

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
2 février 2017 (02.02.2017)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2017/017343 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G06F 17/50 (2006.01) *G01N 3/32* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2016/051853

(22) Date de dépôt international :
19 juillet 2016 (19.07.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1557145 27 juillet 2015 (27.07.2015) FR

(71) Déposant : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES [FR/FR]; 2
Boulevard du Général Martial Valin, 75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs : DESMEURE, Geoffrey, Juan; c/o Safran
Aircraft Engines PI (AJI), Rond-Point René Ravaud-Réau,
77550 Moissy-cramayel Cedex (FR). COMTE, François,
Pierre, Michel; c/o Safran Aircraft Engines PI (AJI),
Rond-Point René Ravaud-Réau, 77550 Moissy-cramayel
Cedex (FR). GAUBERT, Anaïs, Suzanne, Amélie; c/o
Safran Aircraft Engines PI (AJI), Rond-Point René Ra-
vaud-Réau, 77550 Moissy-cramayel Cedex (FR). LON-
GUET, Arnaud, Cyril; c/o Safran Aircraft Engines PI
(AJI), Rond-Point René Ravaud-Réau, 77550 Moissy-cra-

mayel Cedex (FR). CHEVALIER, Marine, Laëticia, Ca-
mille; c/o Safran Aircraft Engines PI (AJI), Rond-Point
René Ravaud-Réau, 77550 Moissy-cramayel Cedex (FR).
HANSOM, Michael, Piers; c/o Safran Aircraft Engines PI
(AJI), Rond-Point René Ravaud-Réau, 77550 Moissy-cra-
mayel Cedex (FR). LANCIAUX, Lucie, Marie, Ida; c/o
Safran Aircraft Engines PI (AJI), Rond-Point René Ra-
vaud-Réau, 77550 Moissy-cramayel Cedex (FR).

(74) Mandataires : DUFLOS, Bertrand et al.; Cabinet BEAU
DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université, 75340 Paris Ce-
dex 07 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR DETERMINING AN ACCEPTABLE MAXIMUM ALTERNATING STRESS FOR A PART SUBJEC-
TED TO CYCLIC SOLICITATIONS; UNIT FOR DETERMINING SUCH A STRESS

(54) Titre : PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION D'UNE CONTRAINTE ALTERNÉE MAXIMALE ADMISSIBLE POUR UNE
PIÈCE SOUMISE A DES SOLICITATIONS CYCLIQUES; UNITÉ DE DÉTERMINATION D'UNE TELLE CONTRAINTE

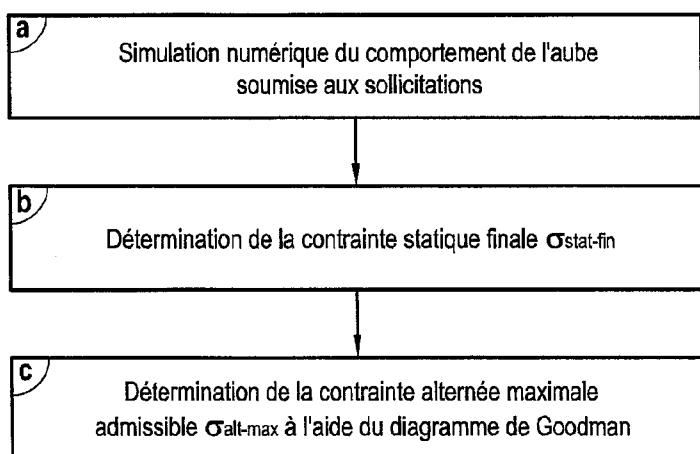


FIG.7

- a Numerical simulation of the behaviour of the vane subjected to the
solicitations
b Determination of the final static constraint $\sigma_{stat-fin}$
c Determination of the acceptable maximum alternating stress $\sigma_{alt-max}$
using a Goodman diagram

(57) Abstract : Method for determining an acceptable
maximum alternating stress ($\delta_{alt-max}$) at a point (P) of a
part (50) subject to cyclic solicitations (F) wherein: a)
assuming that the part has an elasto-viscoplastic
(EVP) behaviour, the part is simulated as undergoing
constant solicitations equal to a threshold value (F_{moy})
during a plateau period (P2); b) on the basis of the re-
sults of the simulation, a final static stress ($\delta_{stat-fin}$) is
determined at said point (P), at the end or after the end
of the plateau period; and c) for the point (P) in ques-
tion, the acceptable maximum alternating stress
($\delta_{alt-max}$) is determined using a Goodman diagram, said
stress being determined for a static stress equal to the
final static stress ($\delta_{stat-fin}$), the duration (D) of the pla-
teau period being equal to the duration of solicitation
of the samples that were used to establish the Good-
man diagram.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

Procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible (δ_{alt_max}) en un point (P) d'une pièce (50) soumise à des sollicitations (F) cycliques : a) on simule que la pièce, pendant une période de palier (P2), subit des sollicitations constantes égales à une valeur seuil (F_{moy}), en supposant que la pièce a un comportement élasto-viscoplastique (EVP); b) à partir des résultats de la simulation, on détermine une contrainte statique finale (δ_{stat_fin}) audit point (P), à la fin ou postérieurement à la fin de la période de palier; et c) pour le point (P) considéré, on détermine à l'aide d'un diagramme de Goodman la contrainte alternée maximale admissible (δ_{alt_max}), celle-ci étant déterminée pour une contrainte statique égale à la contrainte statique finale (δ_{stat_fin}); la durée (D) de la période de palier étant égale à la durée de sollicitation des éprouvettes ayant servi à établir le diagramme de Goodman.

Procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale
admissible pour une pièce soumise à des sollicitations cycliques ;
Unité de détermination d'une telle contrainte

5

DOMAINE DE L'INVENTION

L'invention concerne les moyens et les procédés servant à déterminer la contrainte alternée maximale admissible en un point d'une pièce susceptible d'être soumise à des sollicitations sensiblement cycliques. De telles sollicitations sont typiquement les forces centrifuges subies par les pièces en rotation de machines tournantes, ou encore des sollicitations subies par des pièces statiques, mais disposées à proximité de pièces en rotation.

10

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE

L'invention se place dans le cadre de certaines hypothèses de modélisation, présentées ci-dessous. Ces hypothèses en elles-mêmes sont connues en mécanique, pour l'étude du comportement dynamique des pièces.

15

Selon ces hypothèses, on considère que la contrainte σ qui se développe au sein d'une pièce soumise à des sollicitations cycliques est la somme de deux termes : un terme de contrainte statique σ_{stat} , qui est la partie de la contrainte à évolution lente ; et un terme de contrainte alternée σ_{alt} , qui est la partie de la contrainte à évolution rapide ; ce dernier terme contient notamment les variations cycliques ou sensiblement cycliques de la contrainte, dont la fréquence est sensiblement plus élevée que celle de la contrainte statique σ_{stat} .

20

25

La contrainte statique σ_{stat} peut donc être considérée comme une valeur lissée dans le temps de la contrainte (totale) σ .

On considère donc que le tenseur des contraintes statiques et le tenseur des contraintes alternées sont liés par l'équation :

30

$$\sigma = \sigma_{stat} + \sigma_{alt}$$

La 'contrainte alternée maximale admissible', notée σ_{alt_max} , pour un matériau soumis à des sollicitations cycliques, désigne la contrainte alternée maximale que peut supporter le matériau lorsqu'il est soumis à un nombre de cycles de sollicitations prédéterminé. Cette contrainte

35

alternée maximale admissible σ_{alt_max} est définie à un instant donné en fonction de la contrainte statique σ_{stat} subie par le matériau à cet instant, la valeur de cette contrainte statique σ_{stat} résultant quant à elle des différentes sollicitations appliquées à la pièce.

- 5 Habituellement, la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} relative à un matériau est déterminée en effectuant des tests de sollicitations cycliques sur des éprouvettes constituées dans ce matériau. Ces tests sont réalisés à une température et pour un nombre de cycles prédéterminés. Cette température prédéterminée correspond
10 habituellement à la température auquel le matériau est porté en exploitation ; le nombre de cycles est défini en fonction du nombre de cycles de sollicitations auxquels le matériau est soumis durant la durée de vie prévisionnelle de la pièce dont il fait partie.

- Le terme 'pièce' désigne ici indifféremment soit une pièce formée
15 intégralement, soit un ensemble de pièces distinctes reliées ensemble. Il désigne ici essentiellement des pièces rigides (ou sensiblement rigides) et exclut les ensembles articulés et les fluides.

- Les tests de sollicitations cycliques indiqués précédemment sont réalisés pour différentes valeurs de sollicitations et permettent d'établir un
20 diagramme de Goodman du matériau, de manière connue en soi.

- Un diagramme de Goodman est un diagramme représentant en abscisse, les contraintes statiques subies par le matériau, et en ordonnée, les contraintes alternées subies par celui-ci. Ce diagramme représente, en fonction de la contrainte statique subie par le matériau, la contrainte
25 alternée maximale admissible qui peut être subie par celui-ci sans qu'il ne se rompe alors qu'il est soumis au nombre de cycles de sollicitations prédéterminé (par exemple, 10^7 cycles) en étant porté à la température également prédéterminée.

- Aussi, pour déterminer si une pièce, définie notamment par sa
30 géométrie (son modèle tridimensionnel) et son matériau, est apte à supporter les sollicitations mécaniques qu'il est prévu qu'elle subisse, on procède habituellement de la façon suivante :

a) on simule numériquement le comportement de la pièce pendant une certaine période de temps, durant laquelle celle-ci est soumise aux

sollicitations envisagées ; la simulation est effectuée en prenant en compte pour le matériau un modèle de comportement élastique ;

b) on détermine à la fin de la simulation la contrainte statique et la contrainte alternée subies au point de la pièce considéré ;

- 5 c) pour cette valeur de la contrainte statique, on détermine à l'aide du diagramme de Goodman (établi par la méthode décrite précédemment) si la contrainte alternée dans le matériau au point considéré est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible.

Or, il s'est avéré lors notamment du développement de pièces
10 exposées à des températures élevées, et notamment soumises à des sollicitations à relativement haute fréquence (plus de 1000 Hz), par exemples des aubes de turbine haute pression de turbomachine aéronautique, que la méthode précédente ne donne pas des résultats satisfaisants. Cette méthode conduirait en effet à interdire l'emploi de
15 certains matériaux pour certaines applications, ou certaines géométries de pièces, alors qu'en pratique, l'expérience démontre que ces matériaux et/ou ces géométries de pièces peuvent être choisis pour les applications considérées.

Ce phénomène peut être mieux compris grâce à la figure 1.

- 20 Cette figure présente le diagramme de Goodman associé à un matériau (courbe 10), en comparaison avec une courbe théorique correspondant au comportement réel du matériau (courbe 12).

Sur cette figure, l'axe des abscisses indique la contrainte statique σ_{stat} dans le matériau au point considéré, et l'axe des ordonnées indique la
25 contrainte alternée σ_{alt} en ce point.

La courbe 10 est la courbe du diagramme de Goodman représentant le comportement du matériau considéré, à une température donnée T, et pour un nombre de cycles N prédéterminé (en l'occurrence, 10^7 cycles).

- 30 Les points de la courbe 10 sont les points pour lesquels, la rupture du matériau se produit juste à l'issue du nombre de cycles N, à savoir 10^7 cycles. Par conséquent, les points du diagramme qui se trouvent sous la courbe 10 ont des valeurs de contrainte statique σ_{stat} et de contrainte alternée σ_{alt} pour lesquelles la rupture du matériau se produit pour un
35 nombre de cycles supérieur à 10^7 , alors qu'inversement, pour les points du

diagramme qui se trouvent au-dessus de la courbe 10 ont des valeurs de contrainte statique σ_{stat} et de contrainte alternée σ_{alt} pour lesquelles la rupture du matériau se produit pour un nombre de cycles inférieur à 10^7 .

La courbe 10 est une courbe établie en réalisant des essais de traction cycliques sur des éprouvettes constituées par le matériau considéré, porté à la température T , pour différentes valeurs de contraintes statiques σ_{stat} .

Du fait des limitations des machines de test en traction, qui en pratique ne peuvent fonctionner à des fréquences supérieures à 100Hz, les diagrammes de Goodman sont représentatifs du comportement du matériau principalement lorsque les sollicitations appliquées au matériau varient à une fréquence également inférieure ou égale à 100Hz.

Comme on peut le comprendre, ces conditions sont trop restrictives et bien souvent ne représentent pas les fréquences des sollicitations effectivement appliquées aux pièces, qui peuvent être bien plus élevées.

D'après le diagramme de Goodman, il ne devrait pas être possible d'exploiter des pièces dans lesquelles la contrainte statique subie par le matériau est supérieure à une valeur σ_{max} représentée sur la Fig.1.

Or, il s'est avéré en pratique que de nombreuses pièces supportent de telles contraintes.

On peut en déduire que la courbe qui devrait être tracée pour représenter le comportement réel du matériau, n'est pas la courbe 10 mais une courbe du type de la courbe 12, décalée par rapport à la courbe 10.

Par conséquent, un diagramme de Goodman tel que celui présenté ci-dessus, et le procédé de vérification de l'aptitude d'une pièce à subir certaines sollicitations, tel que défini ci-dessus par les étapes a) à c), ne peuvent pas toujours être utilisés pour évaluer de manière réaliste si une pièce, définie notamment par sa géométrie et son matériau, est apte à subir un certain nombre de sollicitations cycliques prédéterminées sans se rompre.

PRESENTATION DE L'INVENTION

L'objectif de l'invention est donc de surmonter les carences présentées ci-dessus.

Dans ce but, selon l'invention il est proposé un procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible en un point d'une pièce susceptible d'être soumise à des sollicitations sensiblement cycliques, qui fournit une valeur de la contrainte alternée maximale admissible pour le point de la pièce considéré.

Les valeurs de contrainte alternée maximale admissible ainsi déterminées peuvent être utilisées pour vérifier que la contrainte alternée ne dépasse la contrainte alternée maximale admissible en aucun point de la pièce considérée.

Ce résultat est atteint grâce au fait que le procédé comporte les étapes suivantes :

a) on simule numériquement que la pièce, pendant une période de palier, subit des sollicitations constantes égales à une valeur seuil ;

la simulation prenant en compte un modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP) pour un matériau constituant la pièce au point considéré ;

b) à partir des résultats de la simulation, on détermine une contrainte statique finale audit point, à la fin ou postérieurement à la fin de la période de palier ; et

c) pour le point de la pièce considéré, on détermine à l'aide d'un premier diagramme de Goodman la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} , celle-ci étant déterminée pour une contrainte statique égale à la contrainte de fin de palier σ_{stat_fin} ;

la durée de la période de palier étant sensiblement égale à la durée de sollicitation des éprouvettes ayant servi à établir ledit premier diagramme de Goodman.

Dans le procédé tel que défini ci-dessus, les différentes contraintes mentionnées (par exemple la contrainte statique, etc.), sont soit des tenseurs, soit des grandeurs scalaires (des nombres réels) ; la nature de la contrainte considérée doit être déterminée en fonction du contexte.

En particulier lors de l'étape b), la contrainte statique finale que fournit la simulation numérique est généralement un tenseur.

A partir de cette valeur du tenseur, on calcule pour l'instant de fin de palier la contrainte statique finale σ_{stat_fin} : celle-ci est calculée sous forme scalaire.

C'est cette valeur $\sigma_{\text{stat_fin}}$ (scalaire) qui est utilisée à l'étape c) pour déterminer la contrainte alternée maximale admissible $\sigma_{\text{alt_max}}$.

La valeur sous forme scalaire de la contrainte peut être calculée de différentes manières en fonction du tenseur des contraintes dans la pièce.

- 5 Habituellement, on choisit comme contrainte scalaire la contrainte de Von Mises ; cependant, tout en restant dans le cadre de l'invention, la valeur de la contrainte sous forme scalaire peut être définie de manière différente à partir du tenseur des contraintes. Elle peut par exemple être une contrainte principale maximale, ou autre.

- 10 Avantageusement, l'invention est applicable à des pièces soumises à des sollicitations de toute nature : mécaniques, thermiques, ou autre.

Les sollicitations peuvent comprendre des forces ponctuelles, linéiques et/ou surfaciques.

- 15 Des sollicitations sous forme de champ de force ou assimilables à un champ de force, comme les forces centrifuges, peuvent naturellement être également prises en compte en tant que sollicitations dans le cadre de l'invention.

- 20 Les sollicitations peuvent également être définies sous forme de conditions aux limites, comme par exemple des conditions aux limites de position, vitesse, et/ou accélération.

- 25 On comprend que dans le procédé défini précédemment, l'étape a) de simulation peut comporter non seulement la période de palier, mais également d'autres périodes pendant lesquelles le comportement de la pièce est simulé, ces périodes pouvant s'étendre avant et/ou après la période de palier.

- 30 Ainsi, dans un mode de réalisation préférentiel, à l'étape a), on simule numériquement que la pièce, avant la période de palier, subit des sollicitations variant depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur-seuil, durant une période de montée en charge. La prise en compte dans la simulation de cette période de montée en charge permet de représenter de manière plus réaliste l'élévation des contraintes dans la pièce sous l'effet des sollicitations appliquées.

Une caractéristique importante du procédé selon l'invention défini précédemment est qu'il prend en compte, pour représenter le

comportement du matériau, un modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP).

La simulation effectuée en prenant en compte, pour le matériau, « un modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP) », est une
5 simulation de matériau dans laquelle :

. la déformation ε du matériau est la somme d'un terme traduisant sa déformation élastique ε_e et d'un terme traduisant sa déformation viscoplastique ε_p ; et

. la contrainte σ subie par le matériau est fonction notamment de la
10 vitesse de déformation plastique du matériau $d\varepsilon_p/dt$.

Dans le cadre de l'invention, tout modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP) peut être utilisé.

L'étape a) de simulation numérique du comportement de la pièce peut se faire en prenant en compte le comportement élasto-viscoplastique (EVP) du matériau soit au cours même des étapes itératives de calcul, soit
15 en post-traitement.

Dans le premier cas, pendant l'étape de simulation a), en chaque point du matériau au moins dans la zone étudiée de la pièce, la déformation ε indiquée ci-dessus est égale à la somme d'un terme de
20 déformation élastique ε_e et d'un terme de déformation plastique ε_p .

Avantageusement lors de la mise en œuvre de l'invention, il n'est pas nécessaire de faire l'hypothèse d'un comportement élasto-viscoplastique du matériau pour l'ensemble de la pièce : On peut se contenter de faire cette hypothèse pour la partie de la pièce que l'on souhaite
25 étudier précisément ; pour le reste de la pièce, des hypothèses de comportement différentes plus simples peuvent être utilisées, par exemple un modèle de comportement élastique pour le matériau. Cette dernière hypothèse peut par exemple être retenue pour les parties de la pièce qui sont éloignées des zones critiques.

30

Dans le deuxième cas (prise en compte du comportement élasto-visco-plastique du matériau en post-traitement), la simulation comporte deux étapes :

a1) on calcule une déformation 'élastique' ε_e du matériau, par un
35 calcul de type élastique ; puis

a2) on détermine la déformation ε du matériau en faisant la somme de la déformation brute ε_e calculée précédemment et d'un terme correctif ε_p . Ce terme correctif traduit la déformation visco-plastique ε_p du matériau ; il peut par exemple être déterminé sur la base d'une
5 équivalence énergétique locale ou en suivant une approche par changement d'échelle.

Dans ce deuxième cas, à l'issue de la deuxième étape de calcul, on obtient une estimation de la déformation totale qui comprend une partie plastique ou visco-plastique.

10 Le procédé est particulièrement utile pour déterminer la contrainte alternée maximale admissible pour des pièces soumises à des températures élevées, c'est-à-dire plus précisément des températures déclenchant de manière notable un endommagement du matériau par fluage. Ces températures peuvent être par exemple des températures
15 supérieures à 750°C, pour lesquelles la méthode traditionnelle présentée en introduction s'avère particulièrement imprécise.

Avantageusement, du fait du modèle de comportement de matériau utilisé, le procédé selon l'invention fournit des résultats satisfaisants dans une large plage de rapports de charge R.

20 Par rapport de charge, on désigne le paramètre R suivant :

$$R = (\sigma_{\text{stat}} - \sigma_{\text{alt}}) / (\sigma_{\text{stat}} + \sigma_{\text{alt}})$$

Lorsque le rapport de charge R est faible, la contrainte statique σ_{stat} est faible ; la contrainte alternée a éventuellement une importance prépondérante ; le phénomène de fatigue a un rôle prépondérant
25 notamment par rapport au phénomène de fluage.

Inversement, lorsque le rapport de charge R est élevé, la contrainte statique σ_{stat} est élevée ; la contrainte alternée a alors au contraire normalement une importance mineure ; le phénomène de fluage a un rôle prépondérant notamment par rapport au phénomène de fatigue.

30 Avantageusement, l'utilisation d'un modèle élasto-viscoplastique permet de prendre en compte ces deux phénomènes simultanés (fluage et fatigue), notamment par la prise en compte de déformations élastiques ε_e et de déformations visco-plastiques ε_p ; il permet de plus de prendre en compte la dynamique du chargement appliqué au matériau du fait que la

vitesse de déformation plastique intervient dans le calcul de la contrainte subie par le matériau.

Plus particulièrement, le phénomène de fluage dans le matériau est pris en compte grâce au fait que l'on simule que l'on applique au matériau des sollicitations présentant un palier, pendant une certaine période
5 durant laquelle les sollicitations sont stabilisées à la valeur seuil.

En effet, il s'est avéré que, bien que les sollicitations réelles appliquées à la pièce soient cycliques, une simulation simplifiée, prenant en compte non pas des sollicitations cycliques, mais des sollicitations
10 présentant un palier, fournit des résultats quant à la contrainte statique σ_{stat} proches de ceux obtenus quand on prend en compte les sollicitations cycliques, et par conséquent exploitables.

Dans ce but, en ce qui concerne la durée du palier, il convient de choisir une durée sensiblement égale à la durée de sollicitation des
15 éprouvettes ayant servi à tracer le diagramme de Goodman utilisé à l'étape c). Par 'sensiblement égale', on désigne ici une durée de palier égale à la durée du diagramme de Goodman +/- 30%, et de préférence égale à la durée du diagramme de Goodman +/- 15%. La durée du palier simulé est donc sans relation avec la durée réelle d'exploitation de la pièce
20 ou durée de vie.

Le diagramme de Goodman est établi en appliquant un nombre N de cycles fixé à la pièce, à une fréquence f prédéterminée. La durée du diagramme de Goodman est égale à la durée qui a été nécessaire pour réaliser le nombre N de cycles prévu, et est égale au rapport N/f entre ce
25 nombre de cycles N et la fréquence f.

Le diagramme de Goodman doit de préférence être obtenu ou estimé pour la même température que celle du matériau pendant la simulation (étape a).

Avantageusement, dans le procédé selon l'invention, les
30 sollicitations appliquées à la pièce lors de l'étape de simulation numérique (étape a) sont particulièrement simples, puisqu'elles sont constantes pendant la période de palier. Elles sont notamment bien plus simples que les contraintes cycliques appliquées réellement au matériau.

Avantageusement, le procédé selon l'invention peut être mis en
35 œuvre en un temps de calcul particulièrement court, contrairement à

d'autres procédés par simulation dans lesquels l'application de sollicitations alternées à la pièce devrait être simulée.

Avantageusement, le procédé selon l'invention est indépendant de la fréquence et/ou de l'amplitude des sollicitations appliquées à la pièce.

5 Par suite, le procédé s'affranchit des problèmes rencontrés dans les méthodes antérieures.

Les sollicitations appliquées au matériau lors de la simulation (étape a) peuvent inclure une période de montée en charge avant la période de palier.

10 Cette période de montée en charge est une période durant laquelle les sollicitations (simulées) appliquées à la pièce évoluent depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur-seuil.

Dans le cadre de l'invention, pendant la montée en charge les sollicitations peuvent soit varier de manière croissante (à aucun moment, ces sollicitations ne décroissent), ou au contraire de manière non monotone, c'est-à-dire que la montée en charge inclut alors au moins une période de croissance des sollicitations et au moins une période de diminution des sollicitations. La montée en charge peut inclure par exemple plusieurs phases alternées de croissance et de diminution des sollicitations appliquées à la pièce. Ces phases alternées visent par exemple à reproduire les sollicitations appliquées à la pièce pendant son rodage.

20 Dans un mode de réalisation, la contrainte statique finale déterminée à l'étape b) est la contrainte au point considéré à la fin de la période de palier (Dans ce cas, il n'y a pas lieu de simuler le comportement de la pièce après la période de palier).

Inversement, dans un autre mode de réalisation, à l'étape a), on simule numériquement que la pièce, après la période de palier, subit des sollicitations variables pendant une période finale postérieure à la période de palier. La contrainte statique finale déterminée à l'étape b) est alors une contrainte 'de fin de période finale', déterminée au point considéré à la fin de ladite période finale.

35 Dans le cas où les pièces évaluées sont des aubes de turbomachine d'aéronef, la période finale, qui suit la période de palier et pendant laquelle la pièce est soumise à des sollicitations variables en fonction du

temps, peut correspondre par exemple à une phase de redescende de l'aéronef en fin de vol.

5 Dans un mode de mise en œuvre, à l'étape c), la contrainte alternée maximale admissible est déterminée à l'aide d'un diagramme de Goodman obtenu par corrélation ou interpolation entre au moins deux diagrammes de Goodman. Ces derniers diagrammes de Goodman peuvent être notamment des diagrammes de Goodman obtenus directement en effectuant des tests sur des éprouvettes.

10 Le procédé selon l'invention est particulièrement adapté pour la détermination de la contrainte alternée maximale admissible pour une pièce de machine tournante, notamment une pièce d'un rotor, comme par exemple une aube. En particulier, lorsque la pièce est une pièce d'un moteur d'aéronef, dans un mode de mise en œuvre lors de l'étape a) la valeur seuil des sollicitations appliquées pendant la période de palier est
15 égale à une valeur moyenne de sollicitations subies par la pièce lors d'un décollage de l'aéronef.

Le procédé selon l'invention est particulièrement adapté pour la détermination de la contrainte alternée maximale admissible pour une pièce constituée d'un alliage métallique, notamment d'un alliage de titane
20 ou de nickel.

Avantageusement, l'invention peut être utilisée pour qualifier des pièces. Elle permet alors de déterminer l'aptitude de ces pièces à subir les sollicitations cycliques auxquelles on prévoit que les pièces seront exposées.

25 Dans ce but, l'invention concerne également un procédé de vérification de l'aptitude d'une pièce à être soumise à des sollicitations sensiblement cycliques, le procédé comportant les étapes suivantes :

A. On détermine une contrainte alternée maximale admissible en au moins un point de la pièce lorsque celle-ci est soumise auxdites sollicitations, au moyen du procédé de détermination de contrainte
30 alternée maximale admissible décrit précédemment ;

B. on évalue audit au moins un point de la pièce la contrainte alternée subie en ledit au moins un point ;

C. on vérifie pour chacun dudit ou desdits au moins un point que la
35 contrainte alternée est inférieure à la contrainte alternée maximale

admissible au point considéré et on conclut que la pièce n'est pas apte à être soumises auxdites sollicitations si la vérification est négative pour au moins un point.

Les étapes A et B de ce procédé peuvent naturellement être
5 réalisées dans un ordre quelconque ou en parallèle.

L'étape B est réalisée en général en procédant à des essais réels de la pièce.

La vérification indiquée ci-dessus n'est pas faite en tout point de la pièce. Elle n'est faite en général qu'en un nombre limité de points, dits
10 points de contrôle. Eventuellement, lorsque la pièce est modélisée par éléments finis, tous les sommets des éléments finis représentant la pièce peuvent être choisis comme points de contrôle.

Dans un mode particulier de réalisation, les différentes étapes du
15 procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible ou du procédé de vérification d'aptitude d'une pièce selon l'invention sont déterminées par des instructions de programmes d'ordinateurs.

En conséquence, l'invention vise aussi un programme d'ordinateur sur un support d'informations, ce programme étant susceptible d'être mis
20 en œuvre dans un ordinateur, ce programme comportant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes d'un procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible ou d'un procédé de vérification d'aptitude d'une pièce tel que décrit précédemment, lorsque le programme est exécuté sur un ordinateur.

Ce programme peut utiliser n'importe quel langage de
25 programmation, et être sous la forme de code source, code objet, ou de code intermédiaire entre code source et code objet, tel que dans une forme partiellement compilée, ou dans n'importe quelle autre forme souhaitable.

L'invention vise aussi un support d'informations lisible par un
30 ordinateur, et comportant les instructions d'un programme d'ordinateur tel que mentionné ci-dessus.

Le support d'informations peut être n'importe quelle entité ou
dispositif capable de stocker le programme. Par exemple, le support peut
35 comporter un moyen de stockage, tel qu'une ROM, par exemple un CD

ROM ou une ROM de circuit microélectronique, ou encore un moyen d'enregistrement magnétique, par exemple une disquette (floppy disc) ou un disque dur.

5 D'autre part, le support d'informations est généralement un support d'informations non volatiles. Cela étant, le programme selon l'invention peut être en particulier téléchargé sur un réseau de type Internet. Alternativement, le support d'informations peut être un circuit intégré dans lequel le programme est incorporé, le circuit étant adapté pour exécuter ou pour être utilisé dans l'exécution du procédé en question.

10

L'invention concerne également une unité de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible en un point d'une pièce susceptible d'être soumise à des sollicitations sensiblement cycliques, comprenant :

15 - un module de simulation, configuré pour simuler numériquement que la pièce, pendant une période de palier, subit des sollicitations constantes égales à une valeur seuil ;

le module de simulation prenant en compte un modèle de comportement élasto-viscoplastique pour un matériau constituant la
20 pièce au point considéré ;

- un module de détermination de contrainte statique, configuré pour déterminer une contrainte statique audit point de la pièce à la fin ou postérieurement à la fin de la période de palier ; et

25 - un module de détermination de contrainte alternée maximale admissible, configuré pour déterminer à l'aide d'un premier diagramme de Goodman la contrainte alternée maximale admissible, celle-ci étant déterminée pour une contrainte statique égale à la contrainte statique finale ;

la durée de la période de palier étant sensiblement égale à la durée de sollicitation des éprouvettes ayant servi à établir ledit premier
30 diagramme de Goodman.

Enfin, l'invention concerne également un système de qualification d'une pièce susceptible d'être soumise à des sollicitations mécaniques sensiblement cycliques, comprenant :

35 - Une unité de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible telle que définie ci-dessus, configurée pour déterminer une

contrainte alternée maximale admissible au moins en un point de la pièce lorsque celle-ci est soumise auxdites sollicitations ;

- Une unité d'acquisition de contrainte alternée, configurée pour acquérir la contrainte alternée en ledit au moins un point ;

- 5 - Une unité de contrôle, configurée pour vérifier pour chacun dudit ou desdits au moins un point que la contrainte alternée est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible au point considéré et indiquer que la pièce n'est pas qualifiée si la vérification est négative pour au moins un point.

10

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée qui suit, de modes de réalisation représentés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux

15 dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1, déjà décrite, est une vue schématique fondée sur un diagramme de Goodman traditionnel, auquel est superposée une courbe correspondant à un diagramme de Goodman effectif ;

- 20 - la figure 2 est une vue schématique d'une turbomachine dont certaines aubes ont été contrôlées suivant un mode de mise en œuvre du procédé de vérification d'aptitude de pièces conforme à l'invention ;

- la figure 3 est une vue schématique présentant des sollicitations appliquées à une pièce, notamment des sollicitations cycliques, lors d'une simulation.

- 25 - la figure 4 est une vue schématique présentant les variations de la contrainte dans la pièce, lorsqu'elle est soumise aux sollicitations présentées par la figure 3 ;

- la figure 5 est une vue schématique présentant des sollicitations appliquées à une pièce, et présentant un palier, lors d'une simulation effectuée dans un mode de mise en œuvre du procédé selon l'invention ;

- 30 - la figure 6 est une vue schématique présentant les variations de la contrainte dans la pièce, lorsqu'elle est soumise aux sollicitations présentées par la figure 5 ;

- 35 - la figure 7 est un organigramme d'un procédé de détermination de contrainte alternée maximale admissible selon l'invention ;

- la figure 8 est un diagramme de Goodman adapté illustrant l'étape finale du procédé de la figure 7 ;
- la figure 9 est un organigramme d'un procédé de vérification d'aptitude d'une pièce selon l'invention ;
- 5 - la figure 10 est une représentation schématique matérielle d'un système de vérification d'aptitude d'une pièce selon l'invention, incluant une unité de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible selon l'invention ;
- la figure 11 est une représentation schématique fonctionnelle d'une unité
10 de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible selon l'invention ; et
- la figure 12 est une représentation schématique fonctionnelle d'un système de vérification d'aptitude d'une pièce selon l'invention.

15 DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

L'invention va maintenant être présentée dans le cadre de la conception d'une aube 50 d'une roue à aubes mobiles 60 de la turbine haute pression 65 d'une turbomachine 70 telle que celle représentée sur la figure 2.

- 20 Les sollicitations auxquelles l'aube 50 est exposée pendant son exploitation (c'est-à-dire pendant toute la durée de vie de la turbomachine 70) sont présentées par la figure 3.

Cette figure présente les variations des sollicitations mécaniques F subies par l'aube, en fonction du temps t (en secondes). Ces sollicitations
25 correspondant à une force F (en Newton) s'exerçant principalement, mais pas uniquement, suivant la direction longitudinale de l'aube. Cette force F est due notamment aux forces centrifuges subies par l'aube du fait de la rotation de la roue à aubes ; elle représente les sollicitations subies par la pièce pendant la 'mission' ou la phase de fonctionnement pendant laquelle
30 la pièce est exploitée, qui peut être par exemple, pour une pièce de moteur d'avion, une phase de décollage de l'avion, etc.

Comme on peut le voir sur la figure 3, ces sollicitations, hormis une période de montée en charge $P1$ s'étendant d'un instant t_0 à un instant t_1 , sont des sollicitations cycliques qui varient autour d'une valeur moyenne
35 F_{moy} .

La figure 4 présente les variations de contrainte en un point P de l'aube, lorsque celle-ci est soumise aux sollicitations présentées par la figure 3. La figure 4 est représentée à une échelle de temps et avec des proportions tout-à-fait différentes de la figure 3.

5 La figure 4 comporte une première courbe 20 représentant les variations de la contrainte (contrainte totale) σ au point P, en fonction du temps t. Elle comporte également une deuxième courbe 22, qui représente les variations en fonction du temps de la contrainte statique σ_{stat} . La courbe 22 représente les variations de la valeur moyenne de la
10 contrainte σ (ainsi pour chaque cycle, la courbe 22 passe par le point ayant pour valeur la valeur moyenne de la contrainte pendant ce cycle). La courbe 22 ne prend donc pas en compte les variations à haute fréquence de la contrainte σ .

15 Deux exemples de mise en œuvre du procédé de détermination de contrainte alternée maximale admissible selon l'invention vont maintenant être présentés en relation avec les figures 5 à 8 et notamment la figure 7.

Alors que la figure 3 présente des valeurs de sollicitations F utilisées de manière traditionnelle pour déterminer la contrainte alternée maximale
20 admissible, par contraste les figures 5 et 6 représentent des valeurs de sollicitations et de contraintes utilisées conformément à l'invention.

Préparation de la simulation

25 La première étape a) du procédé, étape de simulation, nécessite la préparation des données suivantes :

- modèle numérique de l'aube 50 ;
- modèle de comportement du matériau de l'aube ;
- paramètres du matériau de l'aube ; et
- sollicitations appliquées à l'aube.

30 On définit tout d'abord le modèle numérique de l'aube. Ce modèle est préparé sous un format permettant de réaliser l'étape de simulation.

Le modèle numérique de l'aube est généralement un modèle tridimensionnel défini par éléments finis. Dans le cadre de l'invention, toute modélisation de la pièce peut être utilisée : par exemple des points
35 reliés par des ressorts, ou plus généralement toute méthode de

modélisation numérique susceptible de permettre une simulation du comportement statique, quasi-statique, vibratoire ou dynamique de la pièce par ordinateur.

On détermine ensuite les paramètres relatifs au matériau de l'aube :

On détermine le modèle de comportement du matériau de l'aube, et on détermine les paramètres du matériau de l'aube.

Dans le cadre de l'invention, le modèle de comportement du matériau de l'aube est un comportement visco-élastoplastique (EVP).

Par exemple, le modèle de comportement du matériau de l'aube peut être un écoulement visco-plastique sous forme d'un potentiel de Norton.

On détermine également les sollicitations appliquées à l'aube.

Dans les deux modes de mise en œuvre présentés ici, on définit dans un premier temps les sollicitations qui seront appliquées à l'aube pendant l'étape a) de simulation, à l'aide d'un diagramme tel que celui représenté sur la figure 5.

Ce diagramme présente les variations des sollicitations mécaniques F subies par l'aube (comme exemple de pièce), en fonction du temps t .

Ce diagramme comporte une période $P1$ de montée en charge entre un instant $t0$ et $t1$, une période $P2$ de palier de l'instant $t1$ à un instant $t2$, et une période finale de l'instant $t2$ à un instant $t3$.

A l'instant $t0$, la sollicitation (ou force appliquée) F est nulle, ainsi que la déformation ou le déplacement de l'aube.

A partir de l'instant $t1$ et pendant toute la période de palier $P2$, la sollicitation est constante et égale à une valeur seuil. La valeur seuil est choisie généralement égale à la valeur moyenne F_{moy} de la sollicitation appliquée à l'aube ; c'est ce qui est représenté sur la figure 5. Cette valeur moyenne représente la valeur moyenne des sollicitations pendant la phase critique de la mission réalisée par la pièce ; cette valeur moyenne est obtenue en filtrant ou en excluant les sollicitations (vibratoires) de fréquence élevée.

La valeur de la sollicitation pendant la période de palier $P2$ peut également être choisie égale à la valeur de la sollicitation maximale appliquée à l'aube, ou autre.

La durée de la période P1 de montée en charge est généralement négligeable, par exemple inférieure à $1/10^{\text{ème}}$ de la durée de la période de palier P2. Dans le cas d'une aube telle que l'aube 50, la durée de la période P1 est cependant de préférence d'au moins une seconde. La

5 durée de la période de palier P2 sera discutée plus loin.

La période finale P3 est une période représentant une phase finale d'exploitation de l'aube, par exemple une phase de vol en descente.

Bien que dans l'exemple présenté, les sollicitations F appliquées à l'aube soient des sollicitations mécaniques, l'invention est également

10 applicables à des sollicitations d'autre nature, par exemple thermique, etc.

a) Simulation de fonctionnement de l'aube

Après avoir préparé tous les éléments nécessaires à la simulation, on réalise la simulation du comportement de l'aube.

15 Cette simulation consiste à simuler que les sollicitations définies précédemment sont appliquées à l'aube, l'aube étant constituée du matériau spécifié, le matériau de l'aube réagissant conformément au modèle de comportement choisi.

Avantageusement, comme les variations des sollicitations sont

20 assez simples notamment pendant la période de palier, la discrétisation du temps choisie pour la simulation peut comporter un nombre de pas de temps assez faible.

On peut par exemple avoir des pas de temps de durée croissante :

Un premier pas de temps très bref, correspondant à la période de

25 montée en charge, de durée $t_1 = 2$ secondes ;

suivi par cinq pas de temps pendant la période de palier, de durées croissant exponentiellement, par exemple de durées successives égales respectivement à 10, 100, 1000, 10 000 et 100 000 secondes.

La durée de la période de palier t_2 est choisie de la manière

30 suivante :

On connaît généralement par avance la fréquence f des cycles de sollicitations de la machine utilisée pour réaliser le diagramme de Goodman.

On connaît par ailleurs le nombre N de cycles de sollicitations

35 pendant lesquels l'aube doit pouvoir être exploitée (ce nombre N est

habituellement le nombre de cycles retenu pour les diagrammes de Goodman établis pour la pièce).

La durée D de sollicitation des pièces utilisées pour établir les diagrammes de Goodman pour le matériau de l'aube vaut donc :

5
$$D = N/f$$

Conformément à l'invention, lors de la simulation, on impose donc que la durée t2 de la période de palier soit égale à la valeur D définie ci-dessus. La période de palier a donc la même durée que la durée de sollicitation de pièces ayant servi à établir le ou les diagramme(s) de Goodman du matériau.

Par ailleurs, comme indiqué précédemment, les figures 5 et 6 correspondent à deux modes de mise en œuvre différents.

Dans le premier mode, la simulation peut être interrompue à l'issue de la période de palier P2, alors que dans le deuxième mode, la simulation des trois périodes P1, P2 et P3 est nécessaire.

La raison de cette différence va maintenant être expliquée.

b) Détermination de la contrainte statique finale

20 Dans le premier mode de mise en œuvre, la contrainte statique finale ($\sigma_{\text{stat_fin}}$) est choisie pour chaque point P comme étant la contrainte de fin de palier, c'est-à-dire la contrainte à l'instant t2, à la fin de la période de palier. Elle est notée ici $\sigma_{\text{stat_fin_1}}$.

Par contraste, dans le second mode de mise en œuvre la contrainte statique finale ($\sigma_{\text{stat_fin}}$) est choisie pour chaque point P comme étant la contrainte à l'instant t3, à la fin de la période finale P3. Elle est notée ici $\sigma_{\text{stat_fin_2}}$.

c) Détermination de la contrainte alternée maximale admissible

30 En parallèle, indépendamment de la simulation de comportement de l'aube et de la détermination de la contrainte statique finale $\sigma_{\text{stat_fin}}$, réalisées aux étapes a) et b), on établit ou du moins on se procure un diagramme de Goodman, pour le matériau de la pièce, porté à la température T à laquelle est porté le point de la pièce pendant les

conditions d'exploitation (c'est-à-dire de sollicitations) de celle-ci envisagées.

Au cas où l'on ne dispose pas d'un diagramme de Goodman à la température T, un diagramme de Goodman à la température T peut être
5 réalisé en interpolant des diagrammes de Goodman réalisés pour d'autres températures.

Le diagramme de Goodman est réalisé pour un certain nombre de cycles de sollicitations prévu pour la pièce, à savoir dans le cas présent 10^7 .

10 La contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} , pour le point P considéré de l'aube, est alors déterminée simplement en choisissant l'ordonnée du point de la courbe dont l'abscisse est la contrainte statique en fin de période de palier.

En fonction du mode de mise en œuvre choisi, on obtient
15 naturellement deux valeurs distinctes pour la contrainte alternée maximale admissible, $\sigma_{alt_max_1}$ et $\sigma_{alt_max_2}$ (Fig.8).

En effet dans cet exemple, comme on le voit sur la figure 6, la contrainte subie par l'aube à l'instant t2 est supérieure à celle qu'elle subit à l'instant t3 ; cela se traduit donc par l'inégalité : $\sigma_{stat_fin_1} > \sigma_{stat_fin_2}$.

20 Comme la courbe du diagramme de Goodman est décroissante (Fig.8), il s'ensuit qu'à l'inverse : $\sigma_{alt_max_1} < \sigma_{alt_max_2}$.

Ce résultat traduit le fait que la contrainte alternée maximale admissible obtenue grâce au procédé est la contrainte alternée maximale admissible au moment pour lequel on a choisi la contrainte statique
25 finale : comme pendant l'étape finale P3, la contrainte statique diminue, par suite inversement la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} augmente.

Le procédé de détermination de la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} sert à concevoir des pièces soumises à des sollicitations
30 cycliques.

Un exemple de procédé de vérification d'aptitude de pièces subir de telles sollicitations va maintenant être décrit en relation avec la figure 9.

Suivant ce procédé, la vérification d'aptitude à l'usage de la pièce impose de vérifier que lors de l'exploitation de la pièce, la contrainte subie

en tous les points (ou plutôt, en un certain nombre de points de contrôle) de la pièce reste à une valeur ou dans une plage acceptable.

Dans ce but, le procédé de vérification d'aptitude de pièces comporte les étapes suivantes :

5 On conçoit ou on choisit d'abord la géométrie de pièce (Etape 0, figure 9), définie sous la forme d'une maquette numérique. Cette maquette numérique est définie notamment par un certain nombre de points P, qui sont les sommets de pavés (ou polyèdres) définissant la forme tridimensionnelle de la pièce.

10 On spécifie le matériau de la pièce, et on choisit un modèle de comportement que l'on considère comme représentatif pour ce matériau.

 On spécifie enfin les conditions d'utilisation ou d'exploitation de la pièce. Ces conditions incluent notamment la définition de l'ensemble des sollicitations qui seront appliquées à la pièce, qu'il s'agisse de sollicitations
15 mécaniques, thermiques, de conditions aux limites géométriques, etc.

Ces sollicitations sont définies en fonction du temps et, au moins pendant la période de palier, présentent des variations cycliques.

 Le but du procédé va être de déterminer si, pour le matériau spécifié, avec la géométrie de pièce spécifiée, pour différents points
20 sélectionnés de la pièce (dits 'points de contrôle'), les contraintes subies par la pièce lors de l'exploitation prévue (soumise aux sollicitations spécifiées) vont demeurer à des valeurs acceptables. Dans ce but, on procède de la manière suivante :

 A. En chacun des points de contrôle P, on détermine la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} lorsque la pièce est soumise aux sollicitations prévues, par le procédé présenté précédemment.

 B. On évalue alors la contrainte alternée effectivement subie, pour chacun des points P. Cette évaluation est généralement faite en soumettant la pièce à des essais réels, et en mesurant la contrainte
30 alternée subie par la pièce, par des jauges de contrainte ou équivalent. Elle est donc notée σ_{alt_essai} . Cette contrainte alternée subie σ_{alt_essai} peut notamment être la contrainte alternée au point P en régime de fonctionnement stabilisé de la pièce. Il peut aussi s'agir d'une valeur maximale de la contrainte alternée, par exemple la contrainte alternée au

point P pendant une phase de décollage, dans le cas d'aubes de moteurs d'avion ou d'hélicoptère.

- C. On vérifie pour chacun des points de contrôle P que la contrainte alternée subie σ_{alt_essai} est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} au point considéré.

Si lors de l'étape C, pour au moins un point P, on se rend compte que la contrainte alternée subie est supérieure à la contrainte alternée maximale admissible, on en conclut que la géométrie prévue pour la pièce, avec le matériau prévu, ne permet pas d'obtenir une aube apte à l'utilisation prévue : il est alors nécessaire de retourner à l'étape 0 du procédé, et de modifier l'un des paramètres de l'aube, comme sa géométrie, le choix du matériau, ou autre.

Le procédé de détermination de la contrainte alternée maximale admissible présenté en relation avec la figure 7, est mis en œuvre par une unité 80 de détermination de la contrainte alternée maximale admissible.

Pour la mise en œuvre de ce procédé, l'unité 80 comporte différents modules (Fig.10) :

- un module de simulation 82 permet de réaliser l'étape a) de simulation ;
- un module de détermination de contrainte statique finale 84, qui reçoit du module 82 les résultats de simulation ; sur la base de ces résultats, le module 84 permet de déterminer la contrainte statique finale suivant l'étape b) pour les points de contrôle P choisis pour la pièce.
- un module de détermination de contrainte alternée maximale admissible 86, qui reçoit la contrainte statique finale du module 84. Le module 86 permet alors de réaliser l'étape c) et de déterminer la contrainte alternée maximale admissible pour les différents points de contrôle P.

L'unité 80 de détermination de la contrainte alternée maximale admissible fait elle-même partie d'un ensemble fonctionnel plus large, constituant un système 100 de vérification de l'aptitude d'une pièce à être soumise à des sollicitations cycliques.

Le système 100 sert à mettre en œuvre le procédé de vérification de l'aptitude d'une pièce à être soumise à des sollicitations sensiblement cycliques selon l'invention.

Pour la mise en œuvre de ce procédé, le système 100 comporte différentes unités (Fig.11) :

- L'unité 80, décrite précédemment. Elle sert à déterminer la contrainte alternée maximale admissible, pour chacun des points de contrôle P.
- Une unité d'acquisition de contrainte alternée 90. L'unité 90 est configurée pour acquérir la contrainte alternée σ_{alt_essai} aux différents points de contrôle P. La valeur de la contrainte alternée peut être soit produite par calcul, soit acquise par l'unité 90, la valeur étant produite à l'extérieur du système 100.
- Une unité de contrôle 95. A partir de la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} reçue de l'unité 80 et de la contrainte alternée σ_{alt_essai} reçue de l'unité 90, l'unité 95 vérifie pour chacun des points de contrôle P que la contrainte alternée σ_{alt_essai} y est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible σ_{alt_max} . Si pour au moins un des points de contrôle P, le résultat de cette vérification est négatif, l'unité de contrôle 95 envoie une information indiquant que la pièce n'est pas apte à être soumises aux sollicitations prévues.

Les modules fonctionnels de simulation 82, de détermination de contrainte statique 84, et de détermination de contrainte alternée maximale admissible 86 décrits précédemment dans le cadre de l'unité de détermination de contrainte alternée maximale admissible sont des modules logiciels implémentés au sein d'un ordinateur 100.

L'ordinateur 100 constitue donc une unité de détermination de contrainte alternée maximale admissible au sens de l'invention.

De plus, l'unité d'évaluation 90 et l'unité de contrôle 95 décrites précédemment sont des modules logiciels également implémentés au sein de l'ordinateur 100.

L'ordinateur 100 constitue donc un système d'aide à la vérification de l'aptitude d'une pièce à être soumise à des sollicitations au sens de l'invention.

L'ordinateur 100 présente l'architecture matérielle illustrée schématiquement par la figure 12.

Il comprend notamment un processeur 4, une mémoire vive 5, une mémoire morte 6, une mémoire flash non volatile 7, ainsi que des moyens de communication 8 avec l'utilisateur de l'ordinateur. Ces éléments matériels sont éventuellement partagés avec d'autres unités fonctionnelles.

La mémoire morte 6 de l'unité 100 constitue un support d'informations conforme à l'invention, lisible par le processeur 4 et sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur conforme à l'invention, comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de conception de pièce conforme à l'invention. Ce programme comporte en particulier des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé pour la détermination de contrainte alternée maximale admissible conforme à l'invention.

Quoique la présente invention ait été décrite en se référant à des exemples de réalisation spécifiques, il est évident que des différentes modifications et changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications. L'invention peut par exemple être mise en œuvre aussi bien pour la conception de turbomachines aéronautiques que pour celle de turbines terrestres ou de moteurs thermiques... Par conséquent, la description et les dessins doivent être considérés dans un sens illustratif plutôt que restrictif.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}) en un point (P) d'une pièce (50) susceptible d'être soumise à des sollicitations (F) sensiblement cycliques, le procédé comportant les étapes suivantes :
 - a) on simule numériquement que la pièce, pendant une période de palier (P2), subit des sollicitations constantes égales à une valeur seuil (F_{moy}) ;
 - la simulation prenant en compte un modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP) pour un matériau constituant la pièce au point considéré ;
 - b) à partir des résultats de la simulation, on détermine une contrainte statique finale (σ_{stat_fin}) audit point (P), à la fin ou postérieurement à la fin de la période de palier ; et
 - c) pour le point (P) considéré, on détermine à l'aide d'un premier diagramme de Goodman la contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}), celle-ci étant déterminée pour une contrainte statique égale à la contrainte statique finale (σ_{stat_fin}) ;
 - la durée (D) de la période de palier étant sensiblement égale à la durée de sollicitation des éprouvettes ayant servi à établir ledit premier diagramme de Goodman.
2. Procédé de détermination selon la revendication 1, dans lequel ledit premier diagramme de Goodman est obtenu par interpolation entre au moins deux diagrammes de Goodman.
3. Procédé de détermination selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la pièce est une pièce (50) d'une machine tournante (70), notamment une pièce d'un rotor (60), comme par exemple une aube.
4. Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la pièce est une pièce d'un moteur (70) d'aéronef, et lors de l'étape a), la valeur seuil (F_{moy}) des sollicitations

appliquées pendant la période de palier est égale à une valeur moyenne de sollicitations subies par la pièce (50) lors d'un décollage de l'aéronef.

5 5. Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel

à l'étape a), on simule numériquement que la pièce, après la période de palier, subit des sollicitations variables pendant une période finale (P3) postérieure à la période de palier (P2) ; et

10 la contrainte statique finale ($\sigma_{\text{stat_fin}}$) déterminée à l'étape b) est une contrainte de fin de période finale ($\sigma_{\text{stat_fin2}}$) audit point (P) à la fin de ladite période finale (P3).

6. Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel

15 à l'étape a), on simule numériquement que la pièce, avant la période de palier, subit des sollicitations (F) variant depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur-seuil (F_{moy}), durant une période (P1) de montée en charge.

20 7. Procédé de vérification de l'aptitude d'une pièce (50) à être soumise à des sollicitations (F) sensiblement cycliques, le procédé comportant les étapes suivantes :

25 A. On détermine une contrainte alternée maximale admissible ($\sigma_{\text{alt_max}}$) en au moins un point (P) de la pièce lorsque celle-ci est soumise auxdites sollicitations, au moyen du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 ;

B. on évalue audit au moins un point (P) de la pièce la contrainte alternée ($\sigma_{\text{alt_essai}}$) subie en ledit au moins un point ;

30 C. on vérifie pour chacun dudit ou desdits au moins un point que la contrainte alternée ($\sigma_{\text{alt_essai}}$) est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible ($\sigma_{\text{alt_max}}$) au point considéré et on conclut que la pièce n'est pas apte à être soumise auxdites sollicitations si la vérification est négative pour au moins un point.

8. Programme d'ordinateur sur un support d'informations (6), susceptible d'être mis en œuvre dans un ordinateur (100), comportant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lorsque ledit
5 programme est exécuté sur un ordinateur.

9. Support d'informations (6) lisible par un ordinateur, comportant les instructions d'un programme d'ordinateur selon la revendication 8.

10 10. Unité (80) de détermination d'une contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}) en un point (P) d'une pièce susceptible d'être soumise à des sollicitations (F) sensiblement cycliques, comprenant :

- un module de simulation (82), configuré pour simuler numériquement que la pièce, pendant une période de palier (P2), subit des sollicitations
15 constantes égales à une valeur seuil (F_{moy}) ;

le module de simulation prenant en compte un modèle de comportement élasto-viscoplastique (EVP) pour un matériau constituant la pièce au point considéré ;

- un module de détermination de contrainte statique finale (84), configuré
20 pour déterminer une contrainte statique finale (σ_{stat_fin}) audit point de la pièce à la fin ou postérieurement à la fin de la période de palier ; et

- un module de détermination de contrainte alternée maximale admissible (86), configuré pour déterminer à l'aide d'un premier diagramme de Goodman la contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}), celle-ci
25 étant déterminée pour une contrainte statique égale à la contrainte statique finale (σ_{stat_fin}) ;

la durée de la période de palier étant sensiblement égale à la durée de sollicitation des éprouvettes ayant servi à établir ledit premier diagramme de Goodman.

30 11. Système (100) d'aide à la vérification de l'aptitude d'une pièce (50) à être soumise à des sollicitations (F) sensiblement cycliques, le système comprenant :

- Une unité (80) de détermination d'une contrainte alternée maximale
35 admissible selon la revendication 10, configurée pour déterminer une

contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}) au moins en un point (P) de la pièce lorsque celle-ci est soumise auxdites sollicitations ;

- Une unité d'acquisition de contrainte alternée (90), configurée pour acquérir la contrainte alternée en ledit au moins un point ;
- 5 - Une unité de contrôle (95), configurée pour vérifier pour chacun dudit ou desdits au moins un point (P) que la contrainte alternée (σ_{alt}) est inférieure à la contrainte alternée maximale admissible (σ_{alt_max}) au point considéré et indiquer que la pièce n'est pas qualifiée si la vérification est négative pour au moins un point.

1/7

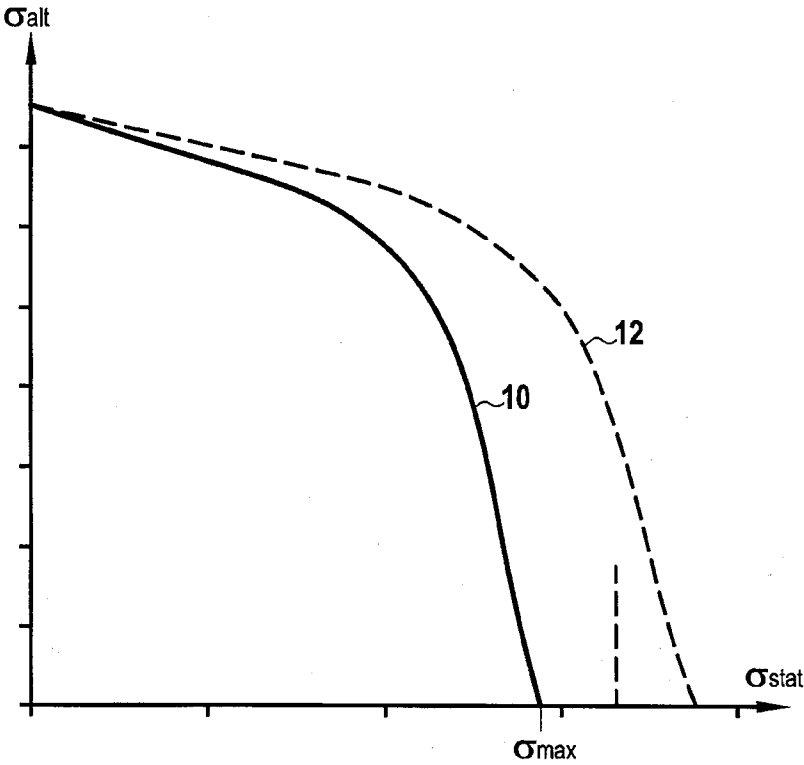


FIG.1A

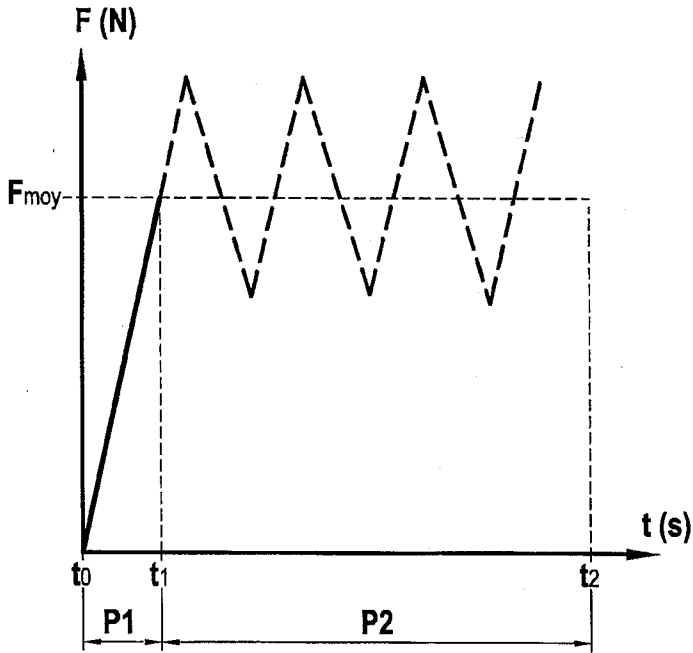
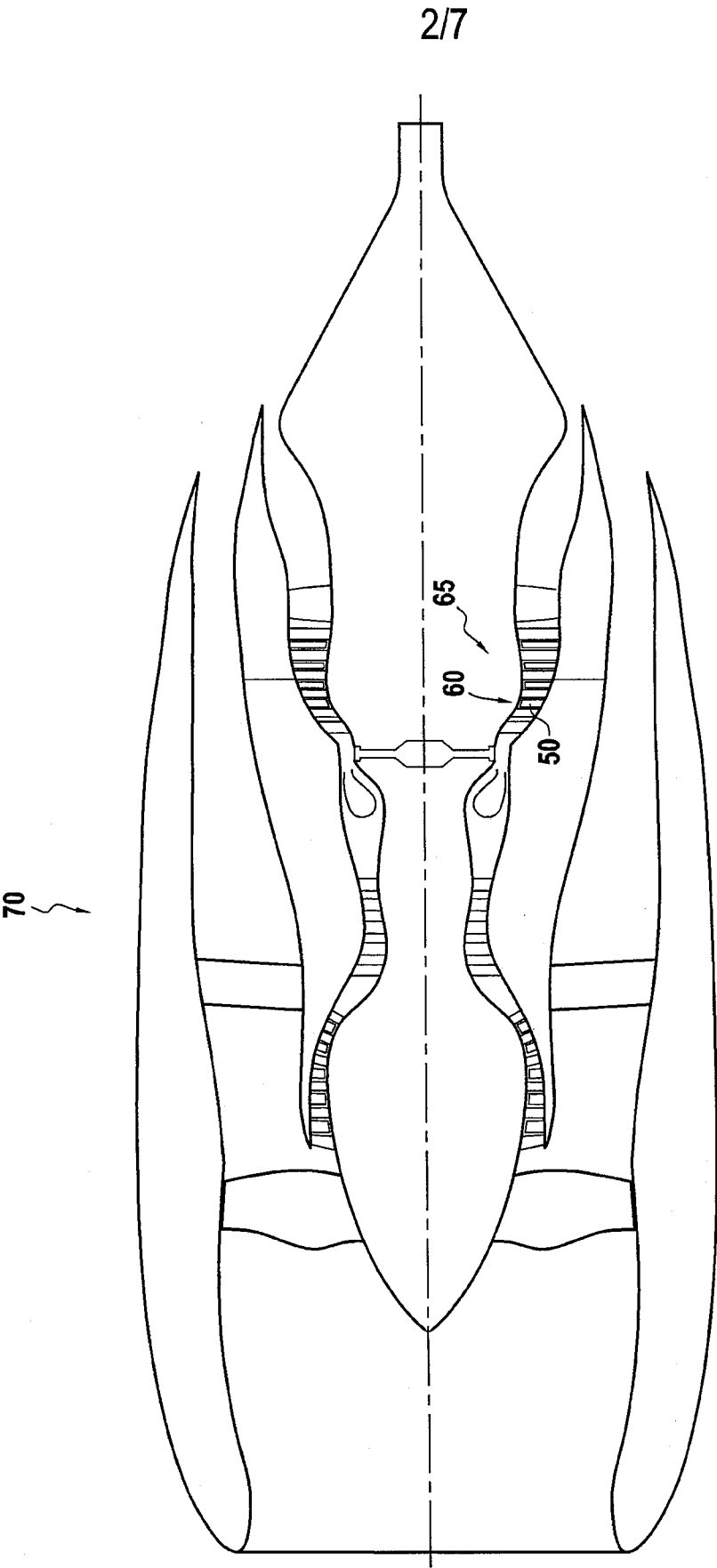


FIG.3



3/7

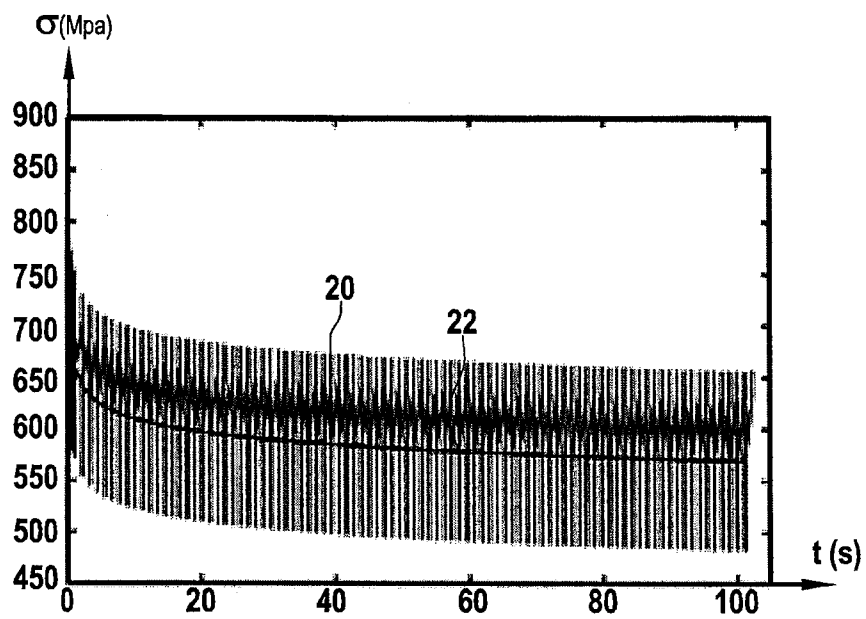


FIG. 4

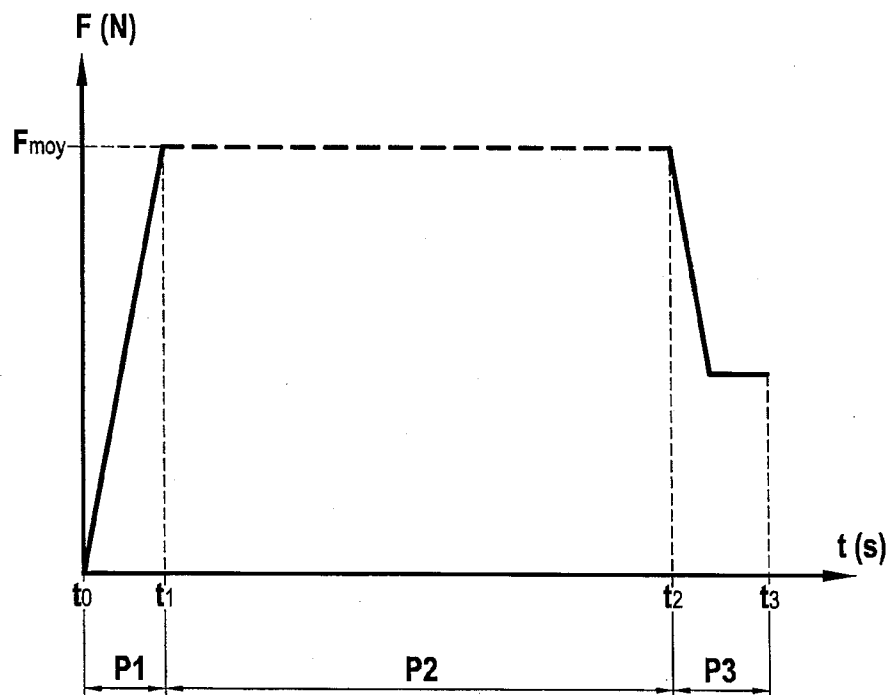


FIG. 5

4/7

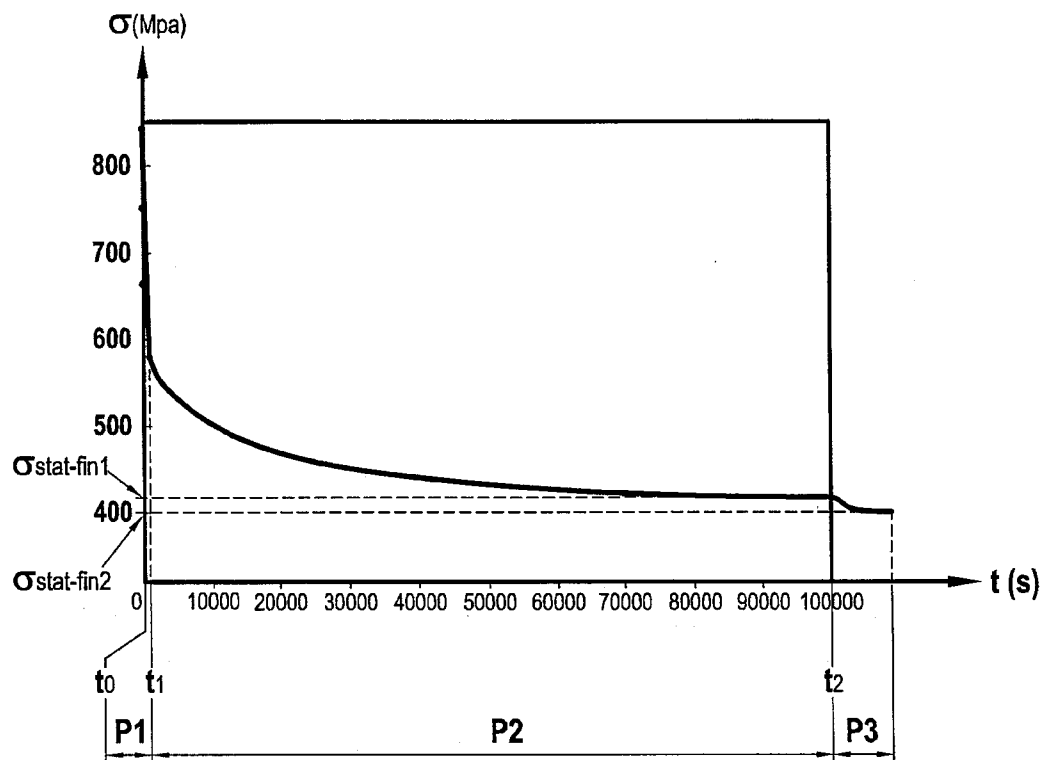


FIG.6

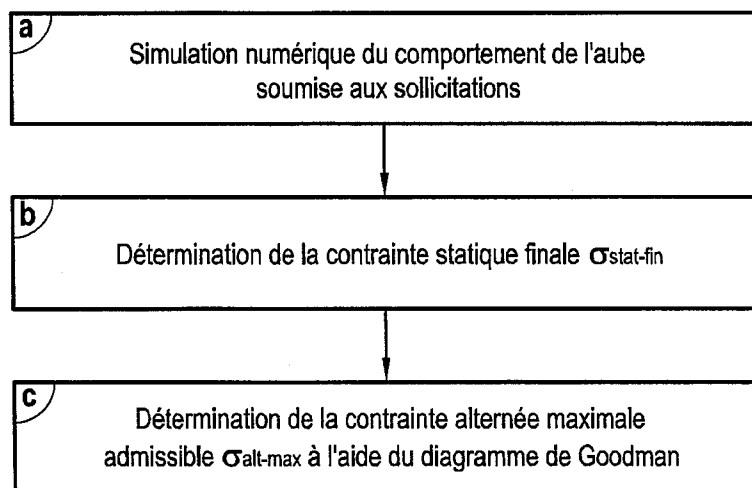


FIG.7

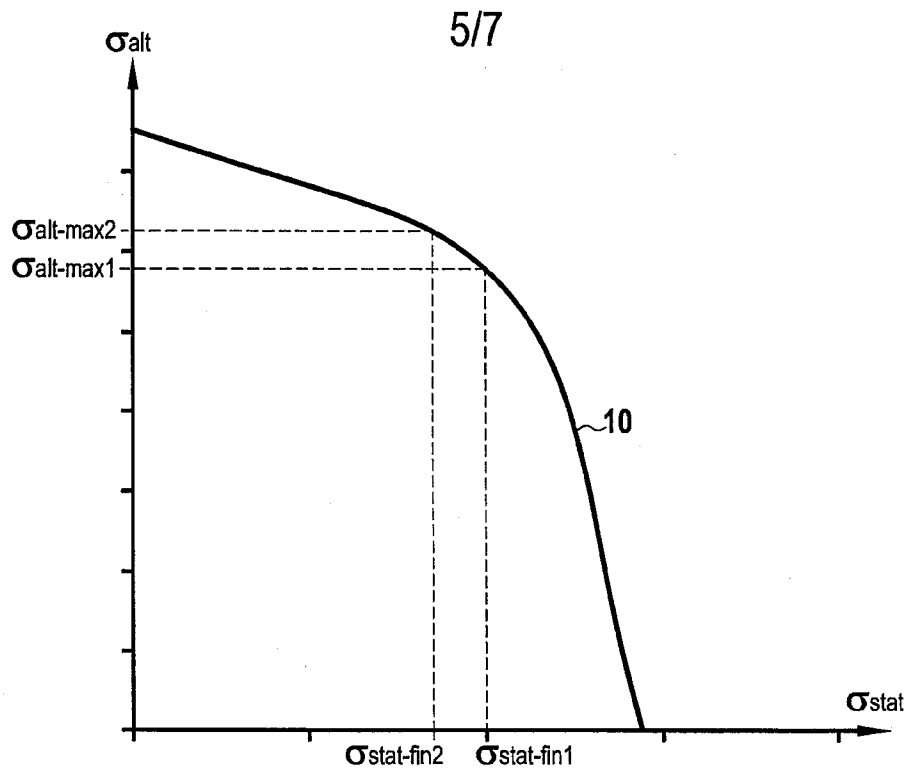


FIG.8

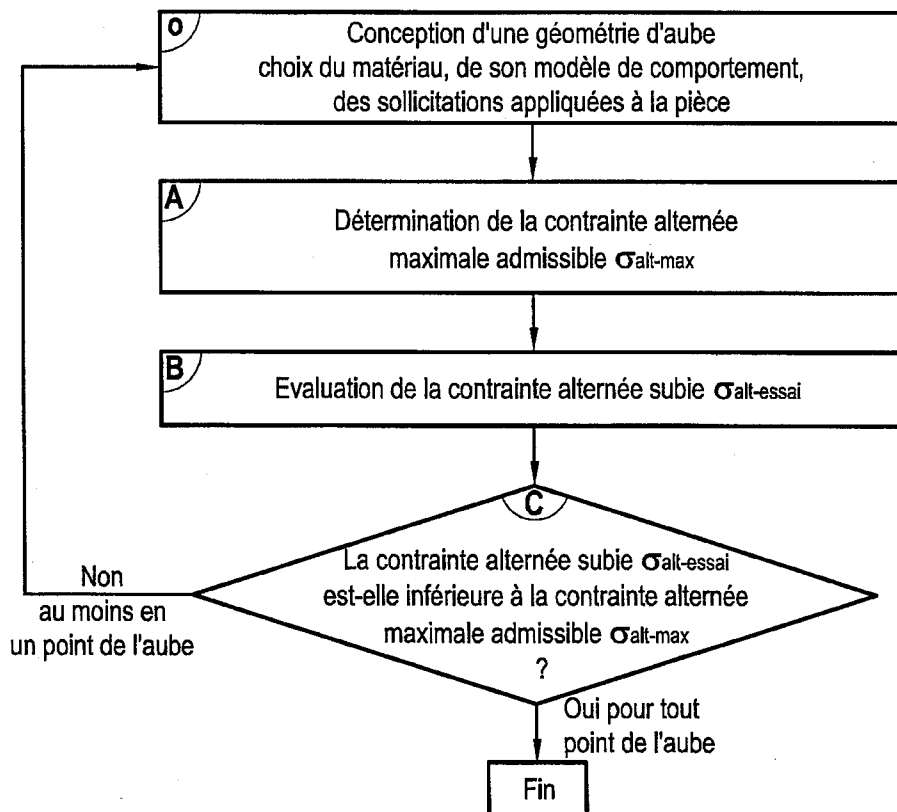


FIG.9

6/7

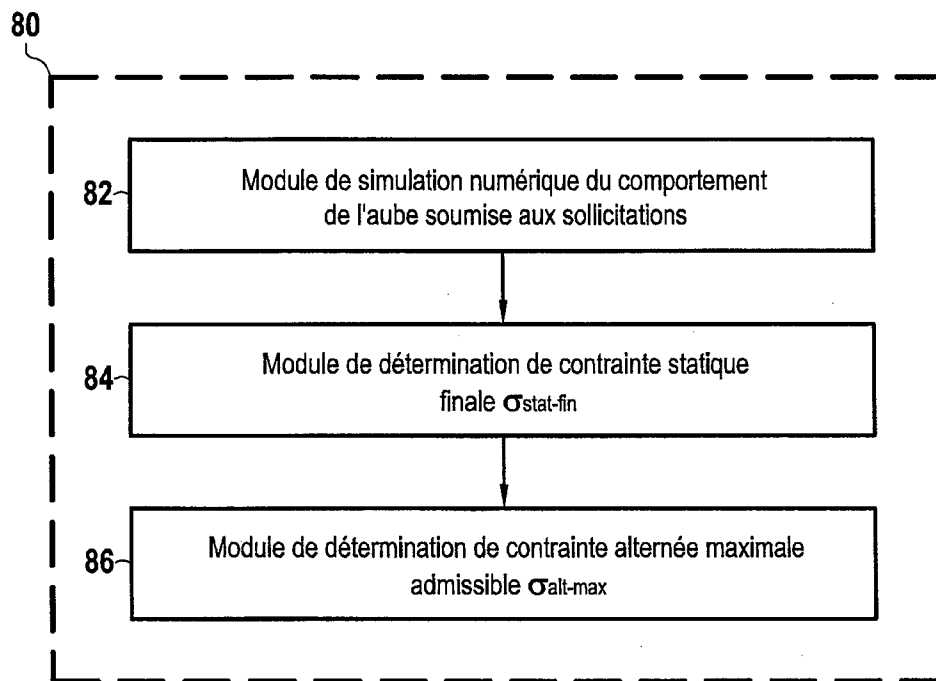


FIG.10

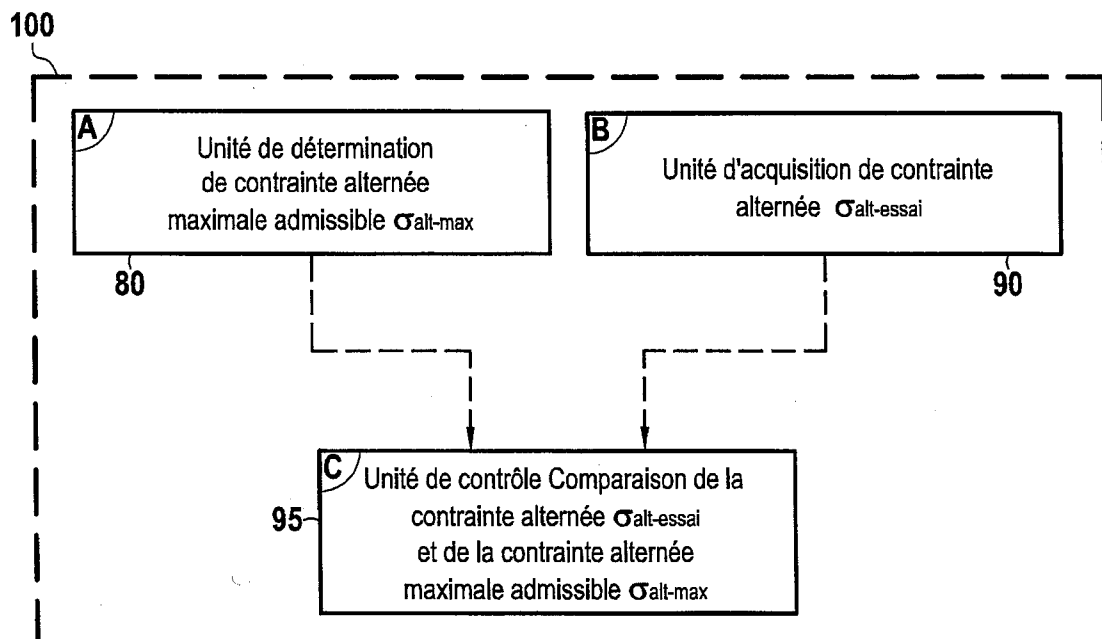


FIG.11

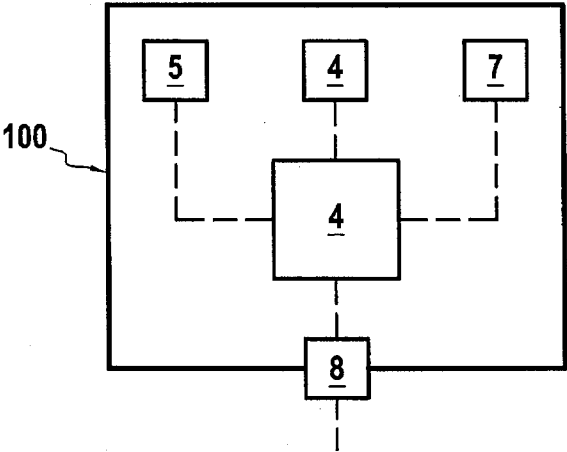


FIG.12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2016/051853

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G06F17/50 G01N3/32
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G06F G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	N. S VYAS ET AL: "Fatigue Life Estimation Procedure for a Turbine Blade Under Transient Loads", JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER., vol. 116, no. 1, 1994, pages 198-206, XP055280129, US ISSN: 0742-4795, DOI: 10.1115/1.2906792 abstract page 198, section "Introduction", dernier paragraphe ; page 201, colonne gauche, section "Steady State Response-Constant Speed Operation", premier paragraphe ; page 204, section "Fatigue Model" ; page 205, paragraphe après "Constant speed operation 700 rpm" ; figures 7,8 ----- -/--	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

7 November 2016

Date of mailing of the international search report

15/11/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Picallo Gonzalez, C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2016/051853

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CEMIL BAGCI: "Fatigue Design of Machine Elements Using the "Bagci Line" Defining the Fatigue Failure Surface Line (Mean Stress Diagram)", MECHANISM AND MACHINE THEORY, vol. 16, no. 4, 1981, pages 339-359, XP055280130, abstract -----	1-11

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2016/051853

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06F17/50 G01N3/32 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06F G01N		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	N. S VYAS ET AL: "Fatigue Life Estimation Procedure for a Turbine Blade Under Transient Loads", JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER., vol. 116, no. 1, 1994, pages 198-206, XP055280129, US ISSN: 0742-4795, DOI: 10.1115/1.2906792 abrégé page 198, section "Introduction", dernier paragraphe ; page 201, colonne gauche, section "Steady State Response-Constant Speed Operation", premier paragraphe ; page 204, section "Fatigue Model" ; page 205, paragraphe après "Constant speed operation 700 rpm"; figures 7,8 ----- -/--	1-11
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 7 novembre 2016		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 15/11/2016
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Picallo Gonzalez, C

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	CEMIL BAGCI: "Fatigue Design of Machine Elements Using the "Bagci Line" Defining the Fatigue Failure Surface Line (Mean Stress Diagram)", MECHANISM AND MACHINE THEORY, vol. 16, no. 4, 1981, pages 339-359, XP055280130, abrégé -----	1-11