Innovation, Sciences et Développement économique Canada
Office de la Propriété Intellectuelle du Canada

Innovation, Science and Economic Development Canada
Canadian Intellectual Property Office

CA 2951003 C 2022/09/06

(11)(21) 2 951 003

(12) BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT

(13) C

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2015/06/03
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2015/12/10
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2022/09/06
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2016/12/01
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2015/051466
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2015/185857
(30) Priorité/Priority: 2014/06/06 (FR1455190)

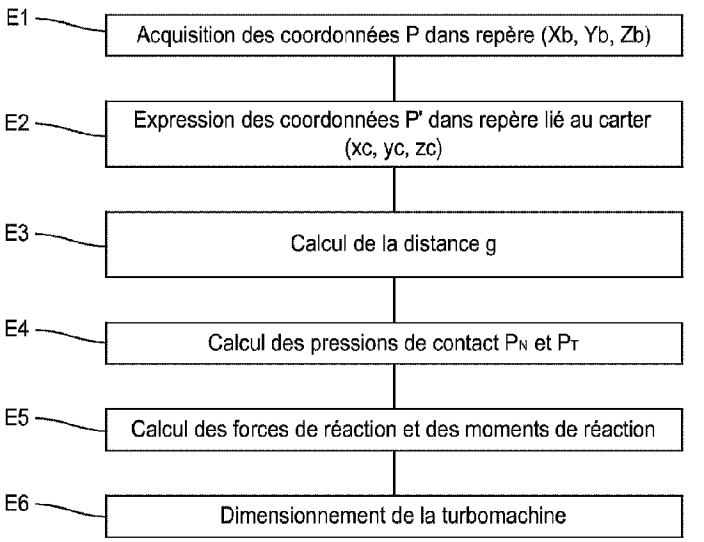
(51) Cl.Int./Int.Cl. *F01D 11/14* (2006.01),
F01D 5/14 (2006.01)

(72) Inventeurs/Inventors:
PARENT, MARIE-OCEANE, FR;
CHEVILLOT, FABRICE JOEL LUC, FR;
THOUVEREZ, FABRICE HUGUES JEAN PIERRE, FR

(73) Propriétaires/Owners:
ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SAINT ETIENNE, FR;
SAFRAN AIRCRAFT ENGINES, FR;
ECOLE CENTRALE DE LYON, FR;
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS), FR

(74) Agent: LAVERY, DE BILLY, LLP

(54) Titre : PROCEDE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE TURBOMACHINE
(54) Title: METHOD FOR DIMENSIONING A TURBOMACHINE



(57) Abrégé/Abstract:
La présente invention concerne un procédé de dimensionnement d'une turbomachine comprenant un carter et un disque sur lequel est fixé au moins une aube, ledit procédé comprenant: l'acquisition des coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au disque et dans un repère lié au carter; le calcul (i) de la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et de fuite de l'aube à partir des coordonnées exprimées dans le repère lié au carter, (ii) des pressions de contact entre l'aube et le carter le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée, et (iii) des forces et des moments de réaction résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées; -dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

ABRÉGÉ

La présente invention concerne un procédé de dimensionnement d'une turbomachine comprenant un carter et un disque sur lequel est fixé au moins une aube, ledit procédé comprenant: l'acquisition des coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au disque et dans un repère lié au carter; le calcul (i) de la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et de fuite de l'aube à partir des coordonnées exprimées dans le repère lié au carter, (ii) des pressions de contact entre l'aube et le carter le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée, et (iii) des forces et des moments de réaction résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées; -dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

Procédé de dimensionnement d'une turbomachine

DOMAINE TECHNIQUE GENERAL

La présente invention concerne la conception assistée par ordinateur. Plus précisément, elle concerne un procédé de dimensionnement d'une turbomachine, en particulier d'un turboréacteur d'aéronef.

ETAT DE LA TECHNIQUE

Les performances de fonctionnement d'une turbomachine, telle qu'un turboréacteur d'aéronef, dépendent grandement de l'espacement entre les parties tournantes et les parties fixes de la turbomachine. Réduire un tel espacement au minimum, par exemple entre les aubes de la turbomachine et son carter, permet de limiter les fuites et donc en général de maximiser les performances de la turbomachine d'un point de vue hydraulique. Néanmoins, si cet espacement est faible, des contacts risquent de se produire entre les aubes et le carter de la turbomachine. De tels contacts, s'ils produisent des forces de réaction trop importantes ou des vibrations à des fréquences inappropriées, peuvent entrainer un endommagement de la turbomachine. De tels risques existent particulièrement dans les turbomachines modernes employant aussi bien pour les parties mobiles que fixes des matériaux légers mais flexibles et donc sujets à déformation et vibration.

Il est donc nécessaire de dimensionner cet espacement au plus juste pour permettre l'obtention de bonnes performances sans pour autant risquer de détériorer la turbomachine ou ses performances du fait de contacts entre ses parties fixes et tournantes.

Une première catégorie de modèles utilisés pour un tel dimensionnement regroupe les modèles de roues aubagées. Ces modèles prennent en compte la flexibilité des aubes et du disque les supportant et

permettent d'analyser le comportement vibratoire de ces éléments. Des modèles en trois dimensions 3D aux éléments finis sont notamment utilisés pour représenter finement la géométrie des aubes et du carter autour de l'extrémité des aubes et estimer le comportement de contact entre les aubes et le carter. De tels modèles sont néanmoins locaux et ne prennent pas en compte le comportement mécanique dynamique de l'arbre de rotation de la turbomachine et du reste de celle-ci. De plus, les calculs utilisant de tels modèles consomment une quantité importante de ressources.

Une deuxième catégorie de modèles utilisés pour le dimensionnement des turbomachines regroupe les modèles de dynamique des rotors. De tels modèles incluent une modélisation de l'ensemble des éléments de la turbomachine permettant d'analyser le comportement vibratoire du rotor de la turbomachine. De tels modèles n'utilisent pas de discrétisation de la géométrie afin de limiter la quantité de ressources informatiques consommées par un calcul. Néanmoins, de tels modèles utilisent généralement une modélisation simplifiée et rigide des aubes et du carter de la turbomachine et ne permettent ainsi pas de calculer précisément les interactions de contact entre les aubes et le carter pour le dimensionnement de la turbomachine.

Il existe donc un besoin d'un procédé de dimensionnement de turbomachine permettant de calculer précisément les interactions de contact entre les aubes et le carter, tout en prenant en compte le comportement mécanique du rotor et les vibrations et déformations des aubes, du disque et du carter, pour un coût en ressources informatiques limité.

PRESENTATION DE L'INVENTION

La présente invention propose selon un premier aspect un procédé de dimensionnement d'une turbomachine comprenant un carter et un

disque sur lequel est fixée au moins une aube, ledit carter entourant le disque et l'au moins une aube, ledit disque étant entrainé en rotation par un arbre autour d'un axe, dit axe de la turbomachine z, et ladite aube comprenant un bord d'attaque BA et un bord de fuite BF,

ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la mise en œuvre par des moyens de traitement de données d'étapes de :

- acquisition des coordonnées P des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au disque (Xb, Yb, Zb) déterminées préalablement;
- à partir desdites coordonnées acquises P, expression des coordonnées P' des extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter (x_c, y_c, z_c);
- calcul de la distance g entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube à partir des coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c);
- calcul des pressions de contact entre l'aube et le carter normales et tangentielles le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée g ;
- calcul des forces de réaction normale et tangentielle et des moments de réaction normal et tangentiel résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées ;
- dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

Un tel procédé permet de dimensionner la turbomachine à partir d'un calcul précis des possibilités de contacts et des réactions associées sans avoir à utiliser une modélisation locale fine et couteuse, comme une modélisation 3D aux éléments finis.

Les coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) peuvent être exprimées en fonction de degrés de liberté du disque, du carter et de l'aube.

Ces degrés de liberté peuvent être parmi des translations et basculements du disque et du carter, un fléchissement de l'aube à son sommet et une déformation radiale du carter.

Plus précisément, ces degrés de liberté peuvent être parmi :

- des translations du disque d'une première longueur $x_d(t)$ et d'une deuxième longueur $y_d(t)$ selon deux axes (x, y) transverses à l'axe de la turbomachine z, les deux axes transverses (x,y) et l'axe de la turbomachine z définissant un premier repère (x, y, z) lié à l'arbre;
- un basculement du disque selon un premier angle $\varphi_{xd}(t)$ autour du premier axe du premier repère x, un deuxième repère (x_1, y_1, z_1) étant obtenu par rotation du premier repère (x, y, z) du premier angle $\varphi_{xd}(t)$ autour du premier axe du premier repère x;
- un basculement du disque selon un deuxième angle $\varphi_{yd}(t)$ autour du deuxième axe du deuxième repère y_1, un troisième repère (x_2, y_2, z_2) étant obtenu par rotation du deuxième repère (x_1, y_1, z_1) du deuxième angle $\varphi_{yd}(t)$ autour du deuxième axe du deuxième repère y_1;
- un positionnement angulaire de l'aube par rapport au deuxième axe du troisième repère y_2, ledit positionnement angulaire correspondant à une rotation selon un troisième angle α_j autour du troisième axe du troisième repère z_2, le repère lié au disque (Xb, Yb, Zb) formant un quatrième repère obtenu par rotation du troisième repère (x_2, y_2, z_2) du troisième angle α_j autour du troisième axe du troisième repère z_2;
- un fléchissement de l'aube à son sommet d'une troisième longueur $x_b(t)$ selon un premier axe x_b d'un cinquième repère (x_b,y_b,z_b) obtenu

par rotation du quatrième repère (Xb, Yb, Zb) d'un quatrième angle β autour du deuxième axe du quatrième repère Yb;

- des translations du carter d'une quatrième longueur $x_c(t)$ et d'une cinquième longueur $y_c(t)$ selon les deux premiers axes du premier repère (x,y) ;
- un basculement du carter d'un cinquième angle $\varphi_{xc}(t)$ autour du premier axe du premier repère x, un sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) étant obtenu par rotation du premier repère (x, y, z) du cinquième angle $\varphi_{xc}(t)$ autour du premier axe du premier repère x;
- un basculement du carter d'un sixième angle $\varphi_{yc}(t)$ autour du deuxième axe du premier repère y, le repère (x_c, y_c, z_c) lié au carter étant obtenu par rotation du sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) du sixième angle $\varphi_{yc}(t)$ autour du deuxième axe du premier repère y;
- une déformation radiale du carter d'une sixième longueur u(α,t) par rapport à un rayon du carter Rc.

Ainsi, la cinématique en trois dimensions (3D) de l'ensemble des éléments de la turbomachine peut être prise en compte pour un calcul précis des possibilités de contact entre chaque aube et le carter.

Les coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube exprimées dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) peuvent alors être exprimées à l'aide de la formule suivante :

$$P' = \mathbf{P}_{\varphi_{yc}} \mathbf{P}_{\varphi_{xc}} \left(\mathbf{P}^T_{\varphi_{xd}} \mathbf{P}^T_{\varphi_{yd}} \mathbf{P}^T_{\alpha_j} \left(P + \mathbf{P}^T_{\beta} \begin{Bmatrix} x_b(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \right) + \begin{Bmatrix} x_d(t) - x_c(t) \\ y_d(t) - y_c(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \right)$$

avec :

$P\varphi_{xd}$ la matrice de passage du premier repère (x, y, z) au deuxième repère (x_1, y_1, z_1), $P\varphi_{yd}$ la matrice de passage du deuxième repère (x_1, y_1, z_1) au troisième repère (x_2, y_2, z_2) , $P\varphi_{xc}$ la matrice de passage du premier repère (x, y, z) au sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) et $P\varphi_{yc}$ la matrice de passage du sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) au repère lié au carter (x_c, y_c, z_c),

Pαj la matrice de passage liée au positionnement angulaire de l'aube sur le disque,

Pβ la matrice de passage liée à l'orientation du fléchissement de l'aube en son sommet,

et,

$$\mathbf{P}_{\alpha_j} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_j & \sin\alpha_j & 0 \\ -\sin\alpha_j & \cos\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{x_A}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{x_A} & \sin\phi_{x_A} \\ 0 & -\sin\phi_{x_A} & \cos\phi_{x_A} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{y_A}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{y_A} & 0 & -\sin\phi_{y_A} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{y_A} & 0 & \cos\phi_{y_A} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{x_C}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{x_C} & \sin\phi_{x_C} \\ 0 & -\sin\phi_{x_C} & \cos\phi_{x_C} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{y_C}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{y_C} & 0 & -\sin\phi_{y_C} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{y_C} & 0 & \cos\phi_{y_C} \end{bmatrix}$$

Ceci permet d'obtenir une relation directe entre la position de l'extrémité d'une aube donnée par sa géométrie 3D et la position de cette même extrémité dans le repère lié au carter. Le calcul du jeu entre le carter et l'extrémité de l'aube est ainsi réduit à un calcul de distance minimale entre un point et la surface interne du carter définie dans le même repère.

La surface interne du carter étant considérée former un cône de révolution d'angle θ, de rayon de base Rb et de hauteur h, la distance g entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$g(P) = \left(-\frac{R_b}{h} P'_{\mathbf{z}} + R_b - \sqrt{P'^2_{\mathbf{x}} + P'^2_{\mathbf{y}}} + u(\alpha(P), t) \right) \cos\theta$$

avec

$$P' = \left\{ P'_{\mathbf{x}}, P'_{\mathbf{y}}, P'_{\mathbf{z}} \right\}^T$$

Le calcul du jeu entre le carter et l'extrémité de l'aube est ainsi réduit à un calcul de distance minimale entre un point et un cône dans le repère lié au carter. L'expression de cette distance est directement fonction des

coordonnées des extrémités de chaque aube P déduites de la géométrie 3D de la turbomachine et son calcul ne nécessite donc pas la résolution d'une équation intermédiaire supplémentaire. Le temps de calcul nécessaire pour déterminer cette distance est ainsi réduit.

Le calcul des pressions peut mettre en œuvre une fonction de forme adaptée à l'extrémité de l'aube et au profil de jeu initial. Une telle variante permet de prendre en compte la géométrie 3D de l'extrémité de la zone de contact sans nécessiter une discrétisation.

Les pressions de contact peuvent être calculées le long d'une corde supposée rectiligne de longueur lc formant une extrémité de l'aube par une interpolation linéaire à partir des distances entre le carter et les extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube calculées.

Les pressions de contact normale p_N et tangentielle p_T en tout point de ladite corde peuvent être calculées à l'aide des formules suivantes :

$$p_N(c) = \frac{k_r}{l_c}(\zeta c + \eta) \text{ and } p_T(c) = \frac{k_t}{l_c}(\zeta c + \eta)$$

$$\text{avec } \zeta = \frac{g(BF) - g(BA)}{l_c}$$

$$\text{et } \eta = \frac{g(BF) + g(BA)}{2}$$

c représentant l'abscisse d'une position le long de ladite corde variant entre –lc/2 et +lc/2 et, k_r et k_t étant les raideurs normale et tangentielle au contact.

Les forces de réaction normale F_N et tangentielle F_T et les moments de réaction normal M_N et tangentiel M_T de réaction résultant du contact entre une aube et le carter peuvent alors être calculés à l'aide des formules suivantes :

$$F_N = \int_{c_1}^{c_2} p_N(c)dc \quad F_T = \int_{c_1}^{c_2} p_T(c)dc \quad M_N = \int_{c_1}^{c_2} c\, p_N(c)dc$$

$$M_T = \int_{c_1}^{c_2} c\, p_N(c)dc$$

c1 et c2 étant les abscisses minimum et maximum de l'ensemble des positions de la corde de l'aube en contact avec le carter.

Ceci permet de calculer les réactions de contact : forces et moments, à partir d'une distribution des pressions sur un sommet d'aube et ainsi de prendre en compte l'évolution de la zone de contact entre une aube et le carter.

Selon un deuxième aspect, l'invention concerne un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de dimensionnement selon le premier aspect lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

Selon un troisième aspect, l'invention concerne un dispositif de dimensionnement d'une turbomachine caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de traitement de données comprenant :

- un module d'acquisition des coordonnées P des extrémités d'un bord d'attaque BA et d'un bord de fuite BF d'une aube d'une turbomachine dans un repère lié à un disque de la turbomachine (Xb, Yb, Zb) déterminées préalablement, ladite turbomachine comprenant un carter et ledit disque sur lequel est fixée au moins ladite aube, ledit carter entourant le disque et l'au moins une aube, ledit disque étant entrainé en rotation par un arbre autour d'un axe, dit axe de la turbomachine z;
- un module d'expression des coordonnées P' des extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un

repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) à partir desdites coordonnées P acquises;

- un module de calcul de la distance g entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube à partir des coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c);
- un module de calcul des pressions de contact entre l'aube et le carter normales et tangentielles le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée g;
- un module de calcul des forces de réaction normale et tangentielle et des moments de réaction normal et tangentiel résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées ;
- un module de dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

De tels produit programme d'ordinateur et moyens de traitement présentent les mêmes avantages que ceux évoqués pour le procédé selon le premier aspect.

PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre d'un mode de réalisation préférentiel. Cette description sera donnée en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 illustre un exemple de turbomachine pour laquelle le procédé selon l'invention est mis en œuvre ;
- la figure 2 représente des moyens de traitement de données pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention ;
- les figures 3a et 3b illustrent un exemple d'aube de turbomachine représentée respectivement en vue de face et en vue de profil pour laquelle le procédé selon l'invention est mis en œuvre ;

- la figure 4 représente un exemple de schématisation d'aube de turbomachine pour laquelle le procédé selon l'invention est mis en œuvre dans le repère lié au disque (Xb, Yb, Zb);
- les figures 5 à 9 illustrent les mouvements des différents éléments de la turbomachine pris en compte pour exprimer les coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter et représentent les différents repères utilisés associés ;
- les figures 10a et 10b illustrent le calcul des distances entre l'extrémité de l'aube et le carter ainsi que des pressions en tout point d'une corde rectiligne formant l'extrémité de l'aube par interpolation linéaire;
- la figure 11 est un diagramme schématisant une mise en œuvre d'un procédé de dimensionnement selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

La présente invention concerne une mise en œuvre d'un procédé de dimensionnement d'une turbomachine, telle que celle représentée sur la **figure 1**, comprenant un carter 1 et un disque 2 sur lequel est fixé au moins une aube 3, le carter entourant le disque et les aubes. Le disque et les aubes sont entrainés en rotation autour d'un axe z, dit axe de la turbomachine, par un arbre 4 s'étendant longitudinalement le long de l'axe z. Le premier repère (x,y,z) représenté en figure 1 dont les deux premiers axes x et y sont transverses à l'axe de la turbomachine z, est un repère tournant lié à l'arbre 4.

Le présent procédé est destiné de façon préférée au dimensionnement d'un turboréacteur d'aéronef mais il n'est limité ni à ce type de turbomachine ni au domaine des réacteurs. Ce procédé peut être mis en œuvre pour le dimensionnement de toute machine tournante comportant des aubes en rotation à l'intérieur d'un carter, tel que des

turbines de production d'électricité à eau, à gaz, à vapeur, des ventilateurs etc...

Il est par ailleurs destiné à être mis en œuvre par un dispositif de dimensionnement d'une turbomachine 7 comprenant des moyens de traitement de données 6 représentés en **figure 2**, comportant des moyens de calcul CALC (calculateur), des moyens de stockage MEM (mémoire), une interface de saisie INT et au moins un dispositif d'affichage 5. De tels moyens de traitement sont pilotables par un opérateur.

Une aube de turbomachine, représentée en vue de face en **figure 3a** et en vue de profil en **figure 3b**, présente un bord d'attaque BA et un bord de fuite BF. En notant (Xb, Yb, Zb) le repère lié au disque dans lequel cette aube est sensiblement verticale, c'est-à-dire tel que la fibre neutre de l'aube est alignée avec l'axe Yb, tel que représenté en **figure 4**, les coordonnées des extrémités au sommet d'aube du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans ce repère sont notées P_{BA} et P_{BF}. Dans les paragraphes suivants, la notation P fera référence respectivement à P_{BA} et à P_{BF} lorsque le point traité est respectivement l'extrémité du bord d'attaque et l'extrémité du bord de fuite. Ces coordonnées sont acquises par les moyens de traitement de données 6 après avoir été déterminées préalablement à partir de la géométrie en trois dimensions (3D) de la turbomachine lors d'une première étape d'acquisition de coordonnées E1, telle que représentée en **figure 11**.

Selon un mode de mise en œuvre, le procédé propose ensuite :

- d'exprimer, à partir des coordonnées P acquises, les coordonnées P' des extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter (x_c, y_c, z_c),
- de calculer la distance g entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube, à partir des coordonnées P'_{BA} et P'_{BF} des

extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c),

- de calculer les pressions de contact entre l'aube et le carter normales p_N et tangentielles p_T le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée g,
- de calculer les forces de réaction normale F_N et tangentielle F_T et les moments de réaction normal M_N et tangentiel M_T résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées p_N et p_T,
- de dimensionner la turbomachine en fonction des distances, pressions, force et moment calculés.

Les coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) peuvent être exprimées en fonction d'un grand nombre de degrés de liberté d'éléments de la turbomachine dont le disque, le carter et les aubes par rapport au repère tournant (x,y,z) représenté en **figure 1**. Ces degrés de liberté peuvent être choisis parmi des translations et basculements du disque et du carter, un fléchissement de l'aube à son sommet et une déformation radiale du carter.

Il est ainsi possible de dimensionner la machine tournante avec un calcul précis de l'espacement entre les extrémités d'aube et le carter, ainsi que des interactions en cas de contact, prenant en compte la cinématique 3D de l'ensemble des éléments de la turbomachine, sans avoir à utiliser une modélisation locale fine et couteuse, comme une modélisation 3D aux éléments finis.

Plus précisément, lors d'une deuxième étape d'expression de coordonnées E2, les coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube sont exprimées dans un repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) en prenant en compte des mouvements des éléments de la turbomachine parmi les degrés de liberté suivants des éléments de la turbomachine :

- des translations du disque d'une première longueur $x_d(t)$ et d'une deuxième longueur $y_d(t)$ selon les deux premiers axes x et y du premier repère (x, y, z) ;
- un basculement du disque selon un premier angle $\varphi_{xd}(t)$ autour du premier axe du premier repère x, un deuxième repère (x_1, y_1, z_1) étant obtenu par rotation du premier repère (x, y, z) du premier angle $\varphi_{xd}(t)$ autour du premier axe du premier repère x, tel que représenté en **figure 5** ;
- un basculement du disque selon un deuxième angle $\varphi_{yd}(t)$ autour du deuxième axe du deuxième repère y_1, un troisième repère (x_2, y_2, z_2) étant obtenu par rotation du deuxième repère (x_1, y_1, z_1) du deuxième angle $\varphi_{yd}(t)$ autour du deuxième axe du deuxième repère y_1 tel que représenté en figure 5 ;
- un positionnement angulaire de l'aube par rapport au deuxième axe du troisième repère y_2, ledit positionnement angulaire correspondant à une rotation selon un troisième angle α_j autour du troisième axe du troisième repère z_2, le repère lié au disque (Xb, Yb, Zb) formant un quatrième repère obtenu par rotation du troisième repère (x_2, y_2, z_2) du troisième angle α_j autour du troisième axe du troisième repère z_2 tel que représenté en **figure 6** ;
- un fléchissement de l'aube à son sommet d'une troisième longueur $x_b(t)$ selon un premier axe x_b d'un cinquième repère (x_b,y_b,z_b) obtenu par rotation du quatrième repère (Xb, Yb, Zb) d'un quatrième angle β autour du deuxième axe du quatrième repère Yb tel que représenté en **figure 7** ;
- des translations du carter d'une quatrième longueur $x_c(t)$ et d'une cinquième longueur $y_c(t)$ selon les deux premiers axes du premier repère x et y ;
- un basculement du carter d'un cinquième angle $\varphi_{xc}(t)$ autour du premier axe du premier repère x, un sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) étant obtenu par rotation du premier repère (x, y, z) du cinquième

angle $\varphi_{xc}(t)$ autour du premier axe du premier repère x y tel que représenté en **figure 8** ;

- un basculement du carter d'un sixième angle $\varphi_{yc}(t)$ autour du deuxième axe du premier repère y, le repère (x_c, y_c, z_c) lié au carter étant obtenu par rotation du sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) du sixième angle $\varphi_{yc}(t)$ autour du deuxième axe du premier repère y tel que représenté en **figure 8** ;
- une déformation radiale du carter d'une sixième longueur u(α,t) par rapport au rayon du carter Rc tel que représenté en **figure 9**.

La déformation tangentielle du carter w(α,t) est négligé. De plus, le carter est considéré dans sa section comme un anneau élastique inextensible. L'effet de l'épaisseur du carter hc sur les déformations de sa surface interne est négligé.

Ainsi, les coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube peuvent être exprimées dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) par la formule suivante :

$$P' = \mathbf{P}_{\phi_{yc}} \mathbf{P}_{\phi_{xc}} \left(\mathbf{P}^T_{\phi_{x_d}} \mathbf{P}^T_{\phi_{y_d}} \mathbf{P}^T_{\alpha_j} \left(P + \mathbf{P}^T_{\beta} \begin{Bmatrix} x_b(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \right) + \begin{Bmatrix} x_d(t) - x_c(t) \\ y_d(t) - y_c(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \right)$$

Avec :

- $P\varphi_{xd}$ la matrice de passage du premier repère (x, y, z) au deuxième repère (x_1, y_1, z_1), $P\varphi_{yd}$ la matrice de passage du deuxième repère (x_1, y_1, z_1) au troisième repère (x_2, y_2, z_2) , $P\varphi_{xc}$ la matrice de passage du premier repère (x, y, z) au sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) et $P\varphi_{yc}$ la matrice de passage du sixième repère (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) au repère lié au carter (x_c, y_c, z_c),
- $P\alpha j$ la matrice de passage liée au positionnement angulaire de l'aube sur le disque,
- $P\beta$ la matrice de passage liée à l'orientation du fléchissement de l'aube en son sommet.

Les matrices de passage peuvent être définies comme suit :

$$\mathbf{P}_{\alpha_j} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_j & \sin\alpha_j & 0 \\ -\sin\alpha_j & \cos\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{xd}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{xd} & \sin\phi_{xd} \\ 0 & -\sin\phi_{xd} & \cos\phi_{xd} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{yd}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{yd} & 0 & -\sin\phi_{yd} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{yd} & 0 & \cos\phi_{yd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{xc}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{xc} & \sin\phi_{xc} \\ 0 & -\sin\phi_{xc} & \cos\phi_{xc} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{yc}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{yc} & 0 & -\sin\phi_{yc} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{yc} & 0 & \cos\phi_{yc} \end{bmatrix}$$

Lors d'une première étape de calcul E3, la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube est calculée. En supposant que la surface interne du carter forme un cône de révolution d'angle θ, de rayon de base Rb et de hauteur h acquis lors de l'acquisition des coordonnées P des extrémités du bord d'attaque, ledit cône étant représenté en figure 3, cette distance peut s'exprimer à partir des coordonnées P selon la formule suivante :

$$g(P) = \left(-\frac{R_b}{h} P'_z + R_b - \sqrt{P'^2_x + P'^2_y} + u(\alpha(P), t) \right) \cos\theta$$

avec

$$P' = \left\{ P'_x, P'_y, P'_z \right\}^T$$

L'expression des coordonnées des extrémités des bords d'attaque et de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) représenté en figure 8 permet ainsi de transformer le calcul du jeu entre une aube et le carter en un simple calcul de distance entre un point et cône dans un repère.

La modélisation mise en œuvre permet ainsi de calculer de manière précise la distance entre les extrémités de chaque aube et le carter, en

tenant compte d'un nombre important de degrés de libertés de l'ensemble des éléments de la turbomachine, sans pour autant devoir faire appel à une couteuse discrétisation telle qu'un modèle aux éléments finis. L'expression de cette distance est directement fonction des coordonnées des extrémités de chaque aube P déduites de la géométrie 3D de la turbomachine et son calcul ne nécessite donc pas la résolution d'une équation intermédiaire supplémentaire. Le temps de calcul nécessaire pour déterminer cette distance est ainsi réduit.

Lors d'une deuxième étape de calcul E4, en cas de contact entre une aube et le carter, les pressions de contact normale et tangentielle peuvent être calculées le long de l'extrémité de l'aube à partir des distances calculées lors de la première étape de calcul E3.

Une fonction de forme adaptée à l'extrémité de l'aube et au profil de jeu initial peut être utilisée afin de déterminer précisément les distances entre l'aube et le carter en tout point de la corde de l'aube, ainsi que les pressions de contact associées. Ce profil de jeu initial peut être déterminé à partir de la forme de l'extrémité de l'aube et de la forme de la surface interne du carter en regard de cette extrémité, lors de la première étape d'acquisition E1, à partir de la géométrie en trois dimensions (3D) de la turbomachine.

Dans une première variante, la fonction de forme utilisée peut être linéaire. La distance entre l'extrémité de l'aube et le carter peut être obtenue en tout point d'une corde rectiligne de longueur lc formant l'extrémité supérieure de l'aube par une interpolation linéaire à partir des distances calculées au niveau du bord d'attaque et du bord de fuite, comme représenté en **figure 10a**, et les pressions normale p_N et tangentielle p_T en tout point de cette corde peuvent être exprimées par les formules suivantes :

$$p_N(c) = \frac{k_r}{l_c}(\zeta c + \eta) \text{ and } p_T(c) = \frac{k_t}{l_c}(\zeta c + \eta)$$
$$\text{avec } \zeta = \frac{g(BF) - g(BA)}{l_c}$$
$$\text{et } \eta = \frac{g(BF) + g(BA)}{2}$$

c variant le long de la corde entre –lc/2 et +lc/2, k_r et k_t étant les raideurs normale et tangentielle au contact, η représentant la distance moyenne entre l'aube et le carter, et ςc+ η représentant l'écart entre l'aube et le carter à la position c de la corde obtenu par interpolation linéaire.

Aux positions pour lesquelles la distance entre l'aube et le carter est positive, correspondant alors à une absence de contact, les pressions normale et tangentielle à prendre en compte sont nulles, comme représenté en **figure 10b**.

Alternativement, une fonction de forme représentant de manière plus réaliste la forme de l'extrémité de l'aube et du profil de jeu initial peut être utilisée afin de déterminer précisément les distances entre l'aube et le carter en tout point de la corde d'une aube dont l'extrémité et le profil de jeu initial n'est pas rectiligne, ainsi que les pressions de contact associées. A titre d'exemple, une fonction de forme polynomiale peut être employée, par exemple d'ordre 2 sous la forme $W(c) = (a_2*c^2 + a_1*c + a0)$ ou d'ordre 3 sous la forme $W(c) = (a_3*c^3 + a_2*c^2 + a_1*c + a_0)$, les coefficients a0, a1, a2 et a3 étant dépendants des jeux calculés aux extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube et du profil de jeu initial défini lors de la première étape d'acquisition E1. Les pressions de contact normale et tangentielle entre l'aube et le carter peuvent alors s'exprimer en fonction d'une telle fonction de forme selon les expressions suivantes : $p_N(c) = \frac{k_r}{l_c} W(c)$ et $p_T(c) = \frac{k_t}{l_c} W(c)$.

Ainsi, les pressions de contact peuvent être calculées en tout point de l'extrémité de l'aube en cas de contact avec le carter, en prenant en compte la géométrie 3D de la zone de contact, sans avoir à discrétiser la géométrie de l'aube ni à utiliser une géométrie trop simplifiée non représentative de la géométrie réelle de l'aube.

Lors d'une troisième étape de calcul E5, les forces de réaction normale F_N et tangentielle F_T et les moments de réaction normal M_N et tangentiel M_T de réaction résultant du contact entre une aube et le carter sont calculés. Ils peuvent être exprimés à l'aide des formules suivantes :

$$F_N = \int_{c_1}^{c_2} p_N(c)dc \quad F_T = \int_{c_1}^{c_2} p_T(c)dc \quad M_N = \int_{c_1}^{c_2} c\, p_N(c)dc$$

$$M_T = \int_{c_1}^{c_2} c\, p_N(c)dc$$

avec c1 et c2 définissant les limites de contact entre l'aube et le carter :

- c1= -lc/2 et c2= lc/2 si les distances entre l'aube et le carter sont négatives pour le bord de fuite et le bord d'attaque. Il y a alors contact tout le long de la corde.
- c1= -lc/2 et c2= - η/ς si la distance entre l'aube et le carter est négative au niveau du bord d'attaque mais positive au niveau du bord de fuite. Il y a alors contact sur une partie de la corde de l'aube, du côté du bord d'attaque.
- c1= η/ς et c2= lc/2 si la distance entre l'aube et le carter est négative au niveau du bord de fuite mais positive au niveau du bord d'attaque. Il y a alors contact sur une partie de la corde de l'aube, du côté du bord de fuite.

Dans les formules présentées, les efforts normaux sont proportionnels à la pénétration entre les solides et les efforts de frottement sont obtenus grâce à la loi de Coulomb.

Ainsi les forces et moments de réaction peuvent être calculés en tout point de l'extrémité de l'aube en cas de contact avec le carter, sans avoir à discrétiser la géométrie de l'aube ni à utiliser une géométrie simplifiée non représentative de la géométrie réelle de l'aube. Un tel modèle permet de prendre en compte l'évolution de la distribution des pressions de contact sur la corde. Le contact peut être initié à l'une des extrémités de la corde puis la zone de contact peut évoluer jusqu'à ce que l'aube touche le carter sur toute sa corde. Les étapes décrites ci-dessus permettent de calculer une distribution des efforts réaliste, tenant compte de l'évolution de la zone de contact.

Lors d'une étape de dimensionnement E6, les résultats des calculs des étapes précédentes sont utilisés pour réaliser le dimensionnement de la turbomachine.

Selon un premier exemple, les résultats de la première étape de calcul E3 sont utilisés pour réaliser une détection de contact. Les résultats de tels calculs pour différentes vitesses de rotation et en supposant un certain déséquilibrage de la turbomachine peuvent être utilisés pour déterminer les déplacements maximums de l'extrémité d'aube lors du fonctionnement du moteur. Toutes les plages de vitesses de rotation pour lesquelles l'espacement initial au repos entre l'extrémité d'aube et le carter est inférieur au déplacement maximal calculé présenteront un risque de contact entre une aube et le carter de la turbomachine.

Selon un deuxième exemple, les résultats des calculs des forces et moments de réaction lors de la troisième étape de calcul E5 peuvent être projetés sur les degrés de liberté du modèle pour être introduit dans le système d'équation décrivant les mouvements de la turbomachine. La résolution de cette équation avec contact peut alors permettre de statuer

sur les efforts à encaisser par la turbomachine et l'apparition de régime de fonctionnement instable, potentiellement dangereux pour la turbomachine. L'équation du mouvement avec contact peut être résolue de plusieurs manières. Une analyse de stabilité de la turbomachine peut être réalisée en supposant un contact permanent d'au moins une aube avec le carter de la turbomachine. Les efforts de contacts calculés lors de l'étape E5 et projetés sur les degrés de liberté du modèle, sont alors linéarisés et appliqués de manière permanente à un système d'équation décrivant le mouvement des éléments de la turbomachine. Une analyse de stabilité peut être menée afin de prédire pour différentes vitesses de rotation si l'introduction d'une perturbation peut provoquer l'apparition d'un régime de fonctionnement instable, potentiellement dangereux pour la turbomachine.

Enfin, selon un troisième exemple, les résultats des calculs de distances, forces et moments obtenus lors des différentes étapes précédentes peuvent être employés au sein d'un calcul transitoire pour déterminer à chaque pas de temps du calcul le risque de contact entre une aube et le carter et les forces et moments de réaction associés le cas échéant. Un tel calcul pourra être mis en œuvre par exemple par la méthode d'intégration temporelle dite des différences finies centrées. Ainsi il est possible de réaliser un calcul d'un régime transitoire résultant d'une perturbation prenant en compte à chaque instant du transitoire la possibilité d'un contact et les réactions résultant d'un tel contact. L'évolution des forces de réaction au cours du transitoire permet de déterminer les efforts à encaisser par la turbomachine et une éventuelle instabilité du régime de fonctionnement de la turbomachine résultant de la perturbation à l'origine du transitoire.

Si l'une de ces analyses fait apparaître un risque inacceptable pour la turbomachine, l'opérateur mettant en œuvre un tel procédé à l'aide des moyens de traitements peut alors modifier une caractéristique de la turbomachine afin d'améliorer son dimensionnement, pour la rendre plus

résistante à une perturbation par exemple. L'opérateur peut par exemple modifier les caractéristiques géométriques des aubes, du disque ou du carter de la turbomachine, interdire une certaine plage de vitesses de rotation présentant un risque trop important d'endommagement, modifier le matériau utilisé pour un des éléments de la turbomachine de façon à diminuer la flexibilité de cet élément...

Ainsi, il est possible de dimensionner de manière optimisée une turbomachine, de façon à limiter les risques d'endommagement en cas de contact entre les aubes et le carter de la turbomachine, en minimisant l'impact sur ses performances grâce à une modélisation fidèle de la géométrie et de la dynamique des éléments de la turbomachine, sans accroitre la quantité de ressources informatiques consommées.

Le dispositif de dimensionnement d'une turbomachine représenté sur la figure 2 pour la mise en œuvre du procédé de dimensionnement comprend des moyens de traitement de données 6 comprenant :

- un module d'acquisition des coordonnées P des extrémités d'un bord d'attaque BA et d'un bord de fuite BF d'une aube d'une turbomachine dans un repère lié à un disque de la turbomachine (Xb, Yb, Zb) déterminées préalablement, ladite turbomachine comprenant un carter et ledit disque sur lequel est fixé au moins ladite aube, ledit carter entourant le disque et l'au moins une aube, ledit disque étant entrainé en rotation par un arbre autour d'un axe, dit axe de la turbomachine z;
- un module d'expression des coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter (x_c, y_c, z_c) à partir desdites coordonnées acquises;
- un module de calcul de la distance g entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube à partir des coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter (x_c, y_c, z_c);

- un module de calcul des pressions de contact entre l'aube et le carter normales p_N et tangentielles p_T le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée g ;
- un module de calcul des forces de réaction normale F_N et tangentielle F_T et des moments de réaction normal M_N et tangentiel M_T résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées ;
- un module de dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

REVENDICATIONS

1. Procédé de dimensionnement d'une turbomachine comprenant un carter et un disque sur lequel est fixée au moins une aube, ledit carter entourant le disque et l'au moins une aube, ledit disque étant entrainé en rotation par un arbre autour d'un axe, dit axe de la turbomachine, et ladite aube comprenant un bord d'attaque et un bord de fuite, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la mise en œuvre par des moyens de traitement de données d'étapes de :

- acquisition des coordonnées (P) des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au disque déterminées préalablement ;
- à partir desdites coordonnées acquises, expression des coordonnées des extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter ;
- calcul de la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube à partir des coordonnées (P') des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter ;
- calcul des pressions de contact entre l'aube et le carter normales (p_N) et tangentielles (p_T) le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée ;
- calcul des forces de réaction normale (F_N) et tangentielle (F_T) et des moments de réaction normal (M_N) et tangentiel (M_T) résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées ;
- dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter sont exprimées en fonction de degrés de liberté du disque, du carter et de l'aube.

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel lesdits degrés de liberté sont parmi des translations et basculements du disque et du carter, un fléchissement de l'aube à son sommet et une déformation radiale du carter.

4. Procédé selon la revendication 2 ou 3, dans lequel lesdits degrés de liberté sont parmi :

- des translations du disque d'une première longueur ($x_d(t)$) et d'une deuxième longueur ($y_d(t)$) selon deux axes transverses à l'axe de la turbomachine, les deux axes transverses et l'axe de la turbomachine définissant un premier repère lié à l'arbre;
- un basculement du disque selon un premier angle ($\varphi_{xd}(t)$) autour du premier axe du premier repère, un deuxième repère étant obtenu par rotation du premier repère du premier angle ($\varphi_{xd}(t)$) autour du premier axe du premier repère ;
- un basculement du disque selon un deuxième angle ($\varphi_{yd}(t)$) autour du deuxième axe du deuxième repère, un troisième repère étant obtenu par rotation du deuxième repère du deuxième angle ($\varphi_{yd}(t)$) autour du deuxième axe du deuxième repère ;
- un positionnement angulaire de l'aube par rapport au deuxième axe du troisième repère, ledit positionnement angulaire correspondant à une rotation selon un troisième angle (α_j) autour du troisième axe du troisième repère, le repère lié au disque formant un quatrième repère obtenu par rotation du troisième repère du troisième angle (α_j) autour du troisième axe du troisième repère ;
- un fléchissement de l'aube à son sommet d'une troisième longueur ($x_b(t)$) selon un premier axe d'un cinquième repère obtenu par rotation du quatrième repère d'un quatrième angle (β) autour du deuxième axe du quatrième repère ;
- des translations du carter d'une quatrième longueur ($x_c(t)$) et d'une cinquième longueur ($y_c(t)$) selon les deux premiers axes du premier repère ;
- un basculement du carter d'un cinquième angle ($\varphi_{xc}(t)$) autour du premier axe du premier repère, un sixième repère étant obtenu par rotation du premier repère du cinquième angle ($\varphi_{xc}(t)$) autour du premier axe du premier repère ;

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

- un basculement du carter d'un sixième angle $\varphi_{yc}(t)$ autour du deuxième axe du premier repère y, le repère lié au carter étant obtenu par rotation du sixième repère du sixième angle ($\varphi_{yc}(t)$) autour du deuxième axe du premier repère ;
- une déformation radiale du carter d'une sixième longueur ($u(\alpha,t)$) par rapport à un rayon du carter (Rc).

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel les coordonnées P' des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube exprimées dans le repère lié au carter sont exprimées à l'aide de la formule suivante :

$$P' = \mathbf{P}_{\phi_{yc}} \mathbf{P}_{\phi_{xc}} \left(\mathbf{P}^T_{\phi_{x_d}} \mathbf{P}^T_{\phi_{y_d}} \mathbf{P}^T_{\alpha_j} \left(P + \mathbf{P}^T_{\beta} \begin{Bmatrix} x_b(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \right) + \begin{Bmatrix} x_d(t) - x_c(t) \\ y_d(t) - y_c(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \right)$$

Avec :

P les coordonnées du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube exprimées dans le repère lié au disque,

$P\varphi_{xd}$ la matrice de passage du premier repère au deuxième repère, $P\varphi_{yd}$ la matrice de passage du deuxième repère au troisième repère, $P\varphi_{xc}$ la matrice de passage du premier repère au sixième repère et $P\varphi_{yc}$ la matrice de passage du sixième repère au repère lié au carter,

$P\alpha j$ la matrice de passage liée au positionnement angulaire de l'aube sur le disque,

$P\beta$ la matrice de passage liée à l'orientation du fléchissement de l'aube en son sommet,

$x_d(t)$ longueur de translation du disque selon l'axe x du premier repère ;

$y_d(t)$ longueur de translation du disque selon l'axe y du premier repère ;

$x_b(t)$ longueur de fléchissement de l'aube à son sommet selon un premier axe du cinquième repère obtenu par rotation du quatrième repère d'un quatrième angle β autour du deuxième axe du quatrième repère ;

$x_c(t)$ et $y_c(t)$ longueurs de translations du carter selon respectivement les deux premiers axes du premier repère ;

et

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

$$\mathbf{P}_{\alpha_j} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_j & \sin\alpha_j & 0 \\ -\sin\alpha_j & \cos\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{x_d}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{x_d} & \sin\phi_{x_d} \\ 0 & -\sin\phi_{x_d} & \cos\phi_{x_d} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{y_d}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{y_d} & 0 & -\sin\phi_{y_d} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{y_d} & 0 & \cos\phi_{y_d} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{\phi_{x_c}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{x_c} & \sin\phi_{x_c} \\ 0 & -\sin\phi_{x_c} & \cos\phi_{x_c} \end{bmatrix} ; \mathbf{P}_{\phi_{y_c}} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{y_c} & 0 & -\sin\phi_{y_c} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi_{y_c} & 0 & \cos\phi_{y_c} \end{bmatrix}$$

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le calcul des pressions met en œuvre une fonction de forme adaptée à l'extrémité de l'aube et au profil de jeu initial.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel les pressions de contact sont calculées le long d'une corde supposée rectiligne de longueur lc formant une extrémité de l'aube par une interpolation linéaire à partir des distances entre le carter et les extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube calculées.

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel les pressions de contact normale p_N et tangentielle p_T en tout point de ladite corde sont calculées à l'aide des formules suivantes :

$$p_N(c) = \frac{k_r}{l_c}(\zeta c + \eta) \text{ and } p_T(c) = \frac{k_t}{l_c}(\zeta c + \eta)$$

$$\text{avec } \zeta = \frac{g(BF) - g(BA)}{l_c}$$

$$\text{et } \eta = \frac{g(BF) + g(BA)}{2}$$

c représentant l'abscisse d'une position le long de ladite corde variant entre –lc/2 et +lc/2 et, k_r et k_t étant les raideurs normale et tangentielle au contact,

g représentant la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube.

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les forces de réaction normale F_N et tangentielle F_T et les moments de réaction normal M_N et tangentiel M_T de réaction résultant du contact entre une aube et le carter sont calculés à l'aide des formules suivantes :

$$F_N = \int_{c1}^{c2} p_N(c)dc \quad F_T = \int_{c1}^{c2} p_T(c)dc \quad M_N = \int_{c1}^{c2} c\, p_N(c)dc$$

$$M_T = \int_{c1}^{c2} c\, p_N(c)dc$$

c1 et c2 étant les abscisses minimum et maximum de l'ensemble des positions de la corde de l'aube en contact avec le carter.

10. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de dimensionnement selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

11. Dispositif de dimensionnement d'une turbomachine caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de traitement de données comprenant :

- un module d'acquisition des coordonnées (P) des extrémités d'un bord d'attaque et d'un bord de fuite d'une aube d'une turbomachine dans un repère lié à un disque de la turbomachine déterminées préalablement, ladite turbomachine comprenant un carter et ledit disque sur lequel est fixée au moins ladite aube, ledit carter entourant le disque et l'au moins une aube, ledit disque étant entrainé en rotation par un arbre autour d'un axe, dit axe de la turbomachine ;
- un module d'expression des coordonnées (P') des extrémités supérieures du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans un repère lié au carter à partir desdites coordonnées acquises ;
- un module de calcul de la distance entre le carter et les extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube à partir des coordonnées des extrémités du bord d'attaque et du bord de fuite de l'aube dans le repère lié au carter ;
- un module de calcul des pressions de contact entre l'aube et le carter normales (p_N) et tangentielles (p_T) le long de l'extrémité de l'aube à partir de la distance calculée ;

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

- un module de calcul des forces de réaction normale (F_N) et tangentielle (F_T) et des moments de réaction normal (M_N) et tangentiel (M_T) résultant du contact entre l'aube et le carter à partir des pressions calculées ;
- un module de dimensionnement de la turbomachine en fonction des distances, pressions, forces et moments calculés.

Date Reçue/Date Received 2022-01-12

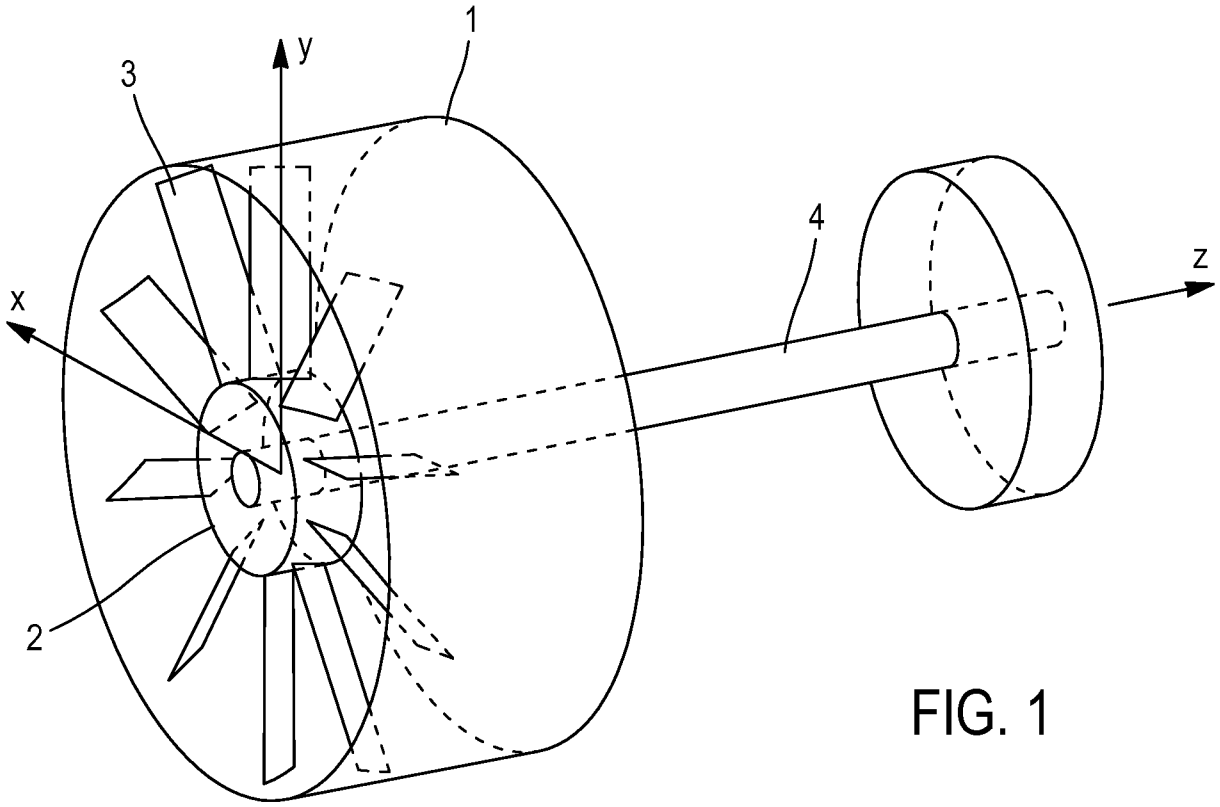

1
y
3
4
z
x
2

FIG. 1

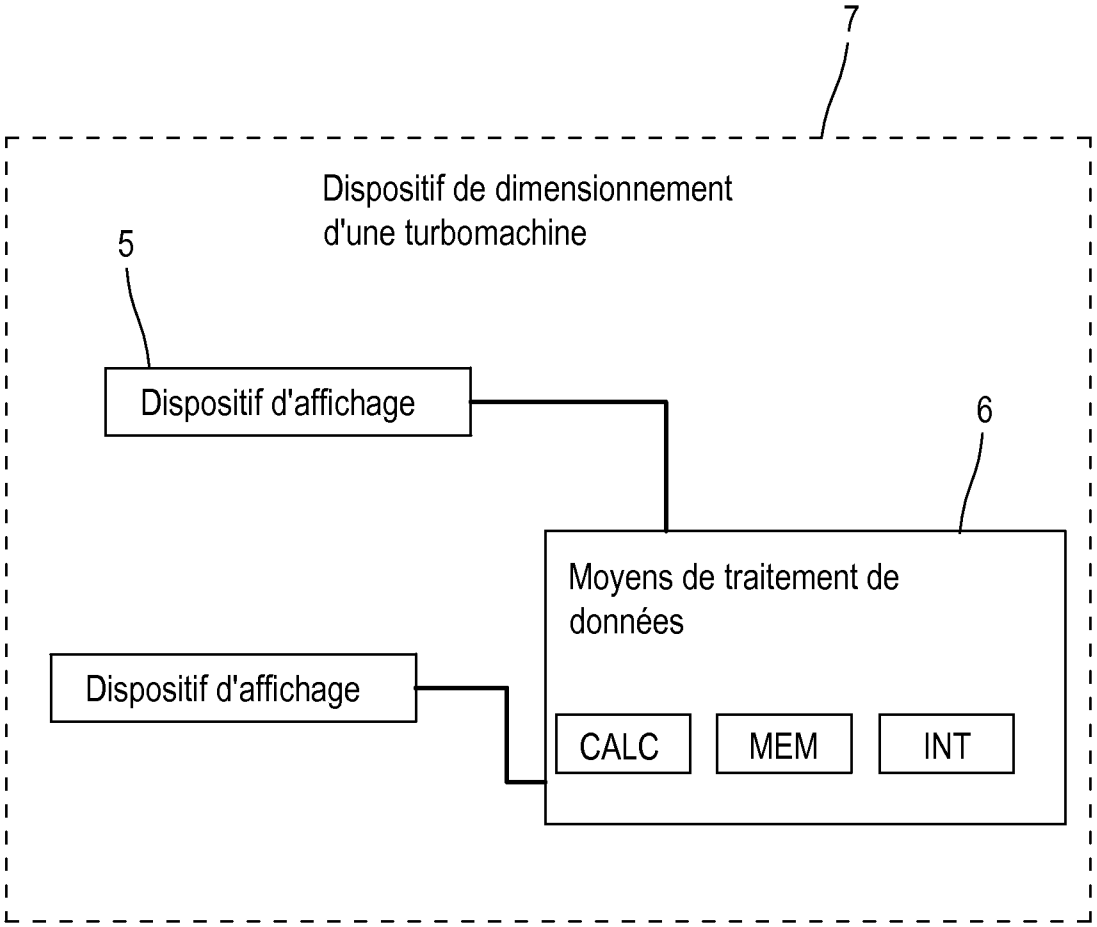

7
Dispositif de dimensionnement
d'une turbomachine
5
Dispositif d'affichage
6
Moyens de traitement de
données
Dispositif d'affichage
CALC
MEM
INT

FIG. 2

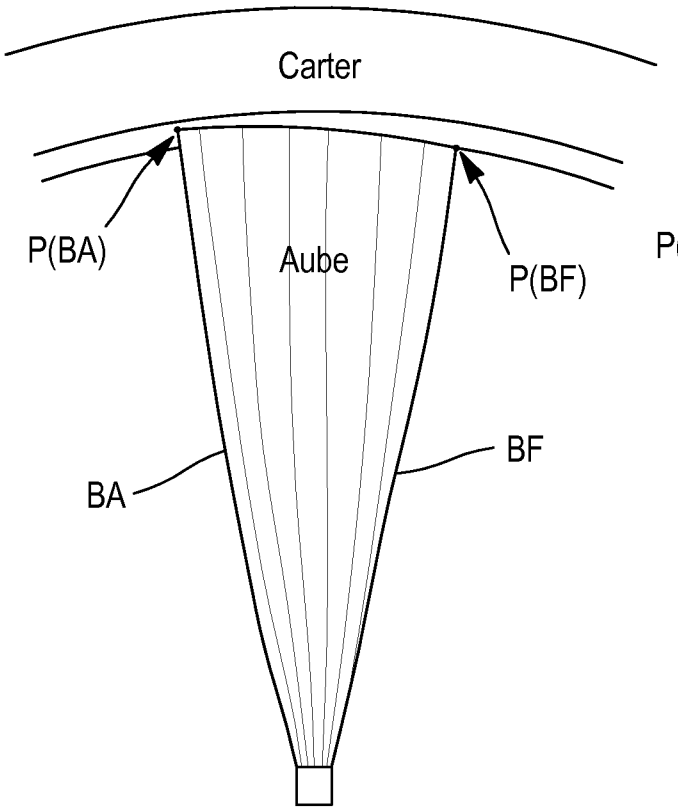


FIG. 3a

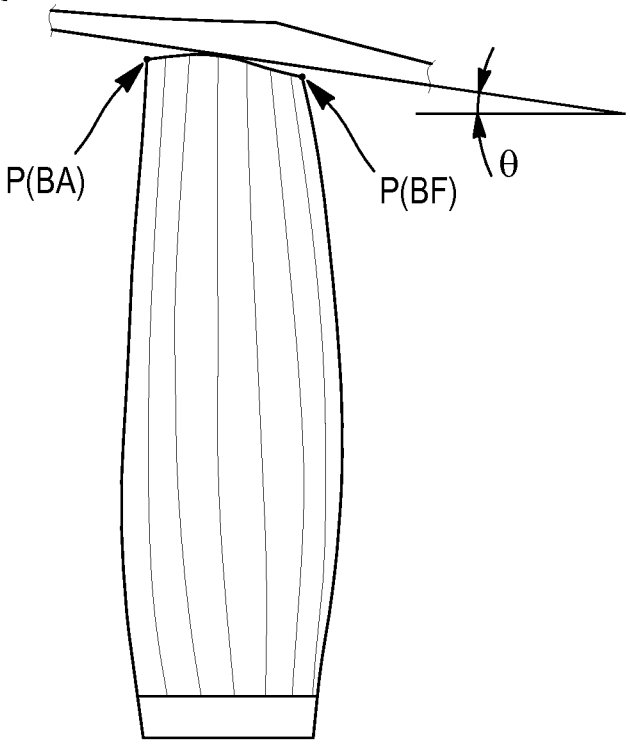


FIG. 3b

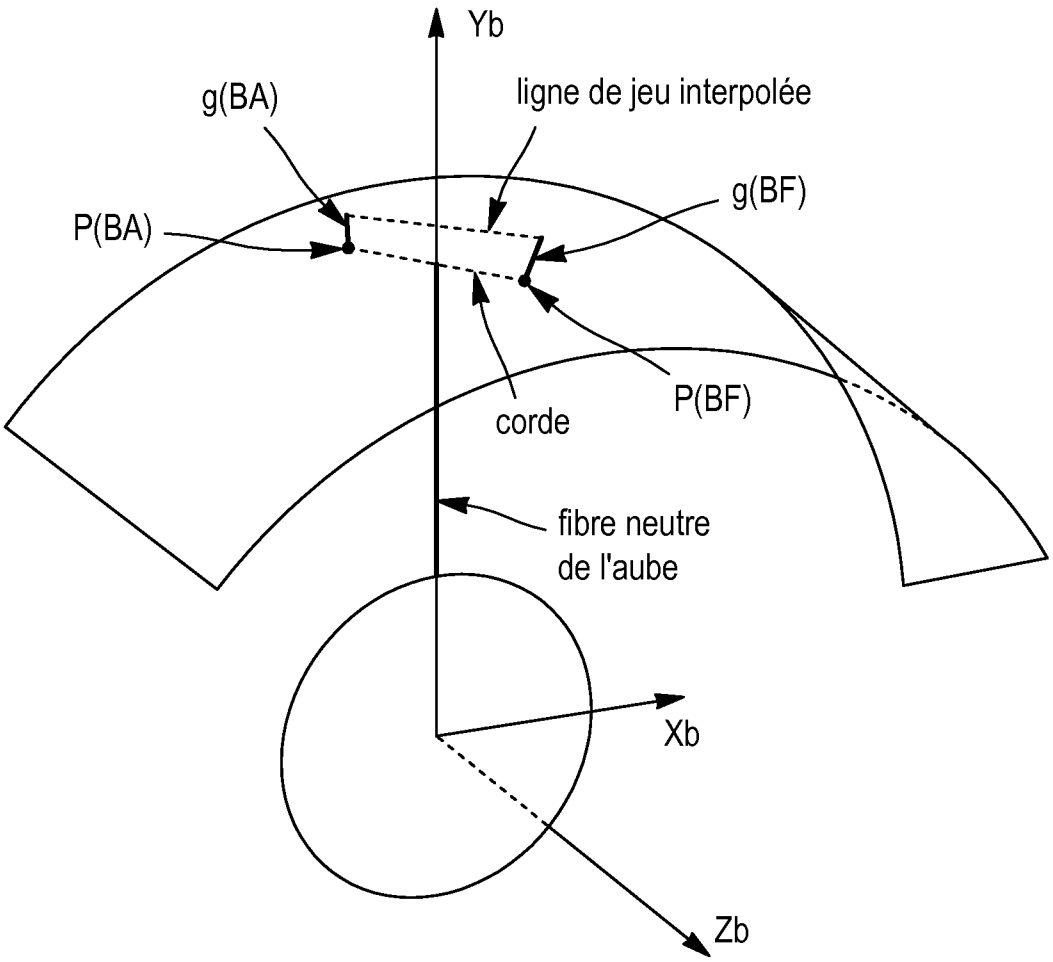

Yb
g(BA)
ligne de jeu interpolée
g(BF)
P(BA)
P(BF)
corde
fibre neutre
de l'aube
Xb
Zb

FIG. 4

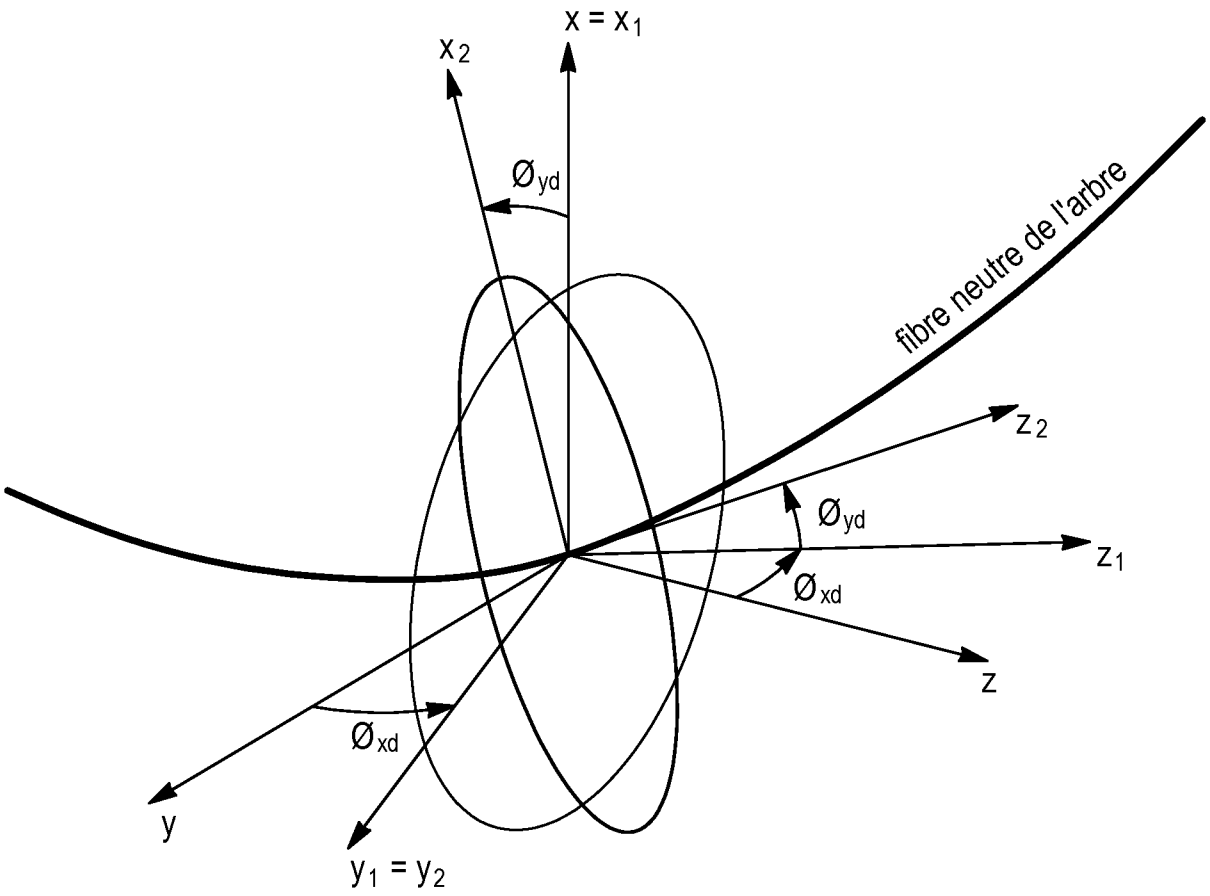


FIG. 5

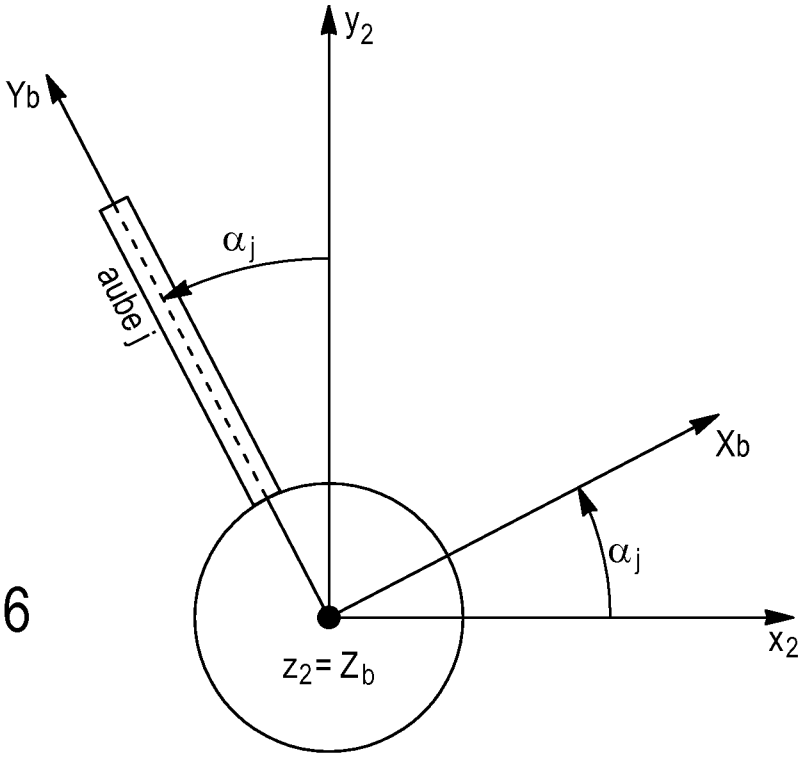


FIG. 6

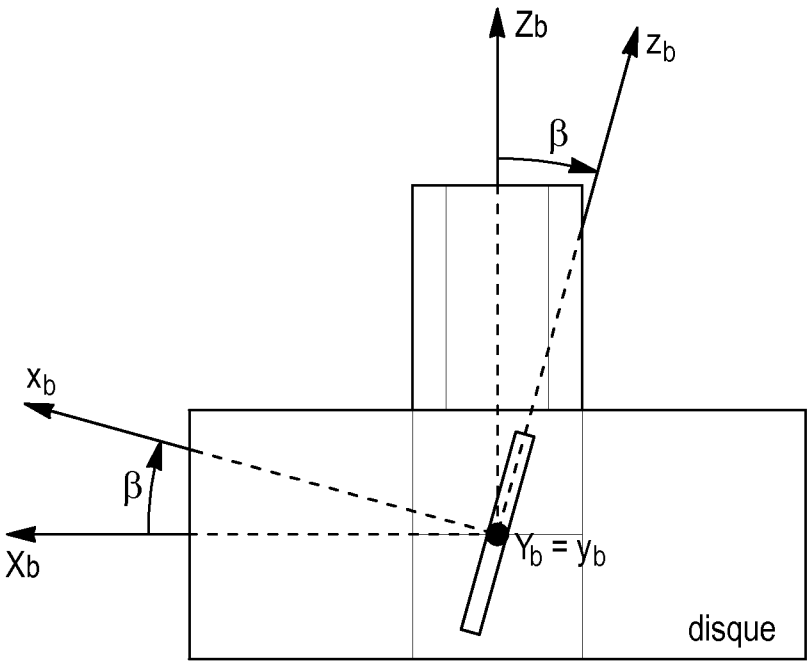


FIG. 7

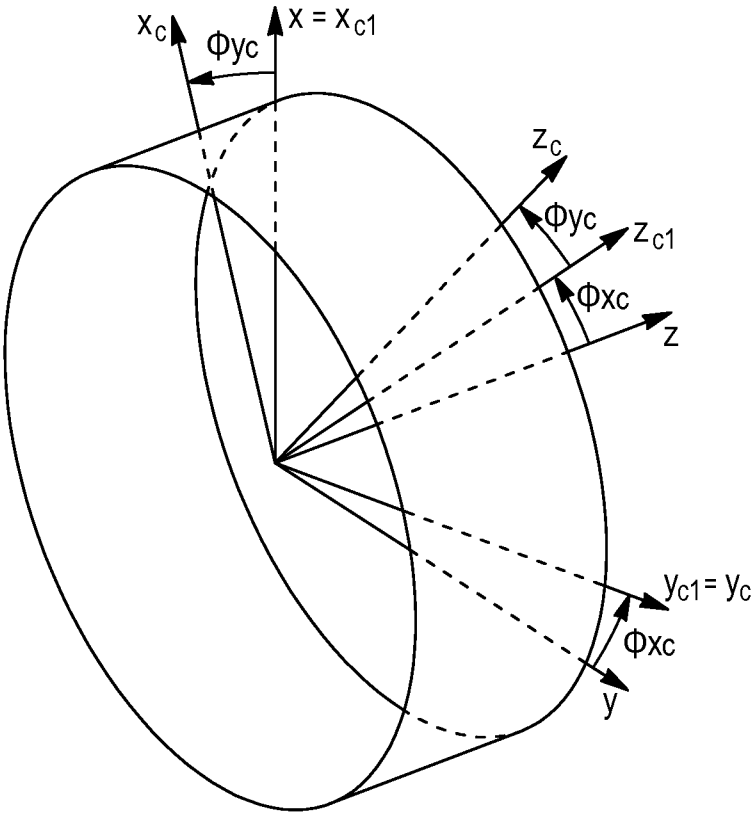


FIG. 8

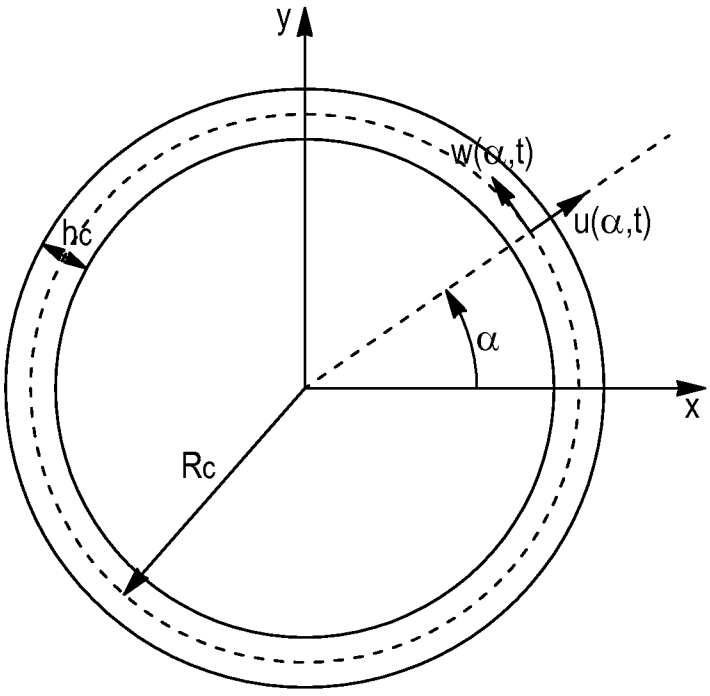


FIG. 9

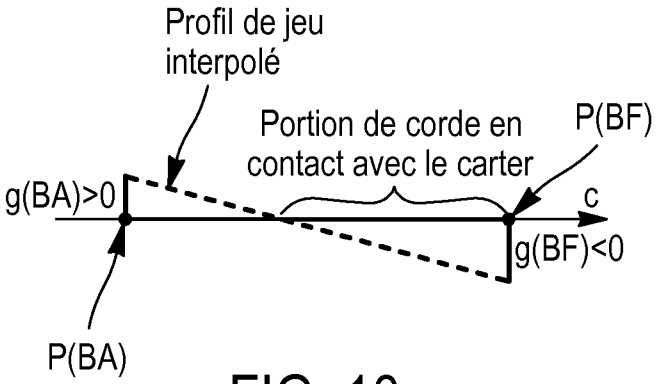


FIG. 10a

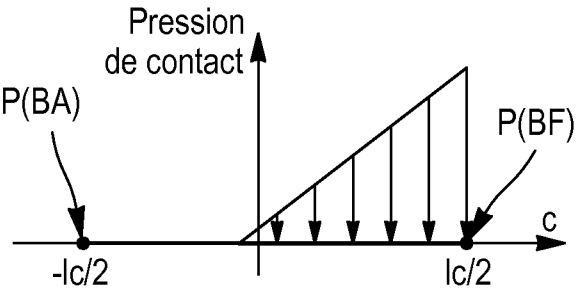


FIG. 10b

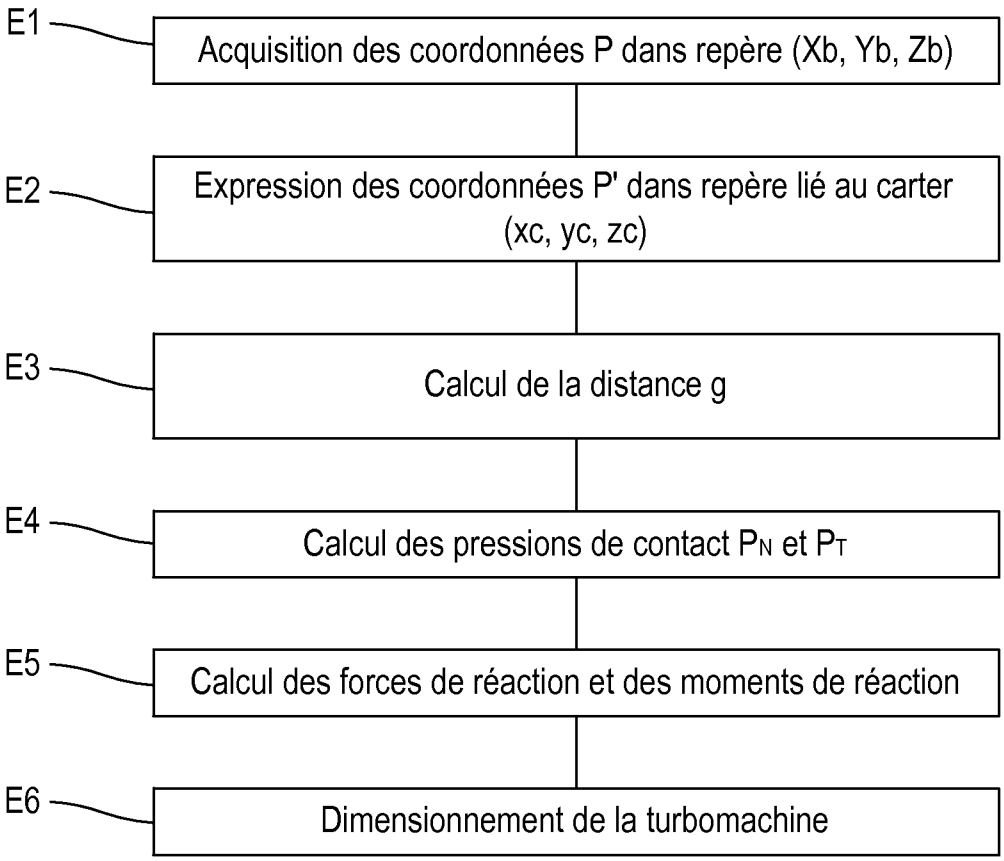
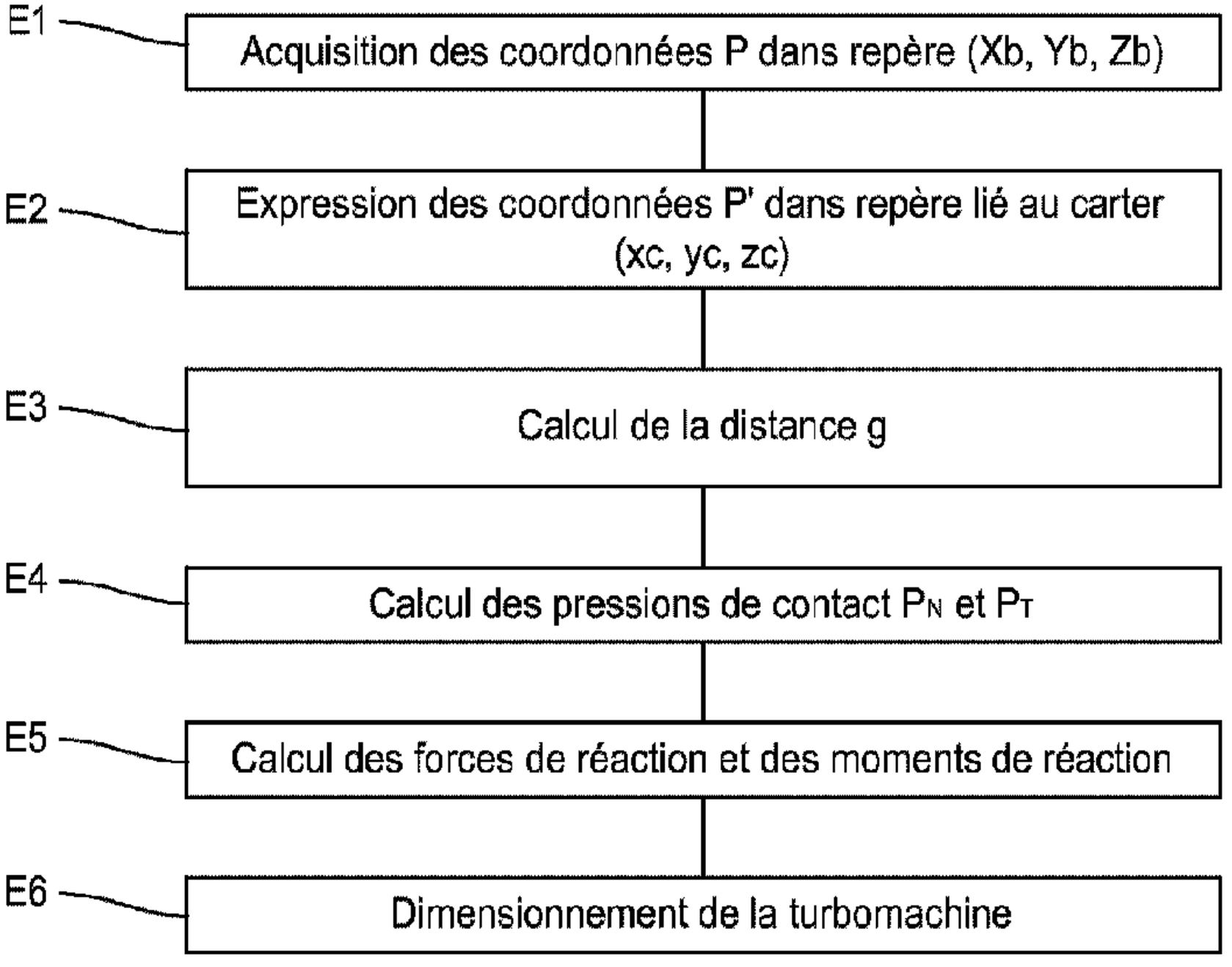


FIG. 11


E1
Acquisition des coordonnées P dans repère (Xb, Yb, Zb)
E2
Expression des coordonnées P' dans repère lié au carter (xc, yc, zc)
E3
Calcul de la distance g
E4
Calcul des pressions de contact P_N et P_T
E5
Calcul des forces de réaction et des moments de réaction
E6
Dimensionnement de la turbomachine