

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

PROCEDURES DE LIMITATION DES CAS DE CHARGE

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

Rapport LMF/R8 - 1995

Rapport 8

Procédures de limitation des cas de charge

1. Introduction

A ce stade du projet, il est important de rappeler le principe fondamental du calcul du défaut dû à l'usinage. Ce principe est le suivant :

Le défaut en un noeud est généré lorsque l'outil coupe ce noeud.

La première étape de la méthode consiste à déterminer les positions successives de l'outil lorsque il coupe les noeuds de la surface usinée. Ensuite, on détermine les cas de charges correspondant à chacune des positions de l'outil, c'est-à-dire les forces de coupe réparties aux noeuds du maillage.

Pour une position donnée, on calcule la déformée de la pièce sous l'effet du cas de charge correspondant. Le défaut du noeud coupé à cet instant est égal à son déplacement projeté sur la normale à la surface usinée en ce point. Ce calcul est répété pour toutes les positions successives de l'outil. Il s'agit alors de rassembler dans un vecteur de *pseudo-déplacement* les déplacements obtenus pour chacun des noeuds coupés. Ensuite ce *pseudo-déplacement* est filtré pour extraire les projections normales à la surface usinée.

Cette *carte* du défaut est récupérée par GIBUS en vue du calcul de la norme du défaut de la pièce.

Lorsque le nombre de noeuds de la surface usinée est grand, le nombre de cas de charges est lui aussi élevé et le temps de calcul peut devenir prohibitif. Les ressources des machines étant limitées, que ce soit en mémoire ou en taille des fichiers, la résolution d'un problème de grande taille peut devenir irréalisable.

Pour ces raisons, il convient de mettre au point des méthodes qui permettent de limiter le nombre de cas de charges (chapitre 2). Pour un maillage du second degré, la méthode la plus simple consiste à ne calculer que les pseudo-déplacements des noeuds sommets.

Il semble plausible de penser que dans la majorités des cas, le fait de considérer moins de cas de charges ne modifie pas beaucoup le résultats des calculs. Cette hypothèse est vérifiée sur quelques problèmes disponibles à l'heure actuelle (chapitre 3).

D'autre part, les différentes méthodes envisageables pour mener à bien les calculs sont décrites et commentées (chapitre 4). Pour chaque type d'usinage, la procédure de calcul la plus adéquate est proposée (chapitre 5).

2. Méthodes de limitation des cas de charge

2.1. Fraisage

2.1.1. Méthode basée sur la définition d'un pas d'avancement

Pour un nombre n de noeuds de la surface usinée, il y a n cas de charges qui correspondent aux forces appliquées au maillage pour les n positions successives de la fraise, chacune de ces positions correspondant à la coupe d'un noeud. La taille de la fraise étant assez grande par rapport à la finesse du maillage, elle coupe certains noeuds presque au même instant. On peut donc considérer qu'une série de noeuds sont usinés pour une seule position de la fraise. Cela revient à considérer l'arc en prise non plus comme un arc de cercle mais comme un croissant circulaire (figure 1).

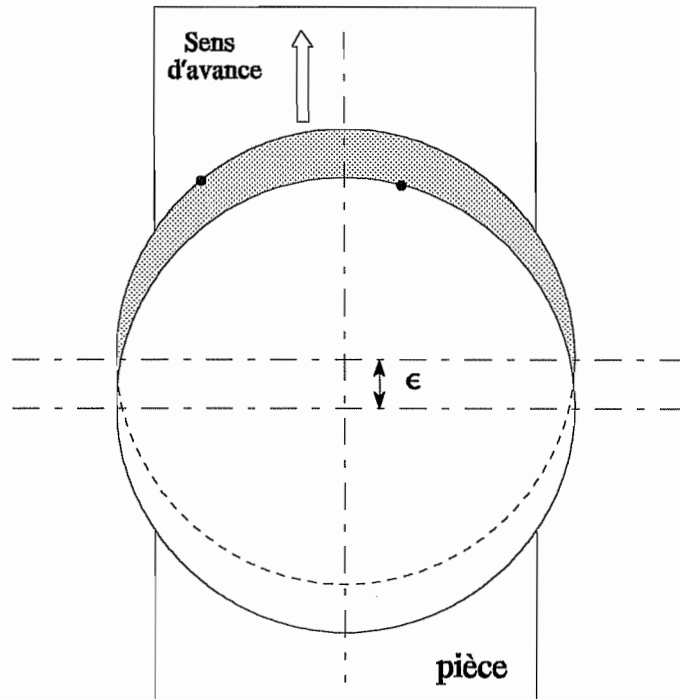


Figure 1 : Arc en prise d'épaisseur ϵ

La limitation du nombre de cas de charge intervient lorsqu'on détermine les positions successives de la fraise. Pour chaque noeud, on connaît le déplacement s de la fraise sur sa trajectoire correspondant à la coupe de ce noeud. Supposons que le prochain noeud à usiner soit le noeud i , coupé lorsque la fraise a parcouru une distance s_i . Tous les noeuds qui sont coupés par la fraise entre s_i et $s_i + \epsilon$ sont considérés comme coupés pour une seule position de la fraise et appartiennent alors à un seul cas de charge.

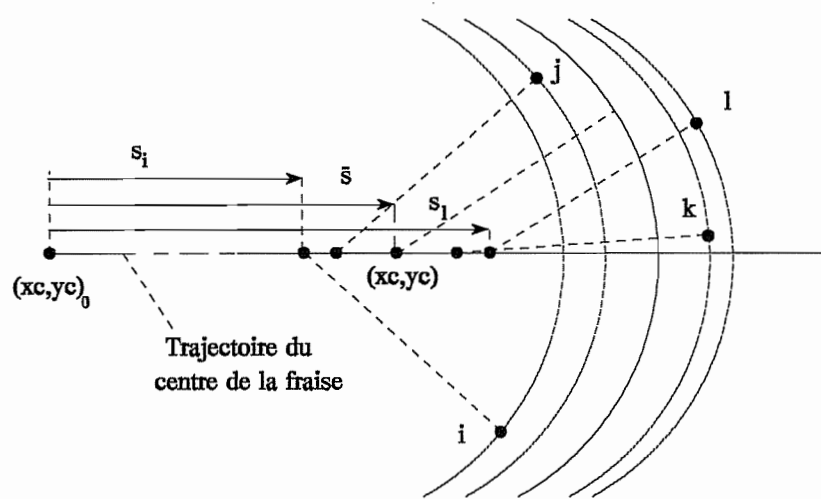


Figure 2 : Choix de la position de la fraise

Pour effectuer le calcul des forces généralisées correspondant à ce cas de charge, on choisit une position moyenne (figure 2) de la fraise associée au déplacement

$$\bar{s} = \frac{s_i + s_l}{2} \rightarrow (x_c, y_c)$$

Choix de ϵ

Il existe plusieurs possibilités pour choisir la valeur de ϵ . Par exemple, on pourrait choisir une valeur qui soit fonction des dimensions de la pièce, ou de la taille moyenne des mailles. Nous avons choisi de lier la valeur de ϵ au rayon de la fraise, soit

$$\epsilon = f_r R_f$$

La valeur du paramètre f_r détermine l'importance de la réduction du nombre de cas de charge. Si cette valeur est nulle, on obtient autant de cas de charge qu'il y a de noeuds sur la surface usinée (moins si le maillage est symétrique par rapport à la trajectoire).

2.1.2. Méthode basée sur l'élimination d'une partie de la surface usinée

Avec un peu d'expérience et en connaissant la carte de souplesse d'une pièce, il est assez facile de deviner la zone de la surface usinée où le défaut est important. Dès lors une manière très simple de réduire le nombre de cas de charge consiste à ne s'intéresser qu'à la partie la plus *prometteuse* de la surface usinée.

On détermine les cas de charge correspondant à l'usinage de tous les noeuds, éventuellement en appliquant la méthode développée au § 2.1.1. Pour le calcul proprement dit, on ne retient que les cas de charge qui correspondent à la coupe de certains noeuds. La liste des noeuds *intéressants* peut être facilement donnée dans le fichier Ideas par la définition d'un groupe **surface usinée calcul**.

Les calculs sont alors effectués avec tous les noeuds impliqués dans les cas de charge retenus et pas seulement avec les noeuds de la **surface usinée calcul**. Les pseudo-déplacements des autres noeuds de la surface usinée sont calculés par après grâce à une méthode d'*interpolation statique*.

2.2. Tournage

Le cas du tournage est assez différent de celui du fraisage. En effet, les forces appliquées par l'outil sur la pièce ne sont plus réparties sur un arc mais appliquées en un point. Le cas de charge correspondant à la coupe d'un noeud se réduit donc aux seules forces de coupe, d'avance et passive appliquées en ce noeud. Il n'est plus possible dans ce cas de considérer que plusieurs noeuds sont coupés en même temps.

Pour réduire le temps de calcul d'un problème en tournage, il faut plutôt envisager de réduire le nombre de noeuds pris en compte dans les calculs.

2.2.1. Dressage au tour

On peut envisager deux méthodes pour limiter le nombre de noeuds sur une pièce telle que le moyeu d'alimentation (figure 3). Pour chacune, le calcul des pseudo-déplacements n'est effectué que sur une partie des noeuds de la surface usinée. Les pseudo-déplacements des autres noeuds sont ensuite calculés par une méthode d'*interpolation statique*.

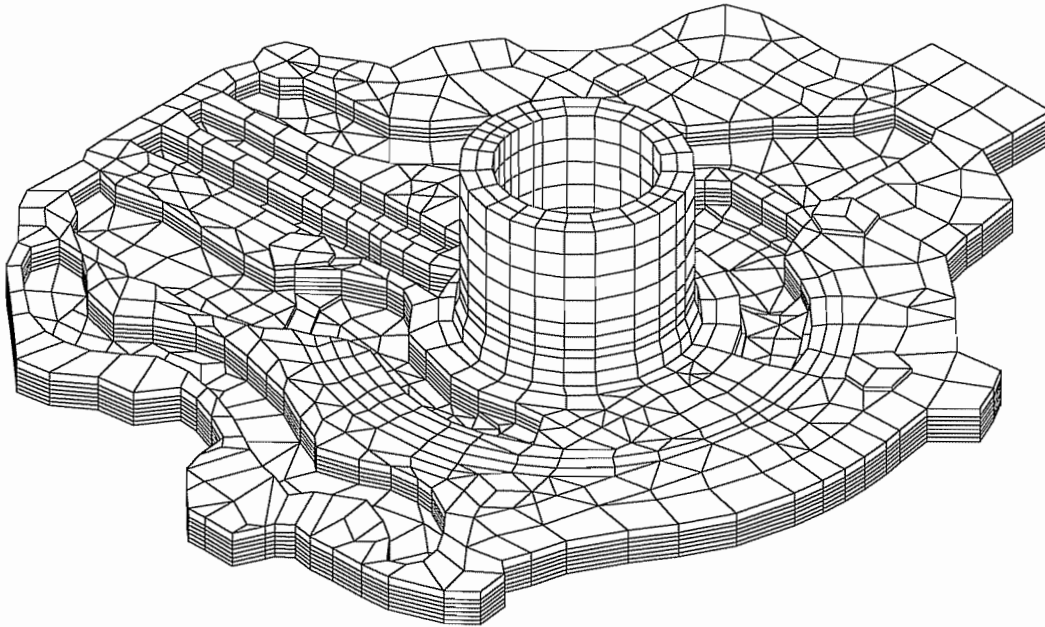


Figure 3 : Moyeu d'alimentation TA96

Méthode manuelle

On sélectionne manuellement les noeuds de la surface usinée qui interviennent dans le calcul (création d'un groupe **surface usinée calcul** dans le fichier Ideas). Cette sélection est facilement réalisable grâce à l'interface graphique d'Ideas. L'avantage de cette méthode est que, sachant a priori où le défaut est grand (entre les points de bridage dans le cas du moyeu), on peut ne retenir que les noeuds *intéressants*.

Méthode automatique

On peut imaginer une procédure qui, à partir de la liste des noeuds de la **surface usinée**, choisisse automatiquement les noeuds à retenir. Par exemple, on pourrait procéder de la manière suivante (figure 4) :

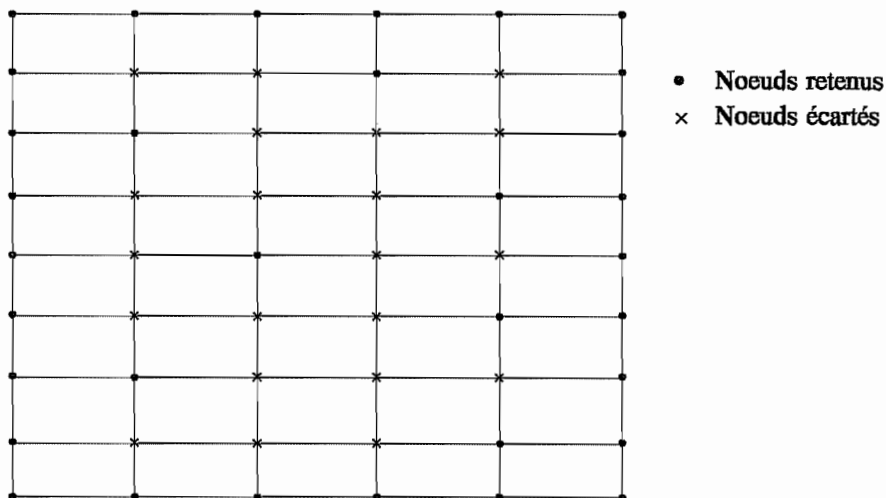


Figure 4 : Méthode automatique de sélection

- on retient tous les noeuds du contour de la surface usinée;
- on retient un noeud intérieur et on élimine tous ses voisins proches (sauf ceux du contour);
- on répète l'opération jusqu'à ce que tous les noeuds intérieurs aient été soit retenus, soit écartés.

Le choix des noeuds intérieurs retenus est assez aléatoire mais leur répartition est bonne si le maillage est suffisamment fin. On pourrait envisager d'autres méthodes plus complexe mais au prix d'un travail de programmation sensiblement plus lourd.

2.2.2. Tournage cylindrique - Tournage conique - Contournage

Il faut envisager deux possibilités :

•1• **Le problème n'est pas axisymétrique.**

C'est le cas quand :

- la pièce et/ou le maillage ne sont pas axisymétriques (rainure de clavette, ...);
- le bridage n'est pas axisymétrique (le plus courant) et le défaut dû au bridage est assez important (pièce creuse, forces de bridage importantes, surface usinée proche des fixations).

Dans ce cas, on peut utiliser la même méthode qu'en dressage, à savoir limiter le nombre de noeuds retenus pour les calculs (méthodes manuelle ou automatique). Cependant le choix des noeuds retenus doit être opéré avec prudence. En effet l'*interpolation* (cf. § 4.1) des pseudo-déplacements est moins performante lorsque la surface usinée est courbe.

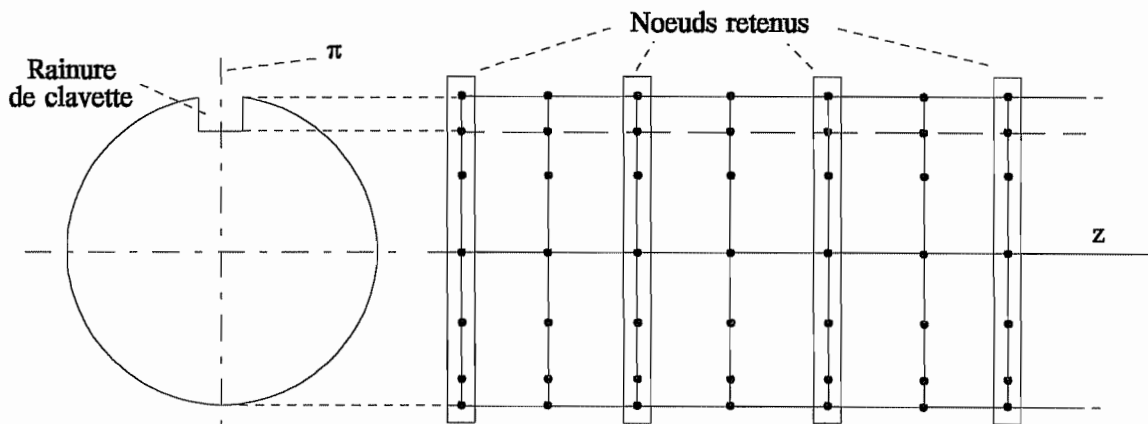


Figure 5 : Barreau cylindrique avec une rainure de clavette - sélection des noeuds retenus

Prenons l'exemple d'un barreau cylindrique avec une rainure de clavette (figure 5). Le défaut de la pièce (en négligeant le défaut de bridage) doit être symétrique par rapport au plan π . Si les noeuds retenus sont choisis sans tenir compte de cette symétrie, l'*interpolation* donnera un défaut final où la symétrie sera partiellement voir complètement absente.

Pour cette pièce, la sélection des noeuds doit être effectuée manuellement en prenant par exemple une série de noeuds sur deux dans la direction z (figure 5). La symétrie du défaut est alors conservée dans le résultat final.

•2• Le problème est quasi ou complètement axisymétrique.

C'est le cas lorsque le bridage est axisymétrique ou lorsque le défaut dû au bridage peut être négligé par rapport au défaut d'usinage.

On peut alors se contenter de calculer le défaut pour les noeuds appartenant à une génératrice de la pièce. Ensuite, on reporte le défaut calculé en un noeud sur les noeuds appartenant à la même directrice (cercle passant par le noeud n dans le plan Oxy , cf. figure 6). Le nombre de noeuds retenus pour le calcul est alors divisé par un facteur égal au nombre de noeuds que contient une directrice de la pièce.

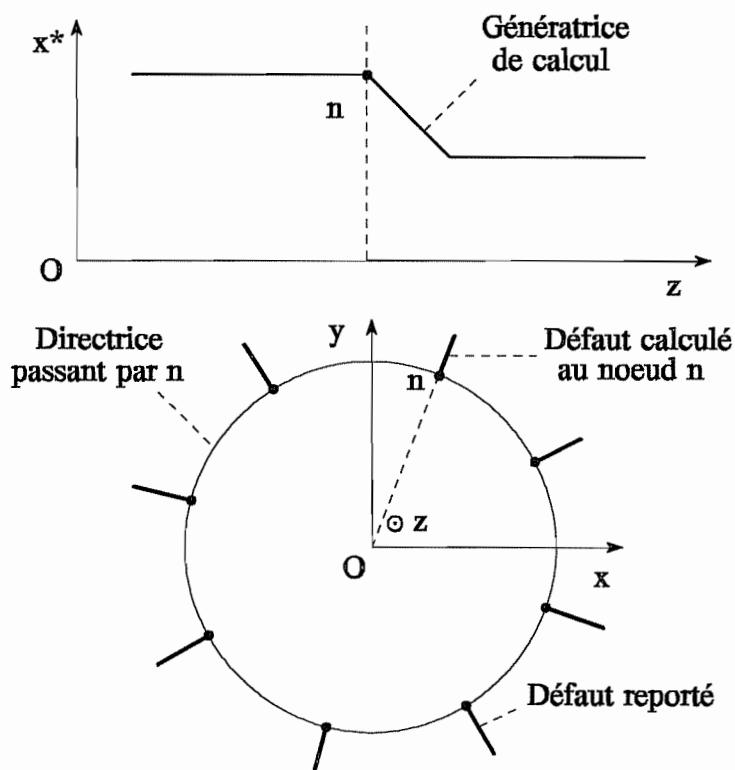


Figure 6 : Report du défaut sur les noeuds d'une même directrice

Une amélioration de cette méthode consisterait à calculer le défaut sur une génératrice partant d'un point de bridage ainsi que sur une génératrice partant d'un point situé à mi-distance de deux points de bridage. En supposant une fixation en n points, il suffirait postérieurement d'effectuer une interpolation en $\cos n\theta$.

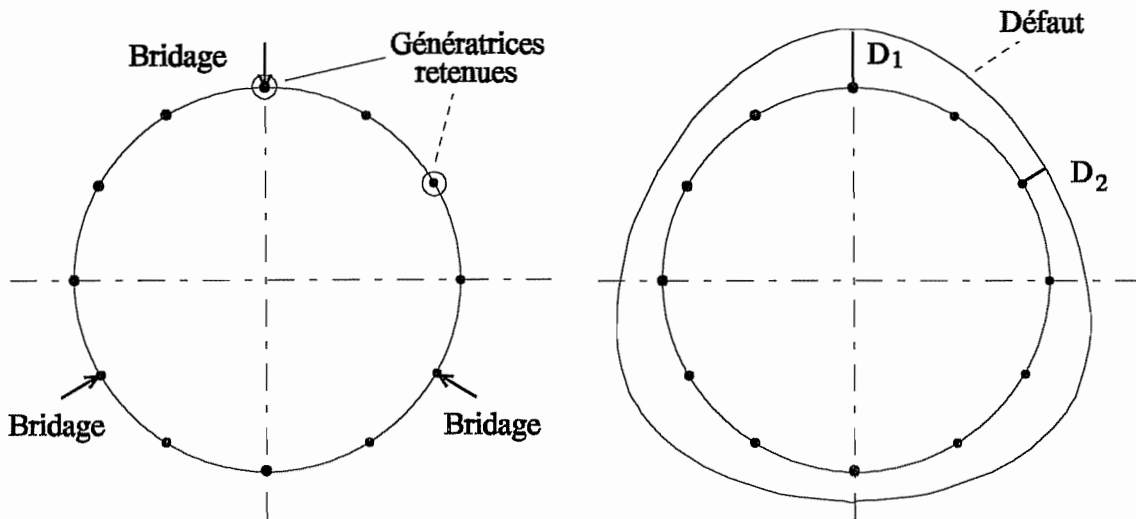


Figure 7 : Effet de trilobe - Calcul sur deux génératrices

Supposons un mandrin à trois mors (figure 7). Le défaut des noeuds appartenant à un plan de coordonnée z donnée est calculé à partir des défauts calculés aux noeuds 1 et 2 (respectivement D_1 et D_2). Le défaut de cette série de noeuds est la superposition d'un défaut d'usinage D_{us} constant et d'un défaut périodique dû au bridage. Si on se limite au premier ordre, l'expression du défaut en fonction de l'angle θ est

$$D(\theta) = D_{us} + A \cos(3\theta)$$

où les constantes valent

$$\begin{cases} D_{us} = \frac{D_1 + D_2}{2} \\ A = \frac{D_1 - D_2}{2} \end{cases}$$

On recalcule le défaut en chaque noeud à partir de sa coordonnée θ et on retrouve le pseudo-déplacement correspondant par projection sur la normale à la surface usinée. Il est donc possible de conserver le défaut de bridage dans les résultats tout en ne calculant que sur deux génératrices de la pièce.

Cette méthode ne sera cependant pas développée dans le cadre de ce projet vu l'importance de la tâche de programmation demandée.

2.3. Alésage

2.3.1. Alésage à l'alésoir

Le contact entre l'alésoir et la pièce est modélisé par un cercle qui se déplace perpendiculairement à l'axe de déplacement de l'outil (axe parallèle à Oz). La surface usinée est cylindrique et se trouve à une distance R_a de l'axe. Les forces appliquées par l'outil sont, comme en fraisage, réparties sur un cercle. On utilise donc la même procédure pour limiter le nombre de cas de charge.

Les noeuds sont classés par ordre chronologique de rencontre avec l'outil, c'est-à-dire par ordre de s_i croissant. Si on donne à l'outil une épaisseur ϵ (figure 8), plusieurs noeuds sont coupés pour une même position de l'alésoir.

Choix de l'épaisseur ϵ

Comme en fraisage, on lie la valeur de ϵ à la dimension de l'outil, c'est-à-dire à son rayon R_o soit

$$\epsilon = f_r R_o$$

Plus on augmente la valeur de f_r , plus on diminue le nombre de cas de charge. Cependant, il arrivera souvent que des séries de noeuds soient à la même côte z si la surface usinée est régulière. Dans ce cas, on aura un seul cas de charge par série de noeuds même en prenant f_r égal à zéro.

2.3.2. Alésage au grain

C'est le même principe que pour le tournage. Si on peut admettre que le défaut d'usinage est axisymétrique ou quasi axisymétrique (cf. §2.2.2), on ne calcule le défaut que sur une génératrice de la pièce et on le reporte sur les autres noeuds de la surface usinée. Il faut cependant noter qu'il est courant en alésage au grain d'usiner des pièces non-axisymétriques. Dans ce cas, on applique la méthode développée pour le dressage de surface (cf. §2.2.1).

2.4. Brochage

Pour les brochages intérieur et extérieur, on effectue qu'un seul calcul de la déformée correspondant au moment où la broche est en régime. La réduction du nombre de cas de charge n'a donc pas lieu d'exister en brochage.

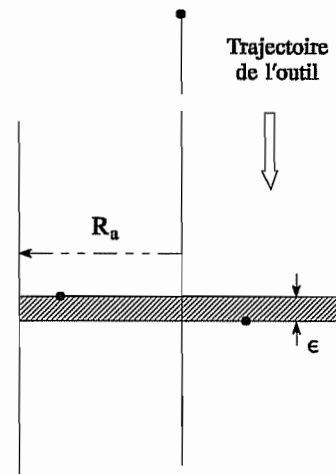


Figure 8 : Coupe simultanée de 2 noeuds

3. Applications - sensibilité du défaut calculé

3.1. Fraisage

Les exemples ci-dessous ont été traités avec la procédure Samcef. Les données utilisées (matériau, outil, bridage, ...) ne correspondent pas aux cas-test définitifs .

3.1.1. Plaque X65

Données

Maillage : - mailleur automatique Samcef (GHS3D)
- éléments tétraédriques du premier degré
- 3290 noeuds, 13513 mailles

Surface usinée : - 546 noeuds
- 890 mailles triangulaires

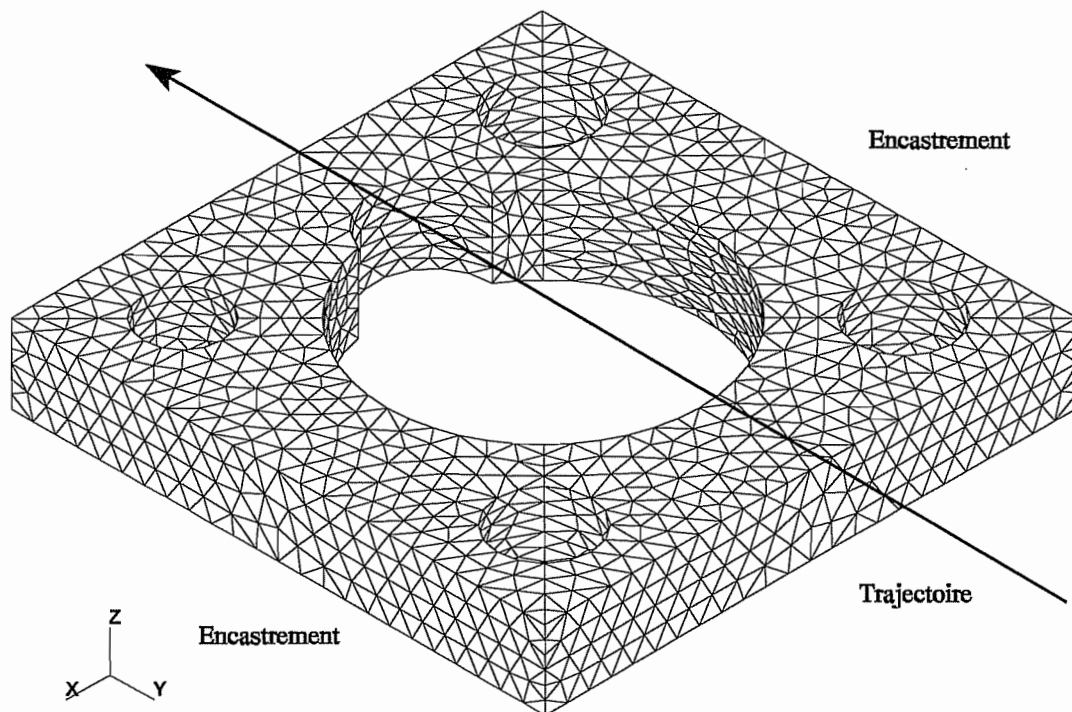


Figure 9 : Plaque X65 - maillage tétraédrique

Matériau : - $E = 210000$ MPa
 - $\nu = 0.3$
 - $R_e = 350$ MPa
 - $R_a = 610-720$ MPa

Pressions spécifiques : - $K_{c11} = 1743$ MPa
 - $K_{f11} = 606$ MPa
 - $K_{p11} = 497$ MPa

Outil : - $D_f = 100$ mm , 14 dents
 - $K_r = 75^\circ$, $\gamma_f = -7^\circ$, $\gamma_p = -4^\circ$

Paramètres d'usinage : - $N = 480$ tr/min
 - $v_f = 835$ mm/min

Trajectoire : centrée (cf. figure 9)

Calcul n°1

Le premier calcul a été effectué sans réduire le nombre de cas de charge. Pour des raisons de symétrie, il n'y a que 516 cas de charge pour 546 noeuds usinés. La norme du défaut calculé, c'est-à-dire la valeur absolue de la différence des défauts maximum et minimum, vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 5.2547 \mu m$$

Calcul n°2

On prend un facteur de réduction du nombre de cas de charge égal à 0.001. L'épaisseur ϵ vaut 0.05 mm. Le nombre de cas de charge est alors de 319 et la norme du défaut calculé vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 4.4538 \mu m$$

Les noeuds où sont situés les défauts maximum et minimum restent les mêmes. L'erreur relative commise sur la norme du défaut est de

$$\Delta = \frac{5.2547 - 4.4538}{5.2547} = 15.2 \%$$

Calcul n°3

On prend un facteur de réduction du nombre de cas de charge égal à 0.01. L'épaisseur ε vaut 0.5 mm. Le nombre de cas de charge est alors de 114 et la norme du défaut calculé vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 4.351 \mu m$$

Les noeuds où sont situés les défauts maximum et minimum restent les mêmes. L'erreur relative commise sur la norme du défaut est de

$$\Delta = \frac{5.2547 - 4.351}{5.2547} = 17.2 \%$$

3.1.2. Nouvelle plaque - Maillage 2226 noeuds

Données

Maillage : - réalisé par Samtech
- éléments hexaédriques du premier degré
- 2226 noeuds, 1352 mailles

Surface usinée : - 630 noeuds
- 572 mailles quadrangulaires

Outil : - $D_f = 140 \text{ mm}$, 14 dents
- $K_r = 75^\circ$, $\gamma_f = -7^\circ$, $\gamma_p = -4^\circ$

Trajectoire : centrée (figure 10)

Les autres données sont identiques à celles du § 3.1.1.

Calcul n°1

Le premier calcul a été effectué sans réduire le nombre de cas de charge. Pour des raisons de symétrie, il n'y a que 405 cas de charge pour 630 noeuds usinés. La norme du défaut calculé vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 26.752 \mu m$$

Les noeuds où sont situés les défauts maximum et minimum sont repérés sur la figure 10.

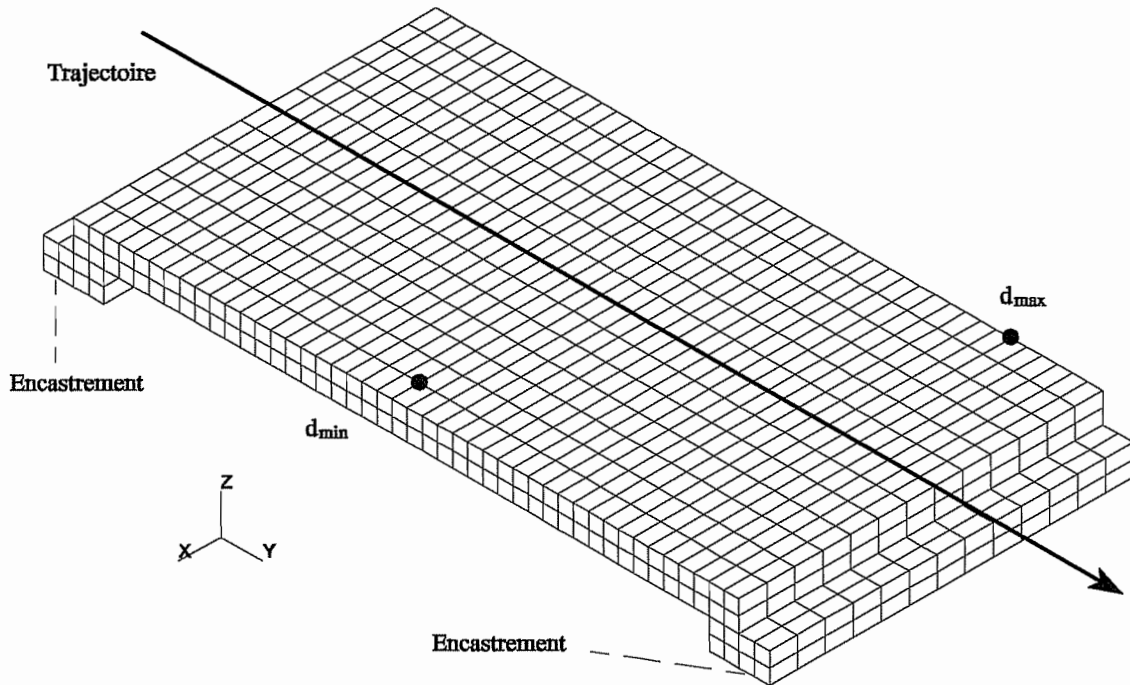


Figure 10 : Nouvelle plaque - maillage 2226 noeuds

Calcul n°2

On prend un facteur de réduction du nombre de cas de charge égal à 0.005. L'épaisseur ϵ vaut 0.35 mm. Le nombre de cas de charge est alors de 231 et la norme du défaut calculé vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 26.702 \mu m$$

Les noeuds où sont situés les défauts maximum et minimum restent les mêmes. L'erreur relative commise sur la norme du défaut est de

$$\Delta = \frac{26.752 - 26.702}{26.752} = 0.19 \%$$

Calcul n°3

On prend un facteur de réduction du nombre de cas de charge égal à 0.03. L'épaisseur ϵ vaut 2.1 mm. Le nombre de cas de charge est alors de 100 et la norme du défaut calculé vaut

$$|d_{\max} - d_{\min}| = 26.168 \mu m$$

Les noeuds où sont situés les défauts maximum et minimum restent les mêmes. L'erreur relative commise sur la norme du défaut est de

$$\Delta = \frac{26.752 - 26.168}{26.752} = 2.18 \%$$

3.1.3. Interprétation des résultats

Plaque X65

Pour le cas de la plaque X65, on s'aperçoit que la réduction du nombre de cas de charge influence beaucoup la norme du défaut calculé (15 et 17% respectivement pour les calculs 2 et 3). Le défaut de cette pièce est essentiellement dû à la compression (dans la direction z).

Pour une position donnée de la fraise, les déformations sont presque exclusivement localisées sous l'outil. Les déplacements et par conséquent le défaut calculé sont très sensibles à une légère modification de la position de la fraise. Lorsqu'on réduit le nombre de cas de charge, l'arc en prise ne passe plus exactement sur les noeuds coupés ce qui entraîne des différences assez importantes sur le défaut calculé.

On peut s'attendre à ce que tous les cas d'usinage où seule la compression de la surface usinée engendre un défaut soient assez sensibles à la réduction du nombre de cas de charge, le défaut calculé étant alors sous-estimé. Ce type de problème ne rentre pas vraiment dans le cadre de ce projet car la pièce ne se déforme presque pas sous l'effet des forces d'usinage.

Nouvelle plaque

Pour cette pièce, le fait de réduire le nombre de cas de charge n'influence quasiment pas le défaut calculé. Quand on réduit le nombre de cas de charge d'un facteur 4 (calcul n°3), l'erreur commise sur le défaut par rapport au calcul avec tous les cas de charge n'est que de 2.18%.

La différence par rapport au cas de la plaque X65 est que la déformation est surtout due à la flexion et à la torsion, elle est de ce fait plus globale que dans le cas précédent. Le défaut calculé est donc moins sensible à la réduction du nombre de cas de charge.

4. Procédures de calcul

4.1. Méthodes d'interpolation

Quelle que soit la méthode employée, lorsqu'on ne calcule les pseudo-déplacements que pour une partie des noeuds de la surface usinée, on doit donc par après retrouver les pseudo-déplacements des autres noeuds. Cette étape du calcul est réalisée par une des trois méthodes d'interpolation ci-dessous.

4.1.1. Report du défaut - cas axisymétrique

Cette méthode n'est appliquée qu'en tournage ou en alésage au grain lorsque le défaut est supposé axisymétrique. Le calcul des pseudo-déplacements n'est effectué que sur les noeuds d'une génératrice de la pièce. Le **report du défaut** est réalisé au niveau du post-processeur (sur station de travail) de la manière suivante :

- en un noeud de la génératrice de calcul, on connaît le pseudo-déplacement;
- par projection sur la normale, on obtient le pseudo-déplacement filtré, autrement dit l'inverse du défaut en ce noeud;
- tous les noeuds qui ont les mêmes coordonnées (x^*, z) que le noeud de calcul ont le même défaut d . Pour chacun de ces noeuds, on recalcule le pseudo-déplacement correspondant à ce défaut d ;
- la même opération est réalisée pour tous les noeuds de la génératrice de calcul.

4.1.2. Interpolation linéaire

Pour un maillage du second degré, quelque soit le type d'usinage, la méthode la plus simple pour réduire le temps de calcul consiste à ne pas prendre en compte les noeuds d'interface dans le calcul des pseudo-déplacements. Le calcul des pseudo-déplacements des noeuds d'interface est réalisé au niveau du post-processeur par **interpolation linéaire** entre les noeuds sommets des côtés.

4.1.3. Interpolation statique

On entend par interpolation statique le fait de calculer les pseudo-déplacements du modèle éléments finis à partir des pseudo-déplacements connus en certains noeuds. Cette méthode est standard sous Nastran comme dans la plupart des codes éléments finis. Elle consiste à résoudre le système suivant

$$\begin{bmatrix} K_{cc} & K_{ci} \\ K_{ic} & K_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_c \\ q_i \end{bmatrix} = 0$$

où q_c sont les degrés de libertés dont les déplacements sont connus et q_i les degrés de libertés dont on veut déterminer les déplacements. Ce système est résolu tout en minimisant l'énergie de déformation du système, soit

$$\min \frac{1}{2} q^T K q$$

Ce type d'interpolation est très efficace lorsque la surface usinée est plane comme en fraisage et en dressage au tour. Par contre, si la surface usinée est courbe, le résultat est moins bon. En effet, si il existe une symétrie du défaut (axiale ou par rapport à un plan), l'interpolation statique ne conserve pas forcément la symétrie. Il faut donc dans ce cas opérer avec prudence le choix des noeuds retenus pour les calculs.

4.2. Procédures de calcul

Les quatre procédures suivantes sont applicables dans le contexte Renault. Les caractéristiques décrites se basent sur les résultats des premiers essais comparatifs méthode directe - méthode du superélément réalisés chez Renault. La méthode utilisée avec Samcef (création du super, extraction de la matrice de raideur, inversion et multiplication par les cas de charges [rapport n°7]) n'est pas reprise ci-dessous puisqu'il n'est pas envisagé de l'appliquer chez Renault. Il convient également de noter qu'il serait possible d'imaginer plusieurs variantes de ces méthodes.

4.2.1. Méthode du superélément à deux étages

Étapes de la méthode :

- création d'un superélément avec tous les noeuds de la **surface usinée**;
- création d'un second superélément à partir du premier avec les noeuds de la **surface usinée calcul**. Celle-ci est soit donnée dans le fichier Ideas, soit déterminée par une procédure automatique;
- calcul des pseudo-déplacements pour le superélément n°2;
- interpolation statique sur tous les noeuds du superélément n°1.

Avantages :

- utilisation de la méthode superélément (rapide dans le contexte Renault),
- calcul des pseudo-déplacements sur le super n°2 qui peut être assez rapide si la **surface usinée calcul** ne contient pas beaucoup de noeuds.
- possibilité de garder les deux superéléments créés → gain de temps lorsqu'on veut tester l'influence de certains paramètres (outil, ...).

Inconvénients :

- création de deux superéléments,
- détermination de la **surface usinée calcul**,
- impossibilité de créer le super n°1 si le nombre de noeuds de la **surface usinée** et la taille du modèle éléments finis dépassent les limites autorisées dans le contexte Renault.

Cette méthode avait été proposée initialement dans les spécifications. Elle est avantageusement remplacée par la méthode qui suit et ne sera plus mentionnée dans la suite de ce rapport.

4.2.2. Méthode du superélément à un seul étage

Étapes de la méthode :

- création d'un seul superélément avec les noeuds de la **surface usinée calcul**;
- calcul des pseudo-déplacements pour ce superélément;
- interpolation statique sur tous les noeuds du modèle éléments finis.

Avantages :

- utilisation de la méthode superélément (rapide dans le contexte Renault),
- calcul des pseudo-déplacements sur un super qui peut être assez rapide si la **surface usinée calcul** ne contient pas beaucoup de noeuds,
- création d'un seul superélément,
- possibilité de garder le superélément créé → gain de temps lorsqu'on veut tester l'influence de certains paramètres (outil, ...).

Inconvénients :

- détermination de la **surface usinée calcul**,
- impossibilité de créer le super si le nombre de noeuds de la **surface usinée calcul** et la taille du modèle éléments finis dépassent les limites autorisées dans le contexte Renault.

4.2.3. Méthode des superéléments séquentiels

Étapes de la méthode :

- création d'autant de superéléments que nécessaire pour ne pas dépasser les limites autorisées dans le contexte Renault pour la création d'un super (par ex. : si la **surface usinée** contient 2000 noeuds et que le nombre de noeuds maximum est de 500, on crée 4 superéléments);
- calcul des pseudo-déplacements pour chacun des superéléments créés.

Avantages :

- pas de limites sur la taille du problème,
- pas besoin de déterminer une **surface usinée calcul**,
- pas d'interpolation statique,
- méthode très générale et facile à mettre en oeuvre,
- possibilité de garder les superéléments créés.

Inconvénients :

- temps de calcul assez long.

4.2.4. Méthode directe

Étape de la méthode :

- résolution du système complet avec second membre (cas de charges).

Avantages :

- méthode très simple à mettre en oeuvre,
- un seul passage Nastran,
- possibilité de spécifier les noeuds pour lesquels on veut obtenir les pseudo-déplacements.

Inconvénients :

- moins rapide que la méthode superélément dans le contexte Renault,
- limitation de la taille du problème à cause du nombre élevé de cas de charge. Il est cependant toujours possible d'effectuer le calcul en plusieurs fois.

5. Solutions proposées

5.1. Fraisage

Deux solutions peuvent être envisagées en fraisage.

Méthode directe

Il est très probable que dans la plupart des cas on puisse diviser le nombre de cas de charge par un facteur assez grand (de 3 à 5). Dans ce cas, il n'est pas impossible que la méthode directe soit plus rapide qu'une méthode de superélément dans le contexte Renault. Cette procédure est **très simple** à mettre en oeuvre, elle est tout à fait **standard sous Nastran** et la procédure de réduction du nombre de cas de charge est **entièrement automatique**.

Le seul inconvénient est que, lorsqu'on veut tester l'influence de certains paramètres d'usinage sur le défaut, il n'est pas possible de reprendre une partie des calculs réalisés précédemment contrairement à une méthode de superélément.

De plus, si la taille du problème est très importante, le calcul peut devenir impossible, même en limitant le nombre de cas de charge. Cependant, on peut très bien imaginer de réaliser le calcul en plusieurs passages Nastran.

Méthode des superéléments séquentiels

Cette procédure est **standard sous Nastran** et elle n'est **pas limitée** d'un point de vue taille de problème. Elle permet la **reprise des calculs** réalisés, auquel cas les seules étapes à refaire sont la lecture des n matrices de raideur des superéléments et la résolution de n systèmes réduits. Dans ce cas, le gain de temps est assez important par rapport à la méthode directe.

Le choix des superéléments est réalisée à partir des cas de charges. Dans chaque cas de charge sont impliqués un ou plusieurs noeuds coupés et une série de noeuds chargés. A partir du premier cas de charge, on ajoute les suivants jusqu'à obtenir un nombre de noeuds impliqués inférieur ou égal à la limite voulue. L'ensemble de ces noeuds sont alors retenus pour la création du premier superélément. On répète l'opération jusqu'au dernier cas de charge, c'est-à-dire lorsqu'on a couvert tous les noeuds de la surface usinée.

Le seul désavantage de cette méthode est le **temps de création des superéléments** qui peut être assez long. L'organisation des fichiers et la récupération des résultats nécessite une attention particulière puisqu'il y a autant de fichiers résultats que de superéléments créés. Rappelons également que les positions de calcul correspondant aux cas de charge ne peuvent plus être modifiées tant que l'on veut utiliser les superéléments existants.

5.2. Tournage

5.2.1. Dressage au tour

Méthode du superélément à un seul étage

Cette procédure est la plus appropriée pour le dressage au tour. En effet, l'interférence pièce-outil étant modélisée par un contact ponctuel (comme tous les cas de tournage), les seules forces appliquées au maillage lorsqu'un noeud est coupé sont les forces f_x , f_y et f_z en ce noeud. Les noeuds retenus dans le superélément sont les noeuds de la **surface usinée calcul**. On calcule les cas de charges uniquement pour ces noeuds et on les applique directement au superélément. Connaissant les pseudo-déplacements des noeuds de la **surface usinée calcul**, on calcule les pseudo-déplacements de tous les noeuds de la structure par la méthode d'interpolation statique.

Cette procédure est tout à fait **standard sous Nastran**, elle est **très simple** à mettre en oeuvre et elle est **très rapide** (un seul superélément).

Cependant, si le nombre de noeuds de la **surface usinée calcul** est trop grand, il devient impossible d'effectuer le calcul. On peut alors appliquer la méthode des superéléments séquentiels qui elle n'est pas limitée.

5.2.2. Tournage cylindrique - Tournage conique - Contournage

Méthode du superélément à un seul étage - calcul sur une génératrice

Si le problème est axisymétrique ou si l'on admet que le défaut est quasi axisymétrique, la méthode la plus appropriée est la méthode du superélément à un seul étage. La **surface usinée calcul** est une des génératrices de la pièce (choisie automatiquement par le programme). Le défaut est calculé pour les noeuds de cette génératrice et reporté, au niveau du post-processeur, sur les autres noeuds de la pièce.

Cette procédure est tout à fait **standard sous Nastran**, elle est **très simple** à mettre en oeuvre et elle est **très rapide** (un seul superélément de petite taille). De plus, elle ne nécessite qu'un seul passage Nastran (pas d'interpolation statique).

Méthode du superélément à un seul étage

Si le problème n'est pas axisymétrique, on applique la même procédure que pour le dressage. Rappelons que dans ce cas, la restitution statique est moins performante puisque la surface usinée est courbe. Il faut donc opérer le choix de la **surface usinée calcul** avec prudence.

La méthode des superéléments séquentiels est toujours applicable si la taille du problème est trop grande.

5.3. Alésage

5.3.1. Alésage à l'alésoir

Rappelons tout d'abord que le nombre de noeuds de la surface usinée excédera rarement les limites de taille d'un superélément. En effet, si l'on considère l'alésage d'un trou de soupape (c'est-à-dire l'endroit où le guide-soupape est fretté), la surface usinée est très petite par rapport aux dimensions globales de la culasse. Il serait dès lors étonnant que la surface usinée possède un nombre élevé de noeuds.

Méthode des superéléments séquentiels

Dans le cas de l'alésage à l'alésoir, on ne crée en général qu'un seul superélément (cf. ci-dessus). On réduit le nombre de cas de charge par la méthode exposée au chapitre 2.3.1.

Cette procédure est tout à fait **standard** sous **Nastran**, elle est **très simple** à mettre en oeuvre, elle est **très rapide** et ne nécessite qu'un seul **passage Nastran** (un seul superélément de petite taille).

Méthode directe

Comme pour le fraisage, la méthode directe s'applique très bien à l'alésage à l'alésoir. Le calcul sera presque toujours possible (problème de petite taille) et le fait de pouvoir réduire le nombre de cas de charge de façon automatique diminue beaucoup le temps de calcul.

5.3.2. Alésage au grain

On applique les mêmes solutions que pour le tournage. Cependant, rappelons que les pièces sont plus rarement axisymétriques en alésage qu'en tournage. Dès lors, la procédure la plus appropriée semble être la méthode du superélément à un seul étage.

5.4. Brochage

Un seul calcul **Nastran** est nécessaire pour calculer le défaut en brochage.

6. Conclusions

De ce rapport il ressort qu'il n'y a **pas de situation de blocage**. Quelle que soit la taille du problème, il est toujours possible de réaliser le calcul du défaut. Que ce soit en utilisant la méthode directe ou une technique de superélément, le calcul peut toujours être réalisé en un ou plusieurs passages Nastran.

Pour tous les types d'usinage, il existe une solution simple d'un point de vue programmation et qui soit standard sous Nastran sur une machine Cray. Nous nous sommes efforcés d'imaginer des procédures de calcul qui soient non seulement applicables mais également rapides dans le contexte Renault.

D'après les premiers essais réalisés, il semble que le défaut calculé soit peu sensible à une réduction du nombre de cas de charge, ce qui permet de limiter le temps de calcul. Cependant, il serait souhaitable d'effectuer un plus grand nombre de tests sur les cas-tests définitifs afin de cerner le domaine de validité de cette hypothèse.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Méthodes de limitation des cas de charge	2
2.1. Fraisage	2
2.1.1. Méthode basée sur la définition d'un pas d'avancement	2
2.1.2. Méthode basée sur l'élimination d'une partie de la surface usinée	4
2.2. Tournage	5
2.2.1. Dressage au tour	5
2.2.2. Tournage cylindrique - Tournage conique - Contournage	7
2.3. Alésage	10
2.3.1. Alésage à l'alésoir	10
2.3.2. Alésage au grain	10
2.4. Brochage	10
3. Applications - sensibilité du défaut calculé	11
3.1. Fraisage	11
3.1.1. Plaque X65	11
3.1.2. Nouvelle plaque - Maillage 2226 noeuds	13
3.1.3. Interprétation des résultats	15
4. Procédures de calcul	16
4.1. Méthodes d'interpolation	16
4.1.1. Report du défaut - cas axisymétrique	16
4.1.2. Interpolation linéaire	16
4.1.3. Interpolation statique	17
4.2. Procédures de calcul	18
4.2.1. Méthode du superélément à deux étages	18
4.2.2. Méthode du superélément à un seul étage	19
4.2.3. Méthode des superéléments séquentiels	19
4.2.4. Méthode directe	20
5. Solutions proposées	21
5.1. Fraisage	21
5.2. Tournage	22
5.2.1. Dressage au tour	22
5.2.2. Tournage cylindrique - Tournage conique - Contournage	22
5.3. Alésage	23
5.3.1. Alésage à l'alésoir	23
5.3.2. Alésage au grain	23
5.4. Brochage	23
6. Conclusions	24