

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①① N° de publication :

3 073 045

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national :

17 60093

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : G 01 M 1/02 (2018.01), F 16 F 15/32

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 26.10.17.

③③ Priorité :

⑦① Demandeur(s) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES —  
FR.

④③ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 03.05.19 Bulletin 19/18.

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

⑥③ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦② Inventeur(s) : MURRY ANTOINE VICTOR, YAHIA  
BACHA MOURAD et LACAILLE JEROME HENRI  
NOEL.

⑦③ Titulaire(s) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES.

○ Demande(s) d'extension :

⑦④ Mandataire(s) : BREVALEX.

⑤④ PROCÉDE D'EQUILIBRAGE D'UN ENSEMBLE D'AUBES.

⑤⑦ L'invention concerne un procédé d'équilibrage d'un  
ensemble d'aubes (5) destinées à être disposées sur un  
disque nu (7) d'un moteur d'aéronef, le disque nu (7) com-  
portant un nombre déterminé d'alvéoles (ai) numérotées  
destinées à recevoir le même nombre déterminé d'aubes  
qui peuvent présenter une dispersion de masse, ledit procé-  
dé étant comportant les étapes suivantes :

-trier les aubes (5) par ordre monotone de leur masse  
(mi) formant un ensemble ordonné d'aubes,

-séparer l'ensemble ordonné d'aubes de manière équi-  
brée en quatre lobes constitués d'un premier gros lobe  
(GL1), d'un deuxième gros lobe (GL2), d'un premier petit  
lobe (PL1) et d'un deuxième petit lobe (PL2), les aubes étant  
classées dans chaque lobe selon un ordre de placement  
courant, et

-agencer les quatre lobes (GL1, GL2, PL1, PL2) sur le  
disque nu (7) en faisant correspondre l'ordre de placement  
courant des aubes aux alvéoles numérotées du disque nu.

FR 3 073 045 - A1



## PROCÉDÉ D'ÉQUILIBRAGE D'UN ENSEMBLE D'AUBES

### DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne le domaine d'équilibrage de disques aubagés d'un moteur d'aéronef et plus particulièrement, d'un procédé d'équilibrage d'un ensemble  
5 d'aubes destinées à être disposées sur un disque nu d'un moteur d'aéronef.

### ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Les aubes d'un moteur d'aéronef peuvent présenter des variations de masses liées à leur processus de fabrication et à la présence de certaines aubes particulières ayant des masses différentes des autres aubes. En outre, le disque nu peut éventuellement  
10 posséder un balourd radial non négligeable et en particulier les disques nus des turbines basse pression. Ainsi, le montage des aubes sur un disque nu d'un moteur d'aéronef doit être réalisé de manière à minimiser le balourd.

Il existe des algorithmes de placements d'aubes sur des turbines hydrauliques. Ces algorithmes produisent des bons résultats mais prennent un temps de calcul  
15 considérable et ne peuvent pas être adaptés pour des moteurs d'aéronefs.

Dans le domaine aéronautique il existe des algorithmes d'équilibrage heuristiques de type non-polynomial « NP difficile » permettant d'augmenter la rapidité du problème d'équilibrage. Un tel exemple est décrit dans le document « Heuristics for  
20 Balancing Turbine Fans » de Samir Amiouny 1997. Toutefois, les algorithmes répertoriés ne prennent pas en compte les pressions sur les disques liées à des forces centrifuges et des disparités entre des aubes voisines qui peuvent provoquer des déformations des disques ainsi que l'amorçage de criques aux niveaux des alvéoles destinées à recevoir les aubes causant des usures prématurées des disques. En outre, ils ne prennent pas en compte les  
25 balourds des disques nus ni les contraintes liées à la présence de certaines aubes particulières.

L'objet de la présente invention est de proposer un procédé d'équilibrage de disques aubagés d'un moteur d'aéronef remédiant aux inconvénients précités, minimisant

le temps de calcul tout en prenant en compte les contraintes liées aux forces centrifuges et balourds des disques nus.

## EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention est définie par un procédé d'équilibrage d'un ensemble d'aubes destinées à être disposées sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, le disque nu comportant un nombre déterminé d'alvéoles numérotées destinées à recevoir le même nombre déterminé d'aubes qui peuvent présenter une dispersion de masse, ledit procédé comportant les étapes suivantes :

-trier les aubes par ordre monotone de leur masse formant un ensemble ordonné d'aubes,

-séparer l'ensemble ordonné d'aubes de manière équilibrée en quatre lobes constitués d'un premier gros lobe, d'un deuxième gros lobe, d'un premier petit lobe et d'un deuxième petit lobe, les aubes étant classées dans chaque lobe selon un ordre de placement courant, et

-agencer les quatre lobes sur le disque nu en faisant correspondre l'ordre de placement courant des aubes aux alvéoles numérotées du disque nu.

Ainsi, ce procédé permet une automatisation de l'équilibrage de disques aubagés tout en minimisant le nombre d'étapes et optimisant le temps de calcul. En outre, ce procédé permet de répartir les aubes selon une configuration géométrique qui limite les déformations du disque et par conséquent, d'augmenter sa durée de vie. En effet, la répartition des masses des aubes en quatre lobes permet de réduire la pression liée à la force centrifuge.

Avantageusement, la séparation de l'ensemble d'aubes en quatre lobes comporte les étapes suivantes :

-séparer de manière équilibrée l'ensemble ordonné d'aubes en des premier et second groupes sensiblement équilibrés en masse en attribuant des aubes distinctives comprises dans l'ensemble ordonné d'aubes aux premier et second groupes selon un processus prédéterminé et en partageant les autres aubes par ordre décroissant de leur

masse de manière alternée entre les premier et second groupes tout en tenant compte du nombre d'aubes distinctives attribuées à chacun des premier et second groupes, et

-composer les premier et deuxième gros lobes de manière équilibrée à partir dudit premier groupe et composer les premier et deuxième petits lobes de manière équilibrée à partir dudit second groupe.

Ceci permet de distribuer les aubes d'une manière qui ne provoque pas un amorçage de crique au niveau des alvéoles. En outre, la création de deux groupes initialement équilibrés permet de minimiser le nombre d'itération de l'algorithme d'équilibrage dans le cas où le balourd sur le disque nu est faible (ce qui représente la majorité de cas).

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les aubes distinctives sont des aubes à léchettes durcies qui sont distribuées entre les premier et second groupes suivant leur nombre tout en optimisant l'espacement entre elles, selon les étapes suivantes :

-si l'ensemble d'aubes comporte trois aubes à léchettes durcies, les deux plus lourdes sont placées dans le premier groupe tandis que la plus légère est placée dans le second groupe, et

-si l'ensemble d'aubes comporte une à deux aubes à léchettes durcies, elle(s)est(sont) placée(s) dans le premier groupe.

Ceci permet aux aubes à léchettes de creuser de manière optimale l'abradable placé sur le carter en face des aubes permettant par conséquent, d'optimiser la compression d'air dans le moteur.

Avantageusement, la composition des premier et deuxième gros ou petits lobes au sein du premier ou second groupes respectivement est réalisée en distribuant les aubes sur des premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe en fonction des propriétés de parité et/ou de divisibilité du nombre d'aubes constituant le premier groupe ou le second groupe.

Ceci permet une répartition optimale des masses des aubes.

Selon un premier cas d'un mode de réalisation de la présente invention, si le nombre d'aubes du premier ou second groupe est un nombre pair non divisible par quatre,

alors les première et deuxième aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième gros ou petits lobes et les aubes restantes sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe.

5 Selon un deuxième cas du mode de réalisation de la présente invention, si le nombre d'aubes du premier ou second groupe est un nombre divisible par quatre, alors les aubes sont distribuées équitablement de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe.

10 Selon un troisième cas du mode de réalisation de la présente invention, si le nombre d'aubes du premier ou second groupe est un nombre impair, alors la dernière aube est positionnée entre les deux gros ou petits lobes et si le nombre d'aubes restantes est divisible par quatre, alors elles sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe.

15 Selon un quatrième cas du mode de réalisation de la présente invention, si le nombre d'aubes du premier ou second groupe est un nombre impair, alors la dernière aube est positionnée entre les deux gros ou petits lobes et si le nombre d'aubes restantes est non divisible par quatre, alors les première et deuxième aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième gros ou petits lobes et les aubes restantes sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe.

20 Avantageusement, la distribution de manière prédéterminée d'un nombre d'aubes divisible par quatre sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe est réalisée selon des séquences périodiques de huit étapes de la manière suivante :

25 -placer la première aube courante en première position non occupée du deuxième demi-lobe,

-placer la deuxième aube courante en première position non occupée du premier demi-lobe,

-placer la troisième aube courante en première position non occupée du quatrième demi-lobe,

-placer la quatrième aube courante en première position non occupée du troisième demi-lobes, et

-placer les quatre aubes suivantes sur les demi-lobes dans le sens inverse des étapes précédentes.

5                    Selon un mode de réalisation de la présente invention, le procédé comporte les étapes suivantes :

-agencer les quatre lobes sur le disque nu en les disposant suivant une configuration déterminée par rapport à un premier vecteur balourd représentatif d'un balourd inhérent au disque nu, et

10                   - réorganiser les aubes dans les différents lobes selon un processus itératif de permutation adapté pour équilibrer le premier vecteur balourd par un second vecteur balourd résultant de la dispersion de masse des aubes et de leurs agencements sur le disque, ladite réorganisation définissant un ordre de placement final des aubes sur les alvéoles du disque.

15                   Ceci permet d'avoir un balourd radial proche de zéro sur l'ensemble disque-aubes en prenant en compte le balourd du disque nu.

Avantageusement, la configuration déterminée comporte l'agencement des premier et deuxième petits lobes sur le disque nu de part et d'autre du premier vecteur balourd.

20                   Ceci permet d'équilibrer les premier et deuxième balourds de manière optimale.

Avantageusement, ledit processus itératif de permutation comporte les étapes suivantes :

25                   - permutations aléatoires d'aubes de manière itérative entre le premier groupe et le second groupe tout en réappliquant les étapes de placement des aubes après chaque itération,

30                   - si, à l'issue des permutations de l'étape précédente, le balourd résultant est supérieur à un seuil prédéterminé, alors on réalise des permutations stochastiques d'aubes entre le premier groupe et le second groupe tout en réappliquant les étapes de placement des aubes après chaque itération, et

- si, à l'issue des permutations de l'étape précédente, le balourd résultant est supérieur audit seuil prédéterminé, alors on réalise des permutations stochastiques directement sur la forme entre le premier groupe et le second groupe.

Ceci permet un équilibrage total du balourd inférieur au seuil prédéterminé.

- 5 Cet équilibrage est avantageusement réalisé en respectant la forme monotone des masses d'aubes et éventuellement en la déformant légèrement si les première et deuxième étapes de permutations étaient insuffisantes pour respecter le critère d'équilibrage.

Avantageusement, on continue les itérations dans chacune des étapes de permutation tant que le balourd résultant est supérieur au seuil prédéterminé et que le  
10 nombre d'itérations est inférieur à un nombre maximal prédéterminé.

La présente invention vise également un système d'équilibrage d'un ensemble d'aubes destinées à être disposées sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, le disque nu comportant un nombre déterminé d'alvéoles numérotées destinées à recevoir le même nombre déterminé d'aubes qui peuvent présenter une dispersion de masse, ledit système  
15 comportant un processeur configuré pour :

-trier les aubes par ordre monotone de leur masse formant un ensemble ordonné d'aubes,

-séparer l'ensemble ordonné d'aubes de manière équilibrée en quatre lobes constitués d'un premier gros lobe, d'un deuxième gros lobe, d'un premier petit lobe et d'un  
20 deuxième petit lobe, les aubes étant classées dans chaque lobe selon un ordre de placement courant, et

-agencer les quatre lobes sur le disque nu en faisant correspondre l'ordre de placement courant des aubes aux alvéoles numérotées du disque nu.

## **BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS**

25 La Fig. 1 illustre de manière schématique des moyens matériels mis en œuvre dans le procédé d'équilibrage, selon l'invention ;

La Fig. 2 est un organigramme illustrant un procédé d'équilibrage d'un ensemble d'aubes destinées à être disposées sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, selon un mode de réalisation de l'invention ;

La Fig. 3 illustre de manière schématique un placement d'aubes en quatre lobes, selon un mode de réalisation de l'invention ;

La Fig. 4 illustre un procédé d'équilibrage des aubes sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, selon un mode de réalisation préféré de l'invention ;

5 La Fig. 5 est un exemple illustrant de manière schématique le placement d'aubes, selon un mode de réalisation de l'invention ;

La Fig. 6 est un schéma en bloc illustrant le processus de permutation pour l'équilibrage du balourd total, selon un mode de réalisation de l'invention ;

10 La Fig. 7 est un organigramme illustrant plus en détail le processus itératif de permutation d'un bloc de la Fig. 6, selon un mode de réalisation de l'invention ;

Les Fig. 8A et 8B illustrent une répartition des aubes selon leurs masses, ainsi que le positionnement des aubes à léchettes durcies résultant des tests du procédé selon un mode de réalisation de l'invention ; et

15 Les Figs. 9A-9C montrent un exemple illustrant l'évolution du balourd résultant en fonction du nombre d'itérations, selon un mode de réalisation de l'invention.

## **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

20 Le concept de l'invention consiste à établir une correspondance entre des aubes destinées à être montées sur un disque nu d'un moteur de manière équilibrée tout en augmentant la durée de vie du disque en minimisant sa déformation sachant que les aubes peuvent présenter une dispersion au niveau de leur masse.

La présente invention s'applique au montage d'aubes sur un disque nu de tout type de moteurs comme par exemple les moteurs d'aéronefs et en particulier sur les disques de turbines basse pression d'un aéronef.

25 La Fig. 1 illustre de manière schématique les moyens matériels mis en œuvre dans le procédé d'équilibrage selon l'invention.

Les moyens matériels comportent un ordinateur 1 ainsi que des instruments de mesures 3 et en particulier des instruments pour évaluer les masses  $m_i$  des aubes 5 destinées à être montées sur un disque nu 7 d'un moteur d'aéronef.

L'ordinateur est muni de manière habituelle d'un processeur 9 utilisé pour l'exécution d'un ou de plusieurs programmes d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme, stockés dans des unités de stockage 11 de l'ordinateur 1 et conçus et configurés pour mettre en œuvre le procédé d'équilibrage selon l'invention.

5 La Fig. 2 est un organigramme illustrant un procédé d'équilibrage d'un ensemble d'aubes destinées à être disposées sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, selon un mode de réalisation de l'invention.

L'étape E1 concerne l'initialisation des données comportant la masse  $m_i$  de chaque aube 5 et le nombre d'alvéoles  $a_i$  du disque nu 7 destinées à recevoir les aubes 5. Plus particulièrement, les alvéoles  $a_i$  sont numérotées dans l'ordre de 1 à N (i.e.  $a_1, \dots, a_N$ ) dans un sens défini (par exemple, dans le sens horaire) et sont toutes espacées de la même distance sur le disque 7. Ainsi, en connaissant le nombre total N des alvéoles  $a_i$  sur le disque 7, on peut déduire leurs positions angulaires  $\alpha_i$ . Les masses  $m_i$  des aubes 5 sont définies par un vecteur masse V de dimension N dont chaque élément  $m_i$  doit correspondre à une et une seule alvéole  $a_i$ . Le but du procédé d'équilibrage est d'établir une correspondance bijective entre les éléments  $m_i$  du vecteur masse V et les alvéoles  $a_i$  du disque 7. Cette correspondance permet un montage facile des aubes 5 dont le positionnement sur le disque nu 7 tient compte de la dispersion de leur masse pour satisfaire un critère de balourd ainsi que d'autres éventuelles contraintes.

20 A l'étape E2, le processeur 9 est configuré pour trier les aubes 5 par ordre monotone (par exemple, décroissant) de leur masse formant ainsi un ensemble ordonné d'aubes 5. Le vecteur de masse V initial peut ainsi être réarrangé pour former un vecteur de masse V courant selon l'ordre décroissant des aubes 5.

25 A l'étape E3, le processeur 9 est configuré pour séparer l'ensemble ordonné d'aubes 5 de manière équilibrée en quatre lobes LG1, LG2, LP1, LP2. Les aubes 5 sont classées dans chaque lobe selon un ordre de placement particulier représentant un ordre de placement courant permettant d'actualiser le vecteur de masse V courant. Deux des quatre lobes sont catégorisés « Gros lobes » LG1 et LG2, et les deux autres sont catégorisés « Petits lobes » LP1 et LP2.

En effet, la Fig. 3 illustre de manière schématique le placement des aubes en quatre lobes, selon un mode de réalisation de l'invention.

Les aubes 5 sont représentées par des segments radiaux dont les longueurs sont représentatives de leurs masses. Ainsi, les différentes longueurs caractérisent la dispersion massique des aubes. Plus particulièrement, les quatre lobes sont constitués d'un premier gros lobe LG1, d'un deuxième gros lobe LG2, d'un premier petit lobe LP1 et d'un deuxième petit lobe LP2. Cette configuration représente la forme optimale pour réduire la pression liée à la force centrifuge tout en étant le plus simple à réaliser. On notera qu'une configuration équilibrée mais n'ayant pas une forme en lobes aura tendance à déformer le disque. Par ailleurs, lorsqu'on a seulement deux lobes, le disque aura tendance à devenir ovale au fur et à mesure de son exploitation, à cause de la force de pression. Un nombre de lobes plus élevé que quatre est très complexe à réaliser et n'apporte pas de gains notables au niveau de la réduction de pression.

A l'étape E4, le processeur 9 est configuré pour agencer les quatre lobes LG1, LG2, LP1, LP2 sur le disque nu 7 en faisant correspondre l'ordre de placement courant des aubes 5 tel que défini dans le vecteur de masse  $V$  courant aux alvéoles  $a_i$  numérotées du disque nu 7.

En outre, au cas où le disque nu 7 présente un balourd initial, les aubes 5 dans les différents lobes peuvent être réorganisées suivant un processus itératif de permutation pour compenser le balourd du disque 7 selon un mode de réalisation de l'invention décrit plus loin en référence à la Fig. 5.

Avantageusement, à la fin du procédé les éléments du vecteur masse sont ordonnés dans le même ordre que l'ordre de numérotation des alvéoles simplifiant ainsi le montage de ces dernières.

La Fig. 4 illustre un procédé d'équilibrage des aubes sur un disque nu d'un moteur d'aéronef, selon un mode de réalisation préféré de l'invention.

A l'étape E11, les données concernant les aubes 5 et le disque nu 7 sont initialisées. Ces données comportent la masse  $m_i$  de chaque aube 5 et sa spécificité, c'est-à-dire si elle est particulière (par exemple du type à léchette durcie) ou pas. Les données d'initialisation comportent également le nombre  $N$  d'alvéoles  $a_i$  numérotées du disque nu

7, le rayon  $R$  du disque nu 7, le balourd du disque nu 7 en cm.g, et l'angle du balourd du disque nu 7 en degré.

Avantageusement, les données concernant les aubes 5 peuvent être organisées selon une matrice d'aubes  $M$  composée de trois colonnes. Pour une ligne donnée associée à une aube 5 donnée, la première colonne contient la masse  $m_i$  de l'aube 5, la deuxième colonne contient l'angle  $\alpha_i$  de l'alvéole  $a_i$  destinée à recevoir ladite aube et la troisième colonne indique si l'aube 5 est particulière ou pas (par exemple le chiffre « 1 » représente une aube particulière et le chiffre « 0 » représente une aube standard). On notera que la première colonne représente le vecteur masse  $V$  des aubes 5.

Dans la suite, on prendra une aube à léchette durcie comme exemple d'une aube particulière. On rappelle qu'une aube à léchette durcie est adaptée pour créer des rainures dans l'abradable placé sur le carter en face des aubes afin d'optimiser la compression d'air dans le moteur.

A l'étape E12, le processeur 9 est configuré pour trier les aubes 5 par ordre décroissant de leur masse  $m_i$  formant un ensemble ordonné d'aubes consigné dans la première colonne de la matrice d'aubes  $M$ .

Aux étapes E13-E30, le processeur 9 est configuré pour classer les aubes en quatre lobes : un premier gros lobe LG1, un deuxième gros lobe LG2, un premier petit lobe LP1 et un deuxième petit lobe LP2.

Plus particulièrement, à l'étape E13, le processeur 9 est configuré pour séparer de manière équilibrée l'ensemble ordonné d'aubes 5 en des premier et second groupes GL et PL sensiblement équilibrés en masse consignés dans des première et deuxième matrices  $M1$  et  $M2$  respectivement. Les premier et deuxième groupes GL et PL correspondent à un groupe de gros lobes et un groupe de petits lobes respectivement.

En premier lieu, les aubes distinctives  $D_i$  (i.e. aubes à léchettes durcies) comprises dans l'ensemble ordonné d'aubes 5 sont attribuées aux premier et second groupes GL et PL suivant leur nombre.

En particulier, si l'ensemble d'aubes 5 comporte trois aubes à léchettes durcies  $D_1$ - $D_3$ , les deux plus lourdes  $D_1$  et  $D_2$  sont placées dans le premier groupe GL tandis que la plus légère  $D_3$  est placée dans le second groupe PL.

En revanche, si l'ensemble d'aubes comporte une à deux aubes à léchettes durcies  $D_i$ , elle(s) est(sont) plac e(s) dans le premier groupe GL.

On notera que le placement des aubes particulières  $D_i$  est réalisé selon un processus prédéterminé destiné à optimiser l'espace de ces aubes comme expliqué plus loin aux étapes E28-E30.

Par ailleurs, une fois que les aubes à léchettes durcies  $D_i$  sont placées dans les deux groupes GL et PL, il s'agit ensuite de répartir les aubes 5 restantes. Les autres aubes sont partag es par ordre décroissant de leur masse de manière altern e entre les premier et second groupes GL et PL. Le placement de ces aubes 5 restantes est réalisé en tenant compte du nombre d'aubes distinctives  $D_i$  attribu es à chacun des premier et second groupes GL et PL afin que ces derniers soient de taille égale. En effet, les premier et deuxième groupes GL et PL sont d'abord rééquilibrés en plaçant le nombre d'aubes nécessaire dans le deuxième groupe PL. Ainsi, si l'ensemble d'aubes 5 comporte une ou trois aube(s)   léchette(s) durcie(s)  $D_i$ , alors une aube 5 standard est plac e dans le deuxième groupe PL. Par ailleurs, si l'ensemble d'aubes comporte deux aubes à léchettes durcies  $D_i$ , alors deux aubes 5 standard sont placées dans le deuxième groupe PL. Le placement est ensuite réalisé en triant les aubes 5 par masse décroissante en commençant par le premier groupe GL. La première aube est plac e dans le premier groupe GL, la deuxième dans le deuxième groupe PL et ainsi de suite. On notera que les aubes 5 sont ordonn es selon leur masse de manière décroissante dans chacun des premier et deuxième groupes GL, PL.

A l'étape E14 le processeur 9 est configuré pour composer les premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 de manière équilibrée à partir du premier groupe GL et pour composer les premier et deuxième petits lobes PL1, PL2 de manière équilibrée à partir du second groupe PL. Le classement des aubes 5 dans chacun des quatre lobes GL1, GL2, PL1, PL2 est réalisé selon un ordre déterminé.

La composition des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 ou petits lobes PL1, PL2 au sein du premier GL ou second PL groupes respectivement est r alis e en distribuant les aubes 5 sur des premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes DG1-DG4 ou DP1-DP4 du premier GL ou second PL groupe en fonction des propriétés de parité

et/ou de divisibilité du nombre d'aubes 5 constituant le premier groupe GL ou le second groupe PL.

A l'étape E15 le processeur 9 est configuré pour déterminer la parité et la divisibilité du nombre L d'aubes d'un groupe GL ou PL, selon quatre cas prédéterminés. En effet, pour créer les deux lobes au sein de chacun des deux groupes à partir d'un nombre L d'aubes, on envisage les quatre possibilités suivantes : L est divisible par quatre, L est pair et non divisible par quatre, L est impair et L-1 est divisible par quatre, et finalement L est impair et L-1 est non divisible par quatre. Chacune des quatre possibilités donne lieu à une étape correspondante de placement d'aubes parmi les étapes E16-E19.

L'étape E16 concerne le cas où le nombre L d'aubes du premier GL ou second PL groupe est un nombre divisible par quatre. Dans ce cas, les aubes 5 sont distribuées équitablement de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes DG1-DG4 ou DP1-DP4 du premier GL ou second PL groupe. Un quart d'aubes ( $L/4$ ) sont placées sur chacun des quatre demi-lobes, selon les étapes E20-E27.

L'étape E17 concerne le cas où le nombre L d'aubes du premier GL ou second groupe PL est un nombre pair non divisible par quatre. Dans ce cas, les première et deuxième aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième (gros ou petits) lobes (GL1 et GL2 ; ou PL1 et PL2). Les aubes restantes (ayant maintenant un nombre divisible par quatre) sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes DG1-DG4 ou DP1-DP4 du premier GL ou second PL groupe. Ainsi, les aubes étant au préalable triées par masse décroissante, la première aube (i.e. l'aube la plus lourde) de la matrice d'aubes correspondante M1 ou M2 est placée au sommet du premier lobe GL1 ou PL1 et la deuxième aube de la matrice d'aubes correspondante est placée au sommet du deuxième lobe GL1 ou PL1. Ces deux aubes sont ensuite supprimées de la matrice d'aubes correspondante avant de passer aux étapes E20-E27.

L'étape E18 concerne le cas où le nombre L d'aubes du premier GL ou second PL groupe est un nombre impair et où le nombre d'aubes décrétement d'une unité (i.e. L-1) est divisible par quatre. Dans ce cas, la dernière aube (i.e. l'aube la plus légère) est positionnée entre les deux (gros ou petits) lobes et les aubes restantes (dont le nombre est

divisible par quatre) sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe. L'aube la plus légère qui a été positionnée entre les deux lobes est ensuite supprimée de la matrice d'aubes avant de passer aux étapes E20-E27 pour placer un quart des aubes restantes  $((L-1)/4)$  sur chaque

5 demi-lobe.

L'étape E19 concerne le cas où le nombre d'aubes du premier ou second groupe est un nombre impair et où le nombre d'aubes décrétement d'une unité (i.e.  $L-1$ ) est non divisible par quatre. Dans ce cas, la dernière aube (i.e. l'aube la plus légère) est positionnée entre les deux (gros ou petits) lobes (GL1 et GL2 ; ou PL1 et PL2) et les première et deuxième

10 aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième (gros ou petits) lobes (GL1 et GL2 ; ou PL1 et PL2). Les aubes restantes (ayant un nombre divisible par quatre) sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe. La figure correspondant à cette étape montre bien que l'aube la plus légère du groupe est positionnée entre les deux lobes (GL1 et GL2 ;

15 ou PL1 et PL2) et la première aube de la matrice d'aubes correspondante (i.e. l'aube la plus lourde) est placée au sommet de la première lobe (GL1 ou PL1) et la deuxième aube de la matrice est placée au sommet de la deuxième lobe (GL2 ou PL2). Ces trois aubes sont ensuite supprimées de la matrice d'aubes avant de passer aux étapes E20-E27 pour placer un quart des aubes restantes sur chaque demi-lobe.

20 Le placement des aubes restantes (composées d'un nombre  $K$  divisible par quatre) est effectué selon un protocole de distribution prédéterminée suivant des séquences périodiques de huit étapes E20-E27. On notera que les demi-lobes représentés sur les figures associées aux étapes E20-E27 font référence aux quatre gros demi-lobes DG1-DG4 ou au quatre petits demi-lobes DP1-DP2.

25 A l'étape E20, le processeur 9 est configuré pour placer la première aube  $a_1$  courante (i.e. l'aube la plus lourde parmi les aubes restantes) en première position non occupée du deuxième demi-lobe DG2 ou DP2.

A l'étape E21, le processeur 9 est configuré pour placer la deuxième aube  $a_2$  courante en première position non occupée du premier demi-lobe DG1 ou DP1.

A l'étape E22, le processeur 9 est configuré pour placer la troisième aube  $a_3$  courante en première position non occupée du quatrième demi-lobes DG4 ou DP4.

A l'étape E23, le processeur 9 est configuré pour placer la quatrième aube  $a_4$  courante en première position non occupée du troisième demi-lobes DG3 ou DP3.

5 Aux étapes E24-E27, le processeur 9 est configuré pour placer les quatre aubes suivantes  $a_5$ - $a_8$  sur les demi-lobes dans le sens inverse des étapes précédentes E20-E23. Autrement dit, à l'étape E24, la cinquième aube  $a_5$  courante est placée en première position non occupée du troisième demi-lobes DG3 ou DP3. A l'étape E25, la sixième aube  $a_6$  courante est placée en première position non occupée du quatrième demi-lobes DG4 ou  
10 DP4. A l'étape E26, la septième aube  $a_7$  courante est placée en première position non occupée du premier demi-lobes DG1 ou DP1. A l'étape E27, la huitième aube  $a_8$  courante est placée en première position non occupée du deuxième demi-lobes DG2 ou DP2.

La Fig. 5 est un exemple illustrant de manière schématique le placement d'aubes selon les étapes E20-E27. Dans cet exemple, le nombre K des aubes restantes est  
15 égal à « 32 » et sont classées de « 1 » à « 32 » de la masse la plus lourde à la plus légère.

On cherche à placer huit aubes sur chacun des quatre gros demi-lobes DG1-DG4. Ainsi, l'aube la plus lourde, représentée par le numéro « 1 », est placée en première position du deuxième demi-lobes DG2. La seconde aube est placée en première position du premier demi-lobes DG1. Les aubes « 3 » et « 4 » suivent le même schéma sur le deuxième  
20 lobes DG4 et DG3. Puis la procédure est inversée afin d'équilibrer au mieux les deux lobes.

Ainsi, au départ, les deux aubes les plus lourdes (aubes « 1 » et « 2 ») ont été positionnées sur le premier lobes LG1 et les deux suivantes (aubes « 3 » et « 4 ») sur le deuxième lobes LG2. Ensuite, les deux aubes les plus lourdes (aubes « 5 » et « 6 ») sont positionnées sur le deuxième lobes LG2 et les deux plus légères (aubes « 7 » et « 8 ») sur le  
25 premier lobes LG1. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce qu'on atteigne la dernière aube « 32 » à placer.

D'un point de vue algorithmique, quatre vecteurs sont générés contenant les suites de nombre des quatre demi-lobes suivantes :

Premier demi-lobes DG1: (31, 26, 23, 18, 15, 10, 7, 2).

Deuxième demi-lobes DG2: (1, 8, 9, 16, 17, 24, 25, 32).

30

Troisième demi-lobes DG3: (29, 28, 21, 20, 13, 12, 5, 4).

Quatrième demi-lobes DG4: (3, 6, 11, 14, 19, 22, 27, 30).

Une fois les quatre demi-lobes DG1-DG4 créés, les aubes à léchettes durcies sont placées aux étapes E28-E30 suivant une configuration la plus espacée possible.

5 En effet, les étapes E28-E30 correspondent à un processus prédéterminé de placement des aubes à léchettes durcies.

Plus particulièrement, l'étape E28 concerne le cas où trois aubes à léchettes durcies  $D_1$ - $D_3$  sont présentes dans le jeu initial. Comme indiqué précédemment, les deux plus lourdes  $D_1$  et  $D_2$  sont placées dans le premier groupe GL (i.e premier et deuxième gros lobes GL1 et GL2) tandis que la plus légère  $D_3$  est placée dans le second groupe PL (i.e premier ou deuxième petit lobe PL1 et PL2). Les deux lobes les plus lourdes  $D_1$  et  $D_2$  placées dans les premier et deuxième gros lobes GL1 et GL2 sont espacées le plus possible (idéalement avec un écart angulaire d'environ  $120^\circ$ ) en les permutant avec d'autres aubes de mêmes masses et se trouvant sur les demi-lobes externes (i.e première DG1 et quatriième demi-lobes DG4).

L'étape E29 concerne le cas où une seule aube à léchette durcie  $D_1$  se trouve dans le premier groupe GL (i.e premier et deuxième gros lobes GL1 et GL2). Dans ce cas, l'aube particulière  $D_1$  est placée le plus proche possible du milieu des deux gros lobes GL1 et GL2.

20 Finalement, l'étape E30 concerne le cas où il y a une aube à léchette durcie  $D_3$  dans le second groupe (i.e premier ou deuxième petit lobe PL1 et PL2). Celle-ci est placée le plus proche possible du milieu des deux petits lobes PL1 et PL2 selon deux configurations possibles. Dans un premier cas, l'aube à léchette durcie  $D_3$  (en pointillé) est placée entre le sommet et la fin du premier petit lobe PL1. Dans un deuxième cas, l'aube à léchette durcie  $D_3$  (en pointillé) est placée entre le début et le sommet du deuxième petit lobe PL2. La configuration retenue est celle qui optimise l'espacement entre toutes les aubes à léchettes durcies présentes sur le disque.

25 Afin de positionner chaque aube à léchette durcie comme décrit précédemment, cette dernière est intervertie avec l'aube la plus proche en masse dans la zone recherchée (i.e. dans la demi-lobes où on souhaite placer l'aube à léchette durcie).

30

Une fois que les première et deuxième matrices  $M1$  et  $M2$  (associées aux premier et deuxième groupes GL et PL) ont été ordonnées selon l'ordre de dépôt des aubes formant les quatre lobes GL1, GL2, PL1 et PL2, il s'agit ensuite de reformer la matrice totale  $M$  des aubes selon leur ordre de dépôt dans les alvéoles du disque (i.e. la première aube apparaissant sur la première ligne de la matrice d'aubes  $M$  sera placée dans la première alvéole  $a_1$  et ainsi de suite).

Ainsi, à l'étape E31, les quatre lobes PL1, PL2, GL1 et GL2 sont agencés sur le disque nu en les disposant suivant une configuration déterminée par rapport au premier vecteur balourd  $B1$  représentatif du balourd du disque nu. Avantageusement, la configuration déterminée comporte l'agencement des premier et deuxième petits lobes PL1 et PL2 sur le disque nu de part et d'autre du premier vecteur balourd  $B1$ .

On notera que la position du balourd du disque nu sur les alvéoles dépend de l'angle du balourd du disque nu et de l'angle des alvéoles du disque. Les alvéoles sont positionnées selon un séquençage régulier des  $360^\circ$  par le nombre d'alvéoles en partant de la position « 1 » correspondant à l'angle  $0^\circ$ . On obtient ainsi la position correspondant à l'angle du balourd du disque nu dans la matrice de correspondance des alvéoles.

Ceci permet d'obtenir le vecteur masse des aubes voulu comportant le positionnement des aubes autour du disque de sorte que le balourd du disque nu soit placé entre les deux petits lobes. La taille des quatre lobes dépend du nombre d'aubes du jeu fourni initialement.

Par construction de l'algorithme de placement des aubes, on peut remarquer que la forme obtenue permet de satisfaire les contraintes de l'optimisation. En effet, on obtient bien une forme en quatre lobes, une continuité de la masse des aubes adjacentes et une optimisation de l'espacement des aubes à l'échelles durcies.

Par ailleurs, étant donné que les premier et deuxième petits lobes PL1, PL2 et premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 ont été créés initialement de manière équilibrée, le balourd engendré par les aubes est proche de zéro. Toutefois, le balourd de l'ensemble « aubes + disque » n'est pas forcément proche de zéro à cause du fait que le disque nu possède un certain balourd initial. Ainsi, afin d'équilibrer le balourd total, les aubes sont réorganisées selon un processus itératif de permutation d'aubes.

En effet, la Fig. 6 est un schéma en bloc illustrant le processus de permutation pour l'équilibrage du balourd total, selon un mode de réalisation de l'invention.

Au bloc B40, on commence avec des aubes ayant un balourd proche de zéro et un balourd résultant B non nul.

5           Au bloc B41, les aubes sont réorganisées par le processeur 9 dans les différents lobes selon un processus itératif de permutation adapté pour équilibrer le premier vecteur balourd B1 par un second vecteur balourd B2 (voir figure de l'étape E31) résultant de la dispersion de masse des aubes et de leurs agencements sur le disque en respectant la monotonie des masses d'aubes. On notera qu'à chaque itération le balourd résultant (i.e. 10 total) est calculé et le processus itératif continue tant que le balourd restant n'est pas inférieur à un seuil prédéterminé S (par exemple d'environ 5 cm.g) et qu'un premier nombre maximal d'itérations n'est pas atteint. A titre d'exemple, le seuil de balourd prédéterminé peut être compris entre environ 1 cm.g et 5 cm.g.

15           Un test T1 est exécuté à l'issue des permutations réalisées dans le bloc B41 pour vérifier si le balourd résultant B est supérieur au seuil prédéterminé S. Si oui, on passe au bloc B42 et sinon on s'arrête.

20           Au bloc B42, le processeur 9 réalise des permutations stochastiques d'aubes entre le premier groupe GL et le second groupe PL tout en respectant la monotonie des masses d'aubes. De manière similaire au bloc B41, le balourd résultant est calculé à chaque itération et le processus itératif continue tant que le balourd résultant n'est pas inférieur au seuil prédéterminé et qu'un deuxième nombre maximal d'itérations n'est pas atteint.

          Un test T2 est exécuté à l'issue des permutations réalisées dans le bloc B42 pour vérifier si le balourd résultant B est toujours supérieur au seuil prédéterminé S. Si oui, on passe au bloc B43 et sinon on s'arrête.

25           Au bloc B43, le processeur réalise des permutations stochastiques « directement sur la forme » entre le premier groupe et le second groupe sans forcément respecter la monotonie des masses d'aubes. Par « directement sur la forme », on entend le fait que les aubes soient permutées sans réappliquer l'algorithme de placement des aubes. Cela implique que l'algorithme d'équilibrage du balourd total peut se permettre de 30 déformer la forme et donc de potentiellement ne plus respecter la contrainte de

monotonie des masses d'aubes. Cela dit, cette contrainte sera prise en compte dans la fonction à optimiser via l'algorithme d'optimisation stochastique.

On notera que la réorganisation des aubes à la fin du processus d'itération de l'un quelconque des blocs B41-B43 définit un ordre de placement final des aubes sur les alvéoles du disque.

La Fig. 7 est un organigramme illustrant plus en détail le processus itératif de permutation du bloc B41, selon un mode de réalisation de l'invention.

A l'étape initiale E50, le balourd des aubes est quasi nul, car les lobes sont créés de manière équilibrée. Par ailleurs, étant donné que le balourd du disque nu B1 a été positionné entre les deux petits lobes PL1 et PL2 (voir étape E31 de la Fig. 4), cela signifie que pour que le balourd B2 sur les aubes compense celui du disque, on doit avoir des gros lobes GL1, GL2 « plus gros » que les petits lobes PL1, PL2.

L'étape E51 est un test qui permet de passer à l'étape suivante tant que le balourd résultant B « disque + aubes » est supérieur au critère fixé (i.e. au seuil prédéterminé) et le nombre d'itération n est inférieur à un nombre maximal prédéterminé N1.

Le balourd résultant est déterminé en calculant le balourd total sur l'ensemble « disque + aubes ». Ainsi, à partir de la matrice M ordonnée des aubes, le balourd des aubes (module et angle) ainsi que le balourd résultant sont calculés comme suit :

$$\begin{aligned}
 Angle &= \text{atan} \left( \frac{\sum_{aubes} [masse_{aube} \sin(\angle_{aube} \frac{\pi}{180})]}{\sum_{aubes} [masse_{aube} \cos(\angle_{aube} \frac{\pi}{180})]} \right) * \frac{180}{\pi} \\
 Module &= Disk_{Radius} \sqrt{\left\{ \sum_{aubes} [masse_{aube} \sin(\angle_{aube} \frac{\pi}{180})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{aubes} [masse_{aube} \cos(\angle_{aube} \frac{\pi}{180})] \right\}^2} \\
 Balourd_{resultant} &= \sqrt{\left\{ balourd_{disque} \cos\left(\frac{\pi}{180} \angle_{disque}\right) + Module \cos\left(\frac{\pi}{180} Angle\right) \right\}^2 + \left\{ balourd_{disque} \sin\left(\frac{\pi}{180} \angle_{disque}\right) + Module \sin\left(\frac{\pi}{180} Angle\right) \right\}^2}
 \end{aligned}$$

Par ailleurs, le nombre maximal prédéterminé d'itérations (ou de permutation) est fixé par exemple à N1=3000. Ce nombre a été sélectionné à partir d'un grand nombre d'essais d'équilibrage de disques. Le procédé s'arrête si le balourd résultant est inférieur au critère fixé ou si le nombre maximal prédéterminé est atteint.

Les étapes suivantes consistent à faire un équilibrage aléatoire, c'est-à-dire, à permuter de manière aléatoire des aubes entre d'une part le groupe des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 et d'autre part le groupe des premier et deuxième petit lobes PL1, PL2. En effet, comme précisé à l'étape E50, pour que le balourd B2 sur les aubes

5 compense celui du disque, on doit avoir des gros lobes GL1, GL2 « plus gros » que les petits lobes PL1, PL2. Dans ce cas, une aube sera tirée de manière aléatoire de l'ensemble des premier et deuxième petit lobes PL1, PL2 en constatant qu'elles sont les aubes dans l'ensemble des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 qui ont une masse plus petite que l'aube tirée, et d'en choisir une de manière aléatoire, qui sera permutée avec ladite aube

10 tirée. Par ailleurs, dans le cas où le groupe des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 a été « trop alourdi », l'aube qui sera tirée dans ce dernier devra être plus lourde que l'aube tirée dans le groupe des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2. Ceci permet d'alléger le groupe des gros lobes GL1, GL2 et d'alourdir celui des petits lobes PL1, PL2. Ces étapes vont permettre petit à petit d'avoir un balourd B2 sur les aubes (ou plutôt la norme du

15 vecteur balourd) qui se rapprochera de celui du disque nu.

En effet, à l'étape E52 une aube de masse  $M_{PL}$  est tirée de manière aléatoire du groupe des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2.

On notera que les permutations ne sont pas faites de manière totalement aléatoire. En fait, afin d'assurer une convergence rapide, le processeur 9 est configuré pour

20 calculer le balourd B2 sur les aubes, afin de savoir s'il faut « alourdir » l'ensemble des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2 ou bien l'alléger.

Ainsi, l'étape E53 est un test où le processeur 9 est configuré pour comparer le balourd B2 des aubes avec le balourd B1 du disque nu. Si le balourd B2 des aubes est inférieur au balourd B1 du disque nu, alors on passe à l'étape E54 où la permutation est

25 réalisée avec une aube tirée aléatoirement dans le groupe des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 et dont la masse  $M_{GL}$  est supérieure à celle tirée du groupe des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2 (i.e.  $M_{GL} > M_{PL}$ ).

En revanche, si le balourd B2 des aubes est supérieur au balourd B1 du disque nu, alors on passe à l'étape E55 où la permutation est réalisée avec une aube tirée

30 aléatoirement dans l'ensemble des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 et dont la

masse  $M_{GL}$  est inférieure à celle tirée de l'ensemble des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2 (i.e.  $M_{GL} < M_{PL}$ ).

Une fois cette permutation réalisée, l'étape E56 consiste à réappliquer les étapes E14-E31 de la Fig. 4 concernant le placement des aubes. La ré-application de ces  
 5 étapes permet de répartir les masses des aubes en quatre lobes GL1, GL2, PL1, PL2 de manière équilibrée.

Ensuite, on revient au test de l'étape E51 pour vérifier si le balourd résultant est devenu inférieur au critère fixé ou si le nombre d'itérations maximal a été atteint.

Dans la pratique, 90% des équilibrages de disque sont réalisés par des  
 10 permutations selon le processus du bloc B41 sans aller aux blocs B42 et B43. En effet, comme précisé précédemment, le balourd B1 sur le disque nu n'est en général pas très important, et le fait d'avoir à l'étape E50 un balourd d'aubes B2 quasi nul (les groupes des petits et gros lobes étant très équilibrés initialement), permet d'arriver à un balourd total inférieur au critère fixé en un nombre limité d'itérations.

Toutefois, au cas où le nombre d'itérations maximal a été atteint mais le  
 15 balourd résultant ne satisfait toujours pas le critère fixé, alors on passe au bloc B42 de permutations stochastiques.

La permutation stochastique se base sur l'utilisation d'un algorithme d'optimisation stochastique (méta-heuristique), visant à minimiser la fonction de balourd  
 20 résultant (dite fonction d'énergie) dont la formule est décrite ci-dessus.

L'algorithme stochastique va modifier progressivement et aléatoirement le vecteur masse obtenu à la fin du processus itératif de permutation du bloc B41, et ne va garder que les modifications diminuant la fonction d'énergie. L'algorithme d'optimisation stochastique peut par exemple être un algorithme Génétique, un algorithme Tabou, ou  
 25 bien un algorithme du Recuit Simulé.

Avec par exemple le Recuit Simulé, l'algorithme d'optimisation stochastique consiste en une suite d'itérations, dont chaque étape correspond à une permutation aléatoire d'une aube du groupe des premier et deuxième gros lobes GL1, GL2 avec le groupe des premier et deuxième petits lobes PL1, PL2. Chaque étape est suivie d'une  
 30 recomposition de placement des aubes de la même manière que précédemment selon les

étapes E14-E31 de la Fig. 4. Si la permutation diminue le balourd total, celle-ci est systématiquement validée, et l'algorithme passe à l'itération suivante. Si la permutation augmente le balourd total, celle-ci est acceptée avec une certaine probabilité, définie selon une loi dépendant d'un paramètre dit « température », qui diminue inversement avec le nombre d'itérations effectuées. Cette méthode a pour avantage d'éviter les minima locaux.

Les itérations se poursuivent ainsi jusqu'à ce que le balourd résultant soit inférieur au critère fixé ou que le nombre d'itérations maximal soit atteint.

Si le critère sur le balourd résultant n'est toujours pas respecté, l'algorithme passe alors au bloc B43 de permutations stochastiques directement sur la forme.

Ce troisième et dernier processus de permutation est le dernier recours du procédé au cas où le balourd total n'est toujours pas satisfaisant. Il est plus efficace en termes de réduction de balourd, mais a une répercussion sur la forme des lobes obtenus.

Similairement au bloc B42, le bloc B43 a recours à un algorithme d'optimisation stochastique sauf que la permutation se fait aléatoirement entre deux aubes standards (i.e. pas à léchettes durcies) de n'importe quel groupe.

D'autre part, cet algorithme ne comporte pas des étapes de reconstruction des lobes. Ainsi, une permutation peut amener une aube à être placée à un endroit qui violerait la disposition monotone des masses. Toutefois, afin de limiter ce phénomène, une permutation entre deux aubes est autorisée lorsque l'écart entre leur masse ne dépasse pas un paramètre correspondant à un pourcentage massique prédéterminé. Plus ce paramètre est élevé, plus la déformation de la forme de lobes sera importante, mais plus la convergence de la méthode sera rapide.

Tout comme dans les blocs précédents, un nombre d'itérations maximal est défini. Si celui-ci est atteint, le jeu d'aubes sera alors considéré comme non équilibrable.

A titre d'exemple, le nombre maximal d'itérations est calculé de la manière suivante :

$$steps = \min\left(A + B * \left\lceil \frac{(balourd_{resultant} - coefficient_{heuristique})}{C} \right\rceil, D\right)$$

Ainsi, plus le balourd résultant est loin du Coefficient\_heuristique (qui correspond au seuil de balourd total acceptable), plus le nombre d'itérations sera

important. Le Coefficient\_heuristique peut prendre des valeurs comprises entre environ 0.5 cm.g et 5.0 cm.g. Les valeurs A, B, C et D sont des meta-paramètres sélectionnés de manière à optimiser le résultat final et de coût de calcul. A titre d'exemple, A=1000, B=50, C=0.1 et D=40000.

5 Les Fig. 8A et 8B illustrent la répartition des aubes selon leurs masses, ainsi que le positionnement des aubes à léchettes durcies D<sub>1</sub>-D<sub>3</sub> résultant des tests du procédé selon un mode de réalisation de l'invention effectués sur plusieurs jeux d'aubes réels.

Le balourd résultant obtenu est de 0.28 cm.g, sachant que le seuil acceptable est de 5 cm.g et que le balourd disque nu était de 258 cm.g. Par ailleurs, la Fig. 5B montre  
10 que les angles entre les aubes à léchettes durcies D<sub>1</sub>-D<sub>3</sub> sont supérieurs à 90°.

Les Figs. 9A-9C illustrent l'évolution du balourd résultant en fonction du nombre d'itérations dans le cas d'un jeu requérant l'usage des trois blocs B41-B43 pour la satisfaction d'un critère de balourd à 1cm.g. On notera que le temps total est de 125 secondes.

15 Plus particulièrement, la Fig. 9A concerne le bloc B41 et montre une stagnation autour de 80cm.g d'où le besoin de passer au bloc B42.

La Fig. 9B concerne le bloc B42 et montre une stagnation autour de 1,5 cm.g d'où le besoin de passer à au bloc B43.

20 Finalement, la Fig. 9C concernant le bloc B43 montre un balourd global très inférieur au seuil acceptable.

La présente invention permet d'augmenter la durée de vie des disques de turbines. En effet, la répartition des masses des aubes en quatre lobes a pour conséquence de limiter les déformations du disque. Plus particulièrement, une configuration en quatre lobes permet au disque de garder une forme sphérique lors de la rotation contrairement  
25 par exemple à une formation en deux lobes qui entraînerait une déformation elliptique du disque rotor. Cette forme en quatre lobes permet également de limiter la différence de masse entre aubes adjacentes. Un nombre de lobes plus élevé ou une configuration sans lobe impliquerait une difficulté à respecter une limitation des différences d'aubes adjacentes.

En outre, la présente invention apporte une répartition monotone des masses des aubes. On notera que lorsqu'une aube de masse importante est placée à côté d'une aube de masse faible, la première aube aura tendance à tirer (avec la force centrifuge) sur le disque nu de manière plus importante que l'aube de masse plus faible engendrant des déformations plus importantes au niveau du disque nu. Ainsi, la monotonie de la répartition des masses évite ce genre de problèmes.

Par ailleurs, les aubes à léchettes durcies sont généralement placées pour créer une rainure dans l'abradable, permettant de limiter l'écoulement d'air des turbines. La présente invention permet de les espacer au maximum garantissant ainsi la création effective de la rainure.

En outre, la présente invention utilise des algorithmes d'équilibrage stochastiques qui permettent d'obtenir tous les résultats et contraintes ci-dessus de manière automatique, efficace et avec très peu de temps de calcul.

La présente invention permet ainsi aux assembleurs de savoir comment placer les aubes sur le disque selon leurs masses de manière simple, efficace et très rapide tout en permettant d'augmenter la durée de vie des disques de moteurs d'aéronefs.

## REVENDEICATIONS

1. Procédé d'équilibrage d'un ensemble d'aubes (5) destinées à être disposées sur un disque nu (7) d'un moteur d'aéronef, le disque nu (7) comportant un nombre déterminé d'alvéoles ( $a_i$ ) numérotées destinées à recevoir le même nombre déterminé d'aubes qui peuvent présenter une dispersion de masse, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

-trier les aubes (5) par ordre monotone de leur masse ( $m_i$ ) formant un ensemble ordonné d'aubes,

-séparer l'ensemble ordonné d'aubes de manière équilibrée en quatre lobes constitués d'un premier gros lobe (GL1), d'un deuxième gros lobe (GL2), d'un premier petit lobe (PL1) et d'un deuxième petit lobe (PL2), les aubes étant classées dans chaque lobe selon un ordre de placement courant, et

-agencer les quatre lobes (GL1, GL2, PL1, PL2) sur le disque nu (7) en faisant correspondre l'ordre de placement courant des aubes aux alvéoles numérotées du disque nu.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la séparation de l'ensemble d'aubes en quatre lobes comporte les étapes suivantes :

-séparer de manière équilibrée l'ensemble ordonné d'aubes en des premier et second groupes (GL,PL) sensiblement équilibrés en masse en attribuant des aubes distinctives ( $D_i$ ) comprises dans l'ensemble ordonné d'aubes aux premier et second groupes selon un processus prédéterminé et en partageant les autres aubes par ordre décroissant de leur masse de manière alternée entre les premier et second groupes (GL,PL) tout en tenant compte du nombre d'aubes distinctives attribuées à chacun des premier et second groupes, et

-composer les premier et deuxième gros lobes (GL1, GL2) de manière équilibrée à partir dudit premier groupe (GL) et composer les premier et deuxième petits lobes (PL1, PL2) de manière équilibrée à partir dudit second groupe (PL).

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que les aubes distinctives ( $D_i$ ) sont des aubes à léchettes durcies qui sont distribuées entre les premier et second groupes (GL, PL) suivant leur nombre tout en optimisant l'espacement entre elles, selon les étapes suivantes :

5                    -si l'ensemble d'aubes comporte trois aubes à léchettes durcies, les deux plus lourdes sont placées dans le premier groupe (GL) tandis que la plus légère est placée dans le second groupe (PL), et

                      -si l'ensemble d'aubes comporte une à deux aubes à léchettes durcies, elle(s) est(sont) placée(s) dans le premier groupe (GL).

10

4. Procédé selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que la composition des premier et deuxième gros ou petits lobes (GL1, GL2 ; PL1, PL2) au sein du premier ou second groupes (GP ; PL) respectivement est réalisée en distribuant les aubes sur des premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes (DG1-DG4 ; DP1-DP4) du premier ou second groupe en fonction des propriétés de parité et/ou de divisibilité du nombre d'aubes constituant le premier groupe (DG) ou le second groupe (DP).

15

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que si le nombre d'aubes (5) du premier ou second groupe (DG ; DP) est un nombre pair non divisible par quatre, alors les première et deuxième aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième gros ou petits lobes (DG1, DG2 ; DP1, DP2) et les aubes restantes sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes (DG1-DG4 ; DP1-DP4) du premier ou second groupe (DG ; DP).

20

6. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que si le nombre d'aubes (5) du premier ou second groupe (DG ; DP) est un nombre divisible par quatre, alors les aubes sont distribuées équitablement de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes (DG1-DG4 ; DP1-DP4) du premier ou second groupe (DG ; DP).

25

30

7. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que si le nombre d'aubes (5) du premier ou second groupe (DG ; DP) est un nombre impair, alors la dernière aube est positionnée entre les deux gros ou petits lobes et si le nombre d'aubes restantes est divisible par quatre, alors elles sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes (DG1-DG4 ; DP1-DP4) du premier ou second groupe (DG ; DP).

8. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que si le nombre d'aubes (5) du premier ou second groupe (DG ; DP) est un nombre impair, alors la dernière aube est positionnée entre les deux gros ou petits lobes et si le nombre d'aubes restantes est non divisible par quatre, alors les première et deuxième aubes sont placées aux sommets des premier et deuxième gros ou petits lobes et les aubes restantes sont distribuées de manière prédéterminée sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes (DG1-DG4 ; DP1-DP4) du premier ou second groupe (DG ; DP).

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisé en ce que la distribution de manière prédéterminée d'un nombre d'aubes divisible par quatre sur les premier, deuxième, troisième et quatrième demi-lobes du premier ou second groupe (DG ; DP) est réalisée selon des séquences périodiques de huit étapes de la manière suivante :

- placer la première aube courante en première position non occupée du deuxième demi-lobe (DG2 ; DP2),

- placer la deuxième aube courante en première position non occupée du premier demi-lobe (DG1 ; DP1),

- placer la troisième aube courante en première position non occupée du quatrième demi-lobe (DG4 ; DP4),

- placer la quatrième aube courante en première position non occupée du troisième demi-lobe (DG3 ; DP3), et

- placer les quatre aubes suivantes sur les demi-lobes dans le sens inverse des étapes précédentes.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- 5 - agencer les quatre lobes (GL1, GL2, PL1, PL2) sur le disque nu (7) en les disposant suivant une configuration déterminée par rapport à un premier vecteur balourd (B1) représentatif d'un balourd inhérent au disque nu, et
- 10 - réorganiser les aubes dans les différents lobes selon un processus itératif de permutation adapté pour équilibrer le premier vecteur balourd par un second vecteur balourd résultant de la dispersion de masse des aubes et de leurs agencements sur le disque, ladite réorganisation définissant un ordre de placement final des aubes sur les alvéoles du disque.

11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que la configuration déterminée comporte l'agencement des premier et deuxième petits lobes (PL1, PL2) sur le  
15 disque nu (7) de part et d'autre du premier vecteur balourd (B1).

12. Procédé selon la revendication 10 ou 11, caractérisé en ce que ledit processus itératif de permutation comporte les étapes suivantes :

- 20 - permutations aléatoires d'aubes de manière itérative entre le premier groupe et le second groupe tout en réappliquant les étapes selon les revendications 2 à 9 après chaque itération,
- 25 - si, à l'issue des permutations de l'étape précédente, le balourd résultant est supérieur à un seuil prédéterminé, alors on réalise des permutations stochastiques d'aubes entre le premier groupe et le second groupe tout en réappliquant les étapes selon les revendications 2 à 9 après chaque itération, et
- si, à l'issue des permutations de l'étape précédente, le balourd résultant est supérieur audit seuil prédéterminé, alors on réalise des permutations stochastiques directement sur la forme entre le premier groupe et le second groupe.

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'on continue les itérations dans chacune des étapes de permutation tant que le balourd résultant est supérieur au seuil prédéterminé et le nombre d'itérations est inférieur à un nombre maximal prédéterminé.

5

14. Système d'équilibrage d'un ensemble d'aubes (5) destinées à être disposées sur un disque nu (7) d'un moteur d'aéronef, le disque nu (7) comportant un nombre déterminé d'alvéoles ( $a_i$ ) numérotées destinées à recevoir le même nombre déterminé d'aubes qui peuvent présenter une dispersion de masse, ledit système étant caractérisé en ce qu'il comporte un processeur configuré pour :

10

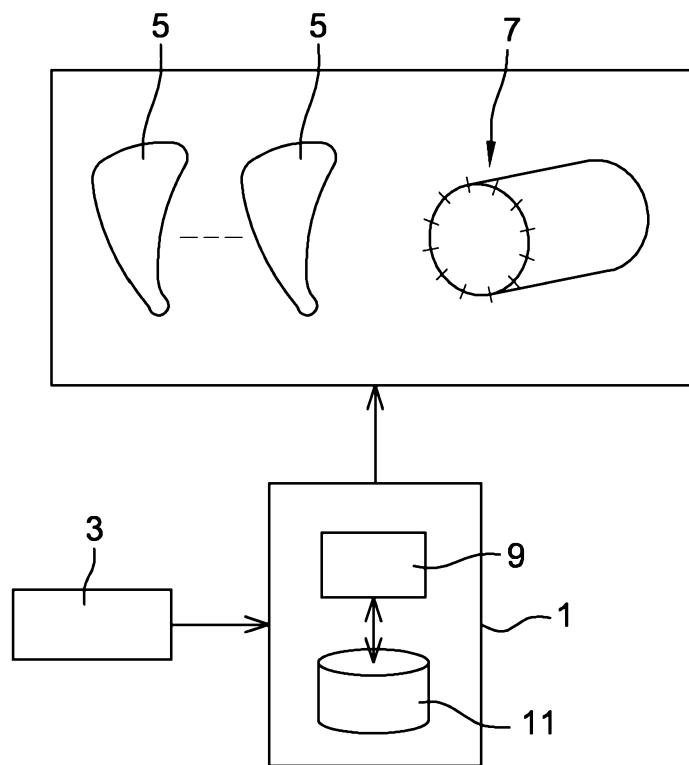
- trier les aubes (5) par ordre monotone de leur masse ( $m_i$ ) formant un ensemble ordonné d'aubes,

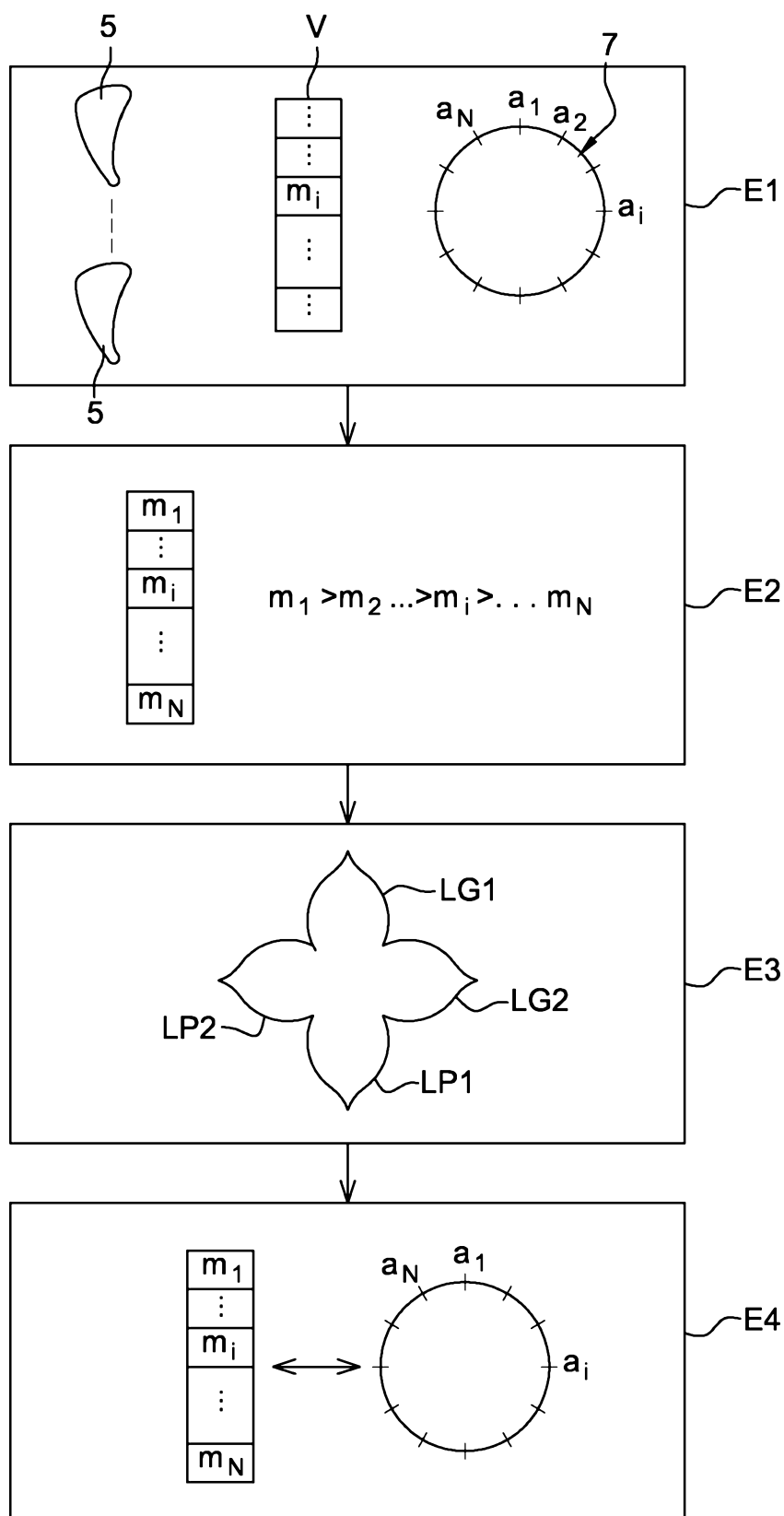
- séparer l'ensemble ordonné d'aubes de manière équilibrée en quatre lobes constitués d'un premier gros lobe (GL1), d'un deuxième gros lobe (GL2), d'un premier petit lobe (PL1) et d'un deuxième petit lobe (PL2), les aubes étant classées dans chaque lobe selon un ordre de placement courant, et

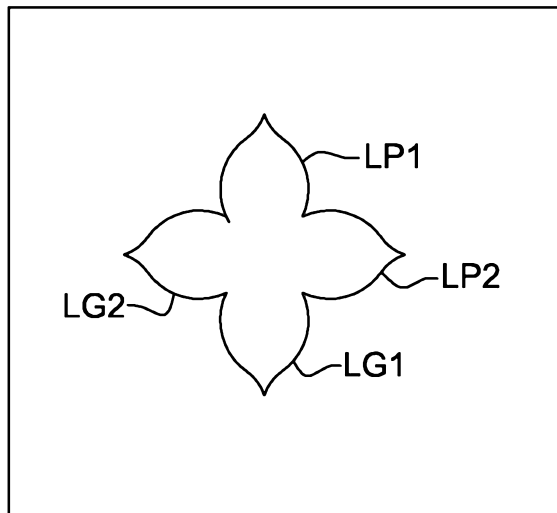
15

- agencer les quatre lobes (GL1, GL2, PL1, PL2) sur le disque nu (7) en faisant correspondre l'ordre de placement courant des aubes aux alvéoles numérotées du disque nu.

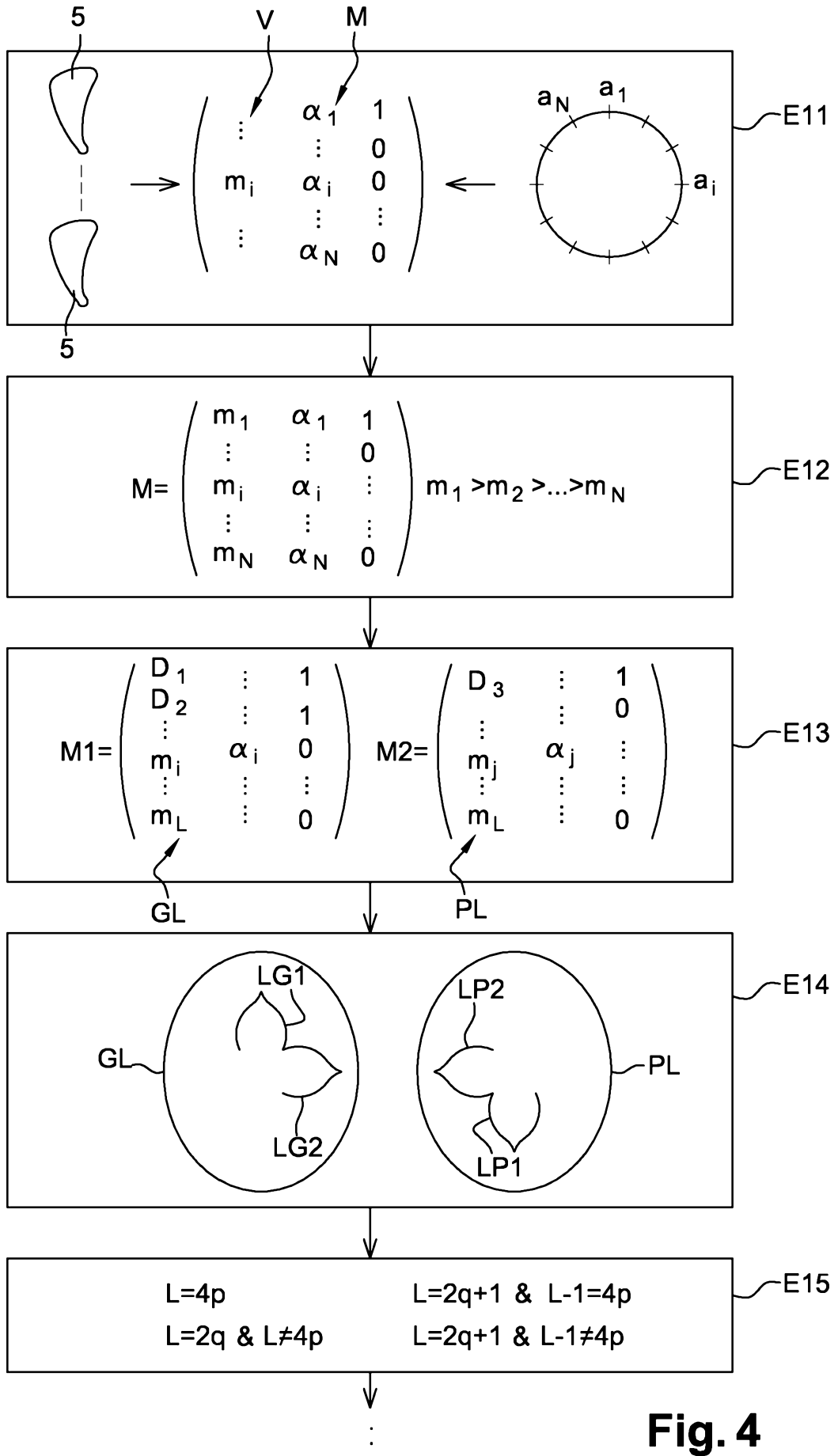
20

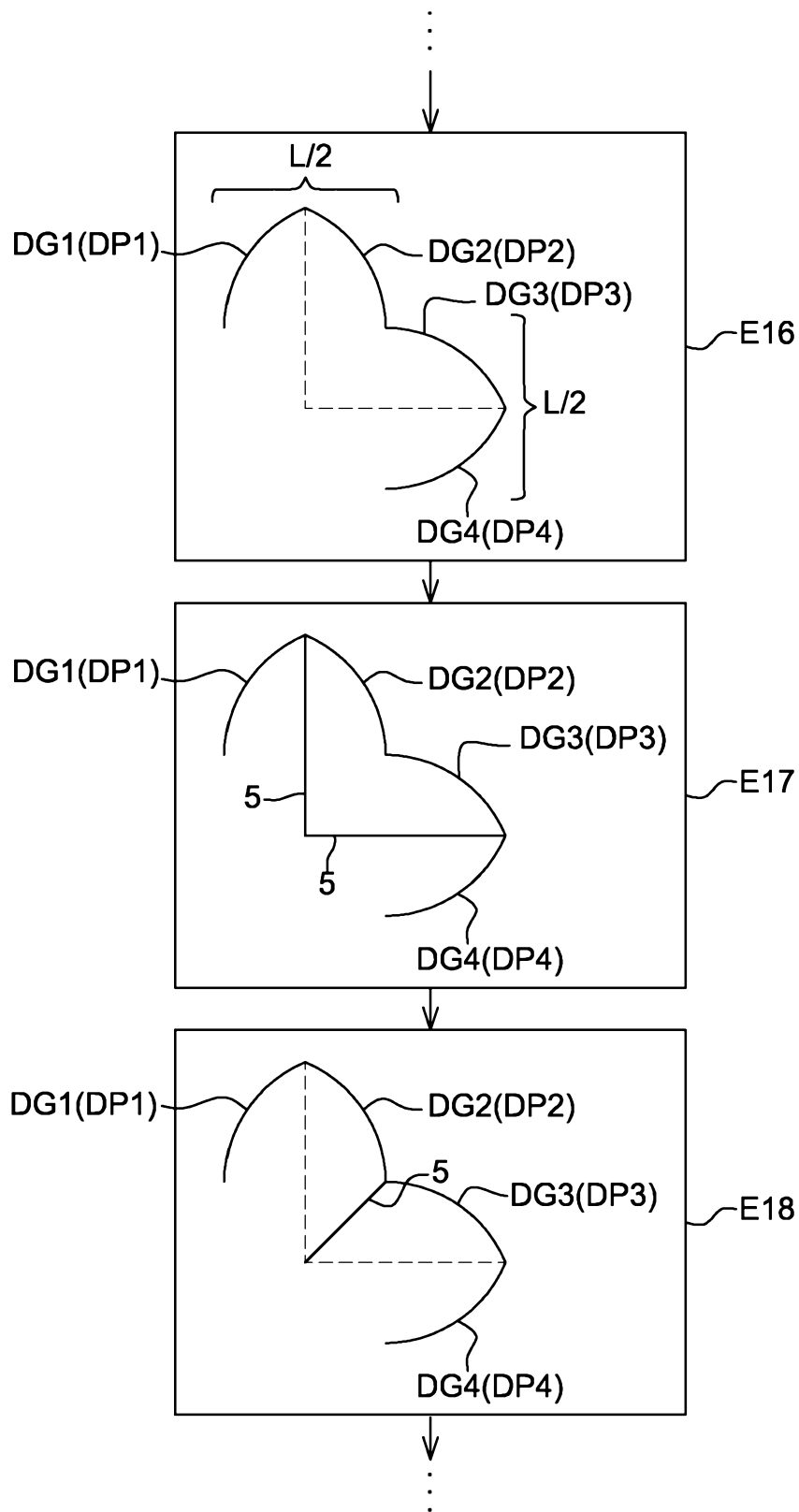
**Fig. 1**

**Fig. 2**



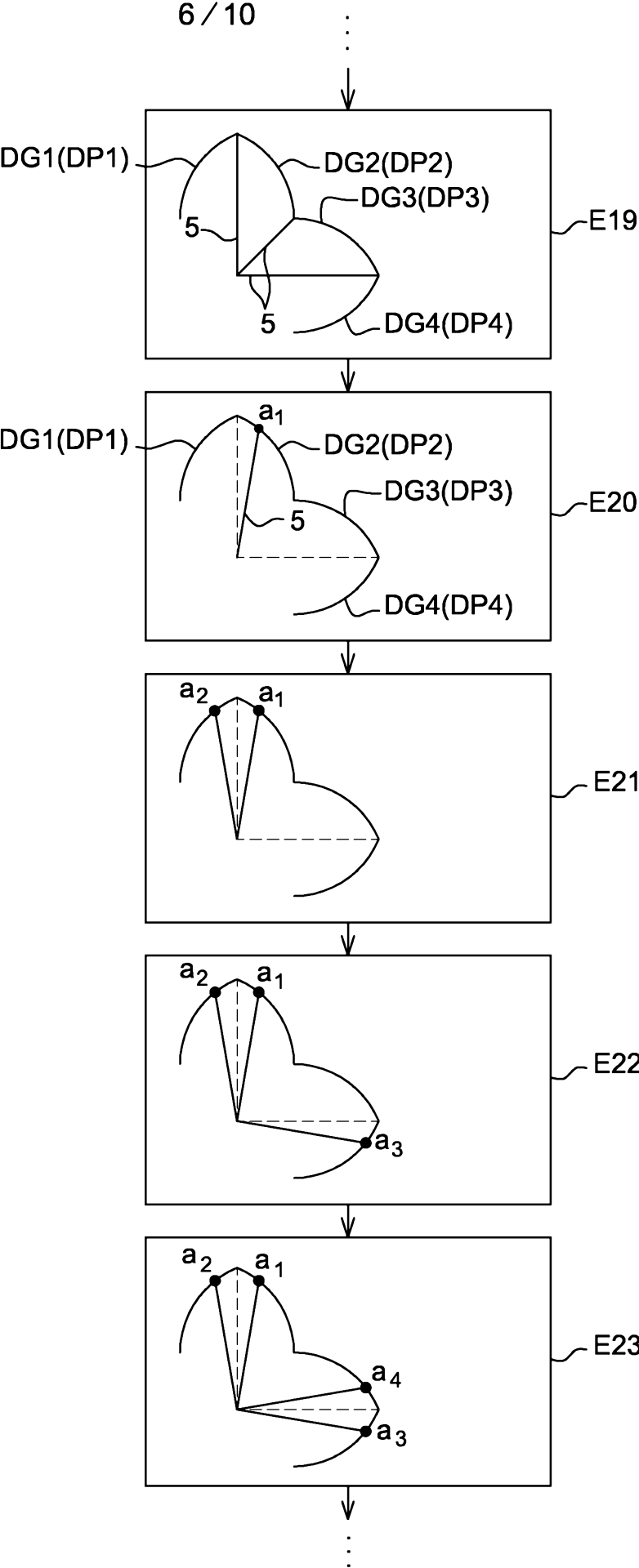
**Fig. 3**

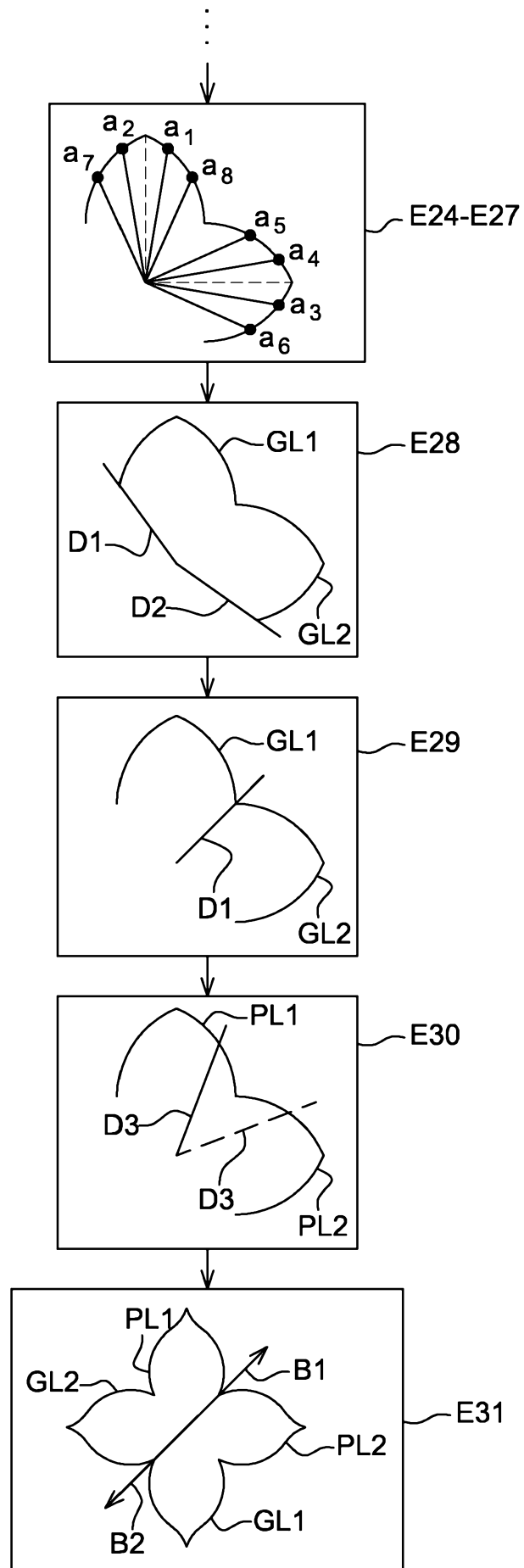
**Fig. 4**



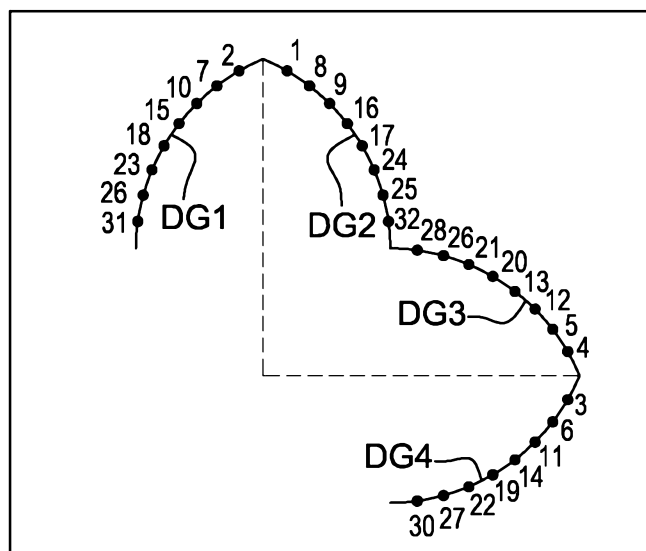
**Fig. 4**

Fig. 4

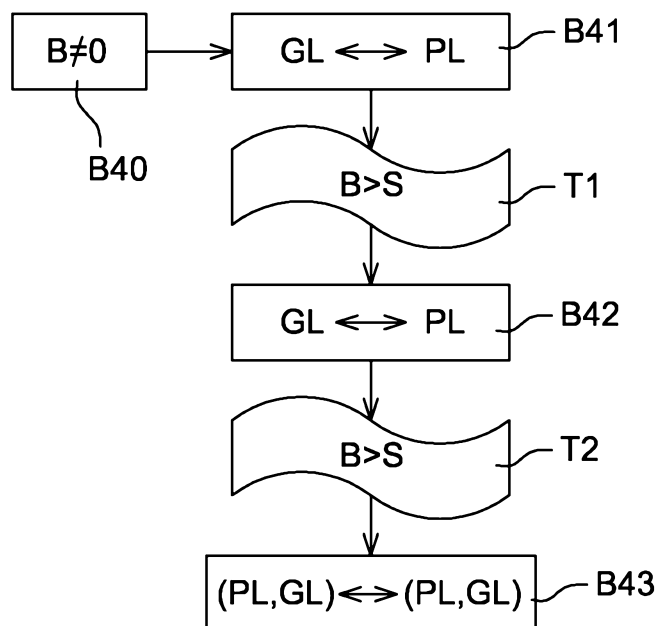




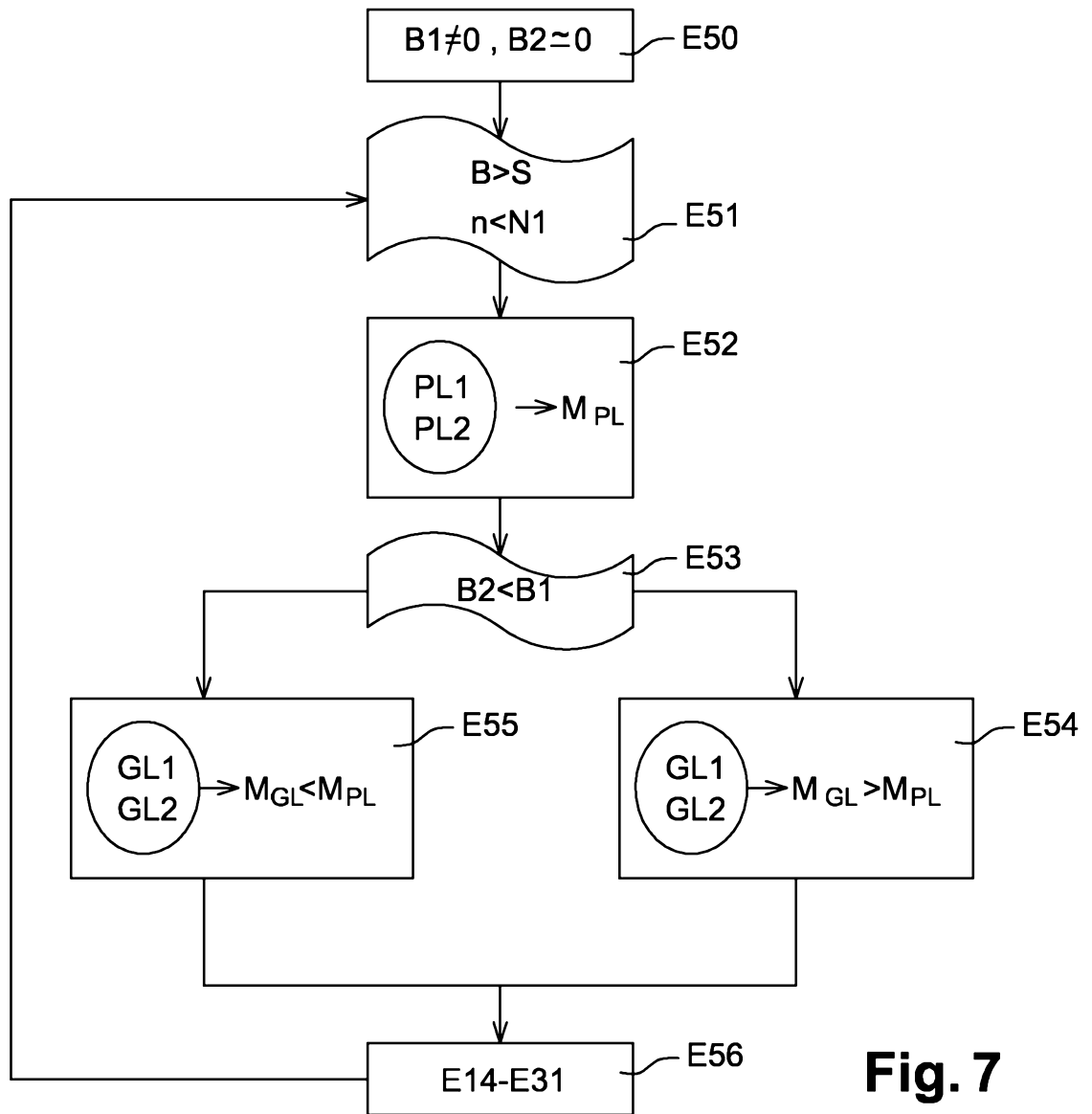
**Fig. 4**



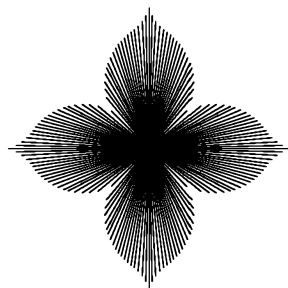
**Fig. 5**



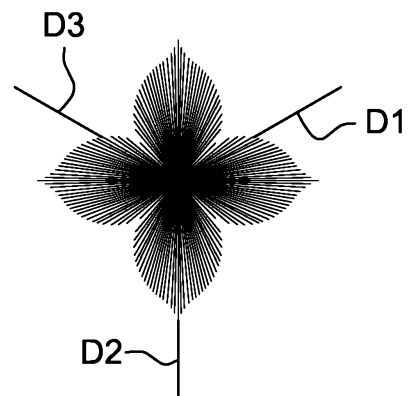
**Fig. 6**



**Fig. 7**



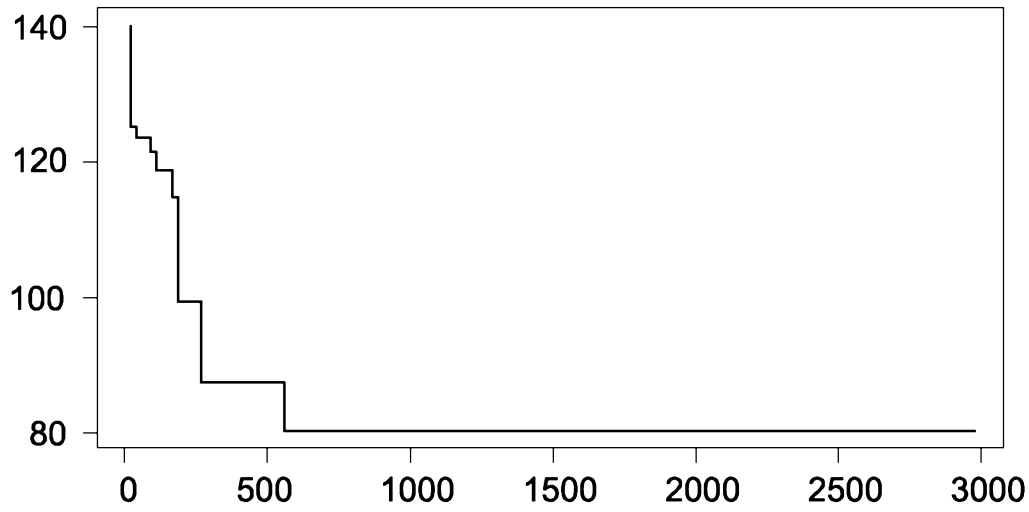
**Fig. 8A**



**Fig. 8B**

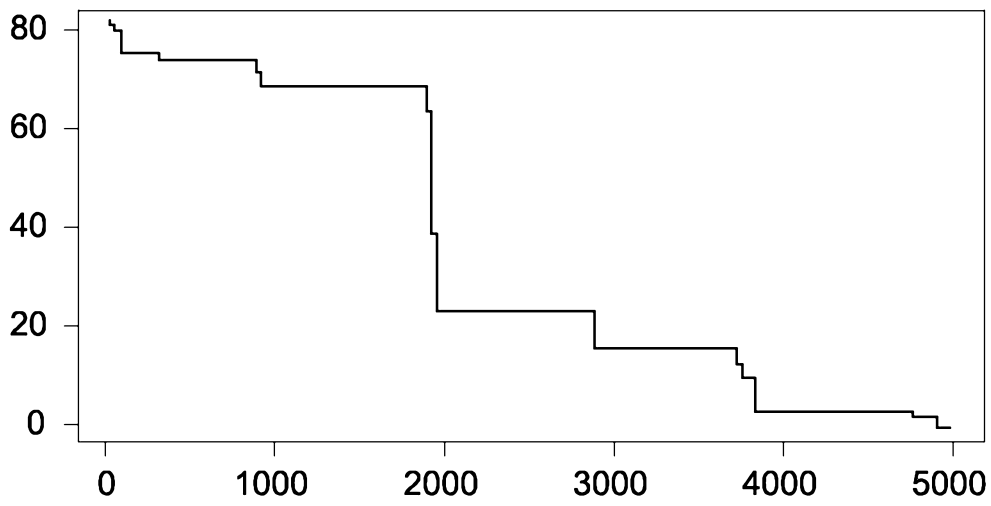
10 / 10

B41



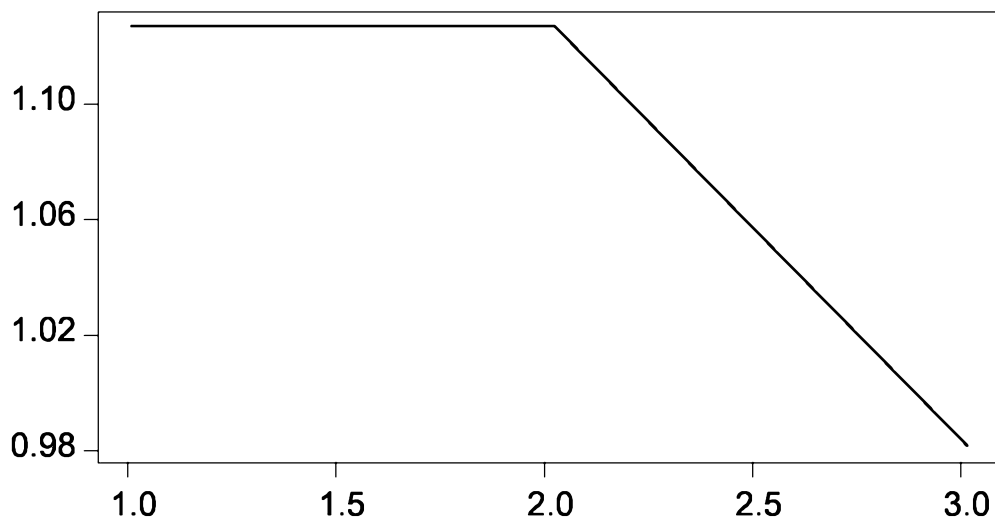
**Fig. 9A**

B42



**Fig. 9B**

B43



**Fig. 9C**

# RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement  
national

FA 847334  
FR 1760093

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Revendication(s)<br>concernée(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                              | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                             |
| Y                                                                                                                                                                                                                                      | SAMIR V. AMIOUNY ET AL: "Heuristics for<br>Balancing Turbine Fans",<br>OPERATIONS RESEARCH.,<br>vol. 48, no. 4, 1 août 2000 (2000-08-01),<br>pages 591-602, XP055489688,<br>US<br>ISSN: 0030-364X, DOI:<br>10.1287/opre.48.4.591.12413                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1,14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | G01M1/02<br>F16F15/32                                       |
| A                                                                                                                                                                                                                                      | * abrégé; figure 1 *<br>* pages 13,14 *                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2-13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                             |
| Y                                                                                                                                                                                                                                      | JP 2007 198265 A (KAWASAKI HEAVY IND LTD)<br>9 août 2007 (2007-08-09)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                      | * abrégé; figure 4 *<br>* alinéas [0050] - [0052] *                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2-13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                      | Yahya Fathi ET AL: "A mathematical model<br>and a heuristic procedure for the turbine<br>balancing problem",<br>European Journal of Operational Research,<br>1 janvier 1993 (1993-01-01), pages<br>336-342, XP055489714,<br>DOI: 10.1016/0377-2217(93)90113-2<br>Extrait de l'Internet:<br>URL:https://ac.els-cdn.com/037722179390113<br>2/1-s2.0-0377221793901132-main.pdf?_tid=e0<br>01e606-af2d-41bb-be3f-38cddd8e6afa&acdnat=<br>1530615239_481262e3709ab1aebd7e5f0c2b02d0c<br>3<br>* le document en entier * | 1-14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHÉS (IPC)<br><br>G01M<br>F01D |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Examineur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                             |
| 4 juillet 2018                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Nelva-Pasqual, F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure<br>à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date<br>de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>.....<br>& : membre de la même famille, document correspondant |                                                             |
| X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un<br>autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                             |

## ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1760093 FA 847334

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

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **04-07-2018**

Les données membres sont contenues au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 1<sup>er</sup> mars 2019.

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

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| JP 2007198265      A                            | 09-08-2007             | AUCUN                                   |                        |