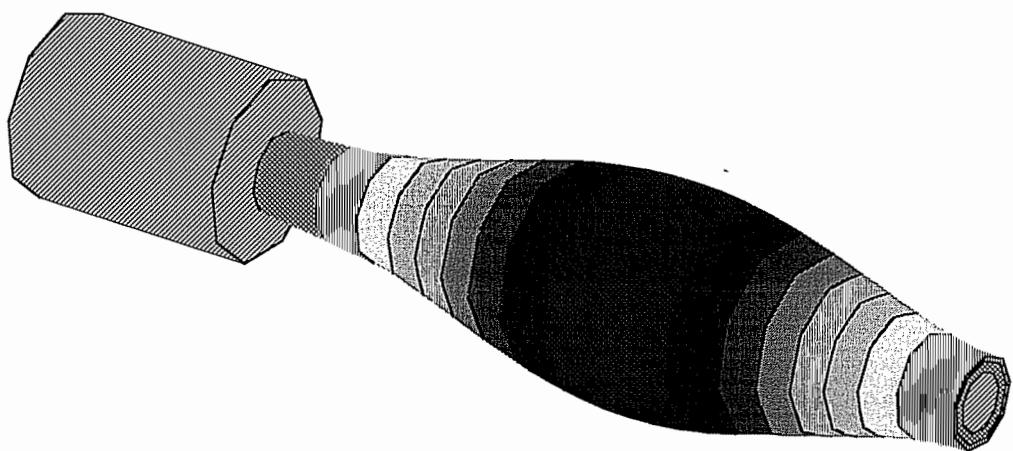
DESCRIPTION D'UNE METHODE DE RECONSTITUTION DE LA SURFACE USINEE

P. BECKERS
J.F. DEBONGNIE
B. DELTOUR
L. MASSET

Rapport LMF/R7 - 1995

Rapport 7

Description d'une méthode de reconstitution de la surface usinée



1. Introduction

L'objet de ce rapport est d'expliquer les deux méthodes utilisées pour calculer les défauts engendrés par les efforts de coupe et de serrage.

La première méthode repose sur l'utilisation des superéléments. Les étapes principales de cette méthode sont :

- **création d'un superélément**; cette condensation comprend la condensation des charges de bridage, sauf si les noeuds auxquels elles sont appliquées sont ajoutés à ceux de la surface usinée; auquel cas, on peut introduire ces charges dans les phases de calcul ultérieures;
- **extraction et inversion de la matrice de raideur** correspondant au superélément;
- **multiplication de cette matrice inversée par un vecteur de charge**, contenant les efforts de serrage (bridage) et les forces de coupe pour une position donnée de l'outil;
- **extraction des déplacements** des seuls noeuds réellement usinés en chaque position particulière de l'outil (**pseudo-déplacements**);
- **calcul du défaut**, c'est-à-dire de la composante du vecteur pseudo-déplacements orthogonale à la surface usinée (**filtrage**);
- **visualisation du défaut** en l'assimilant à des déplacements fictifs des noeuds de la surface usinée.

Nous appellerons **méthode directe** la seconde technique envisagée. Elle consiste à appliquer directement les n cas de charges à la structure complète, puis de sélectionner les déplacements des seuls noeuds réellement usinés en chaque position particulière de l'outil (**pseudo-déplacements**). Le calcul du défaut par filtrage s'effectue de la même manière que précédemment.

Au cours du premier semestre de l'étude, seul l'outil SAMCEF a été utilisé. Actuellement, nous étudions les possibilités offertes par NASTRAN pour effectuer les mêmes opérations.

Les résultats obtenus sont introduits dans un fichier .UNV qui peut être traité dans GIBUS.

2. Technique du superélément [1]

2.1. Justification de la technique du superélément

Lorsqu'une même structure de base doit faire l'objet d'un certain nombre d'analyses correspondant à des configurations légèrement différentes (dans cette application, changement de la mise en charge et des efforts de bridage), un traitement préliminaire des composantes de la structure qui ne sont susceptibles d'aucune modification peut réduire notablement le coût de chaque cas de calcul envisagé.

2.2. Formulation mathématique du concept de superélément dans le cas d'un problème statique

On distingue dans la structure 2 types de degrés de liberté :

- les degrés de liberté q_C , "intérieurs" au superélément et qui devraient donc être condensés;
- les degrés de liberté q_R , qui définissent le superélément, et qui sont retenus ici parce qu'on n'a pas encore défini la mise en charge à appliquer à ces degrés de liberté.

Le problème de création de superélément consiste donc à condenser une matrice de raideur K et, dans le cas de problèmes statiques, des vecteurs de charge g .

Si on partitionne K et g selon les degrés de liberté condensés q_C , et retenus q_R , le système d'équations

$$g = K q \quad (1)$$

peut s'écrire :

$$\begin{Bmatrix} g_C \\ g_R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{CC} & K_{CR} \\ K_{RC} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_C \\ q_R \end{Bmatrix} \quad (2)$$

K étant symétrique, nous avons :

$$K_{RC} = K_{CR}^T, \quad K_{CC} = K_{CC}^T, \quad K_{RR} = K_{RR}^T, \quad K = K^T$$

De la première ligne de l'équation, on tire :

$$q_C = K_{CC}^{-1} (g_C - K_{CR} q_R) \quad (3)$$

et en substituant dans la seconde équation, on obtient :

$$g_R - K_{RC} K_{CC}^{-1} g_C = [K_{RR} - K_{RC} K_{CC}^{-1} K_{CR}] q_R$$

que l'on peut écrire :

$$g_R^* = K_{RR}^* q_R \quad (4)$$

$$\text{où } g_R^* = g_R - K_{RC} K_{CC}^{-1} g_C \quad (5)$$

$$\text{et } K_{RR}^* = K_{RR} - K_{RC} K_{CC}^{-1} K_{CR} \quad (6)$$

La résolution du système d'équations (2) est ramenée à la résolution du système d'équations (4), qui est réduit à la taille du superélément. Une fois connus les déplacements q_R , l'ensemble des déplacements sera obtenu grâce à (3).

Or, un élément fini est représenté par une matrice de raideur et un ou plusieurs vecteurs de charge. On remarque donc immédiatement que la matrice de raideur et les vecteurs de charge des équations (5) et (6) constituent en quelque sorte un élément. On l'appellera *superélément*.

On constate également que résoudre le système (4) puis calculer q_C par l'équation (3) est strictement identique au fait de résoudre directement le système (2).

On remarque enfin que s'il faut effectuer un grand nombre de calculs ne différant que par les g_R , la technique du superélément peut se révéler extrêmement intéressante.

2.3. Création du superélément

Après avoir défini les noeuds et les éléments composant le superélément, il faut indiquer la liste des déplacements retenus. Cette liste constitue la définition du superélément.

Dans le cadre de cette étude, on retiendra, pour définir le superélément, toutes les composantes du déplacement des noeuds de la surface usinée et des noeuds auxquels sont appliqués les efforts de bridage. Dans ce cas, les efforts de coupe **et** de serrage seront des charges explicites appliquées aux noeuds retenus.

Dans le cas d'un maillage du second degré, nous envisagerons 2 possibilités :

- 1) Calcul des déplacements aux noeuds sommets **et** aux noeuds d'interface ; dans ce cas, tous les noeuds de la surface usinée et du bridage sont retenus pour définir le superélément.
- 2) Calcul des déplacements uniquement aux noeuds sommets des éléments ; seuls les noeuds sommets et les noeuds de bridage définissent le superélément. Dans ce cas, pour le post-traitement des résultats par GIBUS, il faut recréer un nouveau maillage, du premier degré cette fois, reposant sur les noeuds sommets.

Une autre possibilité consisterait à découper la surface usinée en un certain nombre de superéléments, de calculer pour chacun d'eux les pseudo-déplacements et ensuite de les **assembler** pour obtenir l'ensemble complet de ces pseudo-déplacements.

3. Reconstitution de la surface obtenue après usinage

3.1. Inversion de la matrice de raideur

L'utilisation du superélément permet d'obtenir, par SAMCEF (et ultérieurement par NASTRAN), une matrice des raideurs correspondant aux seuls noeuds de la surface usinée et du bridage. Or, les charges explicites dues à l'usinage et au serrage ne sont appliquées qu'en ces noeuds particuliers. Il était donc inutile de connaître explicitement les raideurs en tout autre noeud de la pièce volumique.

La matrice de raideur correspondant au superélément est la matrice K_{RR}^* de la relation (6)

ci-dessus. Le vecteur des charges g_R^* du superélément est connu, il peut contenir des efforts invariants (par exemple dus au bridage de la pièce) appliqués en un certain nombre de noeuds non retenus. Il faut encore tenir compte d'un autre vecteur de charges explicites, reprenant les efforts de coupe aux noeuds de la surface usinée et les efforts de serrage que l'on souhaite pouvoir modifier. Ce vecteur, que l'on appellera g_R^{us} , ne doit pas être condensé puisqu'il n'affecte que les noeuds dont les degrés de liberté sont retenus. De plus, ce vecteur varie en fonction de la position de l'outil par rapport à la pièce. La charge totale vaut :

$$g_R^* + g_R^{us}$$

A partir de là, les déplacements des noeuds de la surface usinée et du bridage s'obtiennent aisément grâce à la relation (4), qui devient :

$$q_R = (K_{RR}^*)^{-1} (g_R^* + g_R^{us}) \quad (7)$$

Les autres déplacements q_C ne nous intéressent pas ici.

3.1.1. SAMCEF

Deux possibilités existent :

- 1) soit on introduit dans SAMCEF la définition du superélément ainsi que l'ensemble complet des cas de charges, et le code résout directement l'équation (4);
- 2) soit le calcul des déplacements se fait par la relation (7) qui requiert l'inversion de la matrice de raideur K_{RR}^* . On utilisera pour ce faire la méthode d'élimination de GAUSS [2] appliquée à une matrice symétrique. Le choix des pivots se fait par pivotage diagonal, c'est-à-dire que l'on sélectionne comme pivot, à chaque étape, le plus grand en valeur absolue des éléments appartenant à la diagonale principale et à une ligne non encore traitée.

3.1.2. NASTRAN

Cette fois, nous allons extraire la matrice de raideur obtenue grâce au code NASTRAN, mais au lieu de procéder à son inversion, nous utiliserons NASTRAN comme dans le cas de la première méthode du § 3.1.1. NASTRAN récupère la matrice de raideur et résout directement le système. Cela diminue donc les manipulations de l'utilisateur.

3.2. Calcul de l'enveloppe de la déformée (défauts dus à l'usinage)

3.2.1. Calcul des déplacements dus aux efforts appliqués

Comme cela a été expliqué dans le rapport n° 5 (Procédures d'identification des paramètres de charge), on peut déterminer le "moment" où un point quelconque de la surface usinée est atteint par l'outil, en partant des données CAO et du maillage E.F. En pratique, à ce stade du travail, on calcule, pour chaque noeud de la surface, la position exacte de l'outil au moment où il rencontre ce noeud pour la première fois et le chemin qu'il a parcouru jusque là. C'est ce chemin qui tient lieu de variable temporelle. La possibilité d'adopter un pas constant pour l'avance de l'outil est étudiée au rapport 8.

Pour chaque position de l'outil, on peut encore déterminer la profondeur de passe locale ainsi que les autres paramètres nécessaires pour le calcul des forces. On en déduit une répartition spatiale de forces au contact pièce / outil, grâce à la modélisation des efforts de coupe. Cette répartition d'efforts est ensuite intégrée puis redistribuée aux noeuds sollicités, sous forme de forces généralisées énergétiquement équivalentes. Ce sont les g_R^{us} .

On dispose alors, pour chaque noeud de la surface de travail, de la position de l'outil lors de son premier passage par ce noeud, ainsi que du vecteur charge g_R^{us} correspondant. Le vecteur g_R^* correspondant aux efforts de bridage est, quant à lui, indépendant de la position de l'outil. La matrice de raideur (provenant du superélément) est également constante. Il est donc aisément de calculer les déplacements de chacun des noeuds de la surface usinée en fonction de la position de l'outil.

3.2.2. Détermination de la surface engendrée

Pour une position donnée de l'outil, les déplacements relatifs au(x) noeud(s) effectivement usiné(s) *en ce moment-là* sont les seuls à devoir être retenus pour la définition de la surface engendrée. Appelons ces déplacements particuliers \tilde{q}_R^{env} . NASTRAN permet de n'effectuer les calculs, pour chaque cas de charges particulier, qu'en ces noeuds là.

Lorsque l'outil a parcouru la totalité de sa trajectoire, tous les noeuds de la surface de travail ont été usinés, c'est-à-dire qu'à chaque noeud de cette surface correspond un déplacement

\tilde{q}_R^{env} . L'ensemble de ces déplacements constitue le vecteur des *pseudo-déplacements*.

3.2.3. Calcul du défaut par filtrage

En réalité, le déplacement total du noeud au moment où il est usiné ne représente pas exactement le défaut d'usinage, car la matière n'est coupée que dans une seule direction, la perpendiculaire à la surface usinée. Seule la composante du déplacement dans cette direction particulière nous intéresse pour l'évaluation du défaut.

Le *défaut* est donc la composante du vecteur des pseudo-déplacements orthogonale à la surface usinée. Celui-ci se calcule aisément par projection du pseudo-déplacement dans la direction normale à la surface usinée, au noeud considéré. C'est ce que nous appelons le **filtrage**.

3.3. Visualisation du défaut engendré

Afin de visualiser l'allure de l'enveloppe de la déformée, on impose artificiellement aux noeuds de la surface usinée les pseudo-déplacements $-\tilde{q}_R^{env}$ (ou le défaut après filtrage).

Le signe "-" traduit le fait qu'un déplacement positif d'un noeud au moment de son usinage entraîne un résidu de matière négatif par rapport à un usinage idéal (sans déplacement du noeud), et inversement.

4. Méthode directe

4.1. Procédure classique

La première étape consiste à calculer les efforts de coupe pour chaque position de l'outil. Il existe donc presqu'autant de cas de charges différents que de noeuds sur la surface de calcul. Eventuellement, le nombre de cas de charges sera multiplié par trois si chacune des composantes de l'effort global (force de coupe - force d'avance - force passive) est considérée séparément. De plus, le premier cas de charges sera toujours celui qui correspond aux efforts de bridage de la pièce.

Pour obtenir les déplacements, on traite l'ensemble des cas de charges dans un passage NASTRAN unique. Il est du reste possible de sélectionner directement, dans chaque vecteur déplacement calculé, les seules composantes intervenant dans le **pseudo-déplacement**, ce qui permet, de toute évidence, de gagner du temps et de la mémoire.

4.2. Calcul du défaut dû à l'usinage

4.2.1. Détermination de la surface engendrée

Pour une position donnée de l'outil, les déplacements relatifs au(x) noeud(s) effectivement usiné(s) *en ce moment-là* sont les seuls à devoir être retenus pour la définition de la surface engendrée. NASTRAN permet de n'effectuer les calculs, pour chaque cas de charges particulier, qu'au(x) noeud(s) dont on souhaite conserver les déplacements, et d'obtenir donc directement le vecteur des **pseudo-déplacements**.

4.2.2. Calcul du défaut par filtrage

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, le déplacement total du noeud au moment où il est usiné ne représente pas exactement le défaut d'usinage, car la matière n'est coupée que dans une seule direction, la perpendiculaire à la surface usinée. Seule la composante du déplacement dans cette direction particulière intervient dans l'évaluation du défaut.

Le **défaut**, qui est donc la composante du vecteur des pseudo-déplacements orthogonale à la surface usinée, se calcule de nouveau par projection du pseudo-déplacement sur la normale à la surface usinée, au noeud considéré (**filtrage**).

4.3. Visualisation du défaut engendré

La technique permettant de visualiser le défaut est la même que pour l'autre méthode: imposer artificiellement aux noeuds de la surface usinée les pseudo-déplacements (ou le défaut après filtrage), changés de signe.

5. Exemples

5.1. Plaque de tête d'essieu X65

5.1.1. Données du problème

- **Caractéristiques techniques :**

- Matériau : acier recuit 38CD4, état T2
 - module de Young : $E = 206\ 800\ N/mm^2$
 - coefficient de Poisson : $\nu = 0.29$
 - limite élastique : $R_e = 350\ MPa$
 - limite en rupture : $R_m = 610 - 720\ MPa$
- Coefficients utilisés (KÖNIG et ESSEL) :
 - $k_c = 1743\ MPa$
 - $m_c = 0.2542$
 - $k_f = 606\ MPa$
 - $m_f = 0.6398$
 - $k_p = 497\ MPa$
 - $m_p = 0.4216$
- Description de l'outil :
 - fraise
 - matière de coupe : carbure métallique
 - diamètre : $d = 100\ mm$
 - nombre de dents : $z = 14$
 - angle de direction de l'arête principale : $\kappa_r = 75^\circ$
 - angle de coupe latérale : $\gamma_f = -7^\circ$
 - angle de coupe vers l'arrière : $\gamma_p = -4^\circ$
 - angle de dépinçage : $\delta = 0^\circ$
- Trajectoire d'outil : rectiligne
 - origine : (0 , 84 , 10)
 - extrémité : (0 , -84 , 10)
- Paramètres d'usinage :
 - vitesse de rotation : $N = 480\ tr/min$
 - vitesse d'avance : $v_f = 835\ mm/min$
 - profondeur de passe : $a = 1\ mm$
- Bridage : la plaque est posée sur des cales et serrée dans un étau; en pratique, ce bridage a été modélisé en fixant les trois composantes de tous les noeuds en contact avec les mâchoires de l'étau, c'est-à-dire ceux appartenant à la moitié inférieure des deux faces latérales.

- **Maillage** : le maillage a été proposé par RENAULT (cf **Figure 1**)

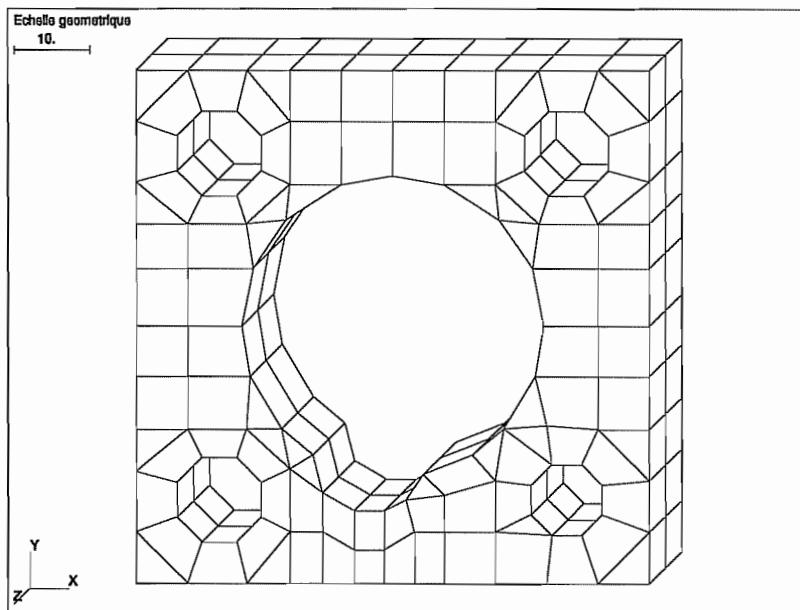


Figure 1 : Maillage de la plaque de tête d'essieu X65

- **Code utilisé** : SAMCEF

5.1.2. Superélément

Le superélément est obtenu en ne retenant que les 125 noeuds de la surface usinée, comme le montre la figure 2.

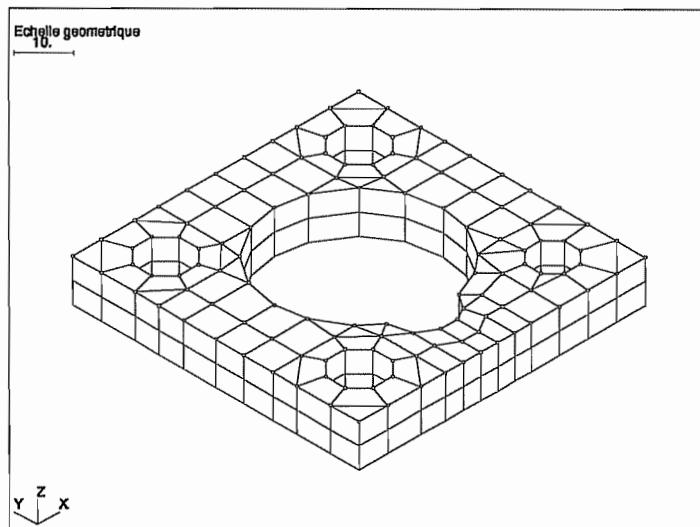


Figure 2 : Superélément de la plaque X65

5.1.3. Résultats obtenus

La figure 3 montre la déformée provoquée par la fraise, lorsqu'elle se trouve en une position déterminée. Ici, l'avance de l'outil est de 34 mm. (Position de son centre : (0, 50, 10))

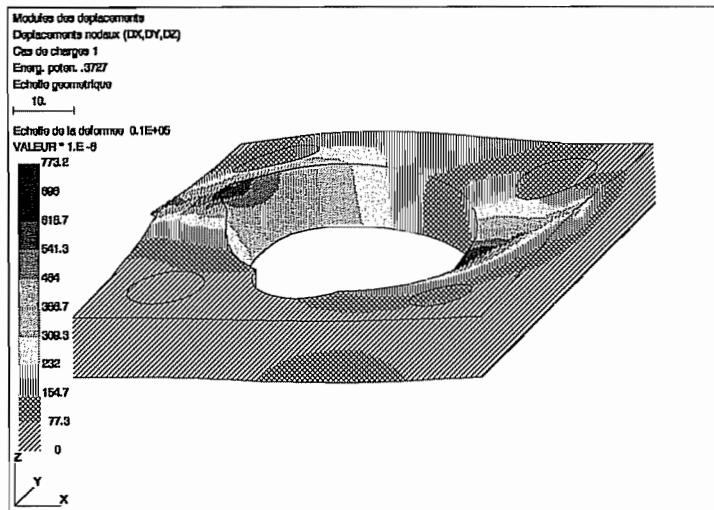


Figure 3 : Déformée en une position donnée de la fraise

5.1.4. Défaut obtenu

L'enveloppe de la déformée est montrée sur les figures 4 , 5 , 6 et 7.

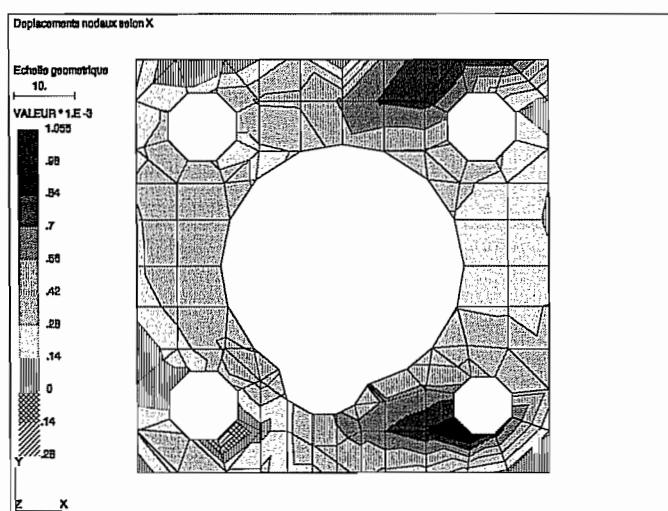


Figure 4 : Déplacements selon X

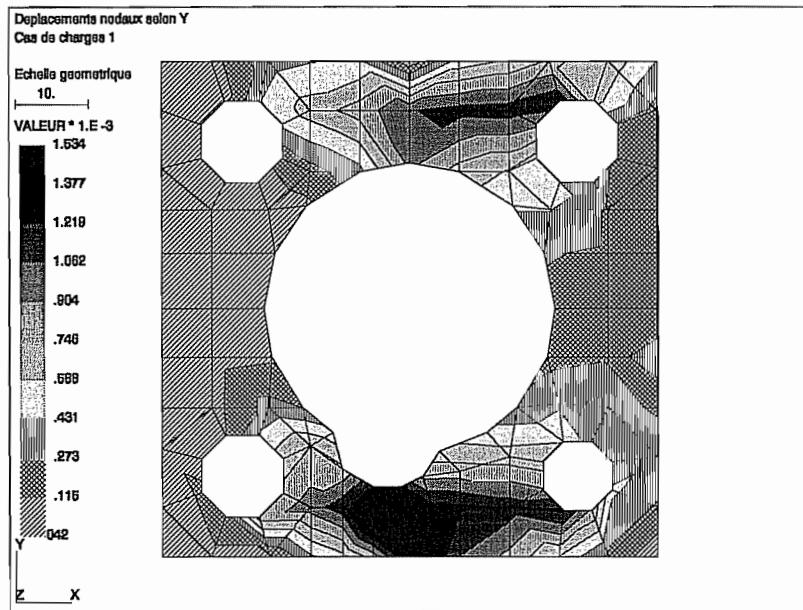


Figure 5 : Déplacements selon Y des noeuds de la surface usinée

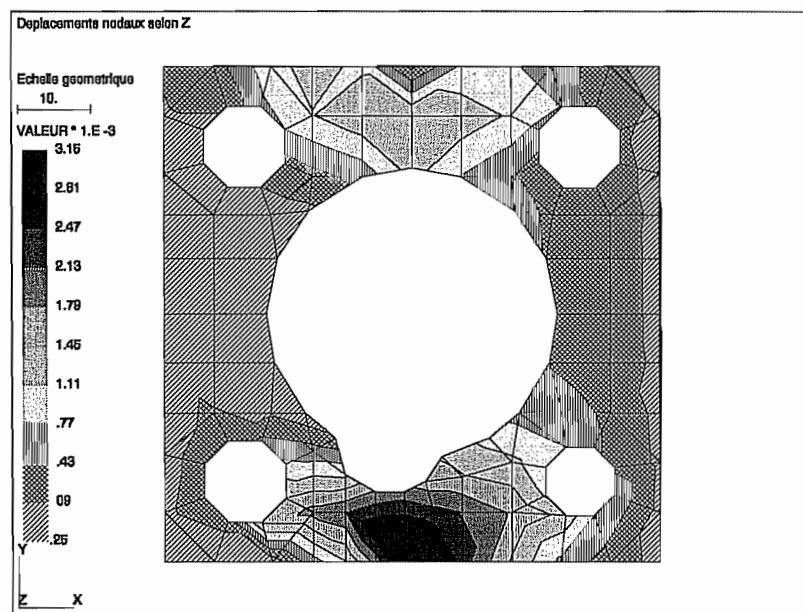


Figure 6 : Déplacements selon Z

5.2. Nouvelle plaque

Les différences fondamentales avec le cas de la plaque de tête d'essieu X65 réside dans la manière de brider la structure et dans les dimensions relatives de l'objet (profil mince).

5.2.1. Données du problème

- **Caractéristiques techniques :**

Ne disposant pas des caractéristiques précises, nous avons utilisé celles de la plaque de tête d'essieu X65, en modifiant quelques paramètres.

- Matériau : acier recuit 38CD4, état T2
 - module de Young : $E = 206\ 800\ \text{N/mm}^2$
 - coefficient de Poisson : $\nu = 0.29$
- Coefficients utilisés (KÖNIG et ESSEL) :

$k_e = 1743\ \text{MPa}$
$m_e = 0.2542$
$k_f = 606\ \text{MPa}$
$m_f = 0.6398$
$k_p = 497\ \text{MPa}$
$m_p = 0.4216$
- Description de l'outil :
 - fraise
 - matière de coupe : carbure métallique
 - diamètre : $d = 140\ \text{mm}$
 - nombre de dents : $z = 14$
 - angle de direction de l'arête principale : $\kappa_r = 75^\circ$
 - angle de coupe latéral : $\gamma_f = -7^\circ$
 - angle de coupe vers l'arrière : $\gamma_p = -4^\circ$
 - angle de dépinçage : $\delta = 0^\circ$
- Trajectoire d'outil : rectiligne
 - origine : (60 , -60 , 20)
 - extrémité : (60 , 300 , 20)
- Paramètres d'usinage :
 - vitesse de rotation : $N = 480\ \text{tr/min}$
 - vitesse d'avance : $v_f = 835\ \text{mm/min}$
 - profondeur de passe : $a = 1\ \text{mm}$
- Bridage :
 - Le montage est hyperstatique (4 points de posage) et se veut peu déformant (serrage en "vis-à-vis"). En pratique, ce bridage a été modélisé en fixant les trois composantes des noeuds situés sur les faces inférieures des semelles ($Z = 0$) (figure 7).

Remarque : Le montage n'est non déformant que pour autant que les deux faces d'appui soient strictement coplanaires, et les trous suffisamment larges pour permettre un serrage sans déformation. L'ordre de serrage peut avoir de l'importance. En principe, avec des trous ajustés, le montage est 5 fois hyperstatique dans le plan. Dans l'espace, beaucoup plus. La pièce, très souple, peut donc être considérablement déformée par l'effet de sa fixation!

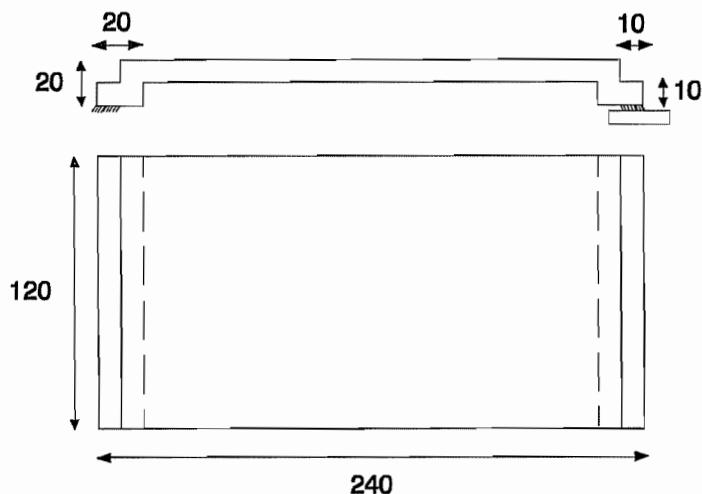


Figure 7 : Géométrie de la nouvelle plaque

- **Maillage :** (figure 8).

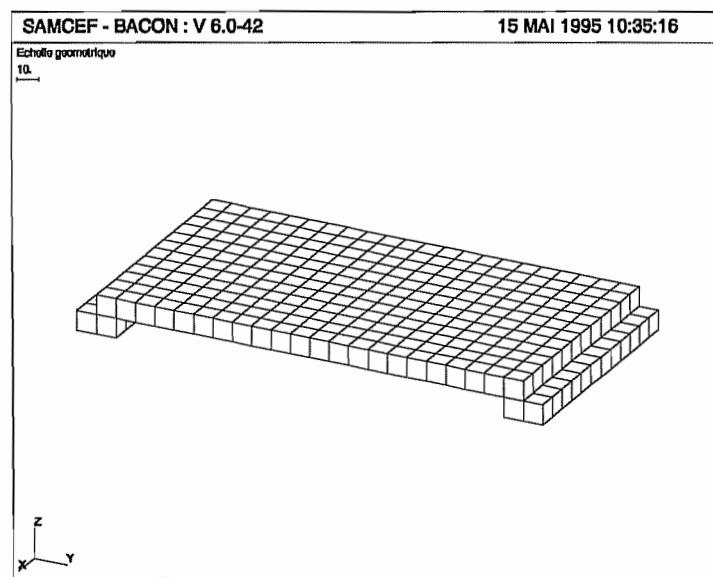


Figure 8 : Maillage de la nouvelle plaque

- **Code utilisé :** SAMCEF

5.2.2. Superélément

Le superélément est obtenu en ne retenant que les noeuds de la surface usinée (299).

5.2.3. Résultats obtenus

La figure 9 montre la déformée provoquée par la fraise, lorsqu'elle se trouve en une position déterminée. Ici, l'avance de l'outil est de 40.5 mm.
(Position de son centre : (60, -19.5, 20))

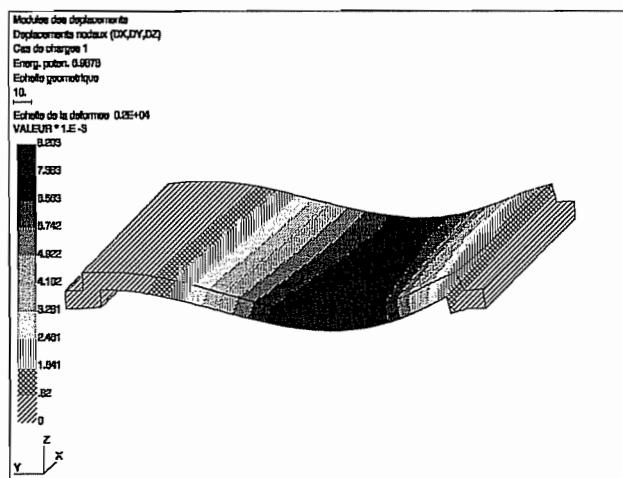


Figure 9 : Déformée pour une position donnée de la fraise

5.2.4. Défaut obtenu

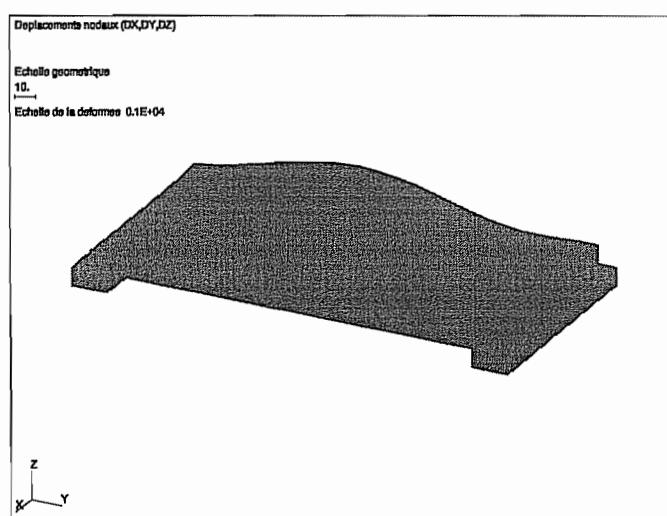


Figure 10 : Allure de l'enveloppe de la déformée

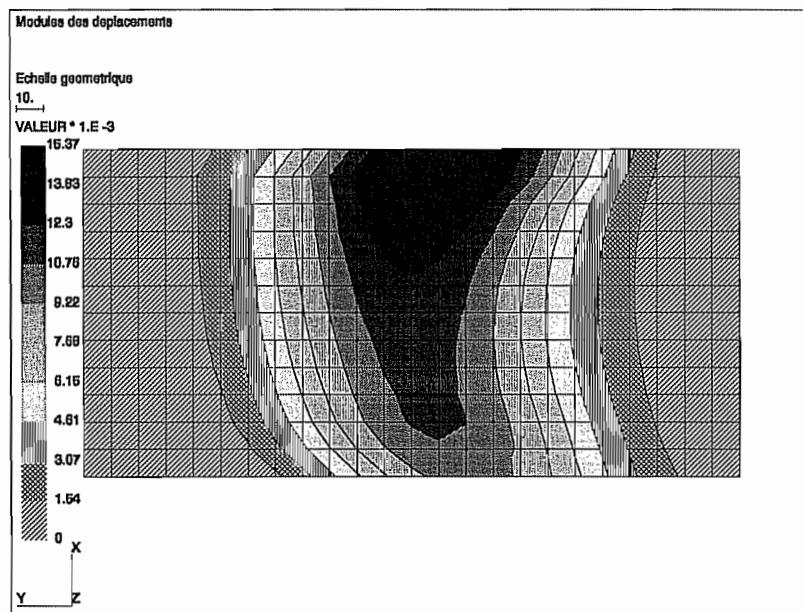


Figure 11 : Déplacements de la surface usinée

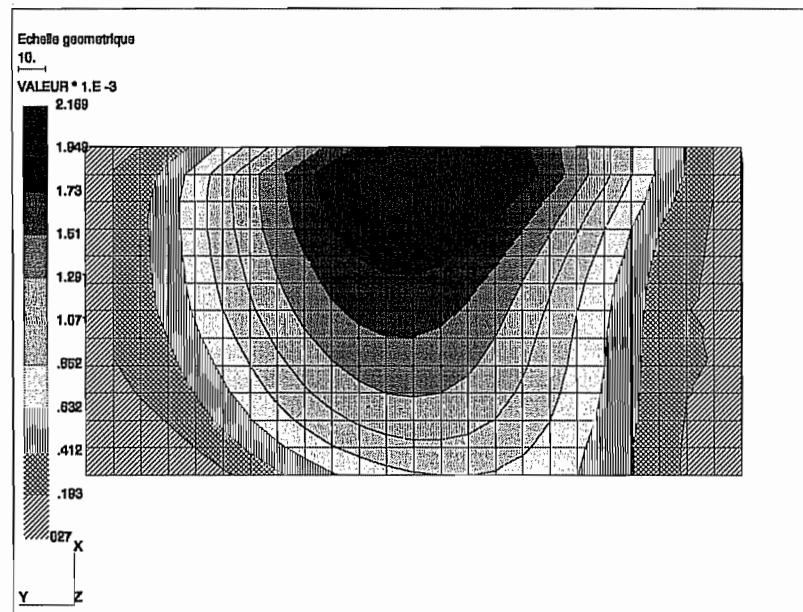


Figure 12 : Déplacements selon X

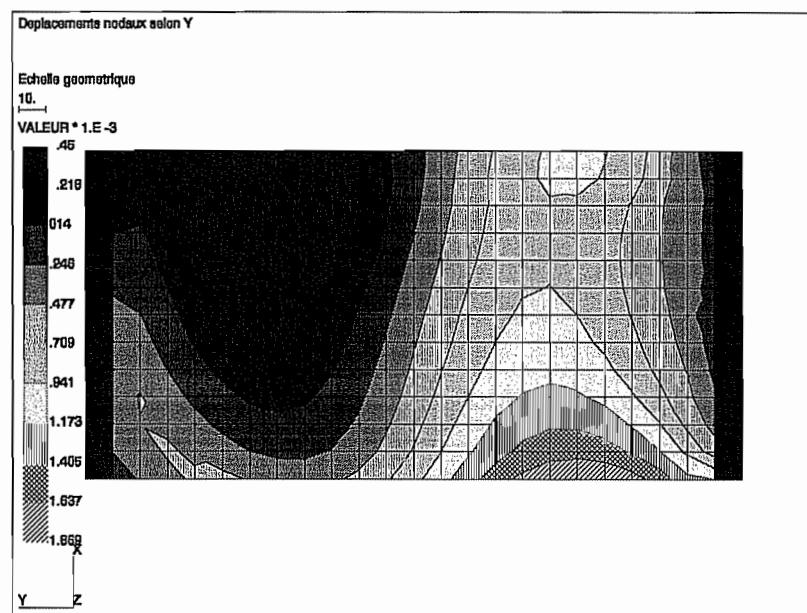


Figure 13 : Déplacements selon Y

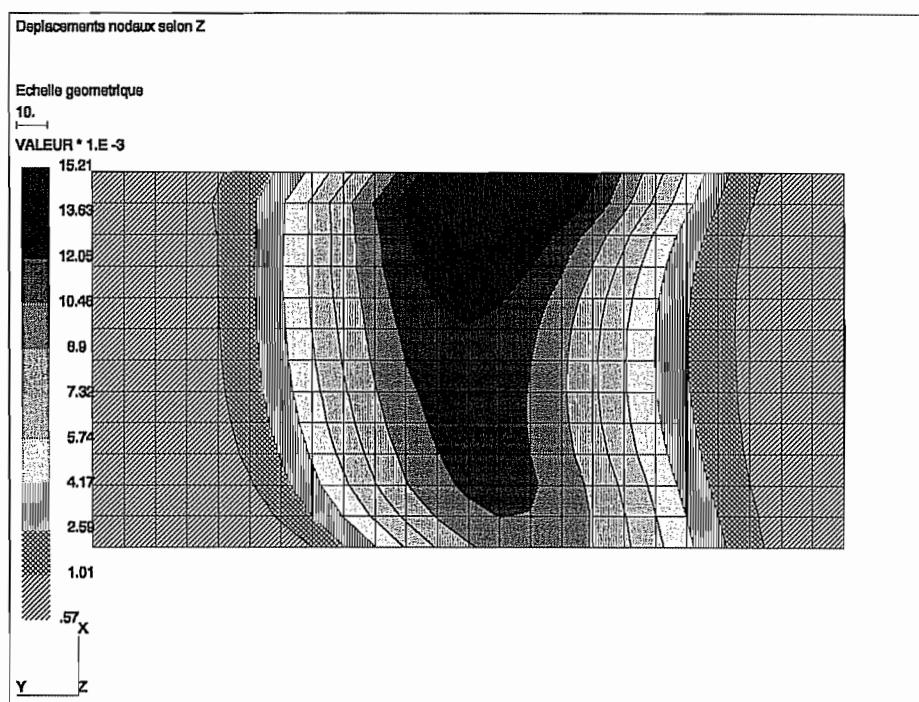


Figure 14 : Déplacements selon Z

5.3. Eprouvette cylindrique

La pièce choisie pour illustrer le tournage cylindrique est axisymétrique, mais le bridage qui lui est appliqué ne l'est pas. Le fait de serrer l'éprouvette dans un mandrin à trois mors entraîne l'apparition d'un trilobe, qui apparaît effectivement dans les résultats numériques. Ce phénomène est cependant très faible, vu la rigidité du cylindre plein.

5.3.1. Données du problème

- **Caractéristiques techniques :**

- Matériau : acier recuit 32M5R

module de Young : $E = 210\ 000\ \text{N/mm}^2$

coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$

limite d'élasticité : $R_e = 560\ \text{MPa}$

limite de rupture : $R_m = 700\ \text{MPa}$

dureté Brinell : $HB = 215$

- Coefficients utilisés (KÖNIG et ESSEL) :

$k_c = 1581\ \text{MPa}$

$m_c = 0.2468$

$k_f = 317\ \text{MPa}$

$m_f = 0.6887$

$k_p = 259\ \text{MPa}$

$m_p = 0.4130$

- Description de l'outil : outil de tour

matière de coupe : carbure métallique

angle de direction de l'arête principale : $\kappa_r = 65^\circ$

angle d'inclinaison d'arête : $\lambda_s = -6^\circ$

angle de coupe : $\gamma_n = -6^\circ$

- Trajectoire d'outil : chariotage (rectiligne)

origine : $R = 13\ \text{mm}$, $Z = 360\ \text{mm}$

extrémité : $R = 13\ \text{mm}$, $Z = 80\ \text{mm}$

- Paramètres d'usinage : vitesse de rotation : $N = 2700\ \text{tr/min}$

avance : $f = 0.4\ \text{mm/tr}$

profondeur de passe : $a = 3\ \text{mm}$

- Bridage : Le montage est mixte : serrage à 3 mors du côté du diamètre de 63 mm, et contre-pointe à l'autre extrémité. En pratique, ce bridage a été modélisé en fixant les trois composantes de 3 noeuds situés à 120° les uns des autres en $Z = 0$ et $R = 31.5\ \text{mm}$, et en fixant les composantes 1 et 2 (X et Y) du noeud $R = 0$, $Z = 360$.

- **Maillage :** (figure 15)

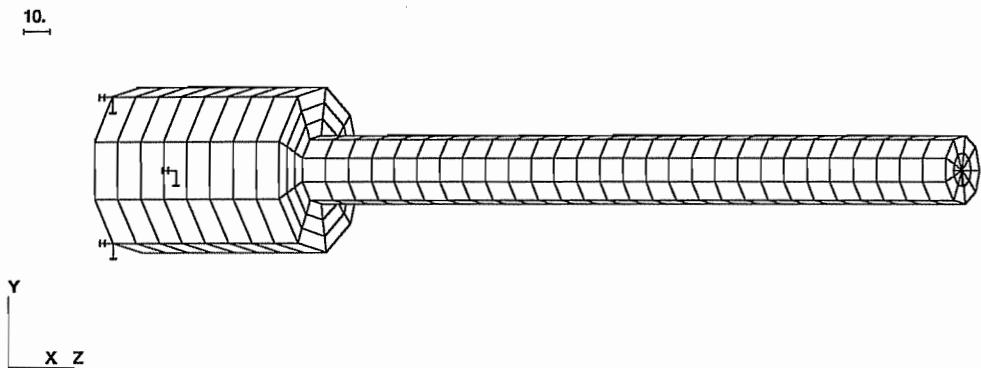


Figure 15 : Maillage et fixations de l'éprouvette cylindrique

- **Code utilisé :** SAMCEF

5.3.2. Superélément

Le superélément est obtenu en ne retenant que les noeuds de la surface usinée (261).

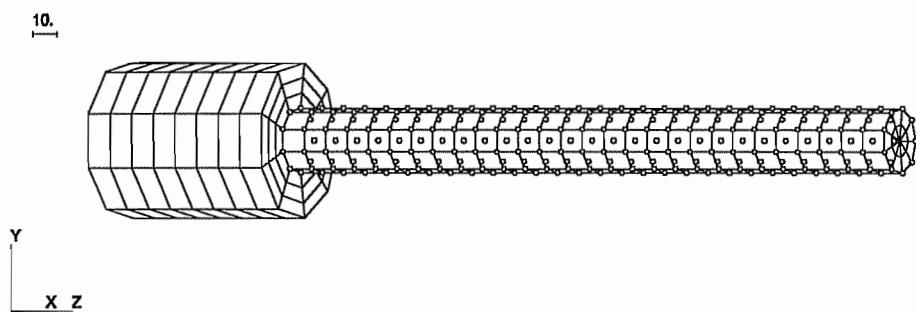


Figure 16 : Superélément de l'éprouvette cylindrique

5.3.3. Résultats obtenus

La figure 17 montre la déformée provoquée par l'outil, lorsqu'il se trouve en une position déterminée. Ici, l'avance de l'outil est de 150 mm.
(Position exacte : $R = 13$ mm , $Z = 210$ mm)

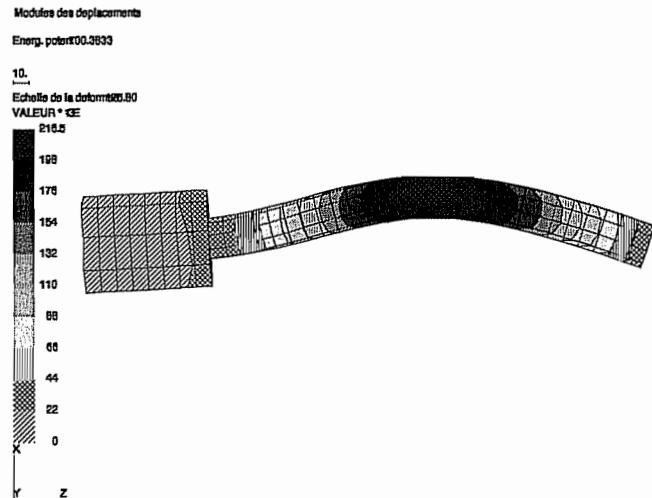


Figure 17 : Déformée pour une position donnée de l'outil

5.3.4. Défaut obtenu

L'enveloppe de la déformée est montrée sur la figure 18.

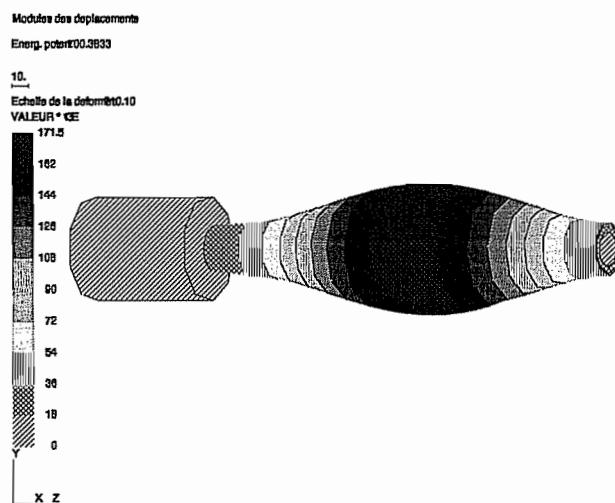


Figure 18 : Défaut dû à l'usinage de l'éprouvette cylindrique

Les déplacements globaux ainsi que ceux relatifs à chacun des axes sont repris sur les figures suivantes.

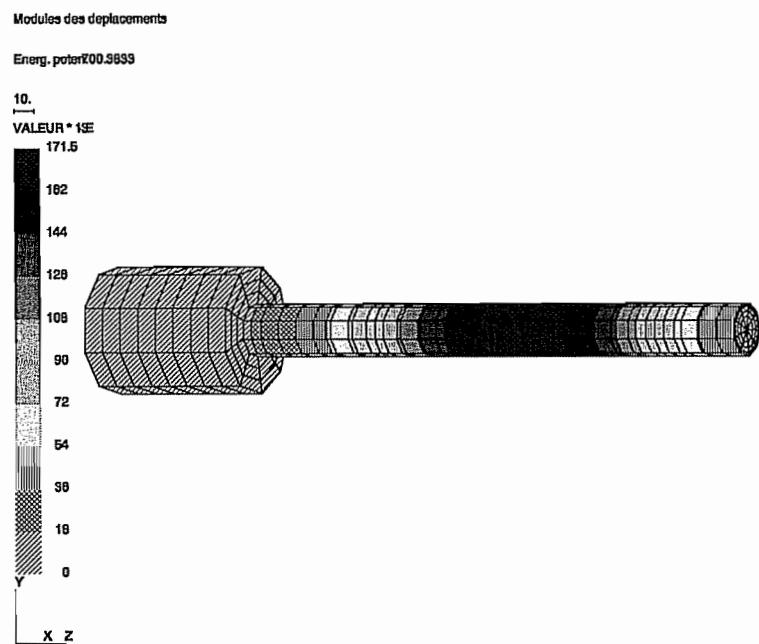


Figure 19 : Déplacements globaux des noeuds de la surface usinée

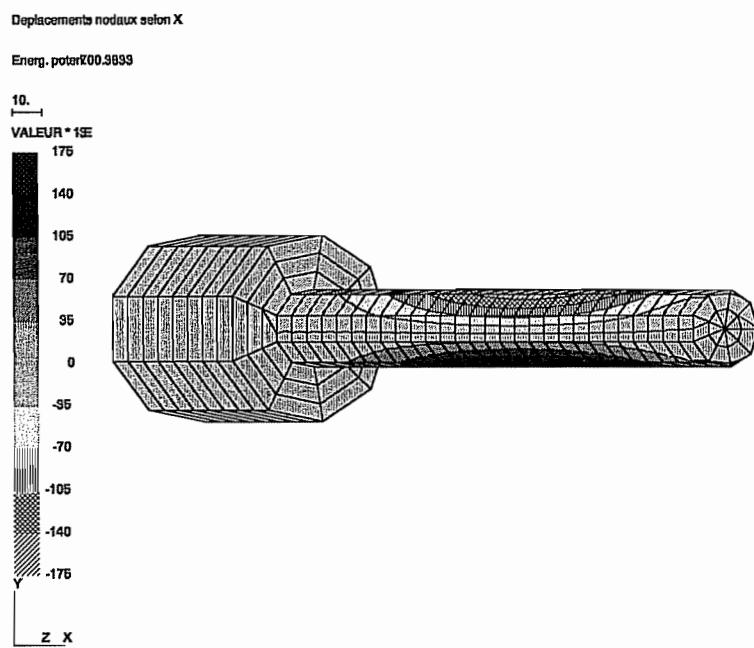


Figure 20 : Déplacements selon X des noeuds de la surface usinée

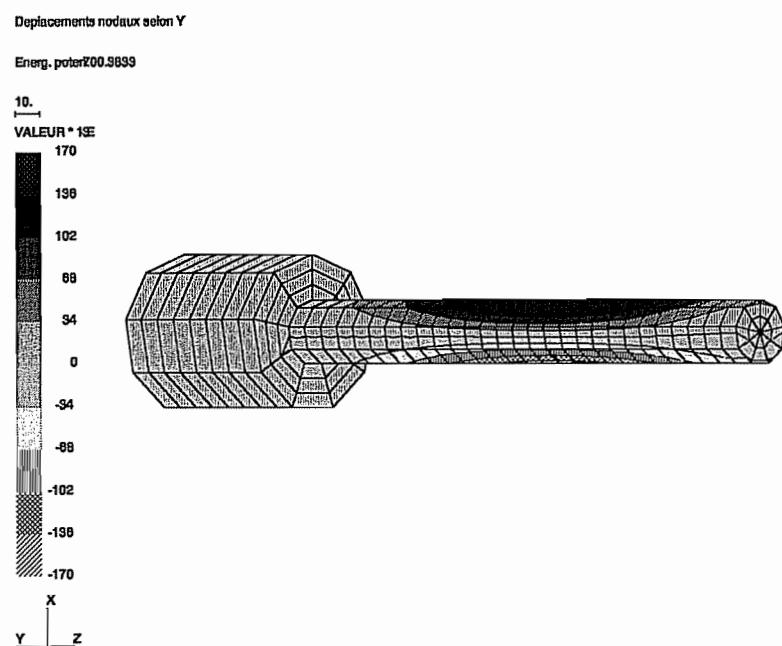


Figure 21 : Déplacements selon Y des noeuds de la surface usinée

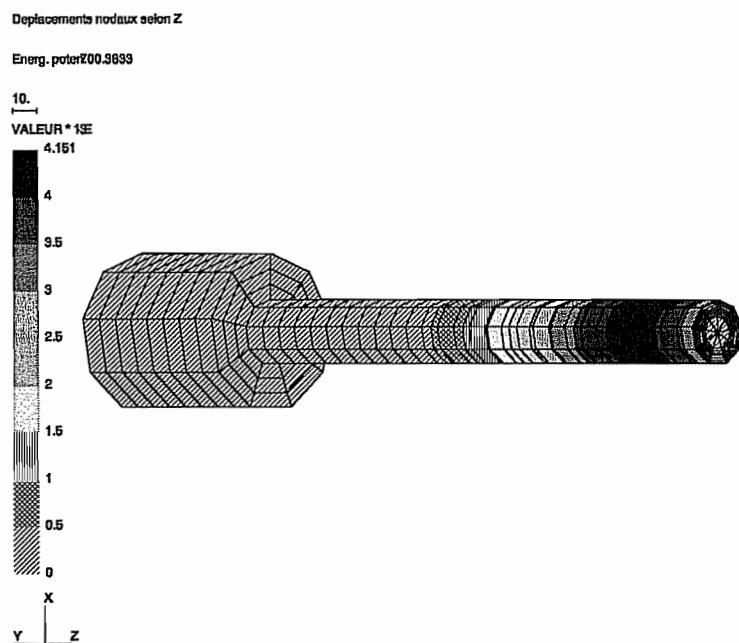


Figure 22 : Déplacements selon Z des noeuds de la surface usinée

5.4. Table des temps de calcul nécessaires

5.4.1. Procédure et code utilisés

Tous les calculs ont été effectués sur une machine dont les caractéristiques sont :

DEC 3000 modèle 500
64 MB DRAM
125 SPECmark

Le code utilisé est SAMCEF. Tous les cas tests repris ci-dessous ont été calculés par la technique de superélément la plus simple. En effet, nous avons créé un superélément en retenant les degrés de liberté de **tous les noeuds de la surface usinée**. Cela nous a permis d'obtenir une matrice des raideurs relative à ces noeuds, que nous avons inversée par la méthode d'élimination de GAUSS appliquée à une matrice symétrique. Ensuite, nous l'avons multipliée par les vecteurs de charges calculés précédemment, pour obtenir les déplacements en chacun des noeuds usinés.

5.4.2. Tableau des temps CPU

Dans le tableau de la page suivante, nous avons rassemblé des temps de calcul relatifs à 4 de nos cas-tests, avec différents maillages ou usinages.

- 1) **Plaque de tête d'essieu X65 (fraisage)** : Cas-test numéro 7 (cf rapport n°1) avec le maillage RENAULT; l'usinage consiste en un surfaçage (fraisage) d'une face de la plaque.
- 2) **Nouvelle plaque (fraisage)** : Elle ne fait pas partie des cas-tests repris dans le rapport n°1; la technologie d'usinage est de nouveau le fraisage. Nous avons étudié cette plaque avec 2 maillages différents, le deuxième contenant 3 fois plus de noeuds que le premier, et un superélément 2 fois plus gros.
- 3) **Eprouvette cylindrique (tournage)** : Cas-test numéro 5; la technique d'usinage est le tournage cylindrique. Nous avons de nouveau étudié cette pièce avec deux maillages différents, avec 2 fois plus de noeuds et un superélément 2 fois plus gros.
- 4) **Dressage éprouvette cylindrique (tournage)** : Afin de tester le dressage de surface sur un "petit" cas-test, nous avons utilisé l'éprouvette cylindrique (cas-test n°5) avec le premier maillage (le plus grossier). Les surfaces dressées sont la section droite la plus petite (diamètre 26 mm) en $Z = 360$ mm, et l'anneau du saut de section en $Z = 80$ mm.

- 5) **Eprouvette conique (tournage)** : Afin de tester le tournage conique, nous avons transformé l'éprouvette cylindrique en une éprouvette conique, en conservant le maillage le plus grossier. La surface usinée est la même que lors du tournage cylindrique.
- 6) **Moyeu d'alimentation (tournage)** : Cas-test numéro 1; l'usinage consiste en un dressage de surface au tour. Le maillage nous a été fourni par RENAULT.

Le tableau récapitulatif contient une série de renseignements pour chaque exemple traité :

-) **Modèle** : Nom du cas-test et type d'usinage effectué;
-) **Nombre de noeuds** : Nombre total des noeuds du maillage de la pièce considérée;
-) **DDL** : Nombre de degrés de liberté du superélément, qui est égal à 3 fois le nombre de noeuds de la surface usinée;
-) **Création du superélément** : Temps CPU nécessaire pour calculer la matrice de raideur correspondant au superélément (code SAMCEF);
-) **ASEF pour un cas de charge** : Temps CPU nécessaire pour effectuer un passage SAMCEF standard, avec un seul cas de charge et sans faire appel au superélément; ce temps est pris comme référence pour chacun des essais;
-) **Inversion de la matrice de raideur** : Temps CPU nécessaire pour inverser la matrice de raideur relative au superélément, par la méthode d'élimination de GAUSS appliquée à une matrice symétrique; l'inversion est réalisée en mode interactif, sauf lorsque le superélément possède plus de 1500 DDL;
-) **Nombre de cas de charge** : c'est-à-dire nombre de vecteurs de charges par lesquels on multiplie la matrice de raideur inversée;
-) **Calcul de la déformée** : Temps CPU nécessaire pour multiplier la matrice de raideur inversée par tous les vecteurs de charge, en mode interactif.

Remarque : Tous les calculs ayant été effectués sur station de travail, les temps CPU mentionnés dans le tableau ci-joint ne peuvent être qu'indicatifs, car ils varient en fonction de l'environnement (nombre d'utilisateurs connectés, encombrement des disques, etc.).

Modèle	Nbre de noeuds	DDL S.E.	Création du superélément	ASEF pour un cas de charge	Inversion de la matrice de raideur	Nbre de cas de charge	Calcul de la déformée
Plaque de tête d'essieu X65 (fraiseage)	375	375	10.25 sec. (87.4 %)	11.73 sec. (100 %)	4.42 sec. (37.7 %)	79	6.03 sec. (51.4 %)
Nouvelle plaque (fraiseage)	702	897	24.78 sec. (174.8 %)	14.18 sec. (100 %)	113.83 sec. (802.8 %)	160	39.54 sec. (278.8 %)
Nouvelle plaque (fraiseage)	2226	1890	234.22 sec. (400.2 %)	58.53 sec. (100 %)	1370.93 sec. (2342.3 %)	276	221.5 sec. (378.4 %)
Eprouvette cylindrique (tournage)	983	783	30.40 sec. (99 %)	30.71 sec. (100 %)	51.47 sec. (167.6 %)	261	40.64 sec. (132.3 %)
Eprouvette cylindrique (tournage)	1928	1566	98.66 sec. (149.2 %)	66.13 sec. (100 %)	480.07 sec. (725.9 %)	522	209.36 sec. (316.6 %)
Dressage éprouvette cylindrique (tournage)	983	162	26.86 sec. (83.7 %)	32.09 sec. (100 %)	29 sec. (90.4 %)	54	1.35 sec. (4.2 %)
Eprouvette conique (tournage)	983	783	43.82 sec. (109.1 %)	40.18 sec. (100 %)	52.74 sec. (131.3 %)	261	40.98 sec. (102 %)
Moyeu d'alimentation (tournage)	8397	1704	1712 sec. (216.4 %)	791.15 sec. (100 %)	1430.5 sec. (180.8 %)	568	293.04 sec (37 %)

Bibliographie

- [1] *SAMCEF - Eléments (M3)*
Manuel d'utilisation de SAMCEF version 5.1
1994 , SAMTECH

- [2] F.X. LITT - *Analyse numérique (première partie)*
Faculté des Sciences Appliquées , ULg
1984 , Société Coopérative de l'A.E.E.S. , Liège

Table des matières

1. Introduction	1
2. Technique du superélément	2
2.1. Justification de la technique du superélément	2
2.2. Formulation mathématique du concept de superélément dans le cas d'un problème statique	2
2.3. Création du superélément	4
3. Reconstitution de la surface obtenue après usinage	4
3.1. Inversion de la matrice de raideur	4
3.1.1. SAMCEF	5
3.1.2. NASTRAN	6
3.2. Calcul de l'enveloppe de la déformée (défauts dus à l'usinage)	6
3.2.1. Calcul des déplacements dus aux efforts appliqués	6
3.2.2. Détermination de la surface engendrée	7
3.2.3. Calcul du défaut par filtrage	7
3.3. Visualisation du défaut engendré	7
4. Méthode directe	8
4.1. Procédure classique	8
4.2. Calcul du défaut dû à l'usinage	8
4.2.1. Détermination de la surface engendrée	8
4.2.2. Calcul du défaut par filtrage	8
4.3. Visualisation du défaut engendré	8
5. Exemples	9
5.1. Plaque de tête d'essieu X65	9
5.1.1. Données du problème	9
• Caractéristiques techniques	
• Maillage	
• Code utilisé	
5.1.2. Superélément	10
5.1.3. Résultats obtenus	11
5.1.4. Défaut obtenu	11
5.2. Nouvelle plaque	13
5.2.1. Données du problème	13
• Caractéristiques techniques	
• Maillage	
• Code utilisé	
5.2.2. Superélément	15
5.2.3. Résultats obtenus	15
5.2.4. Défaut obtenu	15
5.3. Eprouvette cylindrique	18
5.3.1. Données du problème	18
• Caractéristiques techniques	
• Maillage	
• Code utilisé	
5.3.2. Superélément	19
5.3.3. Résultats obtenus	20

5.3.4. Défaut obtenu	20
5.4. Table des temps de calcul nécessaires	23
5.4.1. Procédure et code utilisés	23
5.4.2. Tableau des temps CPU	23