



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <https://oatao.univ-toulouse.fr/23954>

### To cite this version :

Airbus Operations SAS, Toulouse (FR) Method for characterizing the endurance limit of a part from its surface profile. (2011) US 8082114 B2.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

[tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11) N° de publication : **2 898 410**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

21) N° d'enregistrement national : **06 50793**

51) Int Cl<sup>8</sup> : G 01 B 21/20 (2006.01), G 06 F 19/00, G 01 N 33/00

12)

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 07.03.06.

30) Priorité :

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 14.09.07 Bulletin 07/37.

56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71) Demandeur(s) : AIRBUS FRANCE Société par actions simplifiée — FR.

72) Inventeur(s) : VERGNES VIVIAN, CHIERAGATTI REMY, MABRU CATHERINE, ESPINOSA CHRISTINE et SURARACHAI MONCHAI.

73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : SANTARELLI.

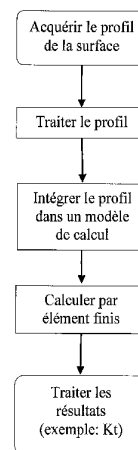
54) PROCÉDE DE CARACTERISATION DE LA TENUE EN FATIGUE D'UNE PIÉCE A PARTIR DE SON PROFIL DE SURFACE.

57) Un procédé de caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce à partir de son état de surface comporte les étapes suivantes:

\* on relève des données géométriques décrivant le profil de surface de la zone dont la tenue en fatigue doit être déterminée

\* on applique ces données à un modèle de calcul en sorte d'élaborer une estimation du champ des contraintes mécaniques dans ladite zone de ladite pièce,

\* on déduit de cette estimation du champ des contraintes au moins une grandeur caractéristique du comportement en fatigue de la pièce.



FR 2 898 410 - A1



5

## 10 **Domaine de l'invention**

L'invention concerne la caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce à partir de son état de surface.

15 L'endommagement par fatigue est un problème pratique que l'on rencontre dans tous les types de pièces soumises à un spectre de chargement cyclique. Or les procédés de fabrication de telles pièces entraînent des fluctuations dans les propriétés de surface et donc dans la tenue des pièces en fatigue. En effet, on sait que la tenue en fatigue de pièces mécaniques dépend notamment de leur surface, où peuvent apparaître des amorces de rupture par  
20 fatigue.

La plupart des études sur l'influence de l'état de surface d'une pièce sur sa tenue en fatigue retiennent 3 paramètres pouvant la caractériser :

- un paramètre géométrique,
- un paramètre métallurgique, et/ou
- 25 - un paramètre mécanique.

Chaque paramètre agit différemment selon le matériau, de sorte qu'il est généralement possible d'en retenir un comme étant le plus représentatif pour un matériau donné.

30 Dans certains cas, par exemple l'alliage d'aluminium pour application aéronautique principalement visé ici, le critère le plus représentatif est le critère géométrique. Ce critère est lié à la forme du profil de rugosité de surface généré par la gamme d'usinage. Il est alors courant d'appliquer un modèle mécanique aux paramètres géométriques ainsi identifiés pour en estimer l'influence sur la tenue en fatigue.

### Etat de la technique

Parmi les études sur l'influence des états de surface sur la tenue en fatigue, celles qui sont consacrées à l'influence de la géométrie utilisent des modèles géométriques définissant des paramètres de rugosités. Ceux-ci sont des moyens intermédiaires de description de la surface ; en effet des modèles mécaniques partent de cette description géométrique, par ces paramètres de rugosité, pour estimer son influence sur la tenue en fatigue. Le diagramme de la figure 1 schématise cette démarche.

#### 1) Modèle géométrique :

Les paramètres de rugosité sont calculés par le modèle géométrique, à partir d'un profil de surface selon les critères physiques ou les critères statistiques (voir la norme internationale ISO 4287/1-1984 (E/F/R) (1984)). Cette étape, en général, est effectuée par une machine de rugosimétrie. Parmi les paramètres de rugosité, ceux le plus souvent employés pour déterminer ensuite la tenue en fatigue des pièces sont :

- L'écart arithmétique moyen ( $R_a$ ) qui est la surface entre le profil de rugosité et sa ligne moyenne, ou l'intégrale de la valeur absolue de la taille de profil de rugosité au-dessus de la longueur d'évaluation :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$

- L'écart total ( $R_t$ ) qui est un écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité, sur la longueur totale d'évaluation.

- La profondeur moyenne d'aspérité ( $R_z$ ) qui est la valeur de moyenne arithmétique des profondeurs simples  $R_{zi}$  des longueurs consécutives de prélèvement (le symbole « i » désignant les longueurs consécutives pouvant être identifiées comme présentant des pics dans le profil de la surface - voir la figure 2).

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn})$$

## 2) Modèle mécanique :

Des paramètres de rugosité ainsi obtenus sont ensuite utilisés par différents modèles connus pour déterminer les propriétés mécaniques. On peut diviser ces modèles en 2 catégories :

- modèles du facteur de surface ( $K_s$ ), et
- modèles d'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue

### 2.1) Modélisations du facteur $K_s$ :

Le facteur  $K_s$  est défini comme le rapport de la limite d'endurance de l'éprouvette donnée avec une certaine rugosité superficielle et de la limite d'endurance d'une éprouvette témoin dont l'état de surface est choisi comme référence.

$$K_s = \frac{\sigma_{DS}}{\sigma_D}$$

$\sigma_D$ : limite de fatigue de l'éprouvette dont l'état de surface est choisi comme référence.

$\sigma_{DS}$ : limite de fatigue de l'éprouvette donnée avec une certaine rugosité superficielle.

Plusieurs modèles ont été proposés pour définir la valeur de  $K_s$ , appelé « Facteur d'état de surface ».

**Stieler (1954)**, en s'appuyant sur la théorie de concentration des contraintes sur les défauts géométriques, a proposé une formule du type

$$K_s = \frac{\left(1 + 2\sqrt{\frac{1}{C}} + \sqrt{\frac{1}{R}}\right)}{\left(1 + 2\sqrt{\frac{1}{C}}\right)}$$

où

$C$  : est un facteur dépendant de l'usinage.

$R$  : est défini comme étant égal à  $2 Rt/Sg$

où  $Sg$  : représente l'épaisseur maximale de matériaux intervenant

dans le processus d'amorçage d'une fissure de fatigue. Stieler a montré qu'elle est de l'ordre de grandeur de la dimension des grains de matériaux dans un essai de flexion rotative.

- 5 **Niemann et Glaubitz (1952)** ont modélisé leurs résultats expérimentaux obtenus en flexion plane par des formules de type :

$$\frac{\sigma_{DS}}{\sigma_D} = \left( \frac{Rt}{Rts} \right)^n$$

où

- 10  $Rts$  : est la rugosité de l'éprouvette donnée avec une certaine rugosité superficielle

$Rt$  : est la rugosité de l'éprouvette de référence,

$\sigma_D$  : est la limite d'endurance de l'éprouvette de référence,

$\sigma_{DS}$  : est la limite d'endurance de l'éprouvette considérée,

$n$  : est un coefficient fonction du matériau.

15

**Brand et al (CETIM, 1980)** ont construit un abaque par lissage d'un grand nombre de données disponibles, avec des droites de pente négative donnant  $K_s$  (le facteur d'état de surface) en fonction de la résistance à la rupture  $R_m$ , pour diverses valeurs du critère de rugosité  $R_t$ .

20

2.2) Modélisations de l'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue:

Deux approches sont généralement utilisées pour la prédiction de la durée de vie en fatigue en fonction de la rugosité :

- 25
- une approche basée sur l'effet d'entaille,
  - une approche basée sur la mécanique de la rupture.

### 2.2.1) Effet d'entaille

30 L'approche par l'effet d'entaille fait appel à la définition classique du facteur effectif de concentration de contraintes,  $K_f$ , qui est le rapport de la limite d'endurance  $\sigma_D$  d'une éprouvette lisse à la limite d'endurance  $\sigma_D$  de l'éprouvette entaillée. Ce coefficient  $K_f$  est généralement inférieur au coefficient

théorique de concentration des contraintes  $K_t$ . Des auteurs, notamment **Neuber, 1957, Smith et al, 1970**, ont proposé des relations reliant  $K_f$  au facteur  $K_t$ . Pour des valeurs de  $K_t$  faibles, **Peterson (1959)** a établi une relation empirique définissant le facteur  $K_f$  comme suit:

$$K_f = 1 + (K_t - 1) \left( 1 + \frac{\alpha}{\rho} \right)$$

5

où  $K_t$  : est le facteur de concentration de contrainte,

$$\alpha = 0,0254 \cdot \left( \frac{2070}{Rm} \right)^{1,8}$$

$\alpha$  : est une constante liée au matériau

$\rho$  : est le rayon d'entaille.

10

**Arola et Williams (2002)** ont exprimé  $K_t$  en fonction des paramètres de rugosité  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$  et du rayon moyen  $\rho$  à fond d'entaille, et d'un paramètre  $n$  qui est un facteur qui dépend du type du chargement ( $n=1$  pour des chargements en cisaillement, et  $n=2$  pour des chargements en traction uniforme).

15

$$K_t = 1 + n \left( \frac{R_a}{\rho} \right) \left( \frac{R_t}{R_z} \right)$$

Ce facteur  $K_t$  est ensuite utilisé pour établir une relation empirique définissant le facteur  $K_f$ .

20

### 2.2.2) Mécanique de la rupture

En considérant que la rugosité de la surface forme des entailles qui peuvent être assimilés à des fissures, il est possible d'utiliser les résultats de la mécanique de la rupture. Le comportement à la fatigue est alors caractérisé par  $\Delta K_{th}$  qui est la variation du seuil du facteur d'intensité de contrainte. **Kitagawa (1976)** a représenté alors l'évolution de ce seuil  $\Delta K_{th}$  en fonction de la longueur de la fissure dans un diagramme bi-logarithmique sur lequel on distingue la limite de fatigue de référence (sur une éprouvette polie) par une droite horizontale, puis une courbe seuil qui apparaît comme une droite de pente  $-1/2$ . La transition entre ces droites définit une zone où les données expérimentales s'écartent des courbes théoriques.

30

**Taylor et Clancy (1991)** ont comparé ces courbes au critère de rugosité  $R_{max}$ , les prédictions effectuées par ces deux approches aux résultats expérimentaux. Ils en ont conclu que pour les faibles rugosités, l'approche par la mécanique de la rupture convient bien. Alors que pour les rugosités élevées, l'approche basée sur l'effet d'entaille donne de meilleurs résultats. La valeur de  $R_{max}$  correspondant à l'intersection de ces deux courbes théoriques peut fournir une limite de validité de la prévision basée sur la mécanique de la rupture, qui devient trop conservative au-delà. Dans tous les cas,  $R_{max}$  leur semble être le critère de surface le plus significatif. En effet, ce critère représente de façon satisfaisante soit la profondeur de la plus grande entaille (l'effet d'entaille), soit la longueur la plus grande de la fissure (mécanique de la rupture).

**Andrews et Sehitoglu (2000)** se sont intéressés à la propagation de fissure et aux facteurs de concentration de contrainte présents, en faisant une distinction selon que les fissures sont considérées comme étant courtes ou longues. Ils ont ensuite proposée une expression des concentrations de contraintes tenant compte d'une relaxation des concentrations de contraintes lorsque les entailles sont côte à côte.

### 2.3) Commentaires

En pratique, la tenue en fatigue des pièces peut être influencée, entre autres, par le profil géométrique de la surface. Les accidents de forme de ce profil influencent l'amorçage ou la propagation des fissures de fatigue. Toutefois, les modèles qui les prennent en compte ne partent pas de la forme réelle de ces accidents mais de descriptions géométriques simplifiées des mesures profilométriques. Les paramètres issus de ces descriptions sont nombreux, mais aucun d'entre eux ne permet d'assurer pour tous les types d'accident une pertinence du modèle mécanique qui l'utilise. Tantôt il est judicieux d'utiliser l'un tantôt l'autre, et seule l'expérience permet de trancher a posteriori. Cela ne permet donc pas une caractérisation de la tenue en fatigue sans avoir procédé à des essais préalables.

L'invention a pour objet une nouvelle procédure de caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce en fonction de son état de surface, permettant



de s'affranchir de toute description purement géométrique de ce profil (par les paramètres classiques tels que les coefficients de rugosité Ra, Rt, Rz, etc...) pour s'intéresser plutôt à une description mécanique de la pièce en rapport plus direct avec la tenue en fatigue de la pièce considérée.

5

### Description de l'invention

10 Selon un aspect de l'invention on part d'une numérisation du profil de surface 2D ou 3D obtenu par les machines de rugosimétrie actuelles, pour calculer directement des modifications du champ de contraintes locales générées en surface par ce profil. Il s'agit donc de mettre en place une chaîne de mesure d'un critère mécanique associé à la géométrie d'une surface pour la qualifier en fatigue.

15 L'invention propose ainsi un procédé de caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce à partir de son état de surface, comportant les étapes suivantes :

\* on relève des données géométriques décrivant le profil de surface de la zone dont la tenue en fatigue doit être déterminée.

20 \* on applique ces données à un modèle de calcul en sorte d'élaborer une estimation du champ des contraintes mécaniques dans ladite zone de ladite pièce,

\* on déduit de cette estimation du champ des contraintes au moins une grandeur caractéristique du comportement en fatigue de la pièce.

25 Il est à noter que, puisqu'il y a une estimation directe du champ des contraintes à partir du profil de surface acquis, sans passer par la détermination de coefficients géométriques, tels que les coefficients de rugosité, on peut aboutir à une estimation du comportement, compte tenu de ce que d'éventuels accidents ne seront pas neutralisés par un quelconque modèle géométrique.

30 Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, éventuellement combinées :

- l'étape de détermination (ou de relèvement) des données caractérisant le profil de surface de la zone comporte une sous-étape de

mesure du profil géométrique de cette zone, en pratique par tout appareil à palpeur connu ; toutefois, il peut être envisagé d'utiliser d'autres techniques, notamment purement optiques, électriques, sonores, thermiques,

- l'étape de relèvement/détermination des données caractérisant ce profil comporte une sous-étape d'échantillonnage, ce qui permet de réduire la taille de la mémoire de stockage nécessaire, sans toutefois risquer de neutraliser complètement des accidents de la surface ; de manière préférée, cette sous-étape d'échantillonnage est conçue en sorte de réduire d'au moins un facteur 10 le nombre de données caractérisant le profil de surface ; toutefois, l'absence d'échantillonnage est envisageable si les moyens de calcul le permettent,

- l'étape de détermination des données caractérisant ce profil comporte une sous-étape de filtrage, par exemple pour enlever l'effet de l'inclinaison ou de la géométrie de la pièce (par exemple pour une pièce cylindrique, la courbure liée à son diamètre).

- l'étape de détermination des données caractérisant ce profil comporte une sous-étape d'ajustage en fonction du modèle de calcul, ce qui peut garantir le respect du format imposé par le modèle de calcul,

- le modèle de calcul auquel sont appliquées les données est un modèle de calcul par éléments finis ou ses variantes (XFEM, BARSOOM,...), ce qui correspond à un outil de calcul bien maîtrisé ; d'autres modèles de calcul peuvent toutefois être envisagés, tels que notamment les autres méthodes numériques comme les modèles numériques particuliers, les différences finis ou spectrales, les méthodes intégrales,

- le modèle de calcul intègre une épaisseur de la pièce ; de manière avantageuse, cette épaisseur est d'au moins 0.5 mm, de préférence au moins 1 mm, sous la surface de ladite zone, ce qui est apparu être tout à fait suffisant pour estimer correctement le champ de contraintes quelques soient les profils des surfaces étudiées ; cette épaisseur peut néanmoins être optimisée au cas par cas selon l'état de l'art,

- le modèle de calcul détermine, pour chaque élément de calcul (élément fini, ou élément numérique du modèle utilisé, etc.) des valeurs de contraintes selon deux ou trois axes principaux de ladite zone, ce qui permet

une meilleure estimation du champ de contrainte qu'avec un seul axe,

- le modèle n'est appliqué qu'à au moins une distance non nulle des bords de la zone de la pièce, par exemple à au moins 1 mm de ces bords, de manière à éviter les effets de bords (à moins de pouvoir intégrer ces effets dans le modèle de calcul),

- la grandeur caractéristique du comportement en fatigue est un coefficient de concentration des contraintes maximales, ce qui correspond à ce que donne les chaînes de mesure actuelles utilisant à la fois un modèle géométrique et un modèle mécanique ; d'autres grandeurs comme la répartition des contraintes dans l'épaisseur peuvent être facilement obtenues à partir du modèle numérique utilisé dans l'invention.

Des objets, caractéristiques et avantages de l'invention ressortent de la description qui suit, donnée à titre d'exemple illustratif non limitatif, donnée en regard des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est un diagramme schématisant les étapes de la caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce à partir de son profil de surface,
- la figure 2 est un schéma montrant le coefficient de rugosité noté  $R_z$ ,
- la figure 3 est un diagramme schématisant les étapes du procédé conforme à l'invention, par analogie avec le formalisme utilisé dans la figure 1,
- la figure 4 est un schéma de mise en œuvre d'un mode de réalisation du procédé de l'invention,
- la figure 5 est un schéma d'une première étape de mise en œuvre de ce procédé,
- la figure 6 est un graphique montrant le profil d'une éprouvette usinée, sur une longueur de 17.5 mm,
- la figure 7 est un schéma d'une seconde étape de mise en œuvre du procédé,
- la figure 8 est un graphique montrant le profil acquis ainsi que le profil modifié,

- la figure 9 est un schéma d'une troisième étape de mise en œuvre du procédé,
- la figure 10 est un graphique montrant le profil modifié ainsi qu'un détail de celui-ci,
- 5 - la figure 11 est un graphique montrant ce profil modifié, ainsi que ce détail, décomposé en éléments finis,
- la figure 12 est un schéma d'une quatrième étape de mise en œuvre,
- la figure 13 est un graphique représentant le champ de contraintes locales,
- 10 - la figure 14 est un schéma d'une cinquième étape de mise en œuvre du procédé,
- la figure 15 est un graphique montrant la courbe de Wohler obtenue pour diverses éprouvettes, et
- 15 - la figure 16 est un graphique montrant la courbe de Wohler obtenue pour les mêmes éprouvettes après correction par le coefficient de contrainte déterminé par le coefficient obtenu au terme de la cinquième étape.

20 Selon l'invention, on utilise une mesure profilométrique dans un modèle mécanique, sans passer par une modélisation géométrique intermédiaire du profil impliquant la détermination de coefficients de rugosité. Cette chaîne de mesure est schématisée à la figure 3 : le modèle mécanique utilise directement le relevé du profil dans un modèle mécanique, en sorte de

25 déterminer un ou plusieurs paramètres mécaniques, tels que des coefficients de concentration de contraintes.

La démarche de cette chaîne de mesure est représentée à la figure 4, avec les étapes suivantes :

- étape d'acquisition du profil de la surface, par détermination (ou relèvement) de données caractérisant le profil de surface d'une
- 30 zone choisie de la pièce considérée,
- éventuelle étape de traitement du profil (elle peut, dans certains cas, être intégrée à la saisie des données du profil de surface),

- intégration du profil éventuellement traité dans un modèle de calcul, ce qui revient à appliquer les données à un modèle de calcul,
- 5 - mise en œuvre du modèle de calcul, en sorte d'estimer le champ de contraintes mécaniques dans la zone dont le profil de surface a été saisi,
- traitement des résultats du calcul en sorte de déduire de cette estimation du champ de contraintes au moins une grandeur caractéristique de ce champ (par exemple  $K_t$ ) et donc du  
10 comportement en fatigue de la pièce considérée.

Le détail de ces diverses étapes peut se résumer comme suit.

#### Étape 1 : Acquérir le profil de la surface

15 L'état géométrique de la surface est mesuré dans cette étape (voir la figure 5). Il est déterminé par une machine à mesurer (contact ou optique) de tout type connu approprié, tel qu'un appareil à palpeur conforme à la norme NF-ISO 3274, Juin 1977, mettant en œuvre les dispositions de la norme ISO – 4287/1 1984 (E/FR) 1984 déjà citée ci-dessus.

20 Le profil obtenu, c'est-à-dire soit le profil total (profil direct ou brut), soit le profil primaire (en pratique, après élimination de la forme nominale de la zone de pièce analysée, et éventuelle application d'un filtre passe-bas) est enregistré numériquement et est ensuite utilisé dans la chaîne de mesure proposée.

25 La figure 6 montre à titre d'exemple le profil de la surface d'une éprouvette usinée acquis par une machine de rugosimétrie du type « Mahr Perthometer - PKG 120.

30 Une longueur d'évaluation de 17,50 mm a été choisie comme longueur de référence pour toutes les gammes de surface dans l'exemple ici considéré. Le profil direct obtenu sans filtre (le profil total, ou direct) a été enregistré en format ASCII par une fonction disponible proposée par ce rugosimètre. Ce profil est composé par l'écart de forme, l'ondulation, la rugosité périodique ou pseudopériodique (les stries et les sillons) et la rugosité

apériodique (les arrachements, marques d'outil et fentes, piquages, etc.).

### Étape 2 : Traiter le profil

Le profil obtenu dans la première étape est ensuite, de manière  
5 avantageuse, échantillonné, modifié et ajusté (voir la figure 7).  
L'échantillonnage a pour avantage de réduire la taille de mémoire demandée et  
le temps de calcul. Plusieurs méthodes d'échantillonnage sont possibles, par  
exemple, avec une fréquence fixée, avec une valeur moyenne de voisinage,  
etc. Le profil peut être modifié par différents filtres pour enlever des paramètres  
10 indésirables comme l'inclinaison. Un éventuel ajustement du résultat peut se  
révéler nécessaire pour pouvoir intégrer ce profil dans le modèle de calcul  
ultérieur.

La figure 8 représente, à une échelle bien plus fine qu'à la figure 6,  
un détail du profil acquis lors de la première étape, ainsi que ce même profil  
15 après traitement. Dans l'exemple ici considéré, l'étape de traitement est  
réalisée par un logiciel de calcul. La méthode d'échantillonnage est effectuée à  
une fréquence fixée choisie pour diminuer le nombre de points de l'ordre de  
11000 points à environ 550 points, aucune autre modification n'étant faite.  
Ensuite, les hauteurs du profil ont été ajustées par suppression de la moyenne  
20 du profil et de l'écart arithmétique du profil. Le premier point et/ou le dernier  
point ont été imposés par le respect de la condition d'avoir une hauteur égale à  
zéro, avec un pas équivalent à la fréquence échantillonnée.

Le logiciel utilisé dans cette étape a été le logiciel SCILAB. Des  
lignes de commandes sont réalisées, et présentées en annexe A. On peut noter  
25 à l'examen de la figure 8 que le profil obtenu est lissé, et que certaines  
rugosités périodiques ou pseudopériodiques et rugosités apériodiques ont  
disparu du fait de l'échantillonnage.

### Étape 3 : Intégrer le profil dans un modèle de calcul, ici un modèle de 30 calcul par éléments finis

Le profil modifié est ensuite intégré dans un modèle de calcul  
destiné à déterminer le champ de contraintes (voir la figure 9). Il s'agit  
avantageusement d'un modèle de calcul par éléments finis. L'intégration est

différente selon le logiciel choisi. La géométrie, les conditions aux limites et les hypothèses sont fixées de manière appropriée en sorte de pouvoir calculer le champ des contraintes.

5 Le passage du profil traité (figure 10) à la décomposition en éléments finis (figure 11) a ici été réalisé au moyen du logiciel de calcul SAMCEF-Asef. Il a besoin d'une banque de donnée d'entrée avec un format spécifique généré par un texte éditeur.

10 Dans l'exemple ici considéré, une épaisseur de 5 mm a été prise en considération en imposant un plan de symétrie, ce qui correspond à une épaisseur équivalente de 10 mm dans le modèle (de part et d'autre de la ligne suivant laquelle le profil a été acquis). Le calcul a été simplifié par l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire et des conditions aux limites représentant des chargements uniformément distribués. Les tailles et le nombre des mailles ont été limités par la zone de mémoire disponible et le temps de calculs demandés. Pour faciliter le travail dans cette étape, des lignes de commande du logiciel SCILAB ont été réalisées pour générer le fichier de calcul (banque de donnée) à partir du profil traité ; elles sont présentées dans l'annexe B.

#### 20 Étape 4 : Calcul du champ de contraintes, ici par éléments finis

Cette étape (voir la figure 12) est réalisée par un logiciel de calcul par éléments finis. Un ou (des) paramètres sont envisagés pour représenter le champ des contraintes ainsi obtenues.

25 La figure 13 représente le résultat obtenu par la mise en œuvre du logiciel de calcul par éléments finis SAMCEF module asef choisi (voir l'étape 3) pour calculer le champ des contraintes. Seul le groupe des résultats entre la distance 1 mm et la distance 16,5 mm a été retenu, pour éliminer l'effet du bord (sur les tronçons 0-1 mm et 16.5-17.5 mm), avec une profondeur de 1 mm. Ils ont été enregistrés pour être traités dans l'étape suivante.

30 Deux résultats (les contraintes dans les axes principaux et les coordonnées de l'élément fini considéré) ont été enregistrés avec des commandes de post-traitement (« post-process ») dans la banque de données.

### Étape 5 : Traiter les résultats

Divers traitement peuvent ici être appliqués aux données issues de l'étape de calcul du champ de contraintes, en vue de déduire de l'estimation du champ de contraintes au moins une grandeur caractéristique du comportement en fatigue de la pièce considérée (en moins en la zone explorée), tels que des coefficients de concentration de contrainte.

A titre d'exemple, les contraintes du champ estimé à l'étape 4 sont divisées par la contrainte nominale, de façon à calculer les coefficients de concentration de contraintes classiques. Un ou (des) paramètres caractéristiques de l'influence de l'état géométrique sur la tenue en fatigue peuvent alors être calculés à partir de ces coefficients.

A titre d'exemple les coefficients de concentration des contraintes maximaux sont calculés.

Un exemple d'utilisation des résultats obtenus est présenté aux figures 15 et 16 : des résultats d'essais de fatigue, représentés par la courbe de Wohler de la figure 15 ont été corrigés par les facteurs de concentration  $K_t$  des contraintes maximales obtenues (voir la figure 16). On observe, par comparaison de ces figures 15 et 16, que les écarts entre les différents états de surface sont largement atténués par la correction (multiplication) par les  $K_t$  mesurés.

Il est ainsi établi que la chaîne de mesure proposée est capable de fournir des indicateurs de qualité des états de surface des pièces destinées à être soumises à un chargement mécanique. Cette chaîne de mesure a l'avantage de ne pas passer par des paramètres géométriques et donc ne nécessite pas de connaissance a priori de l'influence d'un type accident particulier sur la durée de vie de la pièce.



## Annexe A : Les lignes des commands Scilab pour effectuer le travail d'étape 2

```

//Scilab
//Etape 2 - Echantillonnage et Modifier le profil
//      a partir d'un profil mesure par Mahr-PGK120(rugosimetrie)
//le 01 Juin 2005

clear

rugofile = 'profil_direct.TXT';
sample=550; //Nombre d'echantillonnage approximative du profil

[fr,er]=mopen(rugofile,'r');
if (er==0) then
    //Importer le fichier de profil
    mprintf('Importer `%s` \n',rugofile)
    rugo=tlist(['Point',mfscanf(fr,'%s %s %s')]);
    ind=0;
    err = meof(fr);
    while err==0,
        l=mfscanf(fr,'%f %c');
        if l(1) ==[] then break,end;
        ind = ind+1;
        resi = 0;
        pwr = 1;
        r = mfscanf(fr,'%c');
        while (r <> code2str(-40))&(r <> code2str(110)),
            resi = resi + str2code(r)/(10**pwr);
        pwr = pwr+1;
        r = mfscanf(fr,'%c');
        end,
        rugo(2)(ind)=l(1)+resi;
        r=mfscanf(fr,'%c');
    if (r=='\n') then
        dir = -1;
        l=mfscanf(fr,'%f %c');
    else
        dir = 1;
        l = 0;
        while (r <> '),
            l = l*10+str2code(r);
            r = mfscanf(fr,'%c');
        end,
    end,
    resi = 0;
    pwr = 1;
    r = mfscanf(fr,'%c');
    while (r <> code2str(-40))&(r <> code2str(110)),
        resi = resi + str2code(r)/(10**pwr);
        pwr = pwr+1;
        r = mfscanf(fr,'%c');
    end,
    rugo(4)(ind)=dir*(l(1)+resi);
    err=meof(fr);
end;
mclose(fr);

```

```
//Echantillonnage
j=1;
sample=round(ind/sample);
for i =1:ind
    if modulo(i,sample) == 0 then
        profil(j,1)=j+1;
        profil(j,2)=rugo(2)(i);
        profil(j,3)=rugo(4)(i);
        j=j+1;
    end,
end;

//Modifier le profil
moyenne = mean(profil(:,3));
arith = mad(profil(:,3));
profil(:,3)=profil(:,3)-(moyenne+arith);
profil(j,1)=j+1;
profil(j,2)=profil(j-1,2)+(profil(j-1,2)-profil(j-2,2));
profil(j,3)= 0;
save('profil.dat',profil);
end;
```

## Annexe B : Les lignes des commands Scilab pour effectuer le travail d'étape 3

```

//Scilab
//Etape 3 - Generer bankfile de calcul par Elements Finis (Samcef-asef)
//le 01 Juin 2005

clear

bankfile = 'essai.dat';
dquote = ascii(34);

fd=mopen('bankfile','w');
load('profil.dat');

// Generer Bank Ficher pour calcul par Samcef(Asef)

// Prealable
mfprintf(fd, \!***** \n...
\!* Modele EFM-2D * \n...
\!* Obj: Calculer la concentration de la contrainte* \n...
\!* Materiau: Aluminium-élastique * \n...
\!* Model: Surface mesuree * \n...
\!* Hypothese: Deformation plane * \n...
\!* Maillage: Direct tranfini * \n...
\!* CL: traction&traction chaque extremite * \n...
\!***** \n...
\!* Auteur: * \n...
\!* le %s * \n...
\!***** \n...
\!***** \n', date())

// Abreviation des variable
mfprintf(fd, '.del.* \n...
\n...
\! \n...
\! Abreviation des parametre \n...
\!===== \n...
\! \n...
\! Geometrie generale \n...
\!----- \n...
ABRE '\lepais' `5000` \t! Epaisseur \(\um\) \n...
ABRE '\lsec2' `1000` \t! Surface lisse (um) \n...
ABRE '\lmf_y' `500` \t! Epaisseur de zone maillage fin (um) \n...
ABRE '\llm' `%.2f` \t! Longueur du profil \n...
\! \n...
\! Caracteristique du Materiau \n...
\!----- \n...
ABRE '\lE_alu' `70000` \! Modulus de Young d'aluminium \(\N/mm;MPa\) \n...
ABRE '\lpoi_alu' `0.33` \! Coefficient du poissons \n...
\! \n...
\! Nombre des element \n...
\!----- \n...
ABRE '\lNE_surf' `500` \t \! Sur le profil \n...
ABRE '\lNE_sec2' `(\lsec2:(\llm:\lNE_surf))` \t \! Surface lisse \n...
ABRE '\lNE_finY' `(\lmf_y:(\llm:\lNE_surf))` \t \! Zone maillage fin \n...
ABRE '\lNE_groY' `((\lepais-\lmf_y):(\llm:\lNE_surf))` \n', profil(j,2))

```

```

// Geometrie
mfprintf(fd, '\n...'
\! A. Geometrie \n...
\!----- \n...
\! A.1. 2D-geometrie \n...
\!----- \n...
.Point \n...
\! Coordonées du profil \n')
mfprintf(fd, '\n')
mfprintf(fd, 'I %4i \t X %9.2f \t Y %9.4f \n', 1, 0, 0)
mfprintf(fd, 'I %4i \t X %9.2f \t Y %9.4f \n', profil)
mfprintf(fd, '\n...'
.Spline \n...
I 1 Point 1 a %i \n...
\n...
.Point \n...
  i 8001 x 0          y -(\mf_y) \n...
  i 8002 Rx 0        y -(\lepais) \n...
  i 8003 x -(\sec2)  y 0 \n...
  i 8004 Rx 0        y -(\mf_y) \n...
  i 8005 Rx 0        y -(\lepais) \n...
  i 8007 x (\lm)     y -(\mf_y) \n...
  i 8008 Rx 0        y -(\lepais) \n...
  i 8009 x (\lm+\sec2) y 0 \n...
  i 8010 Rx 0        y -(\mf_y) \n...
  i 8011 Rx 0        y -(\lepais) \n...
\n...
.DROIT \n...
  i 103 Point 1 8001 8002 \n...
  i 105 Point %i 8007 8008 \n...
  i 107 Point 8003 a 8005 \n...
  i 109 Point 8009 a 8011 \n...
  i 111 Point 8003 1 \n...
  i 112 Point %i 8009 \n...
  i 113 Point 8005 8002 8008 8011 \n...
\! Ligne de chargement \n...
  i 121 Point 8003 8005 \! A gauche \n...
  i 122 Point 8009 8011 \! A droite \n...
  i 123 Point 8005 8011 \! Au dessous \n'j+1,j+1,j+1)

// Maillage
mfprintf(fd, '\n...'
\! \n...
\! A.2. Maillage \n...
\!----- \n...
.CONTOUR \n...
  i 1 Ligne 105 106 114 104 103 1 \n...
  i 2 Ligne 103 104 113 108 107 111 \n...
  i 3 Ligne 105 106 115 110 109 112 \n...
\n...
.Domaine Auto \n...
\n...

```

```

.GEN \n...
!\Maille en horizontal (axe X) \n...
  modifie Ligne 111 113 \t Element (\NE_sec2:3) distribue 3 6 \n...
  modifie Ligne 112 115 \t Element (\NE_sec2:3) distribue 2 6 \n...
  modifie Ligne 1 \t Element (\NE_surf) \n...
  modifie Ligne 114 \t Element (\NE_surf) \n...
!\Maille en verticale (axe Y) \n...
  modifie Ligne 107 103 105 109 \t Element (\NE_finY) \n...
  modifie Ligne 108 104 106 110 \t Element (\NE_groY:3) distribue 2 6 \n...
\n...
!\Maille automatique \n...
deg 1 \n...
  c1 1 c2 105 106 c3 114 c4 104 103 \n...
  maille 1 transfini \n...
  c1 111 c2 103 104 c3 113 c4 108 107 \n...
  maille 2 transfini \n...
  c1 112 c2 109 110 c3 115 c4 106 105 \n...
  maille 3 transfini \n...
\n...
!\ \n...
!\ A.3. Mesh modifications \n...
!\----- \n...
\n')

// Hypothese et Groupe selection
mfprintf(fd, '\n...
!\ B. Hypothese et Materiau \n...
!\===== \n...
\n...
.MAT \n...
  I 1 Nom `Alu_elastic' \n...
  Beha %cElastic%c \n...
  Yt (\E_Al) \n...
  Nt (\Poi_Al) \n...
\n...
.AEL \n...
  ATTRIBUT 1 a 3 MAT 1 \n...
\n...
.hyp DEFO PLAN \n...
\n...
!\Selection de groupes \n...
.SEL \n...
\n...
  Groupe 1 noeuds nom %cResultat_zone%c \n...
  BOITE STRUCTURE $ \n...
  XI (1000) XS (\lm-1000) $ \n...
  YI (100) YS (-1000) $ \n...
  ZI -(1) ZS (1) \n...

\n',dquote,dquote,dquote,dquote)

```

```

// Conditions aux Limites
mfprintf(fd, '\n...
\! C. Conditions limites \n...
\!===== \n...
.CLM \n...
\n...
\! cas de charge 1 `traction` \n...
  cha Ligne 122 con 100 compo 1 nc 1 \n...
  Fix Ligne 121 compo 1 \n...
  Fix Ligne 123 compo 2 4 6 \n...
\n...
\! Donnees generales \n...
\!----- \n...
.sam nop5 1 nop6 1 \n...
.fin 1 \n')

// Post-processing
mfprintf(fd, '\!===== \n...
.Post & \n...
.Del.* \n...
.doc db %cessai%c \n...
Assign FAC %cessai_as%c \n...
.des \n...
Disc -1 \n...
mode trace = %cresult.txt%c \n...
code 1411 comp 1 \n...
groupe 2 \n...
list \n...
mode trace 0 \n...
mode trace = %cnoeuds.txt%c \n...
.no charge groupe 2 \n...
list \n...
mode trace 0 \n...
.stop \n'...
, dquote, dquote, dquote, dquote, dquote, dquote, dquote)

mclose(fd);

mprintf('Exporter `%s` \n', bankfile)

```

## REVENDEICATIONS

1. Procédé de caractérisation de la tenue en fatigue d'une pièce à partir de son état de surface comportant les étapes suivantes :

\* on relève des données géométriques décrivant le profil de surface  
5 de la zone dont la tenue en fatigue doit être déterminée,

\* on applique ces données à un modèle de calcul en sorte d'élaborer une estimation du champ des contraintes mécaniques dans ladite zone de ladite pièce,

\* on déduit de cette estimation du champ des contraintes au moins  
10 une grandeur caractéristique du comportement en fatigue de la pièce.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'étape de relèvement des données caractérisant le profil de surface de la zone comporte une sous-étape de mesure du profil de géométrie de cette zone.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'étape de  
15 relèvement des données caractérisant ce profil comporte une sous-étape d'échantillonnage.

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la sous-étape d'échantillonnage est conçue en sorte de réduire d'au moins un facteur  
10 le nombre de données caractérisant le profil de surface.

20 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que l'étape de relèvement des données caractérisant ce profil comporte une sous-étape de filtrage.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que l'étape de relèvement des données caractérisant ce profil  
25 comporte une sous-étape d'ajustage en fonction du modèle de calcul.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le modèle de calcul auquel sont appliquées les données est un modèle de calcul par éléments finis.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que le modèle  
30 de calcul intègre une épaisseur de la pièce d'au moins 0.5 mm sous la surface de ladite zone.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8,

caractérisé en ce que le modèle de calcul détermine, pour chaque élément de calcul, des valeurs de contraintes selon au moins deux axes principaux de ladite zone.

5 10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le modèle n'est appliqué qu'à au moins une distance non nulle des bords de la zone de la pièce.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que la grandeur caractéristique du comportement en fatigue est le coefficient de concentration de contraintes maximal.

10

15



1/9

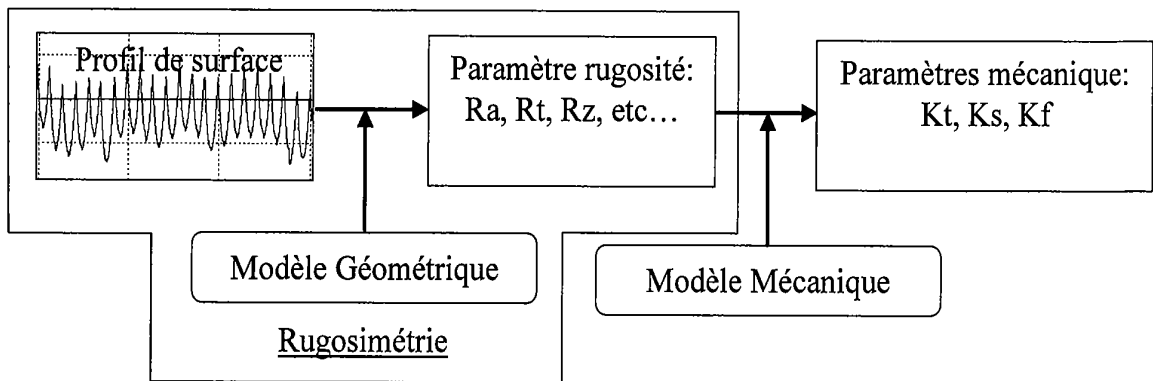


Fig. 1

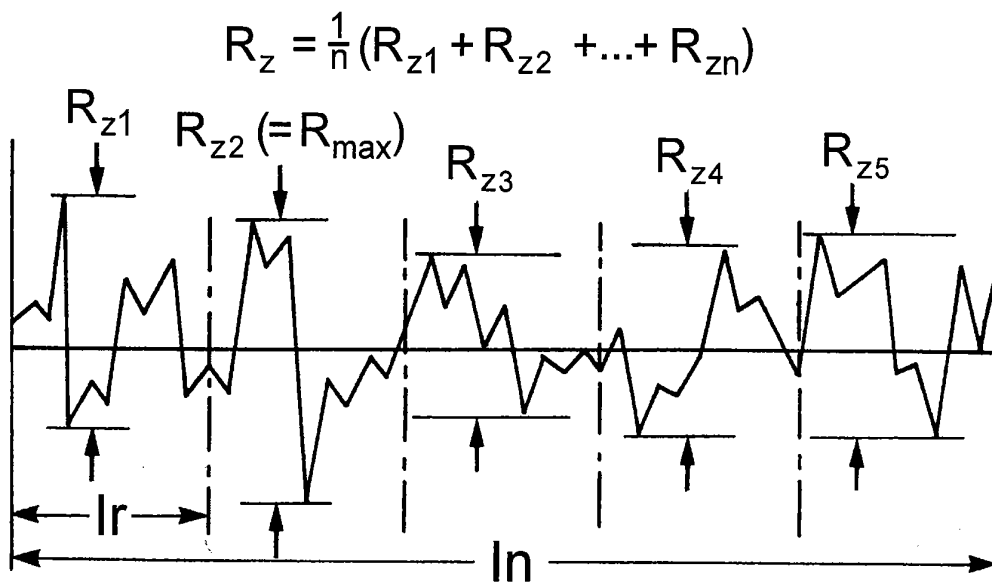


Fig. 2

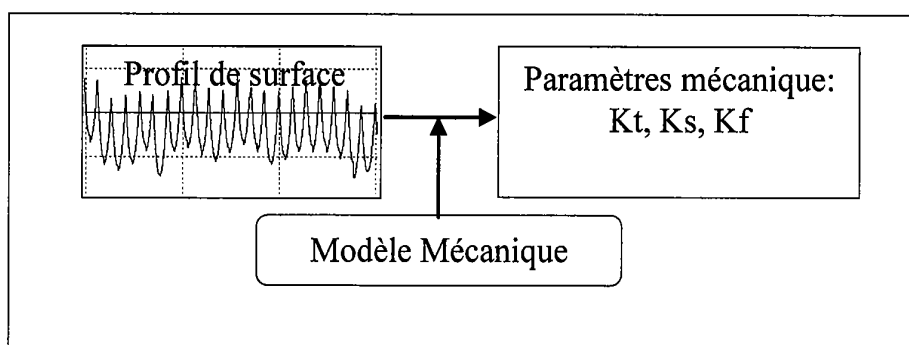


Fig. 3

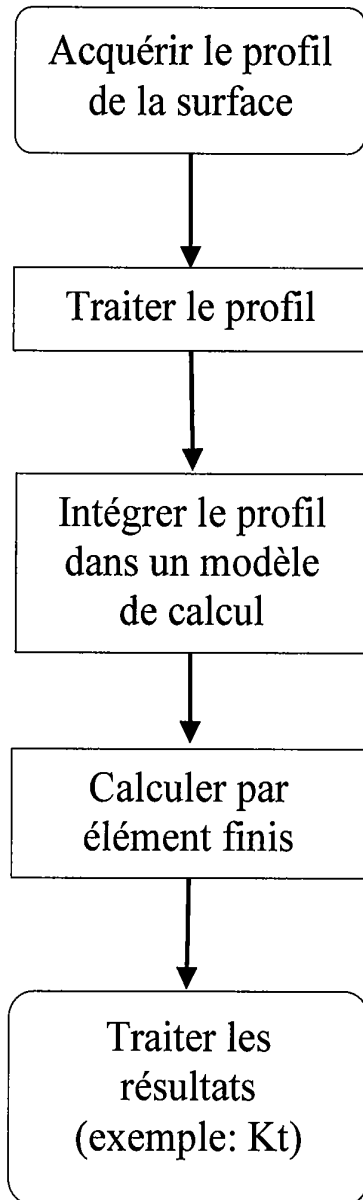


Fig. 4

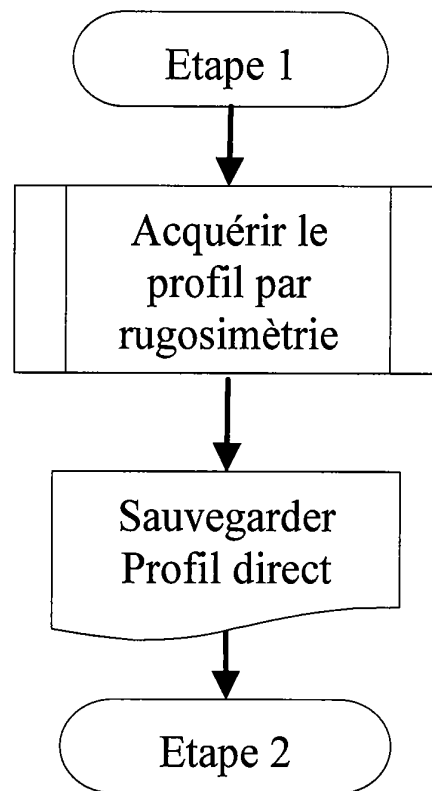


Fig. 5

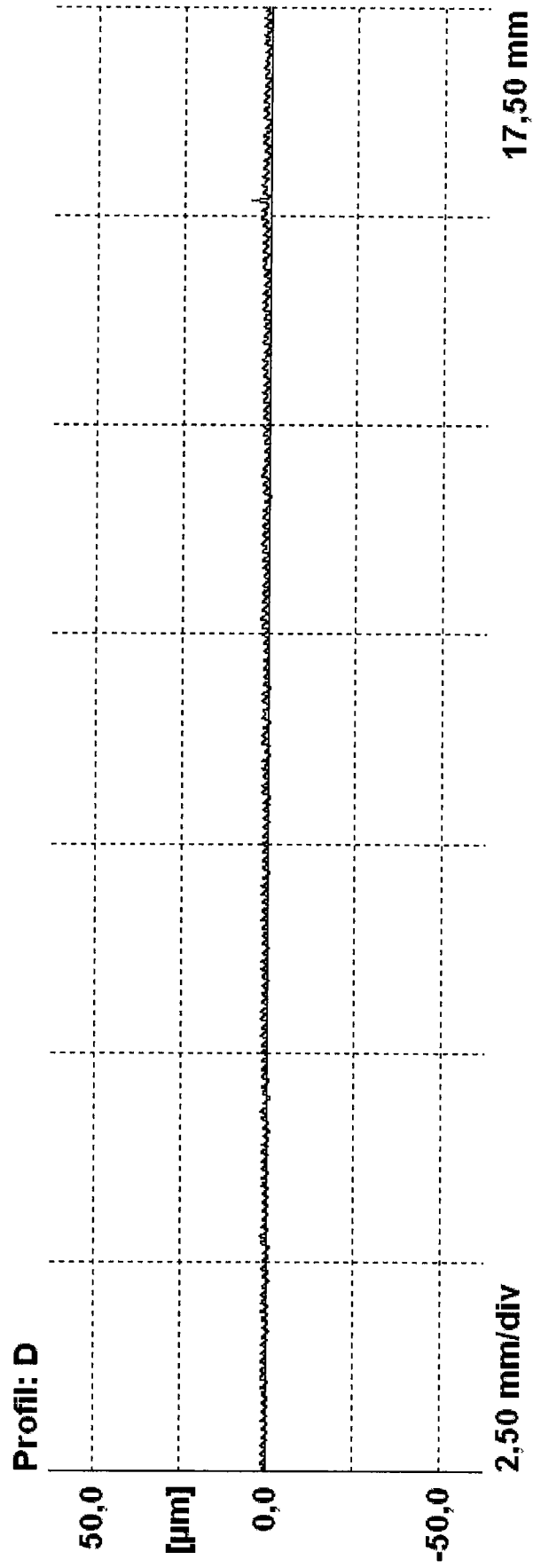


Fig. 6

4/9

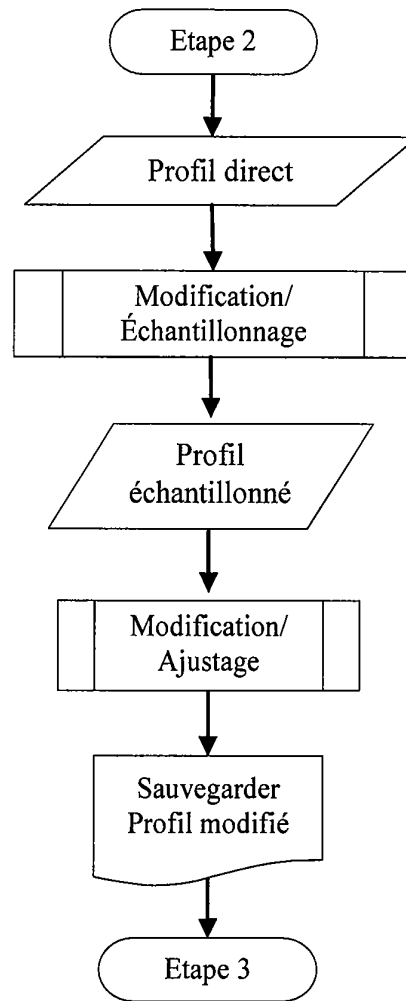


Fig. 7

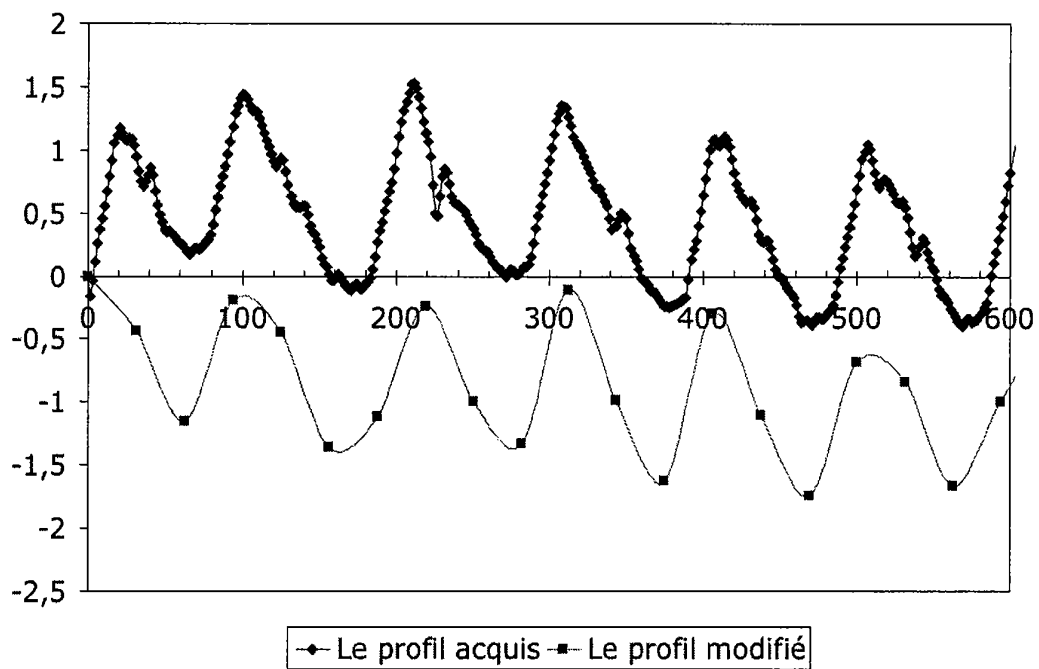


Fig. 8

5/9

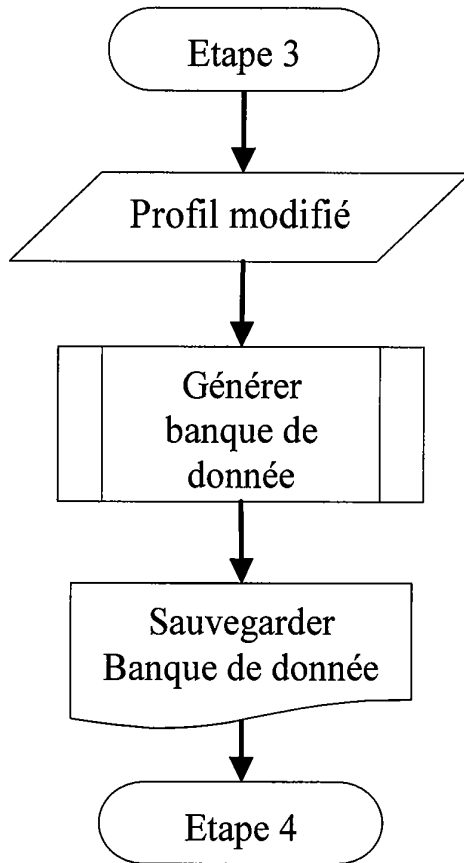


Fig. 9

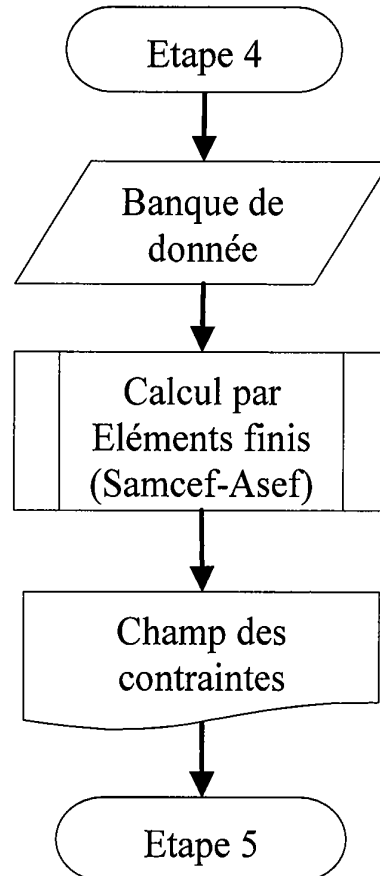


Fig. 12

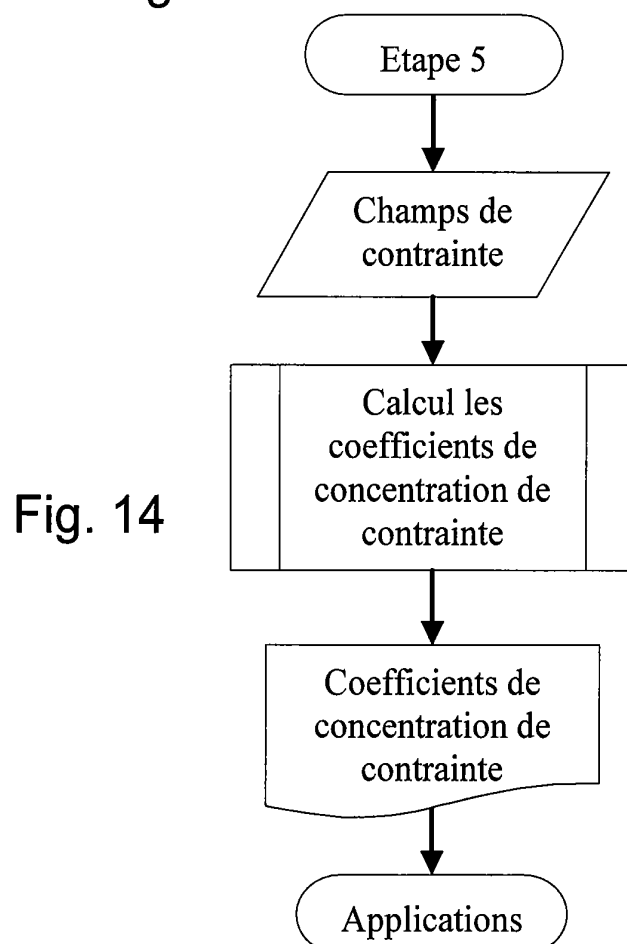


Fig. 14

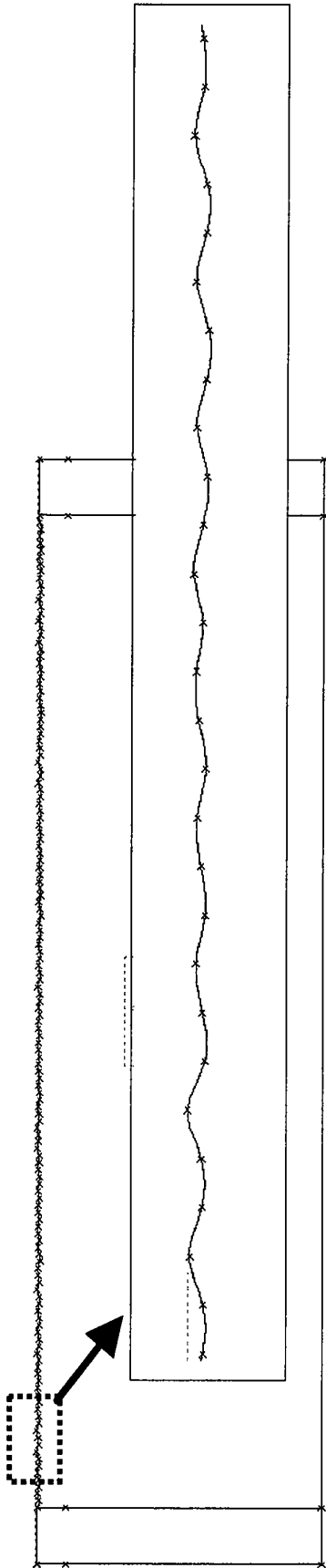


Fig. 10

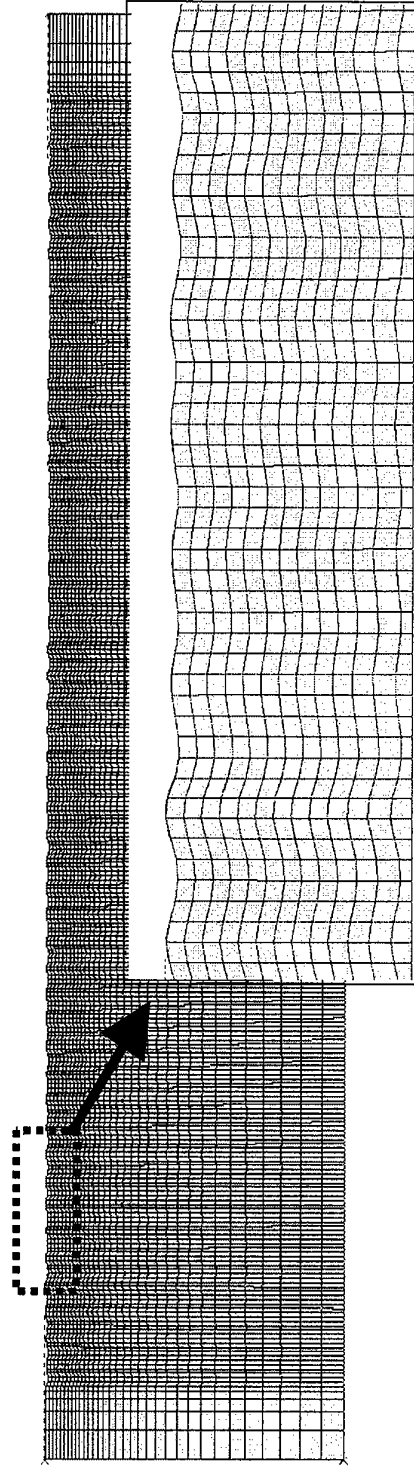


Fig. 11

Tenseur de contraintes : contraintes selon le premier axe  
Cas de charges 1  
Emery. poten. 0.1252E08  
Echelle geometrique  
1000.  
Echelle numerique 1/610. 343811

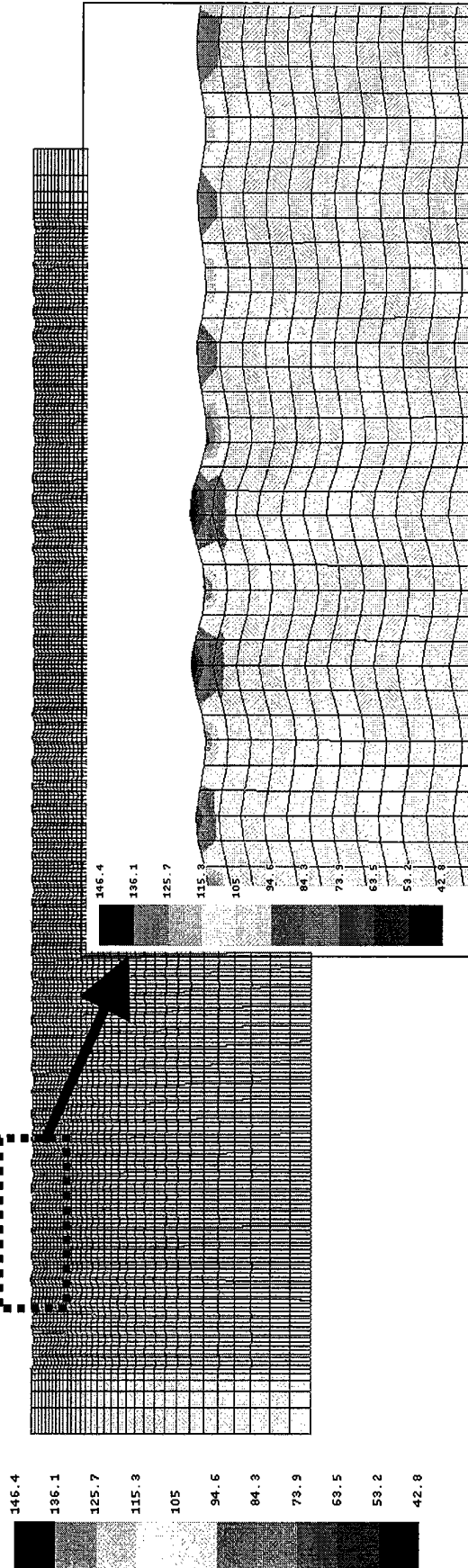


Fig. 13

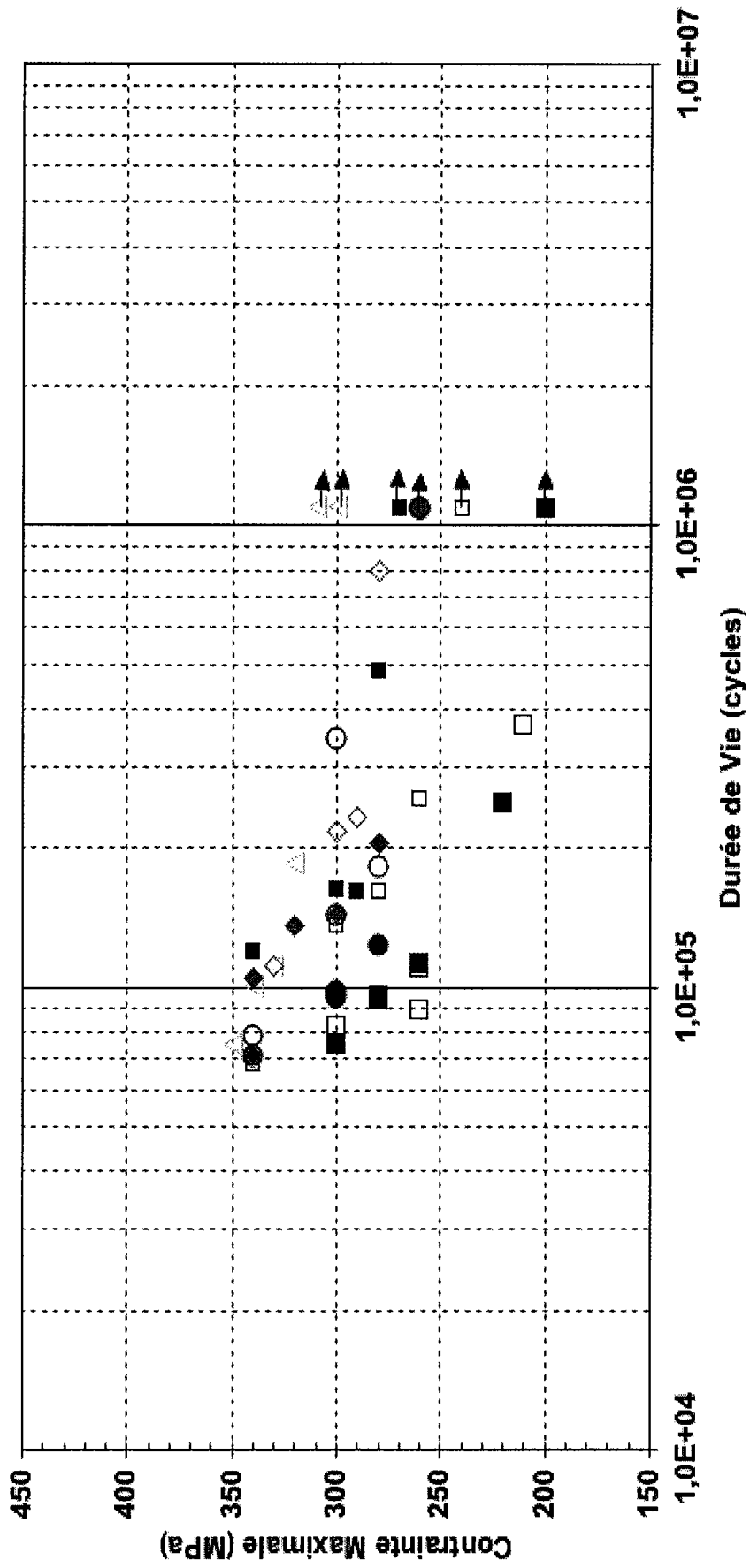


Fig. 15



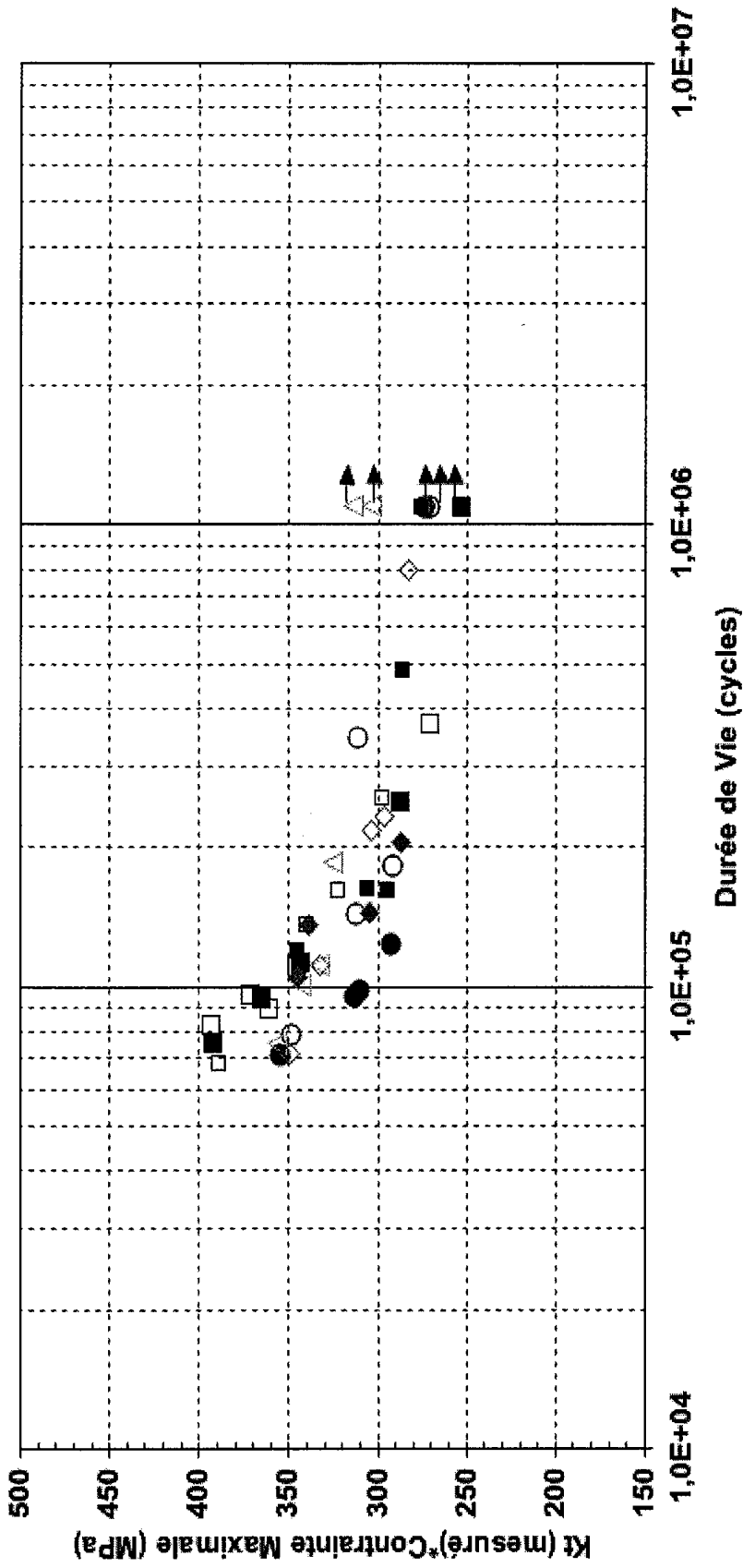


Fig. 16



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 675874  
FR 0650793

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	JP 09 304131 A (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO) 28 novembre 1997 (1997-11-28) * abrégé; figures 1-7 * * alinéa [0025] - alinéa [0049] * -----	1,2,7	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)  G01N
A	SCOTT ANDREWS, HUSEYIN SEHITOGLU: "A computer model for fatigue crack growth from rough surfaces" INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, vol. 22, no. 7, août 2000 (2000-08), pages 619-630, XP002419361 * le document en entier * -----	1-11	
A	WO 89/05448 A (BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE [US]) 15 juin 1989 (1989-06-15) * le document en entier * -----	1-11	
A	HUSEYIN SEHIGATHU, ANA MARIA GARCIA: "Contact of crack surfaces during fatigue: Part 2. Simulations" METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, vol. 28A, no. 11, novembre 1997 (1997-11), pages 2277-2289, XP009078707 * le document en entier * -----	1-11	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 février 2007		Runser, Claude	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p>		<p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0650793 FA 675874**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 09-02-2007

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 9304131	A	28-11-1997	JP 3414582 B2	09-06-2003
-----				
WO 8905448	A	15-06-1989	US 4860589 A	29-08-1989
-----				