

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①① N° de publication : **3 141 209**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **22 10990**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **F 01 D 21/00 (2023.01), G 01 H 1/00, G 01 P 3/42**

①②

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ Système de correction d'un mouvement de précession d'un arbre d'une turbomachine, turbomachine et procédé associés.

②② Date de dépôt : 24.10.22.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 26.04.24 Bulletin 24/17.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 17.01.25 Bulletin 25/03.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *SAFRAN AIRCRAFT ENGINES  
Société par actions simplifiée — FR.*

⑦② Inventeur(s) : *MONTIN Frédéric, TRUCO Romain,  
GARNIER Florian et GUILLOTTEL Loïc Paul Yves.*

⑦③ Titulaire(s) : *SAFRAN AIRCRAFT ENGINES Société  
par actions simplifiée.*

⑦④ Mandataire(s) : *ARGYMA.*

**FR 3 141 209 - B1**



## Description

### **Titre de l'invention : Système de correction d'un mouvement de précession d'un arbre d'une turbomachine, turbomachine et procédé associés**

#### **Domaine technique**

[0001] La présente invention concerne le domaine des turbomachines. L'invention concerne plus particulièrement la correction d'un mouvement de précession d'un arbre d'une turbomachine d'aéronef.

[0002] De manière connue, en référence à la [Fig.1], il est représenté de manière schématique une turbomachine d'aéronef T comprenant un arbre 2 solidaire d'une soufflante 20 et d'une pluralité d'aube de compresseur mobiles 21. L'arbre 2 est guidé axialement autour d'un axe d'arbre X par un ou plusieurs paliers R1 solidaires d'un carter fixe 1 appelé stator. La turbomachine d'aéronef T comporte également des aubes de redresseur 11, solidaires du carter fixe 1, pour redresser un flux d'air A accéléré par les aubes de compresseur mobiles 21.

[0003] En pratique, l'arbre 2 d'une turbomachine T subit des vibrations au cours de sa rotation qui sont susceptibles d'induire un mouvement de précession (appelé aussi orbitage) de l'arbre 2. En référence à la [Fig.2], il est représenté un mouvement de précession de l'arbre 2 entre des instants temporels successifs  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . Dans cet exemple, le mouvement de précession P+ est dans le sens horaire mais il va de soi qu'il pourrait également être dans le sens anti-horaire. Un tel mouvement de précession P+ peut conduire à une dégradation des performances ainsi qu'à une usure prématurée de la turbomachine T (fatigue des pièces et/ou augmentation des jeux au niveau des roues mobiles et des étanchéités). De plus, il peut être source de gêne pour les passagers de l'aéronef puisque ces précessions transmettent des vibrations via les paliers R1 soutenant l'arbre 2 dans les structures et la cellule avion.

[0004] Pour corriger le mouvement de précession P+, il est connu dans l'art antérieur de prévoir des organes d'amortissement mécaniques mais ceux-ci sont dimensionnés de manière à amortir le plus efficacement possible un mode vibratoire prédéterminé de l'arbre 2. De tels organes d'amortissement mécaniques sont ainsi peu efficaces sur les autres modes vibratoires présents dans la plage de fonctionnement de la turbomachine d'aéronef T, ce qui présente un inconvénient.

[0005] L'invention vise à éliminer au moins certains de ces inconvénients.

#### **PRESENTATION DE L'INVENTION**

- [0006] L'invention concerne un système de correction d'un mouvement de précession d'un arbre d'une turbomachine comprenant un élément magnétique, l'arbre étant monté rotatif selon un axe d'arbre dans un carter fixe, le système de correction comprenant :
- Au moins un dispositif de mesure configuré pour déterminer un niveau de précession de l'arbre par rapport au carter fixe de la turbomachine,
  - Au moins un électroaimant configuré pour générer un effort magnétique sur l'élément magnétique de l'arbre à partir d'un ordre de commande, et
  - Au moins un calculateur configuré pour déterminer l'ordre de commande en fonction du niveau de précession de manière à générer un effort magnétique global s'opposant au mouvement de précession de l'arbre pour l'amortir.
- [0007] Grâce à l'invention, un mouvement de précession peut être corrigé de manière dynamique par application d'un effort magnétique qui permet d'amortir les modes vibratoires de l'arbre. Contrairement à l'art antérieur, le système de correction ne corrige pas un unique mode vibratoire. En outre, la correction peut être calibrée de manière pratique par simple calibrage de l'ordre de commande, ce qui est avantageux. La durée de vie de la turbomachine est améliorée. En outre, cela permet d'améliorer le confort des passagers d'un aéronef dont les turbomachines sont équipées d'un système de correction.
- [0008] De manière préférée, le système de correction comprend une pluralité d'électroaimants, chacun étant configuré pour générer un effort magnétique sur l'arbre à partir d'un ordre de commande, le calculateur étant configuré pour déterminer un ordre de commande pour chaque électroaimant en fonction du niveau de précession de manière à générer un effort magnétique global s'opposant au mouvement de précession de l'arbre pour l'amortir.
- [0009] L'utilisation de plusieurs électroaimants permet d'amortir l'arbre par une pluralité d'efforts magnétiques. En outre, cela permet de définir de manière précise la direction de l'effort magnétique global s'opposant au mouvement de précession de l'arbre pour l'amortir.
- [0010] De préférence, les électroaimants sont configurés pour être montés sur le carter fixe de manière périphérique à l'arbre, de préférence, à une même distance radiale de l'axe d'arbre.
- [0011] De manière préférée, les électroaimants comportent au moins une paire d'électroaimants configurés pour être diamétralement opposés par rapport à l'axe d'arbre. De préférence, le système de correction comprend au moins 4 électroaimants écartés de 90°. La direction de l'effort magnétique global est définie avec une grande précision.
- [0012] Selon un aspect de l'invention, le calculateur est configuré pour activer successivement chaque électroaimant de manière à générer un effort magnétique global

tournant s'opposant au mouvement de précession au cours du temps. L'amortissement est ainsi synchronisé avec le mouvement de précession.

- [0013] De préférence, le calculateur est configuré pour activer successivement chaque électroaimant selon une avance de phase par rapport au mouvement de précession. Une telle avance de phase permet d'amortir tout déplacement futur de l'arbre dans son mouvement de précession.
- [0014] De manière préférée, les électroaimants sont activés successivement de manière progressive, deux électroaimants pouvant être actifs de manière simultanée.
- [0015] Selon un aspect de l'invention, chaque électroaimant est configuré pour générer un effort magnétique sur l'arbre selon une direction radiale par rapport à l'axe d'arbre. Le mouvement de précession est ainsi corrigé de manière directe pour recalibrer l'arbre selon l'axe d'arbre.
- [0016] Selon un autre aspect de l'invention, chaque électroaimant est configuré pour générer un effort magnétique sur l'arbre selon une direction parallèle à l'axe d'arbre. Le mouvement de précession est ainsi corrigé de manière indirecte en appliquant un moment de flexion à l'arbre pour recalibrer l'arbre selon l'axe d'arbre.
- [0017] De préférence, le système de correction comprend au moins une cible mobile configurée pour être montée sur l'arbre et configurée pour interagir avec le dispositif de mesure, par exemple, de manière optique, inductive ou capacitive. La mesure du niveau de précession est plus précise, ce qui améliore la correction.
- [0018] De préférence, le système de correction comprend une pluralité de dispositifs de mesure configurés pour être montés sur le carter fixe de manière périphérique à l'arbre, de préférence, à une même distance radiale de l'axe d'arbre.
- [0019] L'invention concerne également une turbomachine d'aéronef comprenant un carter fixe et au moins un arbre monté rotatif selon un axe d'arbre dans le carter fixe, l'arbre comprenant au moins un élément magnétique, la turbomachine comprenant un système de correction, tel que présenté précédemment, configuré pour générer un effort magnétique sur l'élément magnétique pour s'opposer au mouvement de précession de l'arbre de manière à l'amortir.
- [0020] De préférence, l'arbre est solidaire d'une soufflante et d'une pluralité d'aube de compresseur mobiles positionnées de manière radiale extérieure par rapport à l'arbre. Le système de correction est positionné radialement entre l'arbre et les aubes de compresseur mobiles.
- [0021] L'invention concerne également un aéronef comprenant une turbomachine telle que présentée précédemment.
- [0022] L'invention concerne également un procédé de correction d'un mouvement de précession d'un arbre d'une turbomachine d'aéronef comprenant un carter fixe et au moins un arbre monté rotatif selon un axe d'arbre dans le carter fixe, l'arbre

comprenant au moins un élément magnétique, le procédé de correction comportant des étapes consistant à :

- déterminer un niveau de précession de l'arbre par rapport au carter fixe de la turbomachine, et
- générer un effort magnétique sur l'élément magnétique de l'arbre, au moyen d'au moins un électroaimant, qui est fonction du niveau de précession de manière à générer un effort magnétique s'opposant au mouvement de précession de l'arbre pour l'amortir.

[0023] De manière préférée, le procédé comporte des étapes consistant à :

- enregistrer les efforts magnétiques générés au cours du temps et
- estimer un état d'usure de la turbomachine à partir des efforts magnétique enregistrés au cours du temps.

[0024] De manière avantageuse, en suivant l'évolution de l'effort magnétique appliqué, on estime le besoin en correction et, par conséquent, un état d'usure de la turbomachine. Si l'effort magnétique appliqué devient trop élevé, une étape de maintenance de la turbomachine doit être réalisée.

## **PRESENTATION DES FIGURES**

[0025] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple, et se référant aux figures suivantes, données à titre d'exemples non limitatifs, dans lesquelles des références identiques sont données à des objets semblables.

[0026] La [Fig.1] est une représentation schématique d'une turbomachine d'aéronef comportant un arbre.

[0027] La [Fig.2] est une représentation schématique d'un mouvement de précession d'un arbre.

[0028] La [Fig.3] est une représentation schématique d'une turbomachine d'aéronef équipée d'un système de correction selon l'invention.

[0029] La [Fig.4] est une représentation schématique d'un système de correction selon l'invention.

[0030] La [Fig.5] est une représentation schématique en demi-coupe axiale d'une turbomachine d'aéronef comportant un arbre et un système de correction selon une première forme de réalisation de l'invention.

[0031] La [Fig.6] est une représentation schématique en coupe transversale du système de correction selon la première forme de réalisation.

[0032] La [Fig.7] et la [Fig.8] sont des représentations schématiques d'étapes de correction d'un mouvement de précession de l'arbre par le système de correction selon la première forme de réalisation.

- [0033] La [Fig.9] est une représentation schématique en demi-coupe axiale d'une turbomachine d'aéronef comportant un arbre et un système de correction selon une variante de la première forme de réalisation de l'invention.
- [0034] La [Fig.10] est une représentation schématique en coupe transversale du système de correction selon la variante de la première forme de réalisation.
- [0035] La [Fig.11] est une représentation schématique en demi-coupe axiale d'une turbomachine d'aéronef comportant un arbre et un système de correction selon la deuxième forme de réalisation.
- [0036] La [Fig.12] est une représentation schématique en coupe transversale depuis l'aval du système de correction selon la deuxième forme de réalisation.
- [0037] Il faut noter que les figures exposent l'invention de manière détaillée pour mettre en œuvre l'invention, lesdites figures pouvant bien entendu servir à mieux définir l'invention le cas échéant.

### **DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION**

- [0038] L'invention va être présentée pour une turbomachine d'aéronef comprenant un arbre qui est soumis à des vibrations au cours de son fonctionnement. Il va néanmoins de soi que l'invention peut s'appliquer à toute turbomachine, en particulier, dans le domaine industriel.
- [0039] A titre d'exemple, en référence à la [Fig.3], il est représenté une turbomachine d'aéronef T comportant un arbre 2 monté rotatif selon un axe d'arbre X dans un carter fixe 1. L'arbre 2 est relié à une soufflante 20 permettant d'accélérer de l'amont vers l'aval un flux d'air A. Sur la [Fig.3], l'axe d'arbre X est orienté de l'amont vers l'aval. Un tel arbre 2 est susceptible de subir des vibrations au cours de son fonctionnement générant un mouvement de précession, appelé aussi balourd ou orbitage.
- [0040] De manière préférée, l'arbre 2 est un arbre basse pression d'une turbomachine à double corps comportant un arbre basse pression et un arbre haute pression 103. Dans cet exemple, il est également représenté de manière schématique à la [Fig.3] un compresseur basse pression 101, un compresseur haute pression 102, une turbine haute pression 104 et une turbine basse pression 105.
- [0041] Selon l'invention, l'arbre 2 comprend au moins un élément magnétique configuré pour interagir magnétiquement avec un système de correction 9 selon l'invention.
- [0042] Selon un premier aspect, l'arbre 2 peut être intrinsèquement magnétique, par exemple, s'il comporte un revêtement métallique. Selon un deuxième aspect, l'arbre 2 comporte un ou plusieurs éléments magnétiques 7 ([Fig.4]) rapportés à sa périphérie de manière à permettre des interactions magnétiques.

- [0043] A titre d'exemple, une couronne périphérique ou une pluralité d'éléments magnétiques indépendants (aimants permanents, etc.) peuvent être positionnés à la périphérie de l'arbre 2.
- [0044] Selon l'invention, la turbomachine T comprend un système de correction 9, représenté à la [Fig.3] et à la [Fig.4], configuré pour générer un effort magnétique F sur l'arbre 2. Cela permet de s'opposer à un mouvement de précession P+ de l'arbre 2 afin de l'amortir. Un tel système de correction 9 permet avantageusement d'amortir tout type de mode vibratoire, ce qui allonge la durée de vie de la turbomachine T et améliore le confort des passagers.
- [0045] Comme illustré à la [Fig.4], le système de correction 9 comprend au moins un dispositif de mesure 4 configuré pour déterminer un niveau de précession NP de l'arbre 2 par rapport au carter fixe 1 de la turbomachine T. De manière préférée, le dispositif de mesure 4 se présente sous la forme d'un capteur de distance configuré pour déterminer un mouvement de précession P+. Comme cela sera présenté par la suite, plusieurs dispositifs de mesure 4 sont de préférence utilisés pour déterminer précisément un niveau de précession NP. Un dispositif de mesure 4 peut se présenter sous la forme d'un capteur capacitif, d'un capteur inductif, d'un accéléromètre ou analogue.
- [0046] Par niveau de précession NP, on entend notamment un sens de précession et une intensité de précession, par exemple, une distance d'écartement de l'arbre 2 par rapport à l'axe d'arbre X (excentrement). De préférence, le niveau de précession NP comporte la position courante de l'arbre 2 dans son mouvement de précession P+, c'est-à-dire, la position de précession. Cela permet avantageusement de corriger de manière dynamique un mouvement de précession P+ en fonction de la position de précession.
- [0047] De manière préférée, le système de correction 9 comprend au moins deux dispositifs de mesure 4, de préférence au moins 4, qui sont décalés angulairement l'un par rapport à l'autre pour mesurer précisément le niveau de précession NP. Un décalage de 90° est par exemple adapté.
- [0048] Toujours en référence à la [Fig.4], le système de correction 9 comprend au moins un électroaimant 5 configuré pour générer un effort magnétique F sur l'arbre 2 à partir d'un ordre de commande COM, en particulier, un courant de commande comme cela sera présenté par la suite.
- [0049] Un électroaimant 5 permet de manière avantageuse de générer un effort magnétique calibré sur l'élément magnétique 7 de l'arbre 2 afin de pouvoir modifier sa position et corriger le mouvement de précession P+. Par souci de clarté, seuls quelques éléments magnétiques 7 sont représentés. De préférence, les éléments magnétiques 7 couvrent sensiblement uniformément et de manière continue la périphérie de manière à permettre à un électroaimant 5 d'être toujours en vis-à-vis d'un élément magnétique 7.

- [0050] De préférence, un électroaimant 5 génère un effort de répulsion vis-à-vis de l'élément magnétique 7 qui vise à les écarter les uns des autres. Il va néanmoins de soi qu'un effort d'attraction pourrait également convenir. Il va de soi qu'un même électroaimant 5 pourrait agir lors d'une correction en répulsion puis en traction en fonction du besoin.
- [0051] De manière préférée, comme cela sera présenté par la suite, le système de correction 9 comprend une pluralité d'électroaimants 5, chacun étant configuré pour générer un effort magnétique F sur l'arbre 2 à partir d'un ordre de commande COM. Cela permet de générer un effort magnétique global FGLOB sur l'arbre 2 dont la direction est maîtrisée précisément pour s'opposer au mouvement de précession P+.
- [0052] Les électroaimants 5 sont configurés pour être montés sur le carter fixe 1 de manière périphérique à l'arbre 2, de préférence, à une même distance radiale de l'axe d'arbre X. Un montage des électroaimants 5 sur le carter fixe 1 permet de faciliter leur intégration dans la turbomachine T.
- [0053] Toujours en référence à la [Fig.4], le système de correction 9 comprend un calculateur 6 configuré pour déterminer l'ordre de commande COM pour chaque électroaimant 5 en fonction du niveau de précession NP de manière à générer un effort magnétique F s'opposant au mouvement de précession P+. Le calculateur 6 est relié à chaque dispositif de mesure 4 et à chaque électroaimant 5.
- [0054] De préférence, le calculateur 6 comporte une base de données (non représentée) associant, pour chaque niveau de précession NP, un ordre de commande COM pour chaque électroaimant 5. De préférence, chaque ordre de commande COM se présente sous la forme d'un courant de commande.
- [0055] De manière préférée, le calculateur 6 est configuré pour activer successivement chaque électroaimant 5 de manière à générer un effort magnétique global tournant FGLOB s'opposant au mouvement de précession P+ au cours du temps. Ainsi, l'effort magnétique global tournant FGLOB permet d'amortir le mouvement de précession P+ de manière progressive, ce qui est avantageux.
- [0056] En outre, le calculateur 6 est configuré pour activer successivement chaque électroaimant 5 selon une avance de phase par rapport au mouvement de précession P+ de manière à limiter les contraintes mécaniques appliquées à l'arbre 2. Ainsi, lorsque la position de précession de l'arbre 2 est connue, l'effort magnétique global FGLOB permet d'amortir de manière synchronisée le mouvement de précession P+.
- [0057] En référence à la [Fig.5], il est représenté de manière schématique une turbomachine d'aéronef T comprenant un arbre 2 solidaire d'une soufflante 20 et d'une pluralité d'aube de compresseur mobiles 21. L'arbre 2 est un arbre de propulsion. Les aubes de compresseur mobiles 21 sont positionnées de manière radialement extérieure par rapport à l'arbre 2. La turbomachine d'aéronef T comporte également des aubes de

redresseur 11 solidaires du carter fixe 1 pour redresser le flux d'air accéléré par les aubes de compresseur mobiles 21.

- [0058] Dans cette première forme de réalisation, en référence à la [Fig.5], le système de correction 9 est positionné radialement entre l'arbre 2 et les aubes de compresseur mobiles 21.
- [0059] Dans cet exemple, en référence à la [Fig.6], le système de correction 9 comprend quatre dispositifs de mesure 4a-4d qui sont écartés de 90°. Dans cet exemple, chaque dispositif de mesure 4a-4d se présente sous la forme d'un capteur de mesure monté sur le carter fixe 1 de manière périphérique à l'arbre 2, en particulier, à une même distance radiale de l'axe d'arbre X. Dans cet exemple, les dispositifs de mesure 4a-4d sont montés sur une pièce de support 50 solidaire du carter fixe 1.
- [0060] Dans cet exemple, l'arbre 2 comporte une pluralité de cibles mobiles 42 solidaires de l'arbre 2 configurées pour interagir avec les dispositifs de mesure 4a-4d pour déterminer précisément le niveau de précession NP, en particulier, de manière optique, inductive ou capacitive. Dans cet exemple, il est représenté autant de cibles mobiles 42 que de dispositifs de mesure 4a-4d mais il va de soi qu'elles pourraient être plus nombreuses. Comme illustré à la [Fig.6], quatre cibles mobiles 42 sont écartées de 90°. Dans cet exemple, les cibles mobiles 42 sont montées sur une pièce de support 70 solidaire de l'arbre 2. L'utilisation de pièces de support 50, 70 permet un positionnement précis des dispositifs de mesure 4a-4d et des cibles mobiles 42 tout en tenant compte de l'architecture de la turbomachine T.
- [0061] Toujours en référence à la [Fig.6], dans cet exemple, le système de correction 9 comporte quatre électroaimants 5a-5d qui sont écartés de 90°, c'est-à-dire, deux paires d'électroaimants diamétralement opposés afin d'agir précisément sur la position de l'arbre 2 selon deux directions d'alignement perpendiculaires (une direction verticale et une direction horizontale dans cet exemple). Il va de soi que le nombre d'électroaimants 5a-5d pourrait être différent.
- [0062] Dans cette première forme de réalisation, en référence à la [Fig.6], chaque électroaimant 5a-5d est configuré pour générer un effort magnétique Fa-Fd sur l'arbre 2 selon une direction radiale par rapport à l'axe d'arbre X de manière à réaliser une correction « directe » du mouvement de précession P+. Les efforts sont radiaux et dirigés vers l'axe d'arbre X.
- [0063] Sur la [Fig.6], les dispositifs de mesure 4a-4d et les électroaimants 5a-5d sont représentés dans un même plan transversal à l'axe d'arbre X afin de permettre de mesurer de manière précise l'impact des efforts magnétiques Fa-Fb des électroaimants 5a-5d sur l'arbre 2. Il va néanmoins de soi que les dispositifs de mesure 4a-4d et les électroaimants 5a-5d pourraient être dans des plans transversaux différents.

- [0064] De préférence, les électroaimants 5a-5d sont fixés à la pièce de support 50 du carter fixe 1. Dans cet exemple, des éléments magnétiques 7 sont fixés à la pièce de support 70 de l'arbre 2 en regard des électroaimants 5a-5d. En référence à la [Fig.6], les éléments magnétiques 7 sont positionnés radialement intérieurement aux électroaimants 5a-5d. De manière préférée, la pièce de support 70 fixée à l'arbre 2 est ajourée pour réduire sa masse et permettre le passage de servitudes (électricité, conduite d'huile, etc.). Le système de correction 9 est ainsi aisément intégrable dans la turbomachine T.
- [0065] Dans cet exemple, l'arbre 2 tourne dans le sens horaire R+. En l'absence de mouvement de précession P+, en référence à la [Fig.6], le calculateur 6 n'émet aucun ordre de commande COM aux électroaimants 5a-5d de manière à générer un effort magnétique global FGLOB de valeur nulle. De manière alternative, le calculateur 6 émet un ordre de commande COM identique à chaque électroaimant 5a-5d de manière à générer des efforts magnétiques Fa-Fd de valeur identique afin de générer un effort magnétique global FGLOB de valeur nulle. Ainsi, l'arbre 2 n'est pas déplacé magnétiquement en l'absence de mouvement de précession P+.
- [0066] Au cours du fonctionnement de la turbomachine T, les dispositifs de mesure 4a-4d réalisent des mesures de distance pour déterminer le niveau de précession NP de l'arbre 2, en particulier, en surveillant l'excentrement de l'arbre 2, le sens de précession et la position de précession via les dispositifs de mesure 4a-4d et les cibles mobiles 42.
- [0067] Dans cet exemple, en référence aux figures 7 et 8, du fait des vibrations, l'arbre 2 a un mouvement de précession P+. Dans cet exemple, le niveau de précession NP correspond à une précession dans le sens horaire (précession directe P+) avec un degré de précession qui correspond à l'écartement de l'arbre 2 par rapport à l'axe d'arbre X (excentrement). De manière préférée, l'étape consistant à déterminer le niveau de précession NP de l'arbre 2 n'est mise en œuvre que lorsque les vibrations mesurées sur l'arbre 2 dépassent un seuil prédéterminé. Cela permet d'éviter de surveiller le niveau de précession NP de manière continue.
- [0068] En référence à la [Fig.7], si le niveau de précession NP dépasse un seuil prédéterminé, les électroaimants 5a-5d génèrent des efforts magnétiques Fa-Fd sur les éléments magnétiques 7 de l'arbre 2. Les efforts magnétiques Fa-Fd sont fonction du niveau de précession NP de manière à générer un effort magnétique global FGLOB s'opposant au mouvement de précession P+ de l'arbre 2. En particulier, il est appliqué un effort magnétique global FGLOB qui s'oppose à un mouvement de précession P+ dans le sens horaire avec une amplitude qui est fonction de l'excentrement.
- [0069] A titre d'exemple, en référence à la [Fig.7], à un premier instant t1, l'arbre 2 est décalé par rapport à l'axe d'arbre X et est situé à 12h, c'est-à-dire à proximité de

l'électroaimant 5a. Une telle position de précession est par exemple déterminée par les dispositifs de mesure 4a, 4d situés à proximité de l'électroaimant 5a. Comme l'arbre 2 suit un mouvement de précession horaire P+, il va se déplacer à un deuxième instant t2 à 3h vers l'électroaimant 5b. Autrement dit, l'arbre 2 va se déplacer vers la droite en référence à la [Fig.7].

[0070] Pour tenir compte du niveau de précession NP, le calculateur 6 du système de correction 9 détermine un ordre de commande COM pour l'électroaimant 5b qui génère un effort magnétique Fb dirigé radialement vers l'intérieur, c'est-à-dire, vers l'axe d'arbre X. Les autres électroaimants 5a, 5c, 5d ne reçoivent pas d'ordre de commande et il en résulte un effort magnétique global FGLOB qui tend à déplacer l'arbre 2 vers la gauche, c'est-à-dire, de manière opposée au mouvement de précession P+. Le mouvement de précession P+ de l'arbre 2 est amorti.

[0071] De manière avantageuse, un nouvel effort magnétique global FGLOB est déterminé à chaque passage de l'arbre 2 devant un électroaimant 5a-5d. A cet effet, en référence à la [Fig.8], au deuxième instant t2, l'arbre 2 est décalé par rapport à l'axe d'arbre X et est situé à 3h, c'est-à-dire à proximité de l'électroaimant 5b. Comme l'arbre 2 suit un mouvement de précession horaire, il va se déplacer au troisième instant t3 à 6h vers l'électroaimant 5c. Autrement dit, l'arbre 2 va se déplacer vers le bas.

[0072] Pour tenir compte du niveau de précession NP, le calculateur 6 du système de correction 9 détermine un ordre de commande COM pour l'électroaimant 5c qui génère un effort magnétique Fc dirigé radialement vers l'intérieur, c'est-à-dire, vers l'axe d'arbre X. Les autres électroaimants 5a, 5b, 5d ne reçoivent pas d'ordre de commande et il en résulte un effort magnétique global FGLOB qui tend à déplacer l'arbre 2 vers le haut, c'est-à-dire, de manière opposée au mouvement de précession P+. Le mouvement de précession P+ de l'arbre 2 est amorti.

[0073] De manière avantageuse, à chaque fois que l'arbre 2 s'approche d'un électroaimant 5a-5d, le mouvement de précession P+ peut être compensé.

[0074] Ainsi, dans cet exemple, le calculateur 6 est configuré pour activer successivement chaque électroaimant 5a-5d de manière à générer un effort magnétique global tournant FGLOB s'opposant au mouvement de précession P+ au cours du temps. Ainsi, l'effort magnétique global tournant FGLOB permet de compenser le mouvement de précession P+ de manière progressive et synchronisée, ce qui est avantageux. Dans cet exemple, l'effort magnétique global tournant FGLOB suit le mouvement de précession P+, c'est-à-dire, tourne selon le sens horaire.

[0075] De manière préférée, chaque électroaimant 5a-5d est activé avec une avance de phase par rapport à la position de précession de l'arbre 2 afin d'amortir son mouvement de précession P+ et limiter les contraintes mécaniques appliquées à l'arbre 2. De préférence, l'avance de phase correspond à l'écartement angulaire entre

deux électroaimants 5a-5d consécutifs. De manière préférée, l'avance de phase est déterminée en fonction du temps de réponse du système complet, en particulier, le temps de mesure du déplacement, le temps de traitement de la donnée (acquisition, filtrage, ...), le temps de transmission de l'information au calculateur, le temps de traitement du calculateur, le temps de transmission de la commande aux électroaimants 5, le temps d'activation de l'électroaimant, etc.

- [0076] Dans cet exemple, le système de correction 9 est configuré pour commander un électroaimant 5a-5d à la fois mais il va de soi que plusieurs électroaimants 5a-5d pourraient être commandés simultanément pour obtenir l'effort magnétique global FGLOB désiré.
- [0077] Le niveau de précession NP est de préférence surveillé de manière continue lors de la correction afin d'adapter de manière dynamique les ordres de commande COM et l'effort magnétique global FGLOB qui en résulte. De préférence, dès que le niveau de précession NP est inférieur à un seuil prédéterminé, la correction est stoppée. De manière préférée, une boucle de régulation est mise en œuvre pour permettre d'adapter la correction.
- [0078] De manière préférée, les ordres de commande COM sont enregistrés ainsi que les régimes de rotation associés de l'arbre 2. Cela permet de déterminer, à un régime donné, si l'effort magnétique global FGLOB est conforme par rapport aux corrections passées. De manière avantageuse, on peut déterminer un dysfonctionnement de la turbomachine T si l'effort magnétique global FGLOB est plus élevé qu'anticipé. De manière avantageuse, on peut estimer un état d'usure de la turbomachine T en connaissant l'effort magnétique global FGLOB, ce qui permet de réaliser des opérations de maintenance prédictive.
- [0079] Une variante de la première forme de réalisation est représentée aux figures 9 et 10. Par souci de clarté et de concision, les éléments communs aux figures 5 et 6 ne sont pas décrits de nouveau. Dans cette variante, les éléments magnétiques 7 sont positionnés radialement extérieurement aux électroaimants 5a-5d. Par ailleurs, le nombre d'élément magnétiques 7 est supérieur au nombre d'électroaimants 5 comme illustré à la [Fig.10]. Dans cette forme de réalisation, les éléments magnétiques 7 couvrent sensiblement uniformément la périphérie de manière à permettre à un électroaimant 5 d'être toujours en vis-à-vis d'un élément magnétique 7. Par souci de concision, les cibles mobiles 42 n'ont pas été représentées.
- [0080] Il va de soi que le nombre d'élément magnétiques 7 peut également être supérieur au nombre d'électroaimants 5 lorsque les éléments magnétiques 7 sont positionnés radialement intérieurement aux électroaimants 5a-5d.
- [0081] Dans une deuxième forme de réalisation, en référence à la [Fig.11], chaque électroaimant 5a-5d est configuré pour générer un effort magnétique  $F_a$ - $F_d$  sur l'arbre

2 selon une direction parallèle à l'axe d'arbre X. Cela permet avantageusement de générer un couple de flexion FLEX sur l'arbre 2 de manière à réaliser une correction « indirecte » du mouvement de précession P+. Ainsi, de manière avantageuse, on tire avantage de la flexibilité de l'arbre 2 pour corriger son mouvement de précession P+.

[0082] De préférence, les électroaimants 5a-5d sont fixés au carter fixe 1 via une pièce de support 50 et les éléments magnétiques 7 sont fixés à l'arbre 2, en regard des électroaimants 5a-5d, via une pièce de support 70, par exemple, une couronne. Dans cet exemple, en référence à la [Fig.12], les éléments magnétiques 7 sont positionnés en amont des électroaimant 5a-5d. La pièce de support 70 peut être ajouré pour réduire sa masse et permettre le passage de servitudes. Le système de correction 9 est ainsi aisément intégrable dans la turbomachine T.

[0083] De manière préférée, dans les deux formes de réalisation, les pièces de support 50, 70 possèdent des formes adaptées à la structure de la turbomachine T et sont montées au niveau d'interfaces de montage existantes.

[0084] En référence à la [Fig.12] représentant le système de correction 9 vu depuis l'aval, il est représenté quatre électroaimants 5a-5d décalés angulairement de 90° pour commander un effort global FGLOB générant un moment de flexion FLEX sur l'arbre 2. De manière analogue à la première forme de réalisation, des dispositifs de mesure 4 (non représentés) déterminent le niveau de précession NP et le calculateur 6 (non représenté) détermine les efforts magnétiques Fa-Fd déterminant le moment de flexion FLEX en fonction dudit niveau de précession NP. Une telle forme de réalisation est avantageuse sur le plan de l'encombrement. De manière préférée, le système de correction 9 est indépendant des paliers de guidage de l'arbre 2.

[0085] Grâce au système de correction 9 selon l'invention, un mouvement de précession d'un arbre 2 peut être mesuré et corrigé de manière dynamique et, ce, indépendamment de son mode vibratoire. La durée de vie et la fiabilité d'un arbre 2 sont avantageusement améliorées. Il en va de même du carter fixe 1 qui reçoit les vibrations. L'invention présente un intérêt important pour un arbre 2 solidaire d'une soufflante 20 dont les vibrations peuvent présenter une gêne pour les passagers d'aéronef.

## Revendications

- [Revendication 1] Système de correction (9) d'un mouvement de précession (P+) d'un arbre (2) d'une turbomachine (T) comprenant un élément magnétique (7), l'arbre (2) étant monté rotatif selon un axe d'arbre (X) dans un carter fixe (1), le système de correction (9) comprenant :
- une pluralité de dispositifs de mesure (4a-4d) configurés pour être montés sur le carter fixe (1) de manière périphérique à l'arbre (2) pour déterminer un niveau de précession (NP) de l'arbre (2) par rapport au carter fixe (1) de la turbomachine (T),
  - une pluralité de cibles mobiles (42) configurée pour être montées solidairement sur l'arbre (2) et configurées pour interagir avec les dispositifs de mesure (4a-4d),
  - Au moins un électroaimant (5) configuré pour générer un effort magnétique (F) sur l'élément magnétique (7) de l'arbre (2) à partir d'un ordre de commande (COM), et
  - Au moins un calculateur (6) configuré pour déterminer l'ordre de commande (COM) en fonction du niveau de précession (NP) de manière à générer un effort magnétique global (FGLOB) s'opposant au mouvement de précession (P+) de l'arbre (2) pour l'amortir.
- [Revendication 2] Système de correction (9) selon la revendication 1, comprenant une pluralité d'électroaimants (5a-5d), chacun étant configuré pour générer un effort magnétique (Fa-Fd) sur l'arbre (2) à partir d'un ordre de commande (COM), le calculateur (6) étant configuré pour déterminer un ordre de commande (COM) pour chaque électroaimant (5a-5d) en fonction du niveau de précession (NP) de manière à générer un effort magnétique global (FGLOB) s'opposant au mouvement de précession (P+) de l'arbre (2) pour l'amortir.
- [Revendication 3] Système de correction selon la revendication 2, dans lequel les électroaimants (5a-5d) sont configurés pour être montés sur le carter fixe (1) de manière périphérique à l'arbre (2), de préférence, à une même distance radiale de l'axe d'arbre (X).
- [Revendication 4] Système de correction (9) selon l'une des revendications 2 à 3, dans lequel les électroaimants (5a-5d) comportent au moins une paire d'électroaimants (5a,5c ; 5b,5d) configurés pour être diamétralement opposés par rapport à l'axe d'arbre (X).

- [Revendication 5] Système de correction (9) selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel le calculateur (6) est configuré pour activer successivement chaque électroaimant (5a-5d) de manière à générer un effort magnétique global (FGLOB) tournant s'opposant au mouvement de précession (P+) au cours du temps.
- [Revendication 6] Système de correction (9) selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel le calculateur (6) est configuré pour activer successivement chaque électroaimant (5a-5d) selon une avance de phase par rapport au mouvement de précession (P+).
- [Revendication 7] Système de correction (9) selon l'une des revendications 2 à 6, dans lequel chaque électroaimant (5) est configuré pour générer un effort magnétique (F) sur l'arbre (2) selon une direction radiale par rapport à l'axe d'arbre (X).
- [Revendication 8] Système de correction (9) selon l'une des revendications 2 à 6, dans lequel chaque électroaimant (5) est configuré pour générer un effort magnétique (F) sur l'arbre (2) selon une direction parallèle à l'axe d'arbre (X).
- [Revendication 9] Système de correction (9) selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel les dispositifs de mesure (4a-4d) sont montés sur le carter fixe (1) à une même distance radiale de l'axe d'arbre (X).
- [Revendication 10] Turbomachine d'aéronef (T) comprenant un carter fixe (1) et au moins un arbre (2) monté rotatif selon un axe d'arbre (X) dans le carter fixe (1), l'arbre (2) comprenant au moins un élément magnétique (7), la turbomachine comprenant un système de correction (9) selon l'une des revendications 1 à 9 configuré pour générer un effort magnétique (F) sur l'élément magnétique (7) pour s'opposer au mouvement de précession (P+) de l'arbre (2) de manière à l'amortir.
- [Revendication 11] Turbomachine d'aéronef (T) selon la revendication 10 dans laquelle, l'arbre (2) étant solidaire d'une soufflante (20) et d'une pluralité d'aube de compresseur mobiles (21) positionnées de manière radiale extérieure par rapport à l'arbre (2), le système de correction (9) est positionné radialement entre l'arbre (2) et les aubes de compresseur mobiles (21).
- [Revendication 12] Aéronef comprenant une turbomachine selon l'une des revendications 10 à 11.

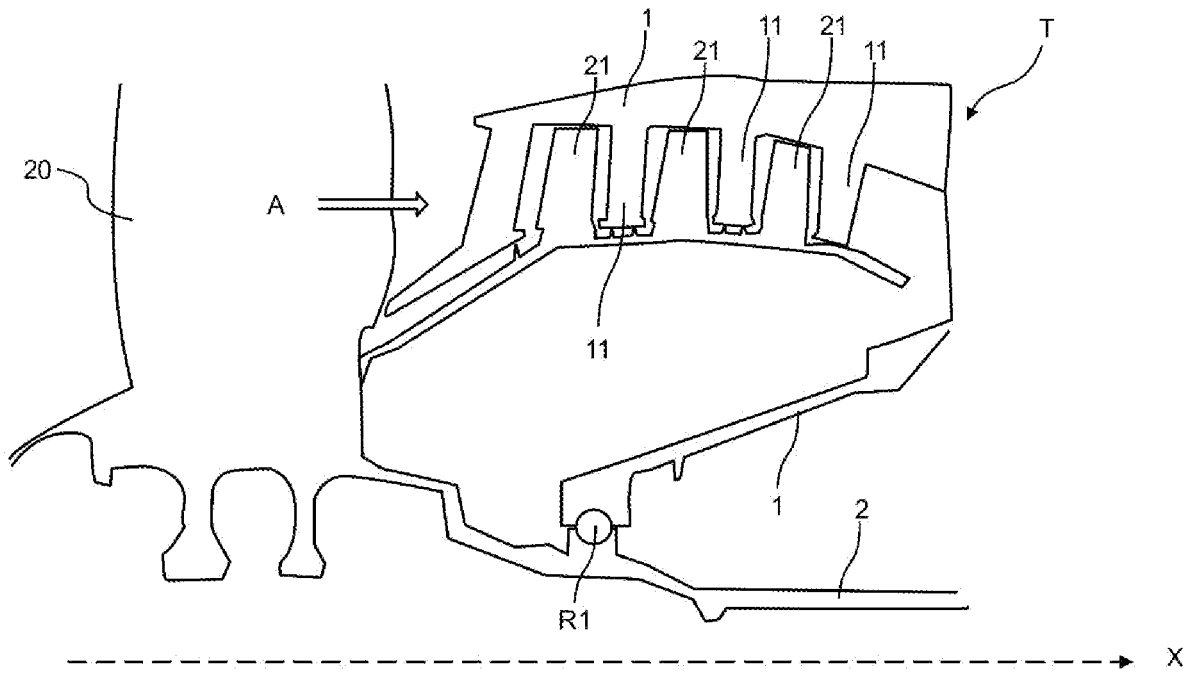
[Revendication 13] Procédé de correction d'un mouvement de précession (P+) d'un arbre (2) d'une turbomachine d'aéronef (T) selon l'une des revendications 10 à 11, le procédé de correction comportant des étapes consistant à :

- déterminer un niveau de précession (NP) de l'arbre (2) par rapport au carter fixe (1) de la turbomachine (T), et
- générer un effort magnétique (F) sur l'élément magnétique (7) de l'arbre (2), au moyen d'au moins un électroaimant (5), qui est fonction du niveau de précession (NP) de manière à générer un effort magnétique (F) s'opposant au mouvement de précession (P+) de l'arbre (2) pour l'amortir.

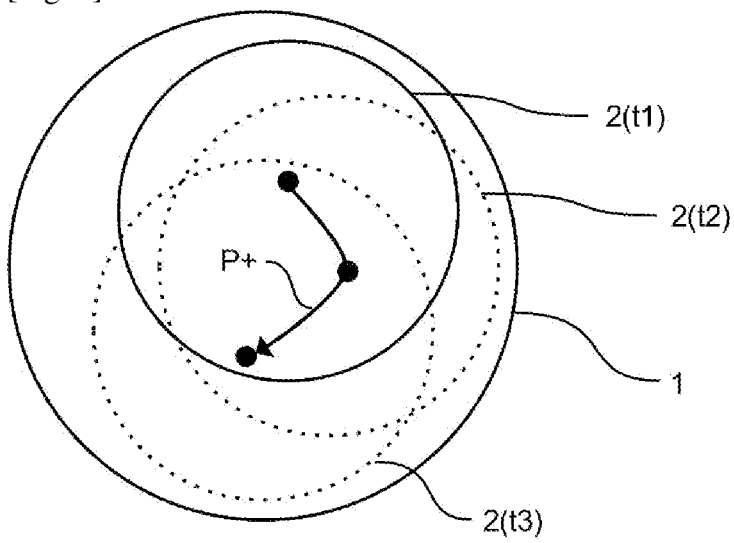
[Revendication 14] Procédé de correction selon la revendication 13, comportant des étapes consistant à :

- Enregistrer les efforts magnétiques (F) générés au cours du temps et
- estimer un état d'usure de la turbomachine (T) à partir des efforts magnétique (F) enregistrés au cours du temps.

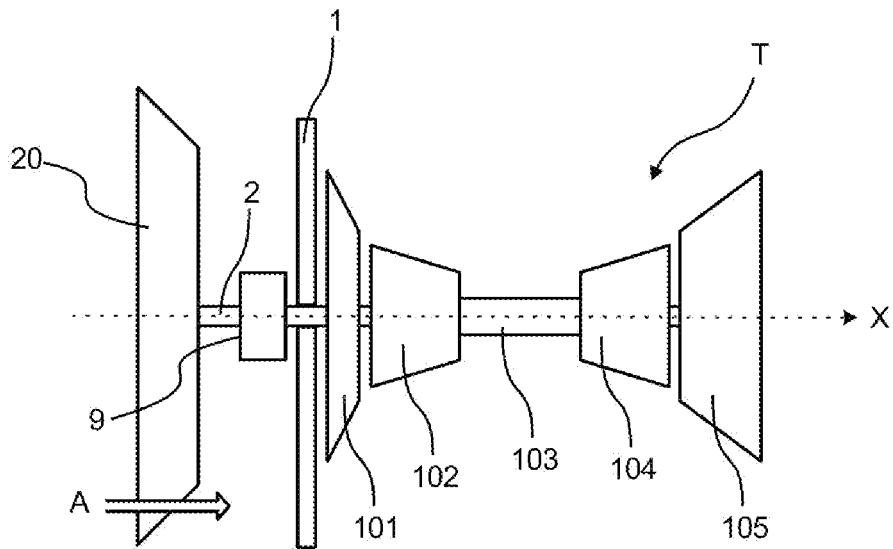
[Fig. 1]

**FIG. 1**

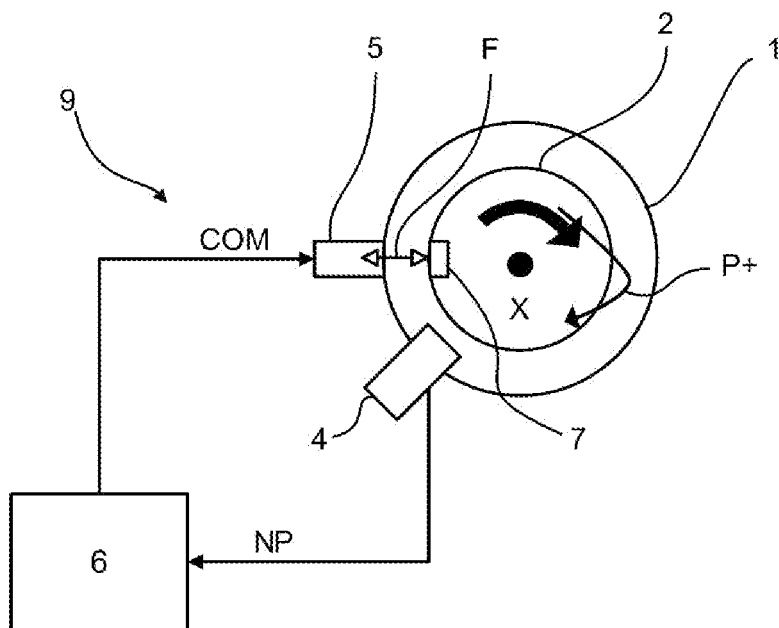
[Fig. 2]

**FIG. 2**

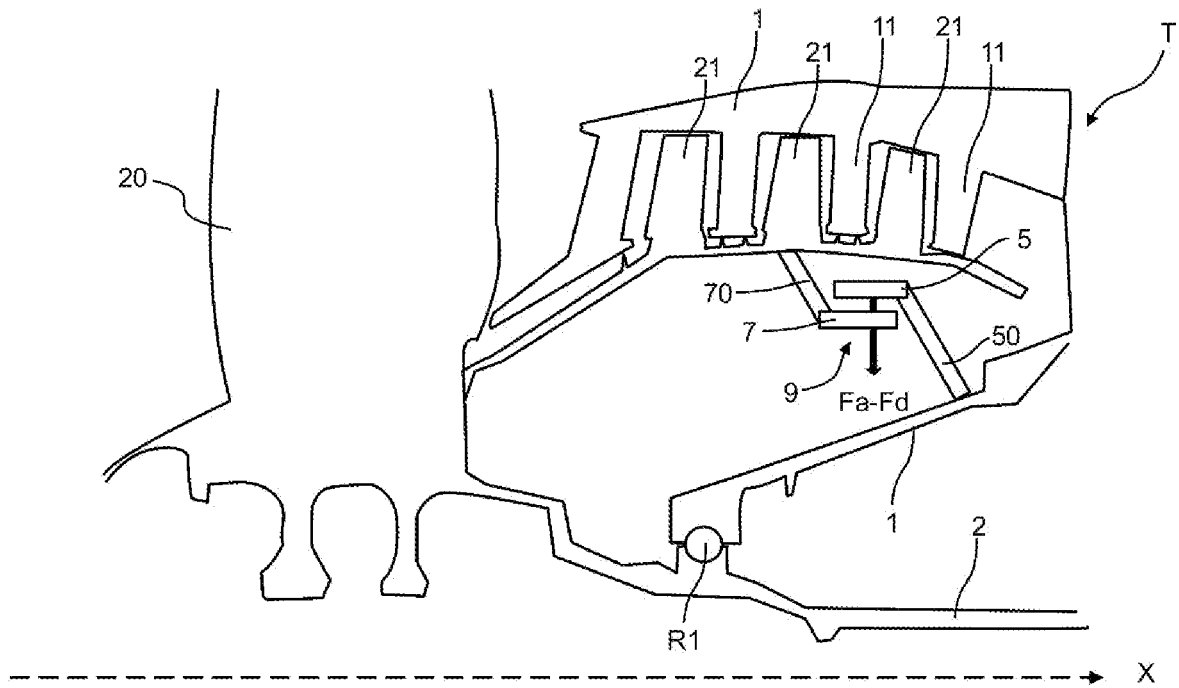
[Fig. 3]

**FIG. 3**

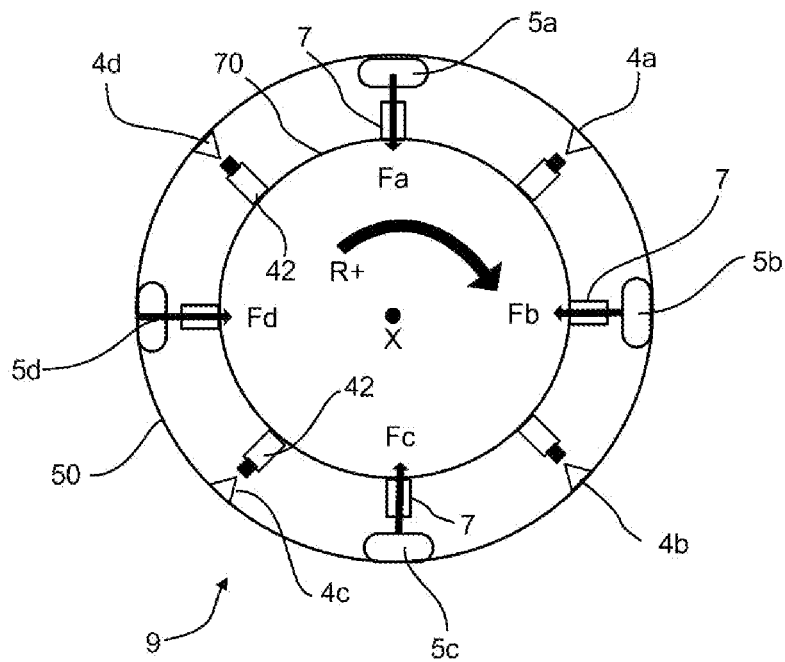
[Fig. 4]

**FIG. 4**

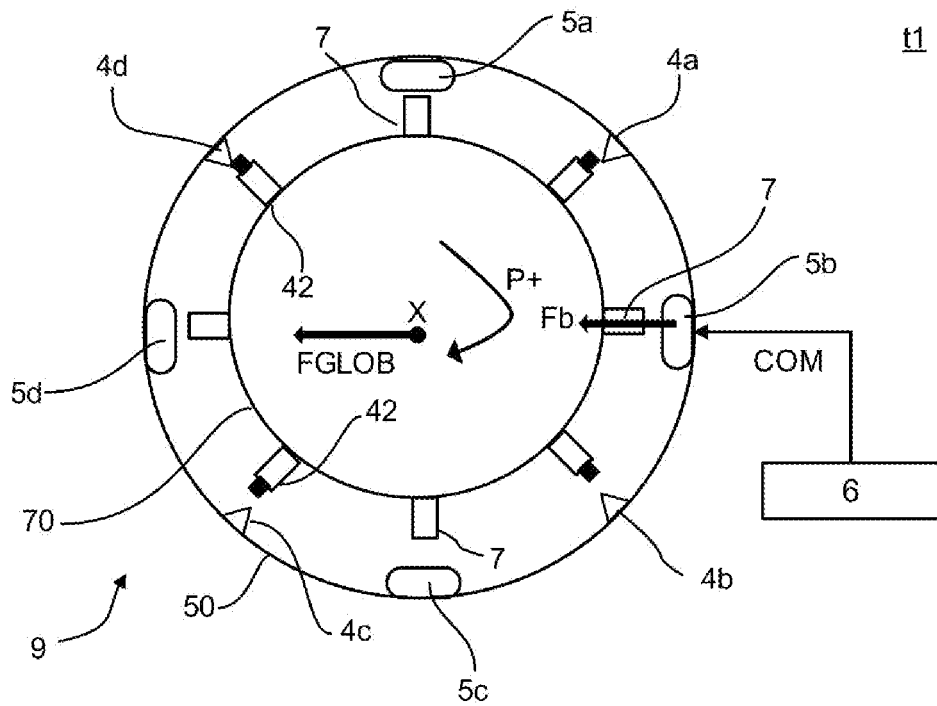
[Fig. 5]

**FIG. 5**

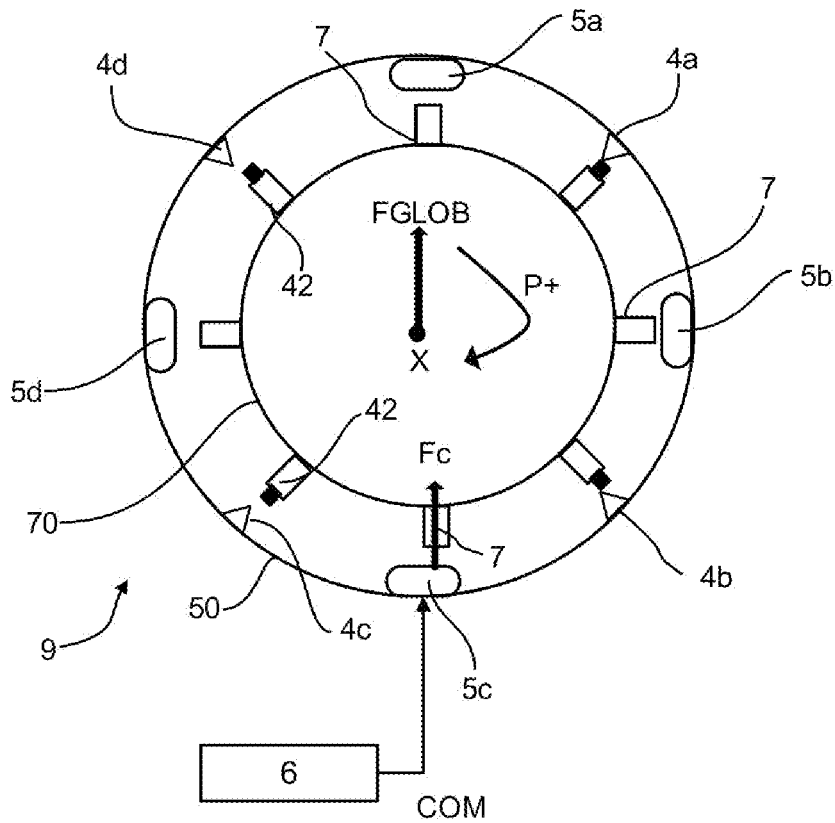
[Fig. 6]

**FIG. 6**

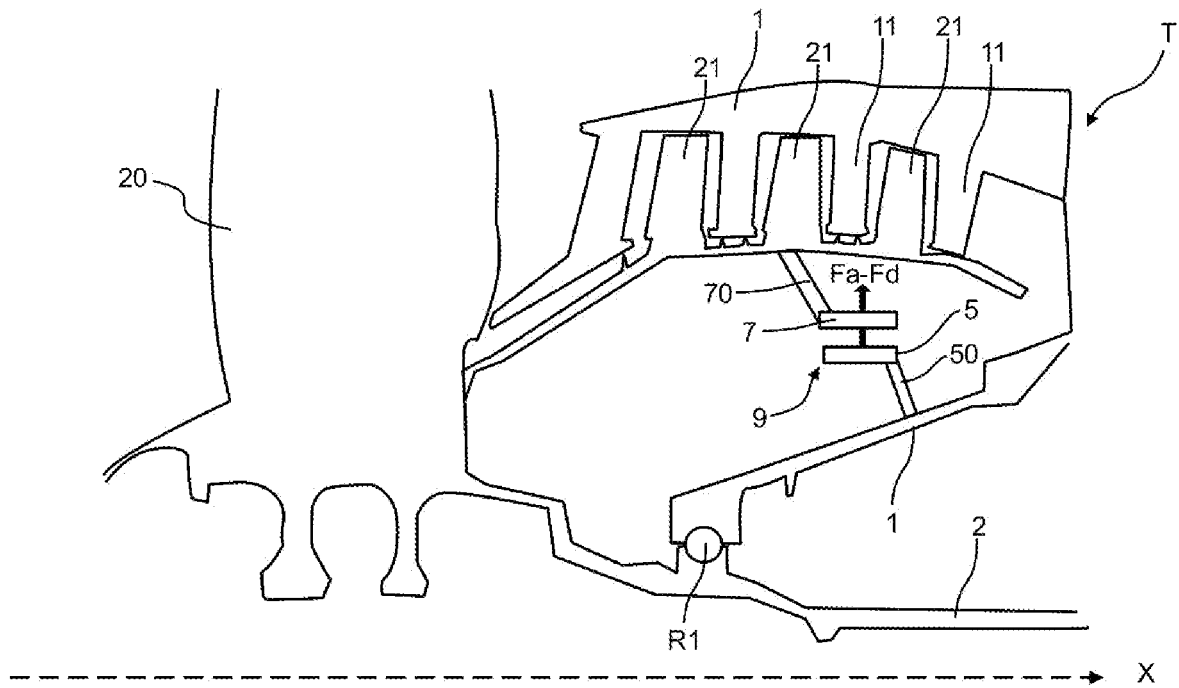
[Fig. 7]

FIG. 7

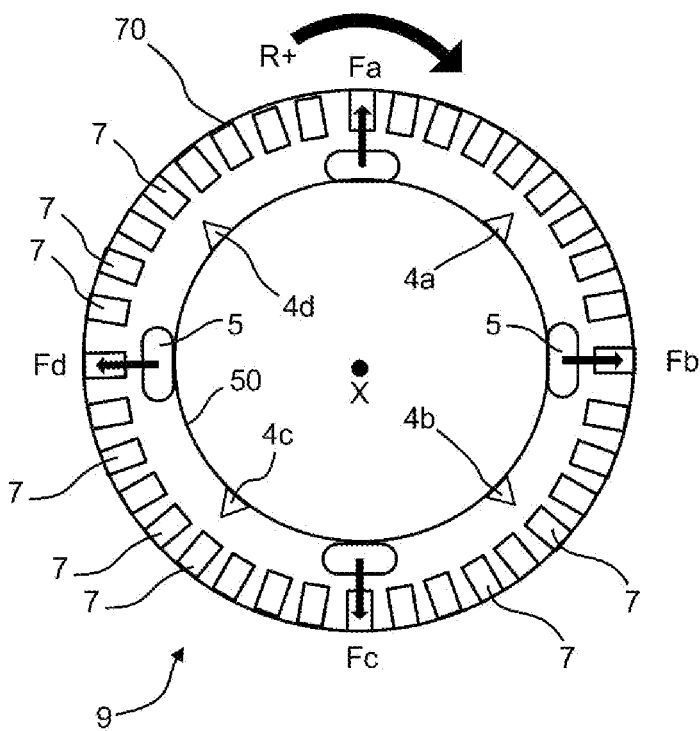
[Fig. 8]

FIG. 8

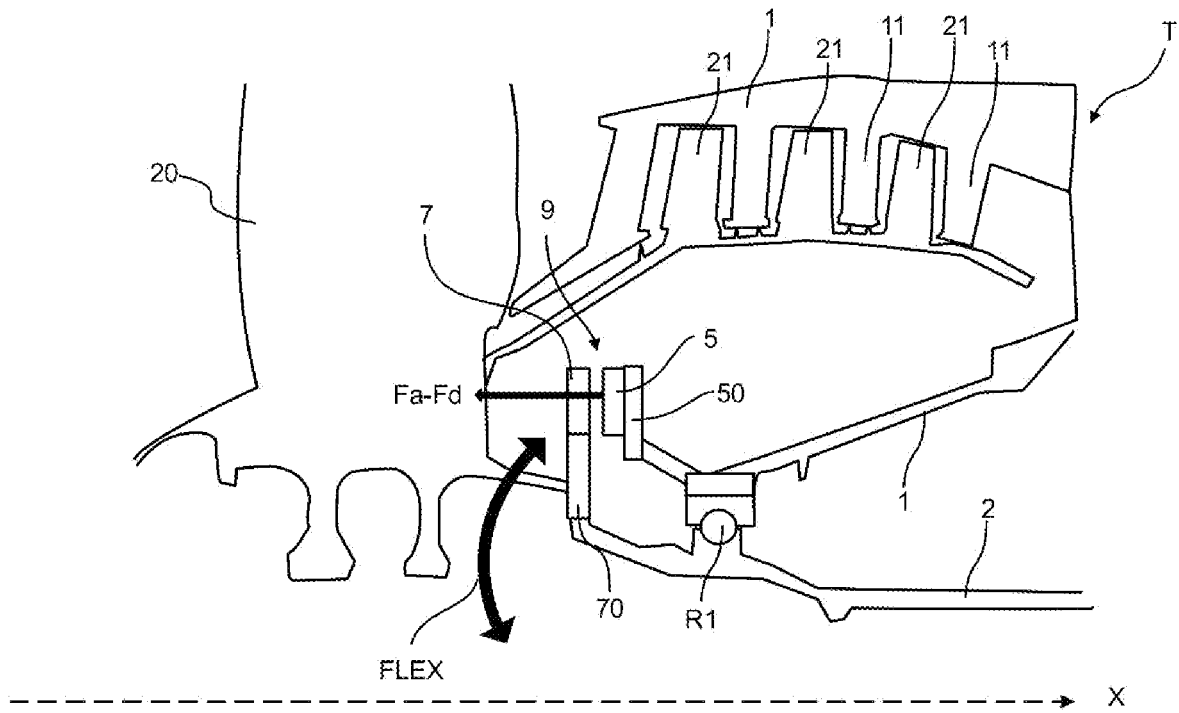
[Fig. 9]

**FIG. 9**

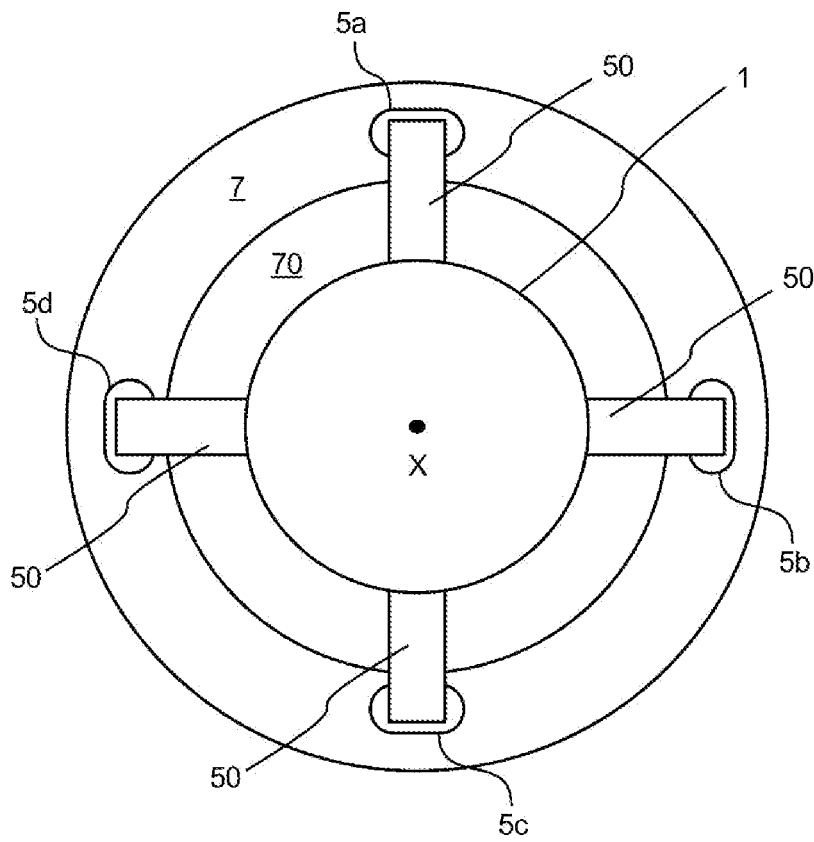
[Fig. 10]

**FIG. 10**

[Fig. 11]

**FIG. 11**

[Fig. 12]

**FIG. 12**

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN  
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

US 2022/154597 A1 (UNTON TIMOTHY [US])  
19 mai 2022 (2022-05-19)

US 9 638 056 B2 (ROLLS ROYCE NAM TECH INC  
[US]) 2 mai 2017 (2017-05-02)

US 2022/290718 A1 (JOLLY MARK R [US] ET  
AL) 15 septembre 2022 (2022-09-15)

US 6 720 695 B2 (SCHLAFHORST & CO W [US])  
13 avril 2004 (2004-04-13)

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN  
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND  
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT