

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :
(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

2 466 393

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 20857

(54) Pale de rotor pour un aéronef à voilure tournante.

(51) Classification internationale (Int. Cl. ³). B 64 C 27/46.

(22) Date de dépôt..... 29 septembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : *EUA, 28 septembre 1979, n° 06/079 706.*

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 15 du 10-4-1981.

(71) Déposant : Société dite : THE BOEING CO., résidant aux EUA.

(72) Invention de : Leone U. Dadone.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Plasseraud,
84, rue d'Amsterdam, 75009 Paris.

"Pale de rotor pour un aéronef
à voilure tournante"

La présente invention concerne de façon générale les pales de rotor d'hélicoptère et en particulier la forme de la section transversale de leur profil de voilure. Les profils de voilure correspondant à l'invention conviennent particulièrement à l'utilisation dans des rotors tels que ceux utilisés par les hélicoptères et d'autres types d'aéronefs à voilure tournante. Ces profils de voilure sont conçus de façon à présenter des caractéristiques de portance maximale aux angles d'attaque élevés lorsque la pale recule, et un retard maximal de l'accroissement de la traînée lorsque la pale avance, ce qui permet au rotor de s'opposer au moment de roulis qui serait autrement produit par le vol de l'aéronef en sens avant. On parvient à ceci tout en maintenant une valeur nulle ou voisine de zéro pour le coefficient de moment de variation du pas du profil de voilure, afin que la pale n'impose qu'un minimum de charges mécaniques au rotor et à son système de commande, y compris le mécanisme de commande du pas.

De nombreux profils de voilure et de nombreuses familles de profils de voilure de types bien connus existent dans l'art antérieur. Un grand nombre de familles de profils de voilure ont été développées par le NACA, National Advisory Committee of Aeronautics, prédécesseur de la National Aeronautics and Space Administration of the United States of America, à la suite de travaux effectués au cours des années 30 et 40. L'information correspondante a été publiée; on la trouve dans la plupart des bibliothèques techniques du monde entier et les aérodynamiciens la connaissent bien. La plupart des hélicoptères ayant eu un succès commercial ont utilisé pour leurs pales de rotor des profils de voilure issus des trois familles de profils de voilure suivantes : NACA 00XX, NACA 230XX et la série NACA 8. Dans ces dénominations, XX représente l'épaisseur du profil de voilure.

L'invention a pour but de réaliser une famille de profils de voilure nouvelle et perfectionnée produisant une portance maximale et présentant un retard maximal de

l'accroissement de la traînée, tout en ayant un coefficient de moment de variation du pas ou moment de tangage pratiquement égal à zéro.

L'invention a également pour but de réaliser une famille de profils de voilure destinés à être utilisés dans des rotors d'hélicoptère et ayant les caractéristiques précitées.

Un aspect de l'invention porte sur une pale de rotor pour un aéronef à voilure tournante ayant un profil de voilure qui présente un coefficient de moment de variation du pas à portance nulle qui est compris dans la plage de $\pm 0,01$, un coefficient maximal de portance supérieur à 1,2, et un nombre de Mach d'accroissement de la traînée, pour une portance nulle, supérieur à 0,78, les valeurs indiquées pour le coefficient de portance correspondant à des nombres de Mach d'environ 0,4 tandis que le coefficient de moment de variation du pas à portance nulle correspond à une vitesse faible.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre de modes de réalisation, donnés à titre non limitatif. La suite de la description se réfère aux dessins annexés dans lesquels les éléments semblables sont désignés par les mêmes numéros de référence et sur lesquels :

La figure 1 est une vue en perspective d'un hélicoptère qui comporte des pales de rotor utilisant des profils de voilure conformes à l'invention.

La figure 2 est une représentation schématique d'un rotor d'un hélicoptère.

La figure 3 est une coupe de l'une des pales de rotor de l'hélicoptère, selon la ligne 3-3 de la figure 2, qui montre un profil de voilure ainsi que la nomenclature utilisée dans la description de ce profil.

La figure 4 est un graphique qui montre la variation du coefficient de traînée c_d en fonction du nombre de Mach M .

La figure 5 montre la variation du coefficient maximal de portance c_{lmax} en fonction du nombre de Mach d'accroissement de la traînée M_{dd0} .

Les figures 6a-6d montrent les contours de quatre profils de voilure de la famille de profils de voilure de l'invention.

Les figures 7a-7c montrent des compensateurs de
5 bord de fuite qu'on utilise pour modifier les caractéristiques de moment de variation du pas des profils de voilure de l'invention.

Les figures 8a et 8b montrent des éléments en forme de coins, placés sur le bord de fuite, qu'on utilise
10 pour modifier les caractéristiques de moment de variation du pas des profils de voilure de l'invention.

La figure 1 montre une vue en perspective d'un hélicoptère à un seul rotor sustentateur, 20, qui comporte un rotor sustentateur principal 22 et un rotor de queue 24,
15 destiné à s'opposer au couple et à commander l'attitude de l'aéronef autour de son axe de lacet. Le rotor principal 22 comporte un moyeu 25 et des pales de rotor 26. Au cours du fonctionnement, le rotor 22 tourne en sens d'horloge, lorsqu'on le regarde du sommet de l'hélicoptère, et sa
20 rotation crée une portance.

Lorsque le rotor tourne, les profils de voilure qui sont situés davantage vers l'extérieur dans la direction de l'envergure d'une pale particulière sont soumis à des vitesses plus élevées que les profils de voilure qui
25 se trouvent du côté intérieur. En outre, lorsque l'hélicoptère vole en sens avant, n'importe quel profil de voilure particulier est soumis à des vitesses plus élevées lorsqu'il se trouve du côté du rotor qui avance que lorsqu'il se trouve du côté du rotor qui recule. De ce
30 fait, le côté du rotor qui avance est capable de produire une portance plus élevée que le côté du rotor qui recule, ce qui fait apparaître un moment qui tend à faire tourner l'aéronef autour de son axe longitudinal. Pour que l'hélicoptère conserve une attitude horizontale pendant qu'il
35 vole en sens avant, il est nécessaire de faire tourner chaque pale de rotor 26 autour de son axe longitudinal, qui s'étend radialement à partir du moyeu du rotor. On diminue le pas de la pale, ou angle d'attaque α de la pale,

lorsqu'elle se trouve du côté du rotor 22 qui avance, afin qu'elle produise une portance plus faible, et on l'augmente lorsque la pale se trouve du côté du rotor qui recule, afin d'augmenter la portance. Ainsi, la moitié du rotor qui

5 avance et la moitié qui recule produisent des portances de même valeur, ce qui supprime le moment de roulis qui, sinon, ferait tourner l'aéronef autour de son axe de roulis.

Pour qu'on puisse faire tourner les pales de rotor 26 autour de leur axe longitudinal, elles sont montées sur 10 le moyeu du rotor 22 à l'aide de paliers à variation de pas ou d'autres moyens qui permettent une telle rotation. On fait varier et on maintient l'angle des pales aux moyens de mécanismes articulés de variation de pas qui sont accouplés à un plateau oscillant. Le plateau oscillant est lui- 15 même accouplé à des vérins du système de commande.

Le mécanisme de commande du pas des pales de rotor est soumis à des efforts sévères du fait des forces dynamiques et aérodynamiques que crée la pale de rotor 26 par rapport à ses divers axes. Une composante importante de la 20 valeur du moment de variation du pas résulte des caractéristiques de moment de variation du pas du ou des profils de voilure qui sont choisis pour la pale de rotor. La valeur de ces efforts de commande a constitué de façon générale un facteur limitatif dans la conception des 25 rotors.

Un autre effet gênant du moment de variation du pas créé par le profil de voilure consiste en une tendance au vrillage de la pale de rotor. Ce phénomène peut avoir des conséquences aérodynamiques gênantes, du fait qu'il 30 modifie l'angle d'attaque local d'un segment de pale et peut entraîner une diminution des performances du rotor.

Comme dans la plupart des applications des profils de voilure, la portance et la traînée sont également des caractéristiques essentielles. On a presque toujours 35 pour objectif d'obtenir la portance maximale tout en réduisant simultanément la traînée au minimum, du fait qu'ainsi on réduit la puissance nécessaire pour faire fonctionner l'aéronef. Les caractéristiques de performances des profils

aérodynamiques, c'est-à-dire la portance, la traînée et le moment de variation du pas dans la plage de nombre de Mach allant de 0,3 à 0,9 sont particulièrement importants pour les applications aux rotors. Ceci est dû au fait que le nombre de Mach local au niveau des profils de voilure, le long de l'envergure de la pale, qui produisent la majeure partie de la portance générée par le rotor est compris dans cette plage. Cette plage est valable pour la plupart des rotors, indépendamment des différences de taille et de vitesse de rotation. Ceci résulte du fait que pour réduire les effets de choc sur le côté du rotor qui avance, on maintient le nombre de Mach du bout de la pale du rotor à une valeur inférieure à un (1). La figure 2 est une représentation schématique du rotor 22. Le centre du rotor se déplace vers l'avant à un nombre de Mach de 0,2. On voit une pale de rotor 26 en position médiane du côté du rotor 22 qui avance. La pale de rotor 26 a un rayon R et une corde c . Le rayon de la pale de rotor est défini comme étant la distance entre son centre de rotation et son bout, tandis que la corde est définie comme étant la distance du bord d'attaque au bord de fuite de la pale. On sait que la plupart des rotors d'hélicoptère fonctionnent à vitesse de rotation constante. Pour un hélicoptère particulier, la vitesse de rotation particulière est fonction du diamètre du rotor et de la vitesse de déplacement de l'hélicoptère. En vol stationnaire, le bout des pales du rotor se déplace à une vitesse particulière V_{t_h} , mais lorsque l'aéronef avance, la vitesse réelle du bout, V_t , est égale à V_{t_h} plus la vitesse d'avance de l'hélicoptère V_h , du côté du rotor qui avance. Du côté du rotor qui recule, V_t est égal à V_{t_h} moins V_h . Comme on l'a indiqué précédemment, le rotor doit être conçu de façon que la vitesse maximale en bout de pale $V_{t_{max}}$ soit inférieure à $M = 1$. On parvient à ceci en faisant varier le diamètre du rotor, sa vitesse de rotation et la vitesse maximale à laquelle l'hélicoptère avance.

Du fait de la limitation imposée par le maintien de V_t à une vitesse inférieure à Mach 1, les critères géné-

raux de sélection des profils de voilure pour les rotors d'hélicoptères sont similaires. Ces critères deviennent cependant beaucoup plus sévères pour les hélicoptères rapides. Les critères relatifs aux gros hélicoptères lents présentent un ensemble de problèmes différents du fait que leurs pales sont généralement beaucoup plus grandes, ce qui introduit des effets de nombre de Reynolds qui sont différents de ceux des pales plus petites des hélicoptères rapides. Ces différences sont bien connues des aérodynamiciens et elles sont donc prises en considération dans la conception.

La figure 3 est une coupe de l'une des pales du rotor 26, selon la ligne 3-3 de la figure 2, qui montre un profil de voilure correspondant à l'invention. Le profil de voilure est représenté sous forme schématique pour faciliter la description. On va considérer brièvement la nomenclature utilisée pour la description des profils de voilure. La corde c du profil de voilure est définie comme étant une ligne droite s'étendant entre le bord d'attaque et le bord de fuite du profil de voilure. On voit également sur la figure l'épaisseur maximale du profil de voilure, et cette épaisseur est généralement exprimée en pourcentage de la corde c . On décrit les profils de voilure en utilisant un système de coordonnées cartésiennes dans lequel l'axe X coïncide avec la corde et le bord d'attaque se trouve à l'origine. On décrit un profil de voilure en spécifiant les positions des points appartenant aux surfaces supérieure et inférieure, sur une perpendiculaire à l'axe X passant par un point particulier sur la corde. On généralise les descriptions des profils de voilure par l'utilisation de coordonnées sans dimensions. Dans ce but, on divise les distances X et Y par la longueur de la corde et on exprime donc respectivement par y/c et x/c la distance verticale et la distance dans la direction de la corde.

Comme la corde c , la ligne moyenne passe par les bords d'attaque et de fuite du profil de voilure, mais elle est définie comme une ligne telle que les distances entre un point de la ligne moyenne et les surfaces supérieure et

inférieure du profil de voilure, le long d'une perpendiculaire à une tangente à la ligne moyenne en ce point, soient toujours égales. Pour des profils de voilure symétriques, les surfaces supérieure et inférieure sont identiques et la
 5 ligne moyenne coïncide avec la corde. La ligne moyenne m représente le degré de courbure, ou cambrure, du profil de voilure considéré dans son ensemble. Les aérodynamiciens savent bien que, de façon générale, le degré de cambrure, ou degré de courbure de la ligne moyenne m , influe sur le
 10 coefficient maximal de portance $c_{l_{\max}}$ du profil de voilure et sur le coefficient de moment c_{m_0} de variation du pas, c_{m_0} . Les profils de voilure de l'invention sont dissymétriques et sont donc des profils cambrés.

La portance que produit un segment particulier de
 15 profil de voilure est une fonction de son angle d'attaque α . Selon la définition du NACA, l'angle d'attaque est l'angle entre le vecteur vitesse de l'écoulement libre V et la corde du profil de voilure.

Lorsqu'on choisit des segments de profil de voilure destinés à des pales de rotor d'hélicoptère, on doit analyser les caractéristiques de portance et de traînée du profil de voilure. Cependant, les profils de voilure à prendre en considération doivent avoir des caractéristiques acceptables de moment de variation du pas. On représente
 20 les caractéristiques de moment de variation du pas par le coefficient de moment c_m , tandis qu'on représente la portance par le coefficient de portance c_l et la traînée par le coefficient de traînée c_d . Le coefficient de moment c_m d'un profil de voilure varie de façon générale avec
 25 l'angle d'attaque de la pale. On considère généralement dans ce domaine que cette variation est faible. Compte tenu des caractéristiques de portance et de traînée, on choisit des profils de voilure qui ont un coefficient de moment de variation du pas, lorsque la pale produit une portance
 30 nulle, c_{m_0} , compris dans la plage de $-0,01$ à $+0,01$ pour des nombres de Mach inférieurs à $M = 0,4$. On commence cependant à admettre qu'un coefficient c_{m_0} à faible vitesse situé dans la plage de 0 à $+0,01$ est c_{m_0} très souhaitable. Confor-

mément à la pratique courante en aérodynamique, on mesure généralement les moments de variation du pas autour du point à 25% de la corde du profil de voilure. En conséquence, chaque fois qu'on parlera du moment de variation du pas et du coefficient de moment de variation du pas, c_m et c_{m_0} , il s'agira de grandeurs considérées par rapport à un point à 25% de la corde du profil de voilure.

Un coefficient c_m positif indique un moment qui tend à faire cabrer le profil de voilure, tandis qu'un coefficient c_m négatif indique un moment qui tend à faire piquer le profil de voilure.

Le coefficient maximal de portance $c_{l_{max}}$ représente les possibilités maximales de portance d'un profil de voilure. Ce paramètre est important lorsque la pale du rotor de l'hélicoptère recule, car c'est à ce moment que la pale doit manifester ses possibilités maximales de portance. On choisit généralement un profil de voilure d'hélicoptère en se basant sur son $c_{l_{max}}$ pour des nombres de Mach caractéristiques des conditions dans lesquelles la pale recule. On choisit généralement dans ce but un nombre de Mach de 0,4, du fait que cette vitesse représente la vitesse moyenne à laquelle la tendance au décrochage de la pale qui recule devient appréciable pour le vol à grande vitesse d'un hélicoptère.

Les caractéristiques de traînée d'un profil de voilure sont représentées par son coefficient de traînée c_d . On admet généralement que c_d augmente lorsque le nombre de Mach M augmente. On a cependant constaté qu'à un certain point au-dessous de la vitesse du son ($M = 1$), il apparaît une augmentation brutale du taux d'augmentation de la traînée en fonction du nombre de Mach. On appelle ce point d'augmentation le point de divergence ou d'accroissement de la traînée, M_{dd} . Comme les autres paramètres aérodynamiques, le coefficient de traînée c_d , et donc le point d'accroissement de la traînée, M_{dd} , varient en fonction de l'angle d'attaque α d'un profil de voilure donné. Ainsi, dans des buts de comparaison et de sélection de profil de voilure, on utilise la valeur de M_{dd} au point de portance nulle du profil de voi-

lure, soit M_{dd_0} .

La figure 4 montre une représentation graphique du coefficient de traînée à portance nulle c_{d_0} en fonction du nombre de Mach M . Le point auquel le taux de variation de c_d par rapport à M , soit dc_d/dM est égal à 0,1 correspond à la définition généralement admise du nombre de Mach pour lequel se manifeste l'accroissement de la traînée, soit M_{dd} . Ceci est représenté sur la figure 4 par le point auquel la ligne droite représentant $dc_d/dM = 0,1$ est tangente à la ligne représentant c_{d_0} en fonction de M . Le nombre de Mach à ce point est le M_{dd_0} nombre de Mach d'accroissement de la traînée à portance nulle, soit M_{dd_0} .

La figure 5 est une M_{dd_0} représentation graphique du coefficient maximal de portance $c_{l_{max}}$, pour un nombre de Mach de 0,4, en fonction de M_{dd_0} . Tout point sur cette courbe représente un seul profil de voilure particulier, dans un système sans dimensions. Dans certains cas une ligne indique une famille de profils de voilure, comme on le mentionnera ultérieurement. De façon générale, les profils de voilure qui apparaissent sur la figure 5 ont un c_{m_0} compris dans la plage allant de -0,01 à +0,01. La position de n'importe quel profil de voilure particulier ou de n'importe quelle famille de profils de la figure 5 n'est évidemment valide que lorsque le coefficient maximal de portance est pris à un nombre de Mach de 0,4. De façon générale, plus un profil de voilure particulier est éloigné de l'origine, plus son utilisation pour un hélicoptère est souhaitable. La figure 5 montre les caractéristiques de la famille de profils de voilure de l'invention, désignée par VR-XX, avec des chiffres arbitraires remplaçant XX pour identifier des profils de voilure particuliers. On a utilisé ce système de désignation du fait qu'aucun des systèmes de désignation classiques utilisés à l'heure actuelle, comme les systèmes de désignation NACA, ne peut être utilisé pour les profils de voilure de l'invention. Les profils de voilure de l'invention ont un c_{m_0} compris dans la plage allant de -0,01 à +0,01. Le tableau I, en annexe, montre les caractéristiques de performances de la famille de profils de voilure de l'invention, qui forment la base de la famille

VR-XX de la figure 5. Des données expérimentales obtenues en soufflerie ont montré que les profils de voilure de l'invention ont un c_{m_0} d'environ $-0,006 \pm 0,002$.

La courbe de performances de la famille de l'invention qui est représentée sur la figure 5 et dont les valeurs figurent sur le tableau I est basée sur des données d'essais en soufflerie. Les données d'essais présentent un éparpillement qui entraîne un écart de $\pm 0,025$ sur la valeur de $c_{l_{max}}$. Les valeurs de performances des profils de voilure particuliers de la figure 5 sont basées sur des essais en soufflerie de profils ayant une corde de 33 cm et ces valeurs sont également présentées dans le tableau IX, en annexe.

Comme on l'a indiqué précédemment, les critères de conception pour la famille des profils de voilure de l'invention imposent que c_{m_0} soit compris dans la plage de $-0,01$ à $+0,01$. Pour la conception et la sélection de profils de voilure, on considère la valeur de c_{m_0} à des "vitesses faibles". L'expression "vitesses faibles" désigne ici de façon générale des nombres de Mach suffisamment bas pour qu'on puisse négliger les effets de compressibilité. En fait, c_{m_0} varie selon une fonction linéaire du nombre de Mach, avec un taux de variation faible. Le taux de variation est suffisamment faible pour que c_{m_0} aux nombres de Mach de fonctionnement demeure généralement dans la plage de $-0,01$ à $+0,01$ si c_{m_0} aux vitesses faibles est compris dans cette plage. Cependant, exactement comme il y a une variation abrupte dans la courbe de la traînée en fonction du nombre de Mach, il y a également une variation abrupte dans la courbe de c_m en fonction du nombre de Mach. La cassure abrupte dans la courbe de moment se produit pour un nombre de Mach très proche du nombre de Mach d'accroissement de la traînée. De ce fait, la valeur de c_{m_0} aux vitesses faibles, c'est-à-dire aux vitesses pour lesquelles on peut négliger les effets de compressibilité, soit généralement pour un nombre de Mach inférieur à 0,3, est représentative du moment aérodynamique de variation du pas jusqu'à ce qu'on atteigne des nombres de Mach s'approchant du nombre de Mach d'accrois-

sement de la traînée.

L'invention est le résultat de travaux ayant pour but d'identifier et de concevoir des profils de voilure conformes aux critères précédents. Les travaux ont fait appel
5 à divers outils théoriques de conception, comme l'analyse transsonique en régime visqueux développée par la NASA ainsi que les théories de l'écoulement potentiel et de la couche limite. Après avoir commencé les travaux en utilisant les outils théoriques disponibles, on a modifié les
10 profils de voilure sur la base de l'expérience et de l'intuition de l'inventeur. Après ces modifications, on a déterminé les caractéristiques de performances des profils de voilure modifiés, en utilisant les outils théoriques disponibles, faisant appel à l'informatique. On a réalisé
15 ceci par un processus itératif qui s'est avéré fructueux. On a ensuite soumis les profils de voilure les plus prometteurs à des essais en soufflerie extrêmement complets.

Le tableau II en annexe présente la famille de profils de voilure de l'invention. Les coordonnées de base
20 du profil de voilure sont données sous une forme sans dimensions, en étant normalisées pour un rapport d'épaisseur égal à un (1). La nomenclature qui est utilisée dans le tableau est la suivante : x désigne une distance mesurée depuis le bord d'attaque du profil de voilure en direction du bord de
25 fuite, c désigne la longueur de la corde du profil de voilure, y désigne une distance jusqu'à un point à la surface du profil de voilure, dans une direction perpendiculaire à la corde de ce profil, l'indice u désigne la surface supérieure et l'indice l désigne la surface inférieure, tandis
30 que t désigne l'épaisseur maximale du profil de voilure. Les coordonnées des points qui définissent le profil de voilure sont données sous une forme sans dimensions, conformément à la pratique habituelle, en désignant l'emplacement d'un point sur le profil de voilure par ses coordonnées
35 x/c et y/c .

Comme on l'a indiqué précédemment, la famille de profils de voilure qui est présentée dans le tableau II a été normalisée, c'est-à-dire définie pour un rapport d'épais-

seur égal à un (1). Ceci signifie littéralement que l'épaisseur du profil de voilure est égale à sa longueur de corde. On utilise cette représentation normalisée pour définir une famille de profils de voilure afin de permettre aux 5 aérodynamiciens de choisir simplement et facilement un profil de voilure sans dimensions ayant un rapport d'épaisseur t/c particulier. On peut exprimer le rapport d'épaisseur t/c en pourcentage, par exemple 10% pour $t/c = 0,10$. Pour choisir à partir de la famille de profils de voilure présentée dans le tableau II un profil de voilure sans dimensions 10 ayant un rapport d'épaisseur t/c particulier, il est nécessaire de multiplier les valeurs y/c supérieures et inférieures par le rapport d'épaisseur désiré. Par exemple, pour sélectionner un profil de voilure sans dimensions ayant 15 un rapport d'épaisseur de 10%, il faudrait multiplier par 0,1 les valeurs y/c supérieures et inférieures. Les tableaux III, IV et V, en annexe, présentent respectivement des profils de voilure ayant des distributions d'épaisseur de 10,62%, 9,5% et 8%. Ces profils de voilure sont respectivement 20 identifiés par les références VR-12, VR-13 et VR-14 et les figures 6a-6d en montrent des approximations graphiques.

La famille fondamentale de profils de voilure que présente le tableau II et les profils de voilure ayant les distributions d'épaisseur particulières que présentent les tableaux 25 III, IV et V sont sous une forme sans dimensions. Une fois qu'on a établi la longueur de corde désirée, on multiplie les valeurs x/c et y/c par la longueur de corde, ce qui donne les coordonnées réelles pour le profil de voilure 30 proposé.

Comme le montre le tableau I, la surface supérieure au niveau du bord d'attaque doit être profilée pour se raccorder à une parabole de la forme : $(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$, tandis que la surface inférieure doit être profilée pour se raccorder à une parabole 35 ayant approximativement la forme : $(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$.

La figure 5, sur laquelle on a tracé $c_{l_{\max}}$ en

fonction de M_{dd} , montre les caractéristiques de performances des profils^o de voilure de l'invention, qui sont désignés par VR-XX. On voit près de cette courbe les caractéristiques déterminées expérimentalement pour les profils de voilure
 5 choisis dans la famille de l'invention, ayant des distributions d'épaisseur de 10,62%, 9,5% et 8%, ces profils étant respectivement désignés par VR-12, VR-13 et VR-14. On observera sur la figure 5 que le profil de voilure le plus épais présente un $c_{l\max}$ plus élevé que celui des autres pro-
 10 fils de voilure, $c_{l\max}$ associé à un nombre de Mach d'accroissement de la traînée inférieur à celui des autres profils. Inversement, le profil de voilure le plus mince a un plus faible $c_{l\max}$ avec, de façon correspondante, un nombre de Mach d'accroissement de la traînée plus élevé, tandis
 15 que le profil de voilure ayant une épaisseur intermédiaire se trouve entre les deux autres profils. On admet généralement qu'il existe à la fois des limites supérieures et des limites inférieures en ce qui concerne l'épaisseur des profils de voilure.

20 Les limites supérieures et inférieures sur l'épaisseur du profil de voilure sont dues à un certain nombre de facteurs. Lorsque l'épaisseur d'un profil de voilure augmente au-delà d'une certaine plage, ses performances aérodynamiques deviennent inacceptables pour les applica-
 25 tions pratiques. Par exemple, lorsque le profil de voilure devient plus épais, $c_{l\max}$ augmente mais le nombre de Mach d'accroissement de la $c_{l\max}$ traînée diminue jusqu'à un point auquel le profil de voilure devient inacceptable. En outre, diverses hypothèses qui ont été faites dans la prévision
 30 des performances des profils de voilure cessent d'être valides et la courbe de performances elle-même ne constitue plus une indication exacte des performances des profils de voilure épais. Ces mêmes principes s'appliquent lorsqu'on considère des profils de voilure très minces. En outre, les
 35 profils de voilure très minces deviennent inutilisables en pratique du fait qu'il devient difficile, ou même impossible, de les construire de manière qu'ils portent les charges prévues. On admet généralement que la plupart des profils de

voilure de rotor utilisables en pratique ont une épaisseur comprise approximativement dans la plage allant de 6% à 15%. Il faut donc noter que l'invention et les performances qu'on lui attribue sont relatives à des profils de voilure dont

- 5 l'épaisseur est comprise dans la plage approximative de 6% à 15% de la corde du profil. Il convient de noter tout particulièrement que le tableau I, qui définit la famille de profils de voilure de l'invention, est établi pour un rapport d'épaisseur de 1 ou 100%, conformément à la coutume,
10 de façon à faciliter la définition de la famille et l'extrapolation à des rapports d'épaisseur particuliers.

Comme on l'a indiqué précédemment, on génère des profils de voilure ayant un rapport d'épaisseur particulier en multipliant les valeurs y/c supérieures et inférieures du
15 tableau II par le rapport d'épaisseur maximal désiré. Il est possible, et souhaitable dans certains cas, comme on l'envisagera, d'obtenir une épaisseur de profil de voilure, dans la famille de profils de voilure, en appliquant un rapport d'épaisseur ou facteur d'échelle aux valeurs y/c
20 relatives à la surface supérieure, et un rapport d'épaisseur ou facteur d'échelle différent aux valeurs y/c relatives à la surface inférieure. Naturellement, le rapport d'épaisseur réel du profil de voilure résultant se trouve alors quelque part entre les valeurs des deux facteurs d'échelle utilisés.
25 On peut déterminer le rapport d'épaisseur réel du profil de voilure résultant après avoir généré le profil de voilure particulier, ou avant de le générer, à l'aide de méthodes classiques bien connues des aérodynamiciens. Le profil de voilure que présente le tableau VI a une distribution
30 d'épaisseur de 8% et il a été généré en utilisant un facteur d'échelle de 0,073534 pour la surface supérieure et de 0,095614 pour la surface inférieure. On l'a désigné par VR-15. Lorsqu'on emploie cette méthode, il ne doit pas y avoir de différence de plus de 20% entre les deux facteurs
35 d'échelle qu'on utilise pour générer le profil de voilure. Des différences supérieures aboutiraient à des combinaisons non vérifiées et très probablement non souhaitables des contours de surface supérieur et inférieur.

Comme on l'a indiqué précédemment, les profils de voilure de l'invention ont été conçus de façon que leurs caractéristiques de moment de variation du pas soient comprises dans la plage de $-0,01$ à $+0,01$. Une fois qu'on a déterminé une épaisseur et une longueur de corde particulières, on peut choisir un profil de voilure particulier dans la famille de profils de voilure de l'invention, en procédant de la manière décrite précédemment et en utilisant le tableau II. Ce profil de voilure aura un c_{m_0} particulier. On peut modifier la valeur de c_{m_0} pour atteindre des objectifs de conception particuliers, avec une certaine variation de $c_{l_{max}}$ et M_{dd_0} , en utilisant des facteurs d'échelle d'épaisseur différents pour les surfaces supérieure et inférieure des profils de voilure, de façon à conserver l'épaisseur totale désirée. Cette procédure a pour effet de changer la ligne moyenne ou la cambrure du profil de voilure et donc de faire varier les paramètres c_{m_0} , $c_{l_{max}}$, et M_{dd_0} du profil de voilure. Le fait d'augmenter l'épaisseur de la surface supérieure du profil de voilure, au détriment de sa surface inférieure, a pour effet d'augmenter la cambrure, ou degré de courbure, du profil de voilure, avec pour résultats une augmentation de $c_{l_{max}}$ et une diminution de M_{dd_0} , tandis que c_{m_0} devient plus négatif. Naturellement, l'inverse est vrai et si on diminue la cambrure d'un profil de voilure, c'est-à-dire si on diminue le degré de courbure en utilisant des rapports d'épaisseur différents pour les surfaces supérieure et inférieure, $c_{l_{max}}$ diminue et M_{dd_0} augmente, tandis que c_{m_0} devient plus négatif, en comparaison du profil de voilure de base. Ce procédé consistant à modifier c_{m_0} produit une variation des caractéristiques $c_{l_{max}}$ et M_{dd_0} du profil de voilure, par rapport à celles qui sont représentées sur la figure 5 et indiquées dans le tableau I. En outre, la valeur du changement du moment de variation du pas est relativement faible.

On peut voir une illustration graphique de cette technique sur la figure 5, sur laquelle on a porté les caractéristiques de performances des profils VR-14 et VR-15. Le profil de voilure VR-14 est un profil d'une épaisseur de 8%

auquel on a appliqué un facteur d'échelle d'épaisseur de 0,08 à la surface supérieure comme à la surface inférieure. Le profil de voilure VR-15 est également un profil d'une épaisseur de 8%. Cependant, on a appliqué dans ce cas un

5 facteur d'échelle d'épaisseur de 0,073534 à la surface supérieure, tandis qu'on a appliqué un facteur de 0,095614 à la surface inférieure. On peut ainsi voir dans le tableau IX que le profil VR-15 résulte d'une diminution de cambrure du profil VR-14, avec une réduction résultante de c_l et une

10 augmentation résultante de M_{dd_0} , tandis que la $c_{l_{max}}$ valeur de c_{m_0} devient davantage positive, comme il ressort du tableau IX. Le profil VR-15 est représenté graphiquement sur la figure 6d.

Pour réaliser un rotor utilisant la famille de

15 profils de voilure de l'invention, on peut utiliser un profil de voilure sans dimensions particulier. Cependant, dans le cas où on conçoit un rotor qui utilise des pales ayant une corde qui n'est pas constante, on peut toujours utiliser un seul profil de voilure sans dimensions, bien que les

20 dimensions physiques réelles des profils de voilure varient sur l'envergure de la pale. Dans certains cas, même lorsqu'on utilise une corde constante dans la pale de rotor, on emploie différents profils de voilure sans dimensions le long de l'envergure. On utilise de façon habituelle vers le

25 bout de la pale des profils de voilure ayant un plus faible rapport d'épaisseur, tandis qu'on utilise dans la partie de pied de la pale de rotor des profils de voilure ayant un rapport d'épaisseur plus élevé. On peut utiliser des profils de voilure d'épaisseur intermédiaire dans la région située

30 à mi-envergure de la pale de rotor. Par exemple, on pourrait utiliser le profil de voilure d'une épaisseur de 10,62%, VR-12, décrit dans le tableau III, du pied de la pale jusqu'à environ 85% du rayon de la pale, tandis qu'on pourrait utiliser en bout de pale un profil de voilure

35 d'épaisseur de 8%, comme le profil VR-14 qui est décrit dans le tableau V.

Les profils de voilure de l'invention qui sont décrits dans le tableau II et les profils de voilure sans

dimensions particuliers qui appartiennent à la famille décrite dans les tableaux III, IV et V ont, conformément aux critères de conception, un coefficient de moment de variation du pas à faible vitesse et pour une portance nulle, c_{m_0} , qui est compris dans la plage de $-0,006 \pm 0,002$. Au cas où des exigences de conception particulières l'imposent, on peut modifier les caractéristiques de moment de variation du pas des profils de voilure de l'invention en modifiant la cambrure de ces profils de voilure, par l'utilisation de facteurs d'échelle différents pour les surfaces supérieures et inférieures, comme on l'a décrit précédemment. On peut également modifier les caractéristiques de moment de variation du pas en utilisant des compensateurs de bord de fuite ou des éléments en forme de coins placés au bord de fuite.

Les figures 7a, 7b et 7c montrent l'application d'un compensateur à un profil de voilure correspondant à l'invention. On voit qu'un bord de fuite d'un profil de voilure de l'invention est équipé d'un compensateur de bord de fuite 32 qui lui est accouplé. La longueur du compensateur est égale à 4% de la corde du profil de voilure. On voit que le compensateur 32 s'étend de 2% au-delà du bord de fuite d'origine du profil de voilure. De ce fait, l'axe du compensateur rencontre la corde, au niveau du bord d'attaque du compensateur, à un point qui se trouve à 98% du bord d'attaque du profil de voilure. Comme il est représenté, l'angle de compensateur δ est l'angle que fait l'axe du compensateur 32 avec la corde du profil de voilure. Selon l'épaisseur du profil de voilure de l'invention, il peut exister une discontinuité entre la surface du profil de voilure et le compensateur. Cette discontinuité peut apparaître sur la surface supérieure, la surface inférieure ou sur les deux. Cette discontinuité peut se présenter sous la forme d'une marche. La figure 7b montre un profil de voilure de l'invention et un compensateur, avec une marche sur la surface supérieure, tandis que la figure 7c montre une combinaison d'un profil de voilure et d'un compensateur avec une marche sur la surface supérieure comme sur la surface inférieure.

Des essais ont montré qu'un compensateur ayant une

longueur égale à 4% de la corde du profil de voilure de base donne une augmentation de c_m d'environ 0,005 pour chaque degré de l'angle de compensateur δ , par rapport au point à 25% de la corde du profil de voilure.

5 Il convient de noter que, lorsqu'on ajoute un compensateur conformément à la description précédente, le profil de voilure résultant a une longueur de corde supérieure à 100% lorsqu'on utilise la nomenclature et la technique précédentes. Dans l'exemple indiqué ci-dessus, le compensa-
10 teur s'étend sur 2% au-delà du bord de fuite du profil de voilure d'origine, ce qui donne une longueur de corde de 102%. Le tableau VII, en annexe, décrit le profil de voilure VR-12 avec un compensateur d'une longueur de 4% s'étendant sur 2% au-delà du bord de fuite. Le prolongement de 2%
15 diminue le rapport d'épaisseur du profil de voilure résultant, ce qui donne $t/c = 0,104$.

Si un compensateur est nécessaire, il est recommandé de renormaliser les coordonnées du profil de voilure de façon à préserver la définition du contour du profil de
20 voilure de base.

On réalise la normalisation en divisant par la nouvelle corde les valeurs x/c et y/c du profil de voilure modifié. Par exemple, du fait que l'extrémité du compensateur se trouve à une position de 1,02 dans la direction de
25 la corde, on divise par 1,02 toutes les valeurs de x/c et y/c . Ceci est indiqué dans le tableau VII. Du fait que le bord de fuite du profil de voilure était à une position de 1,02 dans la direction de la corde, en divisant 1,02 par 1,02 on obtient comme nouvelle valeur 1, et la normalisa-
30 tion est ainsi effectuée. Lorsque toutes les valeurs de y/c sont également divisées par 1,02, la normalisation est entièrement effectuée et il en résulte une remise à l'échelle du profil de voilure conformément à la nouvelle corde. Le profil VR-12 avec un compensateur de 4% s'étendant sur
35 2% au-delà du bord de fuite, puis ensuite normalisé, est décrit dans le tableau VIII, en annexe.

On peut également réaliser la compensation du moment de variation du pas à l'aide d'éléments en forme de

coins placés sur la surface supérieure ou la surface inférieure du bord de fuite du profil de voilure, avec ou sans compensateur de bord de fuite. On peut accomplir ceci en appliquant l'élément en forme de coin sur le profil de voilure de base ou sur un profil de voilure qui a été modifié par l'adjonction d'un compensateur, conformément à la description précédente. La figure 8a montre l'application d'un élément en coin 34 à un profil de voilure de base. L'élément en coin a une longueur égale à 4% de la corde locale de la pale et il a un angle de coin δ . L'angle de coin est défini comme étant l'angle entre la surface sur laquelle l'élément en coin est appliqué et la surface extérieure de cet élément. Sur la figure 8a, le bord de fuite de l'élément en coin coïncide avec le bord de fuite du profil de voilure de base. La figure 8b montre l'application de l'élément en coin 34 à un profil de voilure qui a été modifié précédemment à l'aide d'un compensateur 32. Dans ce cas, l'élément en coin s'étend jusqu'au bord de fuite de la pale modifiée. Les résultats d'essais ont montré qu'un élément en coin ayant une longueur égale à 4% de la corde du profil de voilure de base modifie le moment de variation du pas du profil de voilure, par rapport à son point à 25% de la corde, d'environ 0,003 par degré d'angle de coin δ , pour un élément en coin placé sur la surface supérieure. Lorsqu'on combine un élément en coin 34 et un compensateur 32, le changement qu'on peut prévoir pour le moment de variation du pas est la somme des changements prévus pour le compensateur seul et pour l'élément en coin seul, conformément à la description précédente. Le tableau IX, en annexe, présente un résumé des caractéristiques de performances et des rapports d'épaisseur de profils de voilure particuliers qui appartiennent à la famille de l'invention.

On a constaté que pour la famille de profils de voilure de l'invention, une augmentation de 0,01 pour c_{m_0} entraîne une diminution d'environ 0,1 pour $c_{l_{max}}$. On peut modifier c_{m_0} en modifiant la cambrure, en ajoutant des compensateurs ou des éléments en forme de coins, ou par une combinaison de ces deux moyens. Comme on l'a indiqué pré-

cédemment, la famille de base, sans modification, présente un c_{m_0} de $-0,006 \pm 0,002$, cette valeur résultant des essais effectués.

Il va de soi que de nombreuses modifications
5 peuvent être apportées au dispositif décrit et représenté,
sans sortir du cadre de l'invention.

ANNEXE

TABLEAU I

M_{dd_o}	$c_{1_{\max}}$ (M = 0,4)
0,78	1,60
0,79	1,55
0,80	1,50
0,81	1,45
0,82	1,38
0,83	1,33
0,84	1,26
0,85	1,20

22
TABLEAU II

VR - λX
(t/c = 1,0)

x/c	y_u / c	x/c	y_l / c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,00012	0,02263	0,00055	-0,0235405
0,00080	0,0584313	0,00200	-0,0442561
0,00195	0,0912241	0,0040	-0,0635593
0,00340	0,1204614	0,0062	-0,0790960
0,00520	0,1489642	0,0086	-0,0925612
0,00700	0,1728437	0,011	-0,10310734
0,00900	0,1959793	0,01465	-0,1158192
0,01105	0,2171375	0,01955	-0,1271186
0,01415	0,245744	0,02615	-0,1393597
0,01860	0,2817326	0,0343	-0,1511299
0,02450	0,323352	0,0449	-0,1638418
0,03205	0,369209	0,0569	-0,177966
0,0416	0,416666	0,07245	-0,193032
0,0535	0,467985	0,0924	-0,20809793
0,0685	0,520716	0,1185	-0,2245763
0,0880	0,570621	0,15	-0,2405838
0,1140	0,6177024	0,20	-0,259887
0,15	0,6591337	0,25	-0,2740113
0,20	0,689266	0,3	-0,2834275
0,25	0,702448	0,35	-0,2900188
0,30	0,7071563	0,4	-0,2928437
0,35	0,7048023	0,45	-0,29190207
0,40	0,6949152	0,5	-0,2886064
0,45	0,6756120	0,55	-0,28248588
0,50	0,6506591	0,6	-0,27369115
0,55	0,6153484	0,65	-0,26129943
0,60	0,57124294	0,69	-0,24880132
0,65	0,5155367	0,73	-0,2337476
0,69	0,4644322	0,77	-0,21566855
0,73	0,4079473	0,81	-0,19503766
0,77	0,3493785	0,845	-0,17440207
0,81	0,289670	0,88	-0,1511516
0,845	0,233724	0,91	-0,12538606
0,88	0,176575	0,935	-0,1020245
0,91	0,1282109	0,955	-0,08259416
0,935	0,0879002	0,97	-0,0638795
0,955	0,05811205	0,98	-0,04919021
0,97	0,0398682	0,99	-0,03354708
0,98	0,0294162	0,995	-0,02383
0,99	0,0203644	1,0	-0,0141243
0,995	0,0163041		
1,0	0,0141243		

Parabole de bord d'attaque:

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

TABLEAU III

VR-12
($t/c = 0,1062$)

x/c	y_u/c	x/c	y_l/c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,00012	0,0024033	0,00055	-0,0025
0,0008	0,0062054	0,002	-0,0047
0,00195	0,009688	0,004	-0,00675
0,0034	0,012793	0,0062	-0,0084
0,0052	0,01582	0,0086	-0,00983
0,007	0,018356	0,011	-0,01095
0,009	0,020813	0,01465	-0,0123
0,01105	0,02306	0,01955	-0,0135
0,01415	0,026098	0,02615	-0,0148
0,0186	0,02992	0,0343	-0,01605
0,0245	0,03434	0,04449	-0,0174
0,03205	0,03921	0,0569	-0,0189
0,0416	0,04425	0,07245	-0,0205
0,0535	0,0497	0,0924	-0,0221
0,0685	0,0553	0,1185	-0,02385
0,088	0,0606	0,15	-0,02555
0,114	0,0656	0,20	-0,0276
0,15	0,07	0,25	-0,0291
0,20	0,0732	0,30	-0,0301
0,25	0,0746	0,35	-0,0308
0,30	0,0751	0,40	-0,0311
0,35	0,07485	0,45	-0,031
0,40	0,0738	0,50	-0,03065
0,45	0,07175	0,55	-0,03
0,50	0,0691	0,60	-0,029066
0,55	0,06535	0,65	-0,02775
0,60	0,060666	0,69	-0,0264227
0,65	0,05475	0,73	-0,024824
0,69	0,0493227	0,77	-0,022904
0,73	0,043324	0,81	-0,020713
0,77	0,037104	0,845	-0,0185215
0,81	0,030763	0,88	-0,0160523
0,845	0,0248215	0,91	-0,013316
0,88	0,0187523	0,935	-0,010835
0,91	0,013616	0,955	-0,0087715
0,935	0,009335	0,97	-0,006784
0,955	0,0061715	0,98	-0,005224
0,97	0,004234	0,99	-0,0035627
0,98	0,003124	0,995	-0,0025315
0,99	0,0021627	1,0	-0,0015
0,995	0,0017315		
1,0	0,0015		

Parabole de bord d'attaque:

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

TABLEAU IV

VR-13
($t/c = 0,095$)

x/c	y_u/c	x/c	y_l/c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,000120	0,002150	0,000550	-0,002236
0,000800	0,005551	0,002000	-0,004204
0,001950	0,008666	0,004000	-0,006038
0,003400	0,011444	0,006200	-0,007514
0,005200	0,014152	0,008600	-0,008793
0,007000	0,016420	0,011000	-0,009795
0,009000	0,018618	0,014650	-0,011003
0,011050	0,020628	0,019550	-0,012076
0,014150	0,023346	0,026150	-0,013239
0,018600	0,026765	0,034300	-0,014357
0,024500	0,030718	0,044490	-0,015565
0,032050	0,035075	0,056900	-0,016907
0,041600	0,039583	0,072450	-0,018338
0,053500	0,044459	0,092400	-0,019769
0,068500	0,049468	0,118500	-0,021335
0,088000	0,054209	0,150000	-0,022855
0,114000	0,058682	0,200000	-0,024689
0,150000	0,062618	0,250000	-0,026031
0,200000	0,065480	0,300000	-0,026926
0,250000	0,066733	0,350000	-0,027552
0,300000	0,067180	0,400000	-0,027820
0,350000	0,066956	0,450000	-0,027731
0,400000	0,066017	0,500000	-0,027418
0,450000	0,064183	0,550000	-0,026836
0,500000	0,061813	0,600000	-0,026001
0,550000	0,058458	0,650000	-0,024823
0,600000	0,054268	0,690000	-0,023636
0,650000	0,048976	0,730000	-0,022206
0,690000	0,044121	0,770000	-0,020489
0,730000	0,038755	0,810000	-0,018529
0,770000	0,033191	0,845000	-0,016568
0,810000	0,027519	0,880000	-0,014359
0,845000	0,022204	0,910000	-0,011912
0,880000	0,016775	0,935000	-0,009692
0,910000	0,012180	0,955000	-0,007846
0,935000	0,008351	0,970000	-0,006069
0,955000	0,005521	0,980000	-0,004673
0,970000	0,003787	0,990000	-0,003187
0,980000	0,002975	0,995000	-0,002265
0,990000	0,001935	1,000000	-0,001342
0,995000	0,001549		
1,000000	0,001342		

Parabole de bord d'attaque:

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

TABLEAU V

VR-14
(t/c = 0,08)

x/c	y _u /c	x/c	y ₁ /c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,00012	0,00181	0,00055	-0,001883
0,0008	0,004675	0,002	-0,00354
0,00195	0,007298	0,004	-0,005085
0,0034	0,009637	0,0062	-0,006328
0,0052	0,011917	0,0086	-0,007405
0,007	0,013827	0,011	-0,008249
0,009	0,015678	0,01465	-0,009266
0,01105	0,017371	0,01955	-0,010169
0,01415	0,01966	0,02615	-0,011149
0,0186	0,022539	0,0343	-0,01209
0,0245	0,025868	0,04449	-0,013107
0,03205	0,029537	0,0569	-0,014237
0,0416	0,033333	0,07245	-0,015443
0,0535	0,037439	0,0924	-0,016648
0,0685	0,041657	0,1185	-0,017966
0,088	0,04565	0,15	-0,019247
0,114	0,049416	0,20	-0,020791
0,15	0,052731	0,25	-0,021921
0,20	0,055141	0,30	-0,022674
0,25	0,056196	0,35	-0,023202
0,30	0,056573	0,40	-0,023427
0,35	0,056384	0,45	-0,023352
0,40	0,055593	0,50	-0,023089
0,45	0,054049	0,55	-0,022599
0,50	0,052053	0,60	-0,021895
0,55	0,049228	0,65	-0,020904
0,60	0,045699	0,69	-0,019904
0,65	0,041243	0,73	-0,0187
0,69	0,037155	0,77	-0,017253
0,73	0,032636	0,81	-0,015603
0,77	0,02795	0,845	-0,013952
0,81	0,023174	0,88	-0,012092
0,845	0,018698	0,91	-0,010031
0,88	0,014126	0,935	-0,008162
0,91	0,010257	0,955	-0,006608
0,935	0,007032	0,97	-0,00511
0,955	0,004649	0,98	-0,003935
0,97	0,003189	0,99	-0,002684
0,98	0,002353	0,995	-0,001907
0,99	0,001629	1,0	-0,00113
0,995	0,001304		
1,0	0,00113		

Parabole de bord d'attaque:

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_1/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

TABLEAU VI

VR-15
(t/c = 0,08)

x/c	y _u /c	x/c	y _l /c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,00012	0,001664	0,00055	-0,002251
0,00039	0,004297	0,002	-0,004232
0,00195	0,006708	0,004	-0,006077
0,0034	0,008858	0,0062	-0,007563
0,0052	0,010954	0,0086	-0,00885
0,007	0,01271	0,011	-0,009859
0,009	0,014411	0,01465	-0,011074
0,01105	0,015967	0,01955	-0,012154
0,01415	0,018071	0,02615	-0,013325
0,0186	0,020717	0,0343	-0,01445
0,0245	0,023777	0,0449	-0,015666
0,03205	0,027149	0,0569	-0,017016
0,0416	0,030639	0,07245	-0,018457
0,0535	0,034413	0,0924	-0,019897
0,0685	0,03829	0,1185	-0,021473
0,083	0,04196	0,15	-0,023003
0,114	0,045422	0,20	-0,024849
0,15	0,048469	0,25	-0,026199
0,20	0,050684	0,30	-0,0271
0,25	0,051654	0,35	-0,02773
0,30	0,052	0,40	-0,028
0,35	0,051827	0,45	-0,02791
0,40	0,0511	0,50	-0,027595
0,45	0,04968	0,55	-0,02701
0,50	0,047846	0,60	-0,026169
0,55	0,045249	0,65	-0,024984
0,60	0,042006	0,69	-0,023789
0,65	0,037909	0,75	-0,02235
0,69	0,034152	0,77	-0,020621
0,73	0,029998	0,81	-0,018648
0,77	0,025691	0,845	-0,016675
0,81	0,021301	0,83	-0,014452
0,845	0,017187	0,91	-0,011989
0,88	0,012984	0,955	-0,009755
0,91	0,009428	0,955	-0,007897
0,935	0,006464	0,977	-0,006108
0,955	0,004273	0,98	-0,004703
0,97	0,002932	0,99	-0,003208
0,98	0,002163	0,995	-0,002279
0,99	0,001497	1,0	-0,00135
0,995	0,001199		
1,0	0,001039		

Parabole de bord d'attaque: .

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

TABLEAU VII

VR-12 plus compensateur (4%)

(t/c = 0,104)

x/c	y _u /c	x/c	y _l /c
0,0	0,0	0,0	0,0
0,0001	0,0024033	0,00055	-0,0025
0,0008	0,0062054	0,002	-0,0047
0,00195	0,009688	0,004	-0,00675
0,0034	0,012793	0,0062	-0,0084
0,0052	0,01582	0,0086	-0,00983
0,007	0,018356	0,011	-0,01095
0,009	0,020813	0,01465	-0,0123
0,01105	0,02306	0,01955	-0,0135
0,01415	0,026098	0,02615	-0,0148
0,0186	0,02992	0,0343	-0,01605
0,0245	0,03434	0,04449	-0,0174
0,03205	0,03921	0,0569	-0,0189
0,0416	0,04425	0,07245	-0,0205
0,0535	0,0497	0,0924	-0,0221
0,0685	0,0553	0,1185	-0,02385
0,088	0,0606	0,15	-0,02555
0,114	0,0656	0,20	-0,0276
0,15	0,07	0,25	-0,0291
0,20	0,0732	0,30	-0,0301
0,25	0,0746	0,35	-0,0308
0,30	0,0751	0,40	-0,0311
0,35	0,07485	0,45	-0,031
0,40	0,0738	0,50	-0,03065
0,45	0,07175	0,55	-0,03
0,50	0,0691	0,60	-0,029066
0,55	0,06535	0,65	-0,02775
0,60	0,060666	0,69	-0,0264227
0,65	0,05475	0,73	-0,024824
0,69	0,0493227	0,77	-0,022904
0,73	0,043324	0,81	-0,020713
0,77	0,037104	0,845	-0,0185215
0,81	0,030763	0,88	-0,0160523
0,845	0,0248215	0,91	-0,013316
0,88	0,0187523	0,935	-0,010835
0,91	0,013616	0,955	-0,0087715
0,935	0,009335	0,97	-0,006784
0,955	0,0061715	0,98	-0,0055
0,97	0,004254	0,99	-0,0047857
0,98	0,003124	0,995	-0,0045714
0,99	0,0021627	1,0	-0,0043571
0,995	0,0017315	1,0075	-0,0040357
1,0	0,0015	1,015	-0,0037143
1,0075	0,001875	1,02	-0,0035
1,015	0,00225		
1,02	0,0025		

TABLEAU VIII

VR-12

plus compensateur (4%), valeurs normalisées
($t/c=0,104$)

x/c	y_u/c	x/c	y_l/c
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000118	0,002356	0,000539	-0,002451
0,000784	0,006084	0,001961	-0,004680
0,001912	0,009498	0,003922	-0,006618
0,003333	0,012542	0,006078	-0,008235
0,005098	0,015510	0,008431	-0,009637
0,006863	0,017996	0,010784	-0,010735
0,008824	0,020405	0,014363	-0,012059
0,010833	0,022608	0,019167	-0,013235
0,013873	0,025586	0,025637	-0,014510
0,018235	0,029333	0,033627	-0,015735
0,024020	0,033667	0,043618	-0,017059
0,031422	0,038441	0,055784	-0,018529
0,040784	0,043382	0,071029	-0,020098
0,052451	0,048725	0,090588	-0,021667
0,067157	0,054216	0,116176	-0,023382
0,086274	0,059412	0,147059	-0,025049
0,111765	0,064314	0,196078	-0,027059
0,147059	0,068627	0,245098	-0,028529
0,196078	0,071765	0,294118	-0,029510
0,245098	0,073137	0,343137	-0,030196
0,294118	0,073382	0,392157	-0,030392
0,343137	0,072353	0,441176	-0,030049
0,392157	0,070343	0,490196	-0,029412
0,441176	0,067745	0,539215	-0,028496
0,490196	0,064069	0,588235	-0,027206
0,539215	0,059476	0,637255	-0,025905
0,588235	0,053676	0,676470	-0,024337
0,637255	0,048356	0,715686	-0,022455
0,676470	0,042474	0,754902	-0,020307
0,715686	0,036376	0,794117	-0,018158
0,754902	0,030160	0,828431	-0,015738
0,794117	0,024335	0,862745	-0,013055
0,828431	0,018385	0,892156	-0,010623
0,862745	0,013349	0,916666	-0,008600
0,892156	0,009152	0,936274	-0,006651
0,916666	0,006050	0,950980	-0,005392
0,936274	0,004151	0,960784	-0,004692
0,950980	0,003063	0,970588	-0,004482
0,960784	0,002120	0,975490	-0,004272
0,970588	0,001698	0,980392	-0,003957
0,975490	0,001471	0,987744	-0,003641
0,980392	0,001838	0,995098	-0,003431
0,987744	0,002206	1,000000	
0,995098	0,002451		
1,000000			

TABLEAU IX

PROFIL DE VOILURE	PERFORMANCES POUR VR-XX			
VR-XX	t/c	$c_{l_{max}}$ (M=0,4)	M_{dd_0}	c_{m_0}
VR-12	0,1062	1,52	0,802	-0,007
VR-12 +compensateur(4%),valeurs normalisées	0,104	1,55	0,792	0,000
VR-13	0,095	1,44	0,810	-0,007
VR-14	0,08	1,30	0,833	-0,005
VR-15	0,08	1,17	0,835	+0,006

REVENDECATIONS

1. Pale de rotor pour aéronef à voilure tournante, caractérisée en ce qu'elle présente un profil de voilure qui a un coefficient de moment de variation du pas, à portance nulle, compris dans la plage de $\pm 0,01$, un coefficient maximal de portance supérieur à 1,2 et un nombre de Mach d'accroissement de la traînée, à portance nulle, supérieur à 0,78, les valeurs du coefficient de portance correspondant à des nombres de Mach d'environ 0,4 tandis que le coefficient de moment de variation du pas à portance nulle correspond à une vitesse faible.

2. Pale de rotor selon la revendication 1, caractérisée en ce que la combinaison de $c_{l_{max}}$ et M_{dd_0} définissant sans ambiguïté les performances de ces profils de voilure, est comprise entre : $c_{l_{max}} = 1,6$, $M_{dd_0} = 0,78$ et $c_{l_{max}} = 1,2$, $M_{dd_0} = 0,85$, $c_{l_{max}}$ désignant le coefficient maximal de portance tandis que M_{dd_0} désigne le nombre de Mach d'accroissement de la traînée à portance nulle.

3. Pale de rotor selon la revendication 2, caractérisée en ce que $c_{l_{max}}$ pour ce profil de voilure se trouve pratiquement sur une ligne qui est définie par les coordonnées suivantes pour un c_{m_0} d'environ $-0,006$:

M_{dd_0}	$c_{l_{max}}$
0,78	1,60
0,79	1,55
0,80	1,50
0,81	1,45
0,82	1,38
0,83	1,33
0,84	1,26
0,85	1,20

c_{m_0} désignant le coefficient de moment de variation du pas à portance nulle ; et les valeurs de $c_{l_{max}}$ augmentent d'environ 0,1 pour chaque diminution d'environ 0,01 de c_{m_0} et elles diminuent d'environ 0,1 pour chaque augmentation d'environ 0,01 de c_{m_0} , les valeurs de c_{m_0} correspondant à un

nombre de Mach inférieur à 0,3.

4. Pale de rotor selon la revendication 3, caractérisée en ce que le profil de voilure est en outre pratiquement défini par le système de coordonnées suivant :

	x/c	y _u /c	x/c	y _l /c
5	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,00012	0,02263	0,00055	-0,0235405
	0,00080	0,0584313	0,00200	-0,0442561
	0,00195	0,0912241	0,0040	-0,0635593
10	0,00340	0,1204614	0,0062	-0,0790960
	0,00520	0,1489642	0,0086	-0,0925612
	0,00700	0,1728437	0,011	-0,10310734
	0,00900	0,1959793	0,01465	-0,1158192
	0,01105	0,2171375	0,01955	-0,1271186
15	0,01415	0,245744	0,02615	-0,1393597
	0,01860	0,2817326	0,0343	-0,1511299
	0,02450	0,323352	0,04449	-0,1638418
	0,03205	0,369209	0,0569	-0,177966
	0,0416	0,416666	0,07245	-0,193032
20	0,0535	0,467985	0,0924	-0,20809793
	0,0685	0,520716	0,1185	-0,2245763
	0,0880	0,570621	0,15	-0,2405838
	0,1140	0,6177024	0,20	-0,259887
25	0,15	0,6591337	0,25	-0,2740113
	0,20	0,689266	0,3	-0,2834275
	0,25	0,702448	0,35	-0,2900188
	0,30	0,7071563	0,4	-0,2928437
	0,35	0,7048023	0,45	-0,29190207
30	0,40	0,6949152	0,5	-0,2886064
	0,45	0,6756120	0,55	-0,28248588
	0,50	0,6506591	0,6	-0,27369115
	0,55	0,6153484	0,65	-0,26129943
	0,60	0,57124294	0,69	-0,24880132
	0,65	0,5155367	0,73	-0,2337476
35	0,69	0,4644322	0,77	-0,21566855
	0,73	0,4079473	0,81	-0,19503766
	0,77	0,3493785	0,845	-0,17440207
	0,81	0,289670	0,88	-0,1511516
	0,845	0,233724	0,91	-0,12538606
40	0,88	0,176575	0,935	-0,1020245
	0,91	0,1282109	0,955	-0,08259416
	0,935	0,0879002	0,97	-0,0638795
	0,955	0,05811205	0,98	-0,04919021
	0,97	0,0398682	0,99	-0,03354708
	0,98	0,0294162	0,995	-0,02383
45	0,99	0,0203644	1,0	-0,0141243
	0,995	0,0163041		
	1,0	0,0141243		

dans lequel : x est une distance le long de la corde de la pale, à partir du bord d'attaque de la pale ; c est la lon-

gueur de la corde de la pale ; y_u est la distance entre un point sur la surface supérieure du profil de voilure et la corde, mesurée le long d'une ligne perpendiculaire à la corde ; y_l est la distance entre un point sur la surface inférieure du profil de voilure et la corde, le long d'une ligne perpendiculaire à la corde ; y_u/c et y_l/c sont indiqués pour un rapport d'épaisseur, t/c , égal à un (1), en désignant par t l'épaisseur maximale du profil de voilure ; y_u/c et y_l/c sont multipliés par un facteur d'échelle égal à t/c ; et le bord d'attaque du profil de voilure est pratiquement défini par les paraboles suivantes :

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

ces paraboles se raccordant de façon progressive au profil de voilure qui est défini par ce système de coordonnées.

5. Pale de rotor pour un aéronef à voilure tournante, caractérisée en ce qu'elle comporte un profil de voilure qui est pratiquement défini par le système de coordonnées suivant :

	x/c	y_u/c	x/c	y_l/c
20	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,00012	0,02263	0,00055	-0,0235405
	0,00080	0,0584313	0,00200	-0,0442561
	0,00195	0,0912241	0,0040	-0,0635593
25	0,00340	0,1204614	0,0062	-0,0790960
	0,00520	0,1489642	0,0086	-0,0925612
	0,00700	0,1728437	0,011	-0,10310734
	0,00900	0,1959793	0,01465	-0,1158192
	0,01105	0,2171375	0,01955	-0,1271186
30	0,01415	0,245744	0,02615	-0,1393597
	0,01860	0,2817326	0,0343	-0,1511299
	0,02450	0,323352	0,04449	-0,1638418
	0,03205	0,369209	0,0569	-0,177966
	0,0416	0,416666	0,07245	-0,193032
35	0,0535	0,467985	0,0924	-0,20809793
	0,0685	0,520716	0,1185	-0,2245763
	0,0880	0,570621	0,15	-0,2405838
	0,1140	0,6177024	0,20	-0,259887
	0,15	0,6591337	0,25	-0,2740113
40	0,20	0,689266	0,3	-0,2834275
	0,25	0,702448	0,35	-0,2900188
	0,30	0,7071563	0,4	-0,2928437

	x/c	y _u /c	x/c	y _l /c
	0,35	0,7048023	0,45	-0,29190207
	0,40	0,6949152	0,5	-0,2886064
	0,45	0,6756120	0,55	-0,28248588
5	0,50	0,6506591	0,6	-0,27369115
	0,55	0,6153484	0,65	-0,26129943
	0,60	0,57124294	0,69	-0,24880132
	0,65	0,5155367	0,73	-0,2337476
	0,69	0,4644322	0,77	-0,21566855
10	0,73	0,4079473	0,81	-0,19503766
	0,77	0,3493785	0,845	-0,17440207
	0,81	0,289670	0,88	-0,1511516
	0,845	0,233724	0,91	-0,12538606
	0,88	0,176575	0,935	-0,1020245
15	0,91	0,1282109	0,955	-0,08259416
	0,935	0,0879002	0,97	-0,0638795
	0,955	0,05811205	0,98	-0,04919021
	0,97	0,0398682	0,99	-0,03354708
	0,98	0,0294162	0,995	-0,02383
20	0,99	0,0203644	1,0	-0,0141243
	0,995	0,0163041		
	1,0	0,0141243		

dans lequel : x est une distance le long de la corde de la
 pale, à partir du bord d'attaque de la pale ; c est la lon-
 25 gueur de la corde de la pale ; y_u est la distance entre un
 point sur la surface supérieure du profil de voilure et la
 corde, mesurée le long d'une ligne perpendiculaire à la
 corde ; y_l est la distance entre un point sur la surface
 inférieure du profil de voilure et la corde, le long d'une
 30 ligne perpendiculaire à la corde ; y_u/c et y_l/c sont indi-
 qués pour un rapport d'épaisseur, t/c, égal à un (1), en
 désignant par t l'épaisseur maximale du profil de voilure ;
 y_u/c et y_l/c sont multipliés par un facteur d'échelle égal
 à t/c ; et le bord d'attaque du profil de voilure est pra-
 35 tiquement défini par les paraboles suivantes :

$$(y_u/c)^2 = 4,2676129 (t/c)^2 (x/c)$$

$$(y_l/c)^2 = (t/c)^2 (x/c)$$

ces paraboles se raccordant de façon progressive au profil
 de voilure qui est défini par ce système de coordonnées.

40 6. Pale de rotor selon la revendication 5, carac-
 térisée en ce que t/c est compris dans la plage allant de
 0,06 à 0,15.

7. Pale de rotor selon la revendication 6, caractérisée en ce que t/c est pratiquement égal à 0,1062.

8. Pale de rotor selon la revendication 6, caractérisée en ce que t/c est pratiquement égal à 0,095.

5 9. Pale de rotor selon la revendication 6, caractérisée en ce que t/c est pratiquement égal à 0,08.

10. Pale de rotor selon l'une quelconque des revendications 5 à 9, caractérisée en ce qu'on applique un premier facteur d'échelle à y_u/c et un second facteur

10 d'échelle à y_1/c .

11. Pale de rotor selon la revendication 10, caractérisée en ce que le bord de fuite du profil de voilure comporte un compensateur de bord de fuite.

12. Pale de rotor selon la revendication 11, 15 caractérisée en ce que le profil de voilure est normalisé.

13. Pale de rotor selon la revendication 10 ou 12, caractérisée en ce que le bord de fuite du profil de voilure comporte un élément en forme de coin.

FIG. 4

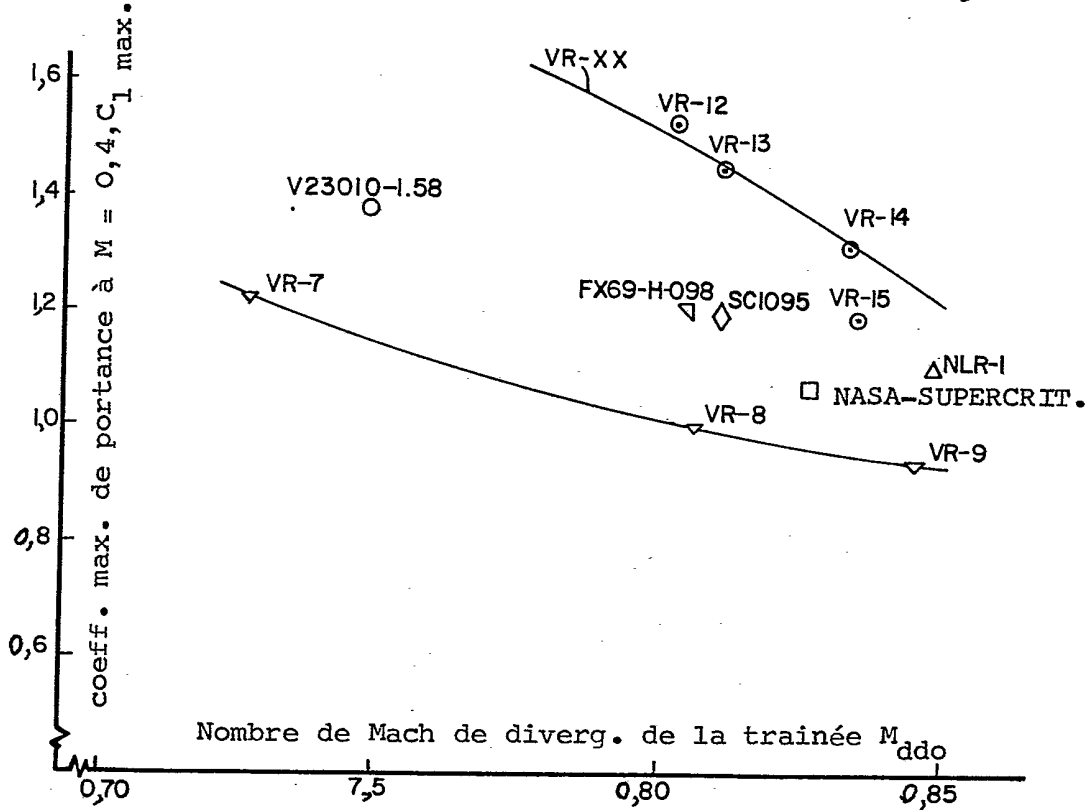
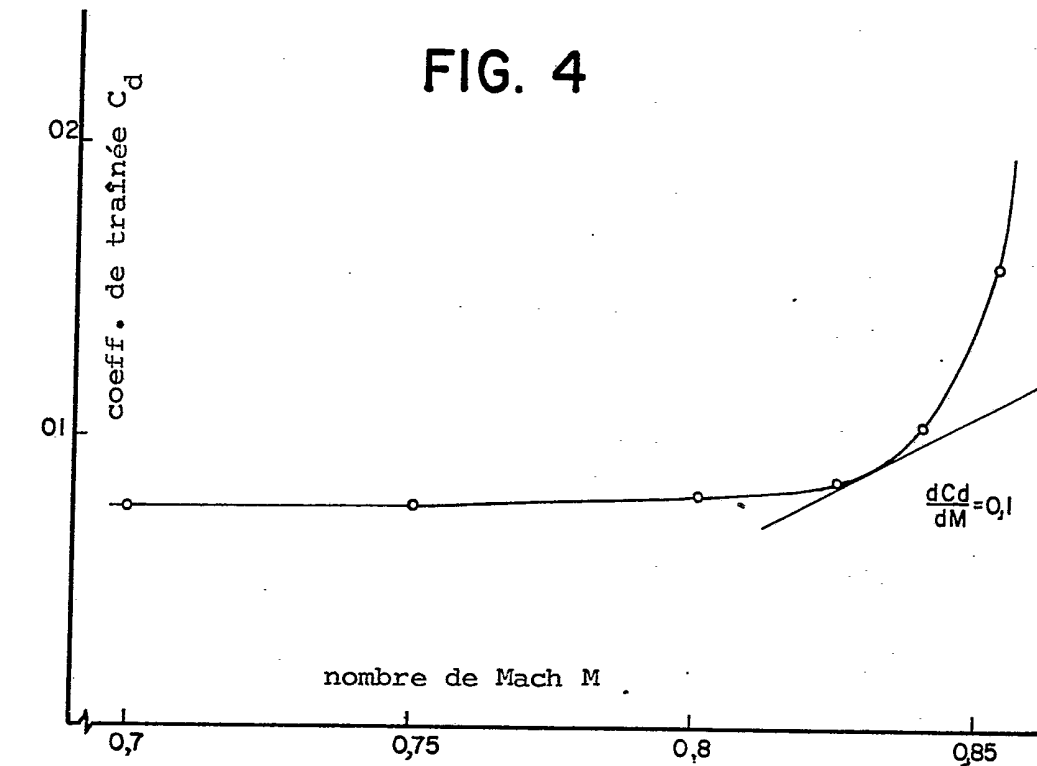


FIG. 5

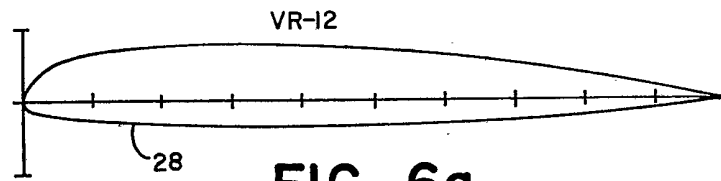


FIG. 6a

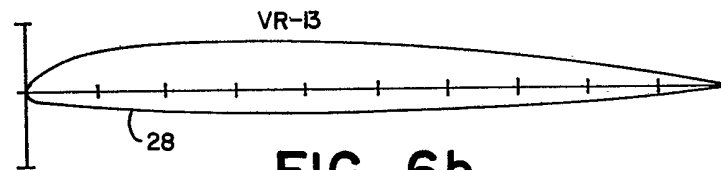


FIG. 6b

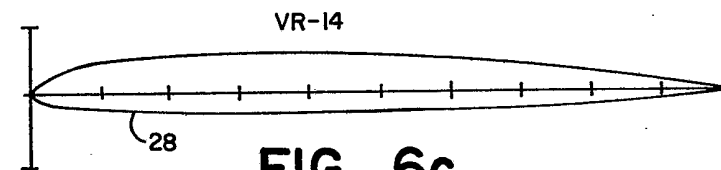


FIG. 6c

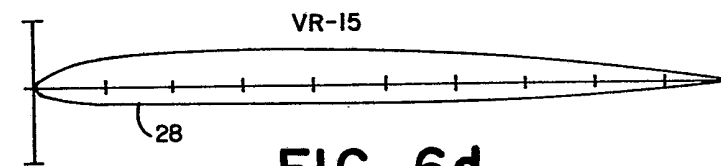


FIG. 6d

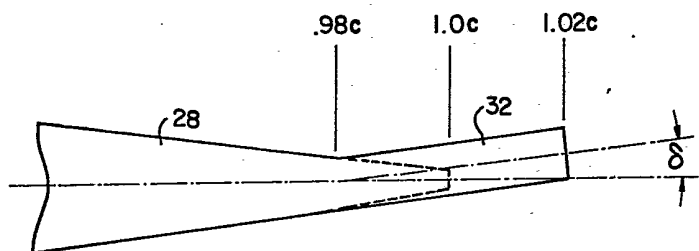


FIG. 7a

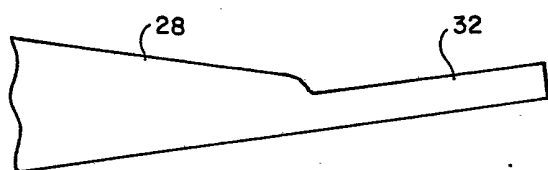


FIG. 7b

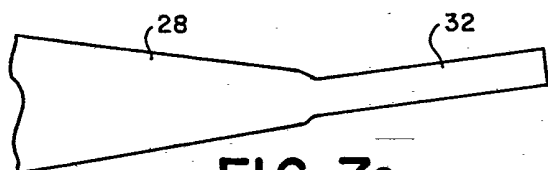


FIG. 7c

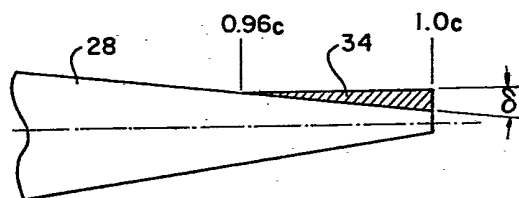


FIG. 8a

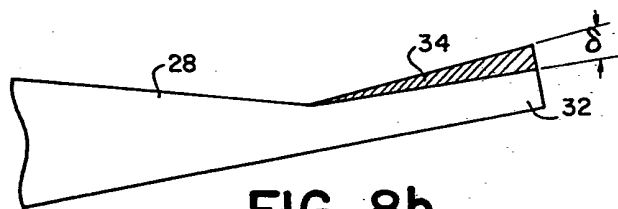


FIG. 8b