



⑫ FASCICULE DU BREVET A5



616 485

⑳ Numéro de la demande: 8723/77

⑦③ Titulaire(s):  
Groupe Européen pour la Technique des Turbines  
à Vapeur G.E.T.T., Paris (FR)

㉒ Date de dépôt: 14.07.1977

③⑩ Priorité(s): 13.08.1976 FR 76 24765

⑦② Inventeur(s):  
Gilbert Riollet, Paris (FR)

㉔ Brevet délivré le: 31.03.1980

④⑤ Fascicule du brevet  
publié le: 31.03.1980

⑦④ Mandataire:  
Fulmen Electricité S.A., Rüschiikon

⑤④ Turbine à fluide compressible.

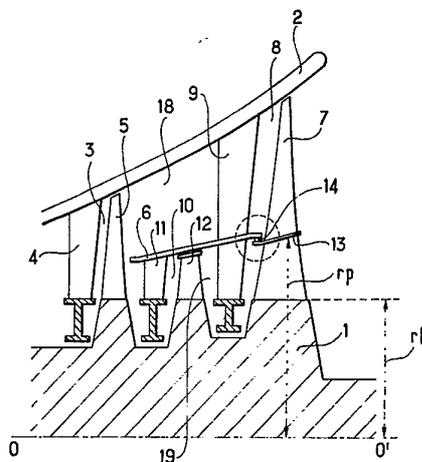
⑤⑦ Dans la turbine à vapeur le débit sortant de l'antépénultième étage (3) est séparé en deux flux coaxiaux, le flux intérieur traversant l'avant-dernier (10) et le dernier (8) étages de la turbine, le flux extérieur traversant uniquement le dernier étage.

Les aubes mobiles (7) du dernier étage (8) portent une paroi de révolution (13) servant de frontière entre les flux intérieur et extérieur. Sur cette frontière, le degré de réaction des aubes mobiles possède au régime d'adaptation aérodynamique une valeur  $x_2$  du côté du

flux extérieur sensiblement égale à  $\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} x_1$ ,  $x_1$

étant la valeur de ce degré de réaction du côté du flux intérieur,  $Q_1$  étant la chute enthalpique sur l'avant-dernier (10) et  $Q_2$  sur le dernier étage (8).

Cette construction à haut rendement des étages terminaux des turbines de grande puissance valorise l'emploi du titane pour la réalisation de la dernière ailette.



## REVENDECATIONS

1. Turbine à fluide compressible dans laquelle le débit de fluide sortant de l'antépénultième étage est séparé en deux flux coaxiaux l'un extérieur, l'autre intérieur, les flux intérieur et extérieur subissant sensiblement la même chute enthalpique entre la sortie de l'antépénultième étage et la sortie de la turbine, le flux intérieur traversant l'avant-dernier étage et le dernier étage de la turbine avec une chute enthalpique  $Q_1$  sur l'avant-dernier étage et une chute enthalpique  $Q_2$  sur le dernier étage, le flux extérieur ne traversant que le dernier étage, caractérisée en ce que les aubes mobiles du dernier étage portent une paroi de révolution servant de frontière entre les flux intérieur et extérieur, et en ce que sur cette frontière le degré de réaction des aubes mobiles possède au régime d'adaptation aérodynamique une valeur  $x_2$  du côté du flux extérieur sensiblement égale.

$$\text{à } \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} x_1, x_1$$

étant la valeur de ce degré de réaction du côté du flux intérieur.

2. Turbine à fluide compressible selon la revendication 1, caractérisée en ce que la frontière entre les deux flux coaxiaux au niveau des aubes mobiles du dernier étage est située à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe de la turbine sensiblement égale

$$\text{à } \sqrt{\frac{Q_2 + Q_1}{Q_2} \cdot \frac{1 - x_0}{1 - x_2}} \cdot r_b,$$

$r_b$  étant la distance de la base des aubes mobiles à l'axe de la turbine et  $x_0$  le degré de réaction à la base du dernier étage du flux intérieur.

3. Turbine à fluide compressible selon la revendication 1, caractérisée en ce que la valeur  $x_2$  est comprise entre  $0,3 x_1$  et  $0,7 x_1$ .

4. Turbine à fluide compressible selon l'une des revendications 1 et 3, caractérisée en ce que la frontière entre les deux flux coaxiaux au niveau des aubes mobiles du dernier étage est située à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe de la turbine et comprise entre  $1,25 r_b$  et  $1,55 r_b$ ,  $r_b$  étant la distance de la base des aubes mobiles à l'axe de la turbine.

5. Turbine à fluide compressible selon la revendication 1, caractérisée en ce que les chutes enthalpiques du flux intérieur sur l'avant-dernier et sur le dernier étage sont sensiblement égales.

6. Turbine à fluide compressible selon la revendication 5, caractérisée en ce que la valeur  $x_2$  est sensiblement égale

$$\text{à } \frac{x_1}{2}.$$

7. Turbine à fluide compressible selon l'une des revendications 5 et 6, caractérisée en ce que la frontière entre les deux flux coaxiaux au niveau des aubes mobiles du dernier étage est située à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe de la turbine sensiblement égale

$$\text{à } \frac{1 - x_0}{2 \cdot (1 - x_2)} \cdot r_b,$$

$r_b$  étant la distance de la base des aubes mobiles à l'axe de la turbine et  $x_0$  étant le degré de réaction à la base du dernier étage du flux intérieur.

8. Turbine à fluide compressible selon l'une des revendications 5 et 6, caractérisée en ce que la frontière entre les deux flux coaxiaux au niveau des aubes mobiles du dernier étage est située à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe de la turbine sensiblement égale

$$\text{à } \sqrt{2 \cdot r_b},$$

$r_b$  étant la distance de la base des aubes mobiles à l'axe de la turbine.

9. Turbine à fluide compressible selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les aubes mobiles du dernier étage sont en titane.

La présente invention a trait à une turbine à fluide compressible dans laquelle le débit de fluide sortant de l'antépénultième étage est séparé en deux flux coaxiaux, l'un extérieur, l'autre intérieur, les flux intérieur et extérieur subissant sensiblement la même chute enthalpique entre la sortie de l'antépénultième étage et la sortie de la turbine, le flux intérieur traversant l'avant-dernier étage et le dernier étage de la turbine avec une chute enthalpique  $Q_1$  sur l'avant-dernier étage, et une chute enthalpique  $Q_2$  sur le dernier étage, le flux extérieur ne traversant qu'un étage.

Dans les turbines connues du type Baumann le flux extérieur traverse l'avant-dernier étage de la turbine.

Les turbines du type Baumann possèdent l'avantage d'avoir une grande section de sortie mais elle présentent un certain nombre d'inconvénients, notamment elles nécessitent deux couronnes d'aubes mobiles longues dont la construction est délicate et le prix très élevé et, de plus, les aubes du dernier étage sont exposées, lorsque le fluide est condensable, à une forte usure par érosion.

L'invention a pour objet une turbine à fluide compressible ne présentant pas ces inconvénients.

La turbine à fluide compressible selon l'invention est caractérisée en ce que les aubes mobiles du dernier étage portent une paroi de révolution servant de frontière entre les flux intérieur et extérieur et en ce que sur cette frontière le degré de réaction des aubes mobiles possède au régime d'adaptation aérodynamique une valeur  $x_2$  du côté du flux extérieur sensiblement égale

$$\text{à } \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} x_1, x_1$$

étant la valeur de ce degré de réaction du côté du flux intérieur.

Dans la turbine selon l'invention, les aubes mobiles longues du dernier étage peuvent être moins larges que celles du dernier étage d'une turbine classique qui véhiculerait à égale longueur d'aubes le même débit de fluide.

En effet, on sait d'une manière générale que les aubes mobiles d'un dernier étage ont un profil très cambré à la base qui devient de plus en plus plat vers l'extrémité de l'aube.

Pour maintenir à un niveau suffisamment faible les sollicitations de traction et de flexion, on est amené à prévoir des sections de grandes dimensions en particulier, à la base de l'aube, ce qui peut conduire à un encombrement axial prohibitif.

Dans la turbine selon l'invention, la variation du profil de l'aube mobile du dernier étage de sa base à son extrémité peut présenter une discontinuité et le profil de l'aube au-dessus de la frontière entre les deux flux est plus cambré qu'en dessous de la frontière.

Cette particularité géométrique est la conséquence directe du fait que, dans le dernier étage, le degré de réaction de l'écoulement subit une diminution brutale en franchissant la frontière qui sépare le flux intérieur du flux extérieur.

L'accroissement local de cambrure – donc de rigidité – se répercute de manière décroissante sur toute la longueur de l'aube mobile contenue dans le flux extérieur, de sorte que, tout en conservant un niveau de contrainte de flexion égal à celui d'une aube classique, l'on peut sensiblement réduire la largeur de l'aube mobile. Cette réduction sera déterminée dans la section qui est soumise par les forces aérodynamiques à la plus grande contrainte de flexion et se traduira par une réduction proportionnelle des autres sections et en particulier de la section de base sans que soit modifiée la contrainte de traction centrifuge.

De plus, la chute enthalpique dans la partie du dernier étage situé dans le flux extérieur peut toujours être choisie égale ou voisine de la chute enthalpique conférant un rendement aérodynamique optimal car celle-ci, dans le flux extérieur, est suffisamment importante. De plus, dans le cas d'un fluide condensable ces aubes seront alors protégées de l'érosion dues aux gouttelettes de liquide.

L'énergie d'impact des gouttelettes de fluide dans le flux intérieur est beaucoup moins élevée et on peut donc encore choisir pour cette partie du dernier étage une chute enthalpique pas trop éloignée de la chute procurant le rendement optimal bien qu'elle soit nettement inférieure à la chute enthalpique du flux extérieur.

Il est enfin connu que l'écoulement dans le dernier étage d'une turbine à fluide compressible subit lorsque le débit de fluide devient inférieur à sa valeur d'adaptation une forte perturbation dans laquelle le fluide tend à ne traverser que la partie extérieure des aubes et à ne plus remplir leur partie inférieure. Ce phénomène, qui peut aller jusqu'à provoquer un décrochement tournant sur les profils supérieurs des aubes, entraîne une chute rapide du rendement et engendre également sur les aubes des efforts pulsatoires très dangereux si le décrochement tournant apparaît. Ces inconvénients se manifestent avec d'autant plus de gravité que le rapport longueur de l'aube/diamètre de base est élevé.

Il apparaît bien que la présente turbine tend à réduire ces effets néfastes puisque le flux intérieur reste rempli aux faibles débits grâce au maintien de la chute  $Q_1 + Q_2$  sur l'ensemble des deux derniers étages et puisque le flux extérieur se comporte comme s'il traversait une aube mobile possédant un rapport longueur/diamètre de base plus favorable que celui du dernier étage considéré globalement.

Si le degré de réaction

$$x_2 \text{ est } = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} x_1,$$

la pression au niveau des aubes mobiles du dernier étage est égale de part et d'autre de la frontière entre les deux flux, ce qui permet d'éviter toute fuite de fluide à travers cette frontière. D'une manière générale,  $x_2$  peut se trouver compris entre  $0,3 x_1$  et  $0,7 x_1$ . En prenant une chute enthalpique égale sur l'avant dernier et le dernier étage dans la partie de la turbine parcourue par le flux intérieur, l'égalité des pressions de part et d'autre de la frontière au niveau des aubes mobiles du dernier étage peut être obtenue pour

$$x_2 = \frac{x_1}{2}.$$

Selon un autre mode de réalisation, la frontière entre les deux flux coaxiaux au niveau des aubes mobiles du dernier étage est située à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe de la

turbine est comprise entre  $1,25 r_b$  et  $1,55 r_b$ , étant la distance de la base des dites aubes mobiles à l'axe de la turbine.

De préférence, on choisira  $r_p$  sensiblement égal

$$\text{à } \sqrt{\frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} \cdot \frac{1 - x_0}{1 - x_2}} \cdot r_b,$$

( $x_0$  étant le degré de réaction à la base du dernier étage du flux intérieur), car lorsqu'une telle relation existe entre  $r_p$  et  $r_b$ , il est possible de choisir des chutes enthalpiques  $Q_1 + Q_2$  sur le flux extérieur et  $Q_2$  sur le dernier étage du flux intérieur procurant un rendement sensiblement égal sur ces deux flux et correspondant si on le désire au rendement aérodynamique maximal réalisable.

Lorsque  $Q_1$  est pris égal à  $Q_2$ , il faut donc choisir  $r_p$  sensiblement égal

$$\text{à } \sqrt{2 \cdot \frac{1 - x_0}{1 - x_2}} \cdot r_b,$$

ce qui correspond en pratique à une valeur peu éloignée de  $\sqrt{2} r_b$ .

Les avantages de la turbine selon l'invention sont d'autant plus importants que l'on cherche à réaliser des aubes mobiles plus longues qui sont soumises à des forces d'inertie centrifuges considérables ce qui nécessite de recourir à des matériaux, tels que le titane, possédant une valeur élevée du rapport limité élastique sur densité.

La présente invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre à titre d'exemple, dans laquelle

la fig. 1 représente une coupe axiale de la turbine selon l'invention,

la fig. 2 une aube mobile du dernier étage de la turbine selon l'invention,

et la fig. 3, une coupe de cette aube passant légèrement au-delà de la frontière séparant les deux flux intérieur et extérieur.

Sur la fig. 1 qui représente une coupe axiale de la turbine à fluide compressible, par exemple à vapeur, seuls les trois derniers étages ont été figurés.

La turbine comporte un rotor 1 tournant à l'intérieur d'un stator 2.

L'antépénultième étage 3 est de construction classique et comporte une couronne d'aubes directrices 4 fixée au stator 2 et une couronne d'aubes mobiles 5 fixée au rotor 1.

La turbine comporte une paroi 6 de révolution autour de l'axe  $00'$  de la turbine. Cette paroi 6 s'étend de la sortie de l'antépénultième étage 3 jusqu'à l'entrée de la roue mobile 7 du dernier étage 8, elle est fixée à la couronne d'aubes directrices 9 du dernier étage 8, elle-même fixée au stator 2.

L'avant-dernier étage 10 comporte une couronne d'aubes fixes 11 et une couronne d'aubes mobiles 12. La couronne d'aubes fixes 11 est fixée sur la paroi 6 et entoure le rotor 1, elle est disposée dans l'espace limité par la paroi 6.

La couronne d'aubes mobiles 12 est montée sur le rotor 1 et sa périphérie est voisine de la paroi 6.

La couronne mobile 7 du dernier étage 8 est munie d'une paroi de révolution 13 située sensiblement dans le prolongement de la paroi 6. Cette paroi 13 est de forme cylindrique ou tronconique. Au raccordement des deux parois 6 et 13, on a disposé une garniture d'étanchéité 14 constituée par exemple

de une ou plusieurs lèchettes montées sur la paroi fixe 6 en vis-à-vis de l'extrémité de la paroi tournante 13.

Le degré de réaction  $x$  de chaque aube mobile du dernier étage 8 va en croissant de la base de l'aube d'une valeur  $x_0$  jusqu'à la paroi mobile 13 où il atteint une valeur  $x_1$  comprise par exemple entre 30% et 60%. Le degré de réaction  $x_0$  à la base de l'aube est compris par exemple entre -10% et +20%.

Le degré de réaction  $x_2$  au-dessus de la paroi mobile est choisi dans la plage comprise entre  $0,3 x_1$  et  $0,7 x_1$  et va en croissant jusqu'à l'extrémité de l'aube.

La fig. 2, qui représente en vue cavalière une aube mobile du dernier étage, fait apparaître l'attache 15 qui sert à fixer cette aube sur le rotor ainsi qu'un élément 13' de la paroi tournant 13 qui sépare la partie 16 de l'aube recevant l'effort moteur du flux intérieur de la partie 17 soumise au flux extérieur.

L'attache 15, qui est réalisée dans le cas de la fig. 2 sous forme d'un enfourchement classique à doigts multiples, pourrait également être d'un autre type connu tel que la fixation par feuille de chêne.

L'élément 13' de la paroi tournante 13 est monobloc avec l'aube et se raccorde exactement sur les éléments identiques des aubes voisines de façon à constituer une paroi complète de révolution enfermant le flux intérieur. Cet élément 13' peut venir de matriçage avec le corps de l'aube lorsque celui-ci est obtenu directement par forgeage; ledit élément peut également être usiné dans la masse. Les éléments 13' des aubes successives sont mis en contact lors du montage des aubes sur le rotor et se trouvent naturellement serrés les uns contre les autres en rotation sous l'effet de la déformation de dévissage que la force centrifuge impose à l'aube mobile.

Dans sa partie supérieure 17, l'aube peut comporter si nécessaire des dispositifs de liaisonnement avec les aubes voisines, constitués par exemple par des fils ou des nageoires. De tels dispositifs, dont la nature est classique et qui ne répondent pas à des besoins inhérents à l'invention, n'ont pour ces raisons par été représentés.

La fig. 3 est une section de l'aube mobile du dernier étage par un cylindre de révolution autour de l'axe 00' de la turbine. Ledit cylindre, qui est voisin de la paroi tournante 13 et légèrement extérieur à celle-ci, coupe la partie 17 de l'aube mobile selon son profil de base S2 qui possède une forte cambrure du fait de la faible valeur de degré local de réaction  $x_2$ . Sur cette même figure, apparaissent les faces A, B, C, D, et A', B', C', D', qui sont parallèles entre elles et qui épousent les faces correspondantes des éléments 13' de paroi tournante 13 appartenant aux aubes voisines. Les limites de l'élément 13' peuvent en fait avoir une forme quelconque, par exemple circulaire ou polygonale, telle que A, B, C, D.

Le profil S1 est celui de la section de l'aube mobile appartenant à la partie 16 de celle-ci et située sur un rayon immédiatement inférieur à celui de la paroi tournante 13. Comme le degré de réaction  $x_1$  – sous lequel fonctionne ce profil – est supérieur à  $x_2$ , S1 est moins cambré que S2. Cependant, en prenant certaines précautions qui consistent essentiellement à aligner les centres de gravité de ces deux profils sur un même rayon, à leur conférer des angles de sortie voisins et à faire travailler S1 sous une incidence aérodynamique négative, il est possible de réduire très fortement la discontinuité de forme existante entre S2 et S1. L'on évite ainsi tout accroissement excessif des contraintes centrifuges à l'endroit où le corps de l'aube mobile, constitué par les parties 16 et 17, traverse la paroi tournante 13.

En revenant à la fig. 1, on voit que la paroi mobile 13 est disposée à une distance moyenne  $r_p$  de l'axe 00' de la turbine. La distance  $r_p$  est comprise entre  $1,25 r_b$  et  $1,55 r_b$ ,  $r_b$  étant la distance de la base de l'aube à l'axe 00'.

La paroi 6 sépare le débit de fluide sortant de l'antépénul-

tième étage 3 en deux flux coaxiaux, un flux extérieur et un flux intérieur. Le flux extérieur circule dans un canal extérieur 18 limité par le stator 2 et les parois 6 et 13.

Le flux intérieur circule dans un canal intérieur 19 limité par les parois 6 et 13 et le rotor 1.

Le canal extérieur 18 ne comporte qu'un seul étage, l'étage 8 et le canal intérieur 19 comportent deux étages, l'étage 10 et l'étage 8.

Dans le canal intérieur 19, la chute enthalpique sur l'avant-dernier étage 10 est  $Q_1$  et sur le dernier étage 8 et  $Q_2$ .

Comme les chutes enthalpiques dans le canal intérieur et extérieur sont sensiblement égales, la chute enthalpique dans le canal extérieur est donc voisine de  $Q_1 + Q_2$ .

On sait que la chute enthalpique procurant le meilleur rendement aérodynamique est proportionnelle à l'énergie cinétique associée à la vitesse d'entraînement  $U_b$  du filet de base

$$(Q_{opt} = k \frac{U_b^2}{2})$$

et que lorsque ce dernier est à action le coefficient de proportionnalité  $k$  est voisin de 4.

Dans le canal extérieur 15,  $U_b$  est la vitesse d'entraînement du filet situé au-dessus de la paroi mobile 13. Etant donné que le degré de réaction  $x_2$  est faible, et que  $r_p$  étant plus grand que  $r_b$  la vitesse  $U_b$  est plus grande au-dessus de la paroi 13 qu'à la base de l'aube, la chute optimale sera plus importante que celle d'un dernier étage classique. Il s'ensuit que l'on peut choisir  $Q_1 + Q_2$  égal ou voisin de cette chute procurant le rendement optimal car l'érosion due aux gouttelettes de fluide sera évitée en raison de l'importance même de ladite chute. Il convient de remarquer que dans le dernier étage d'une turbine classique pour lequel la chute enthalpique procurant le rendement optimal est de  $q$  il est courant de choisir une chute enthalpique de l'ordre de  $1,5 q$  pour éviter l'érosion due aux gouttelettes de fluide condensé, ce qui provoque une détérioration notable du rendement.

Pour obtenir le même rendement dans les deux canaux intérieur et extérieur, il faut que les distances  $r_p$  et  $r_b$  soient sensiblement liées par la relation

$$r_p = \sqrt{\frac{Q_2 + Q_1}{Q_2} \cdot \frac{1 - x_0}{1 - x_2}} \cdot r_b,$$

$x_0$  étant le degré de réaction à la base du dernier étage du flux intérieur. Ainsi on pourra, si  $Q_1 + Q_2$  correspond à la chute enthalpique procurant le rendement optimal pour le canal extérieur, avoir également la chute correspondant au rendement optimal pour le canal intérieur.

La chute enthalpique  $Q_2$  est insuffisante pour diminuer notablement la masse des gouttelettes de fluide heurtant les aubes mobiles mais cela est sans importance puisque en raison de la faible vitesse circumférentielle des aubes dans le canal intérieur, l'impact de ces gouttelettes est sans gravité.

Au cas où  $Q_2$  est égal à  $Q_1$  et  $x_2$  voisin de  $x_0$ , on choisira  $r_p$  voisin de

$$\sqrt{2} \cdot r_b.$$

Selon une caractéristique importante, on cherche à égaliser les pressions de part et d'autre de la paroi 6 entre la couronne fixe 9 et la couronne mobile 7 évitant ainsi les fuites de fluide et améliorant le rendement.

Pour que ces pressions soient voisines il suffit de prendre  $x_2$  voisin de

$$\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} x_1.$$

Ce qui conduira dans le cas où  $Q_1$  est égal à  $Q_2$  à prendre  $x_2$  voisin

$$\text{de } \frac{x_1}{2}.$$

Il est possible, lorsque les fuites sont ainsi diminuées, de supprimer la garniture d'étanchéité 14 et de disposer la paroi 13 dans le prolongement exact de la paroi 6.

Il convient de remarquer que pour les rayons des aubes mobiles du dernier étage supérieurs à  $r_p$ , la cambrure des aubes est supérieure à celle de la section d'une aube longue classique située à une distance  $r_p$  de l'axe. Il s'ensuit que le moment résistant de l'aube est supérieur à celui d'une aube classique, ce qui permet d'obtenir des aubes beaucoup moins encombrantes et beaucoup plus facilement réalisables.

Les aubes longues mobiles du dernier étage peuvent être réalisées en acier au chrome ou bien en titane.

Les aubes fixes et mobiles de l'avant-dernier étage 10 ne sont traversées que par une fraction seulement du débit total, ce qui les rend nécessairement plus courtes que celles constituant l'avant-dernier étage d'une turbine classique.

Ceci constitue une simplification qui permet en outre de réduire l'encombrement axial de cet étage et par conséquent de raccourcir le rotor.

En raison des avantages qu'elle procure dans le cas d'un fluide condensable, cette invention s'applique particulièrement aux turbines à vapeur. Cependant, elle est également intéressante pour réaliser les étages terminaux de toute turbine véhiculant un grand volume de fluide, telles que les turbines à gaz de grande puissance.



