

## 5<sup>e</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

### ETUDE DES PERFORMANCES D'UN PROPULSEUR CYCLOIDAL NOUVEAU (PROCEDE LIPP)

J.F.DEVILLERS-T.PICHON  
Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées  
Laboratoire de Mécanique  
Groupe Dynamique Expérimentale des Fluides  
75015 Paris

R.ROUCOUS  
Université Paris VI  
75006 PARIS

#### RESUME

La propulsion cycloïdale n'est pas une nouveauté. Le système Voith-Schneider existe depuis 1923 et a été commercialisé à plusieurs milliers d'exemplaires. La conception de ce type de propulseurs ne permet pas leur utilisation avec des paramètres d'avancement  $\lambda$  (vitesse d'avance sur vitesse de rotation) supérieurs à l'unité. Récemment, une mécanique simple permettant d'obtenir des valeurs de  $\lambda > 1$  a été inventée (brevet Lipp). L'ENSTA a réalisé un prototype d'étude pour évaluer la poussée de ce nouveau système et en déterminer les rendements. Sur un modèle à une seule pale, les résultats déjà obtenus montrent que les performances de ce propulseur sont comparables à celles d'autres procédés. Parallèlement, un calcul basé sur la méthode de G.Couchet [1] a été utilisé à fin de comparaisons. Ce calcul est un modèle fluides parfaits, la comparaison fait bien ressortir les effets de fluides réels.

#### SUMMARY

Cycloïdal propulsion is not a novelty. The Voith-Schneider propeller has been sold in thousands since 1923. The concept of this propeller is such that it cannot be used with advance ratio  $\lambda$  (forward speed to rotating speed) greater than one. Recently a simple mechanism working with  $\lambda > 1$  has been patented (Lipp). ENSTA has made a prototype to estimate the thrust and the efficiency of this new system. With a one blade propeller, the first results show performances comparable to those obtained with other propellers. Concurrently, a perfect fluid calculation based on the method of G.Couchet [1] has been used. Real fluid effects clearly appear in the comparison between experimental and theoretical results.

## 1. INTRODUCTION:

Fin 1992 une étude comparative de propulseurs marins à axe de rotation perpendiculaire à l'avancement est entreprise à l'ENSTA. Parmi ceux-ci on peut imaginer des cinématiques théoriques relativement simples faisant passer l'axe perpendiculaire à la pale par un point fixe, la position de ce pivot permet l'adaptation et l'orientation de la propulsion.

Depuis 1923 il existe le propulseur Voith-Schneider dans lequel le point fixe N est situé à l'intérieur du cercle décrit par la pale (cf. fig. 1), ce propulseur travaillant à des vitesses d'avancement inférieures à la vitesse linéaire de rotation de la pale ( $\lambda < 1$ ) (cf. § ANNEXE). Le profil étant peu incliné sur la tangente au cercle.

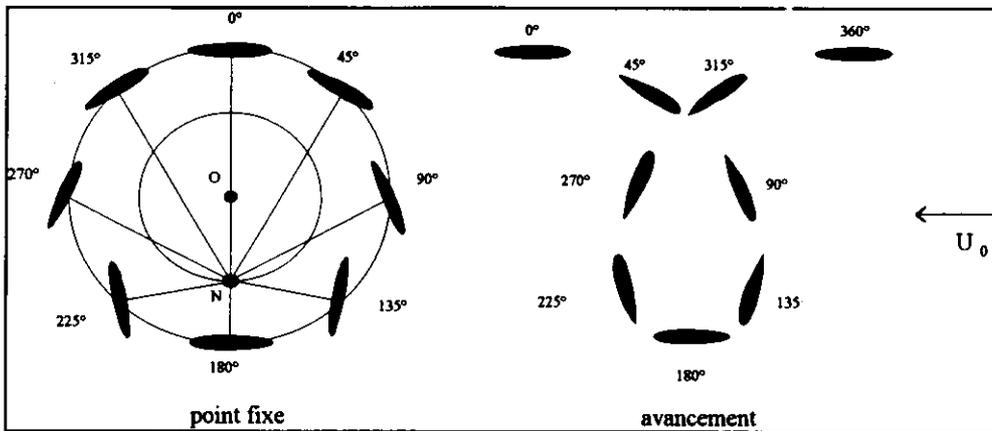


fig. 1 : Voith-Schneider, fonctionnement à  $\lambda < 1$

Plus récemment M.R.Lipp nous a présenté la maquette d'un propulseur de son invention basé sur un système d'engrenages aboutissant à une loi de calage avec le point fixe à l'extérieur du cercle (cf. fig. 2) et travaillant à des vitesses d'avancement supérieures à la vitesse de rotation de la pale ( $\lambda > 1$ ). Ici, le profil étant peu incliné sur la vitesse d'avancement  $U_0$ .

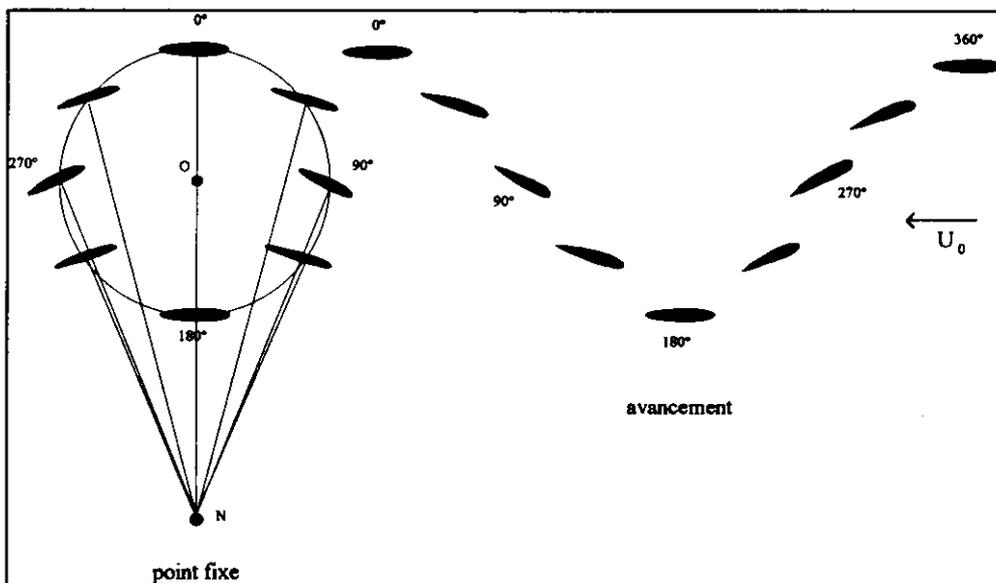


fig. 2 : Lipp, fonctionnement à  $\lambda > 1$

L'ENSTA a réalisé un prototype dans le but d'évaluer les performances de ce procédé et d'établir des comparaisons expérimentales et théoriques.

## 2. MOYENS EXPERIMENTAUX:

### 2.1. Le prototype :

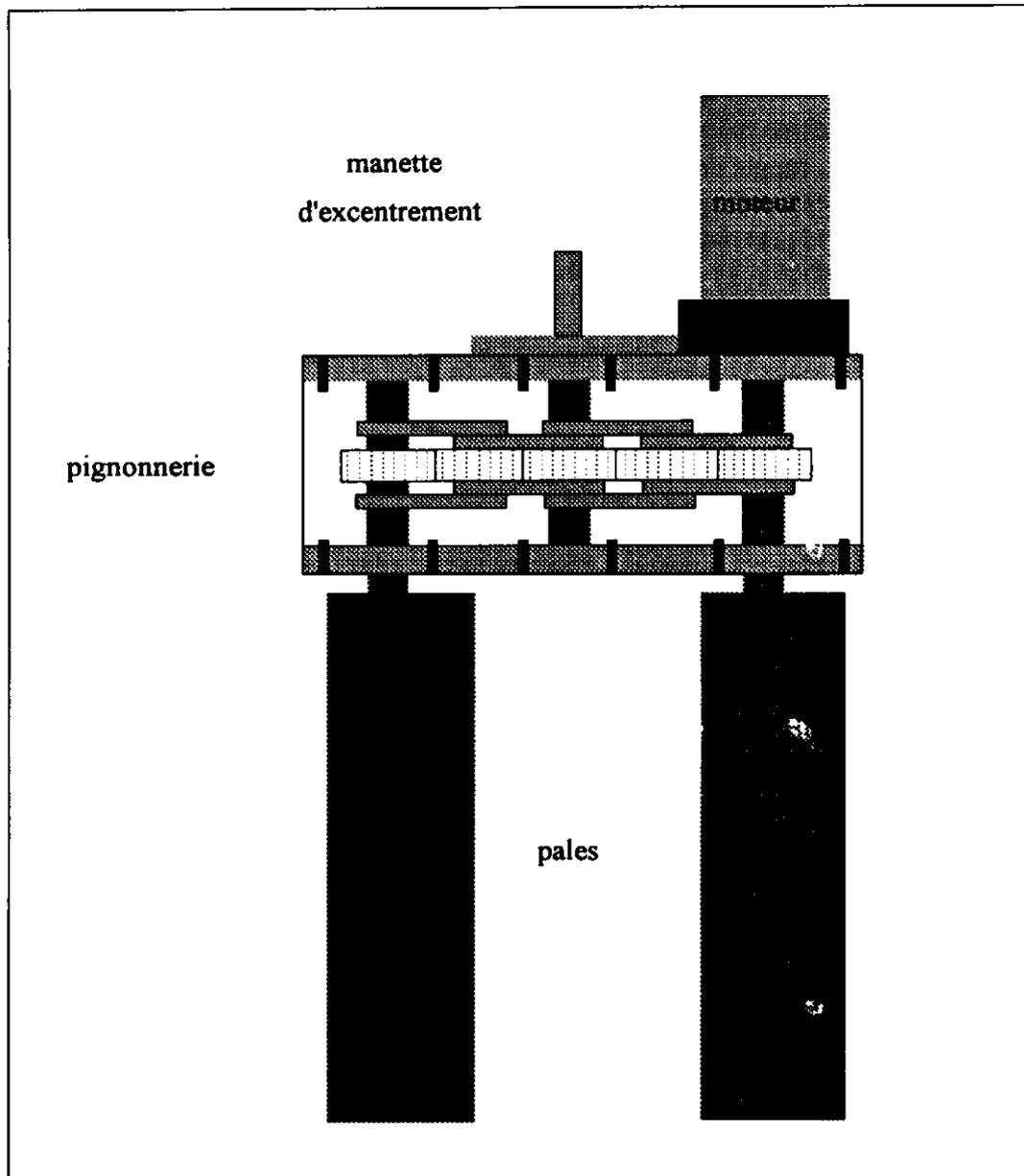


fig. 3 : Vue d'ensemble du rotor Lipp

#### 2.1.1 Détail des éléments :

-Un moteur électrique à courant continu entraînant une couronne extérieure qui donne le mouvement de rotation au système de pignons. Ce moteur peut être alimenté de 0 à 24 volts et nous donne des vitesses de rotation de 0 à 100 tr/mn.

-Un ensemble de 5 pignons qui transmet le mouvement à une ou deux pales.

-Un système mobile permettant le décentrement du pignon central afin de modifier la loi de calage des pales (cf. § ANNEXE).

Les caractéristiques dimensionnelles sont les suivantes :

- Diamètre entre les axes des pales :  $D = 12$  cm.
- Rayon des pignons d'entraînement :  $r = 2$  cm.
- La pale utilisée est un profil NACA 0016, envergure  $L = 20$  cm, corde  $c = 5$  cm.
- Surface de la pale :  $S = Lc = 100$  cm<sup>2</sup>.
- Le décentrement  $e$  peut varier de 0 à 12 mm.

### 2.1.2 Principe de fonctionnement :

Le point A d'une pale est entraîné d'un mouvement circulaire uniforme sur le cercle de centre O de rayon R, l'angle de calage  $\theta$  de cette pale liée à un pignon centré en A de rayon r est donné par un système d'engrenage tournant autour du pignon central fixe en rotation, mais mobile en translation sur l'axe de la propulsion. Le décentrement de ce pignon permet à tout moment de faire varier la loi de calage de la pale.

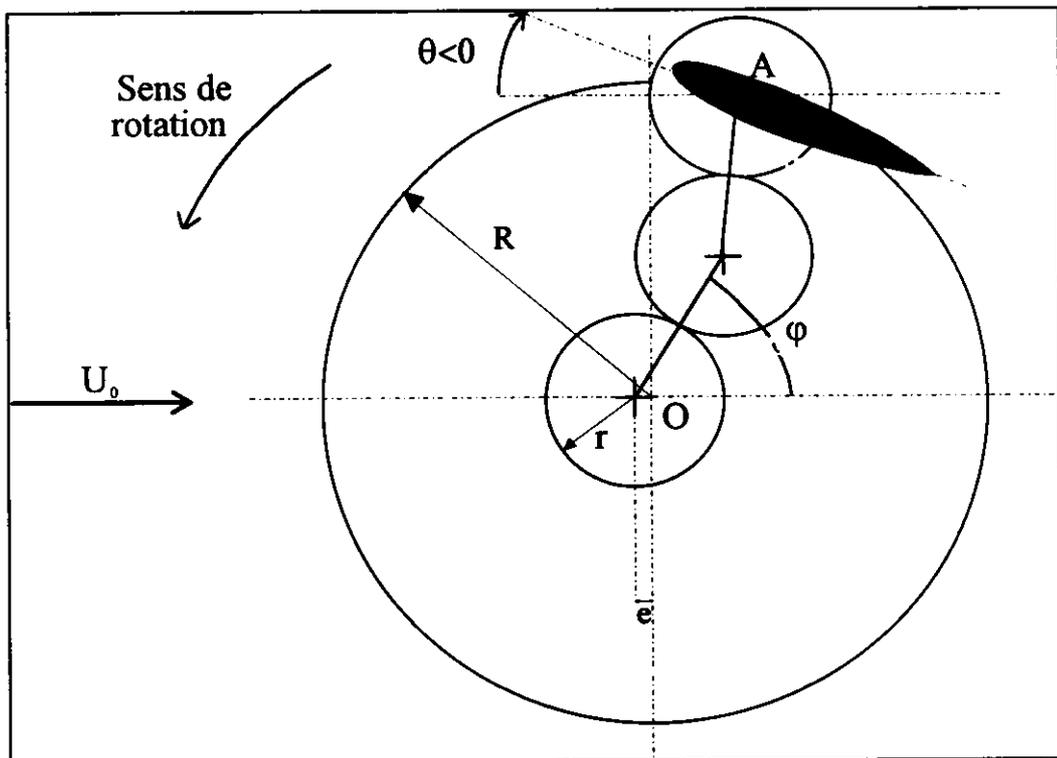


fig. 4 : Mécanisme du propulseur.

### 2.2. La veine d'essai : (boucle hydrodynamique à surface libre)

Elle est composée d'un bassin rectangulaire (6 x 1,5 x 0,6 m) aux parois et plancher en verre. A l'intérieur de ce bassin, une structure métallique guide l'eau entraînée par un propulseur électrique de 2 Kw nous permettant une plage de vitesse d'écoulement allant de 15 à 60 cm/s. Dans le coude précédant la zone d'essai nous avons disposé des éléments en nid d'abeille de manière à avoir un écoulement aussi stationnaire et uniforme que possible dans la zone d'essai, nous avons ainsi réussi à obtenir une stabilité de l'écoulement de l'ordre de 5 % autour de la vitesse moyenne.

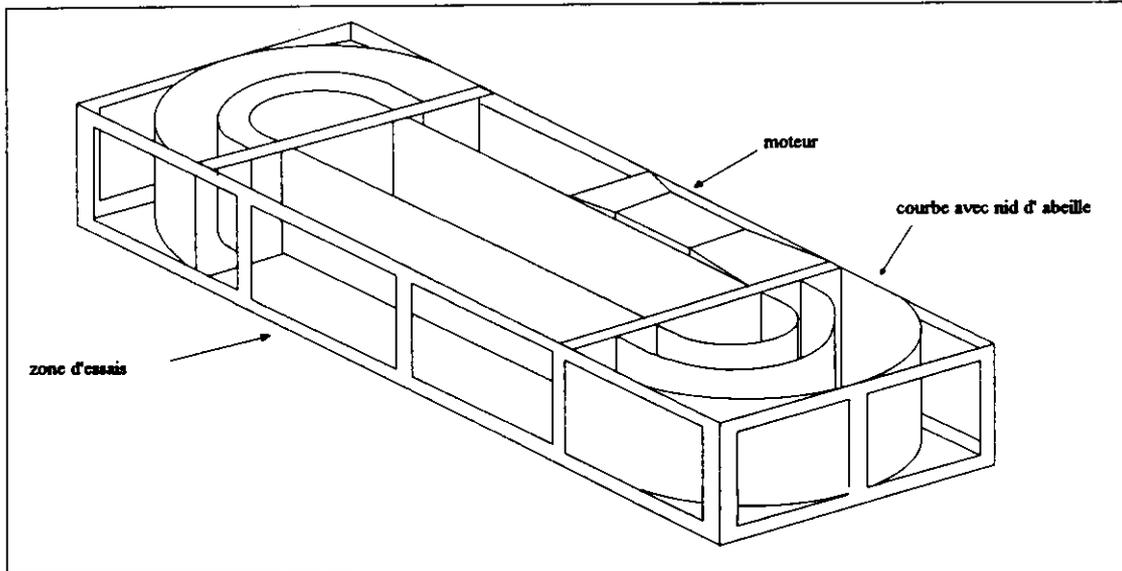


fig. 5 : la veine d'essai.

### **2.3. La chaîne de mesure :**

#### **2.3.1. Elements constitutifs :**

Cette chaîne comprend trois parties, une pour les efforts sur les pales, l'autre pour les vitesses (écoulement de l'eau et rotation du moteur), la dernière pour l'acquisition et le traitement des mesures.

La première partie est composée d'un capteur piézo-électrique dont l'étendue de mesure est de plus ou moins 50 N et de son amplificateur de charge. Ce capteur pouvant être indifféremment positionné parallèlement (fig. 6) ou perpendiculairement (fig. 7) à l'écoulement de manière à avoir les deux composantes de force instantanée sur les pales (propulsion et dérive).

Pour pouvoir mesurer les efforts, nous laissons le propulseur libre en translation, relié à un bâti par l'intermédiaire d'un système de 4 barres formant un parallélogramme déformable, alors que le capteur est maintenu en position fixe sur le bâti. Ce système pendulaire est déséquilibré afin d'assurer une précontrainte définie sur le capteur.

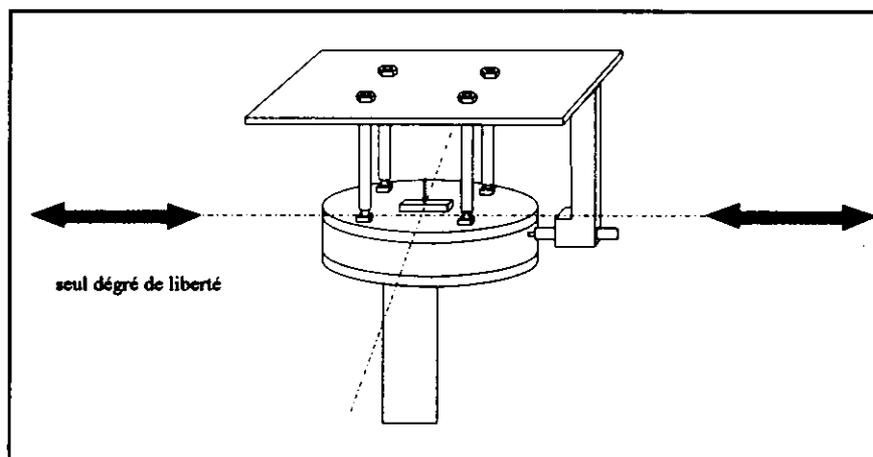


fig. 6 : Configuration pour obtenir l'effort de propulsion.

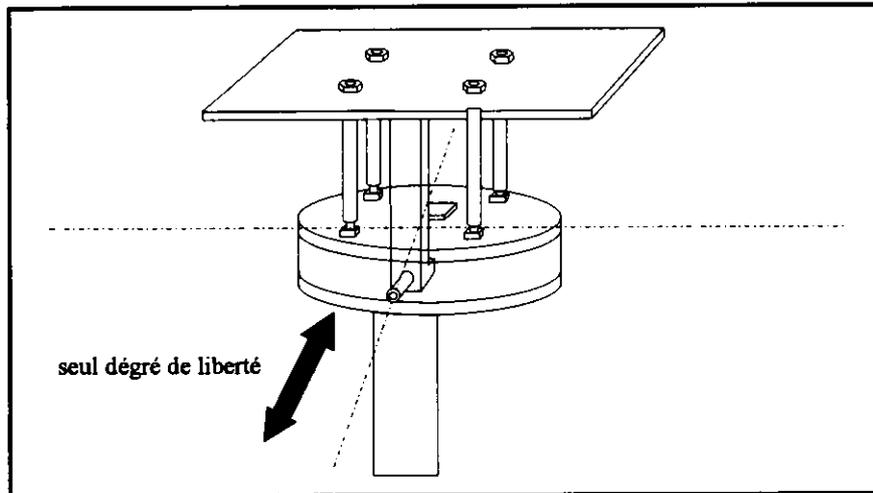


fig. 7 : Configuration pour obtenir l'effort de dérive.

La deuxième partie est composée d'un moulinet placé dans l'eau à mi-hauteur de la pale et de son électronique, d'un capteur inductif de proximité placé sur le capot de la pignionnerie à une position angulaire connue.

Les données d'effort et de vitesse sont alors filtrées puis envoyées vers un oscilloscope afin de visualiser les mesures en temps réel. Après ce premier traitement les données sont transmises à un ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition pour enfin être dépouillées sur le logiciel EXCEL.

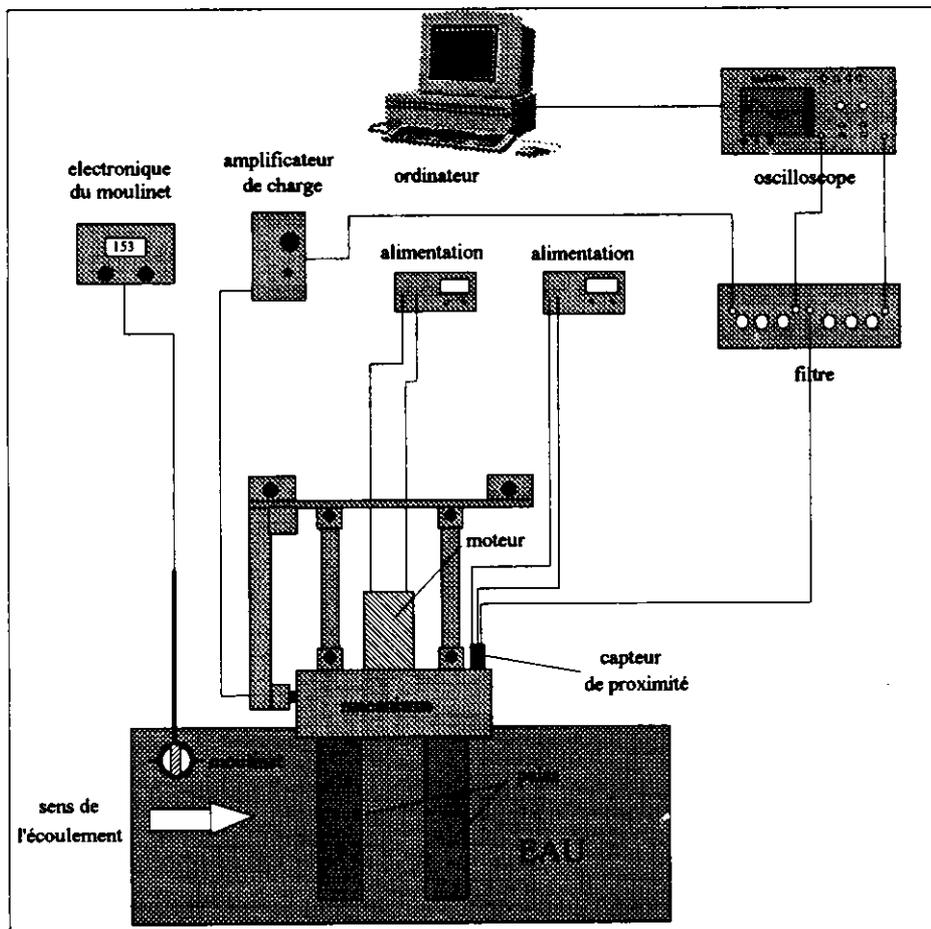


fig. 8 : Schéma de principe de la chaîne de mesure.

### 3. CALCUL NUMERIQUE :

L'approche théorique de l'étude des propulseurs cycloïdaux en général a été faite dans le cadre d'un mouvement au sein d'un fluide parfait incompressible considéré comme irrotationnel en dehors du sillage. Considérant une pale de grand allongement, cette étude est limitée au cas d'un écoulement bidimensionnel, c'est à dire un écoulement par tranche autour du profil. On résout le problème plan de l'écoulement en fluide parfait incompressible et irrotationnel autour d'un obstacle (ici un profil à pointe) qui se meut d'un mouvement quelconque.

La solution à ce problème, est recherchée sous la forme du potentiel complexe de l'écoulement :

$$f(z, t) = \varphi(x, y, t) + i\psi(x, y, t)$$

où :  $-\varphi(x, y, t)$  représente le potentiel des vitesses absolues.

$-\psi(x, y, t)$  représente la fonction de courant des vitesses absolues.

Le calcul s'effectue en écrivant les conditions aux limites portant sur les vitesses :

-vitesse à l'infini (en général nulle).

-vitesse relative tangente à l'obstacle sur celui-ci.

Toutefois, il faudra ajouter dans le cas d'un profil à pointe une condition supplémentaire exprimant la condition de Joukowski (vitesse finie en ce point) qui permettra de déterminer la circulation installée autour du profil à chaque instant. Dans le cas général, cette circulation fluctuant au cours du temps donnera lieu à l'émission de rotationnel à la pointe, c'est à dire à l'émission d'un sillage issu de celle-ci et évoluant ensuite au cours du temps. Plusieurs méthodologies permettent de mettre ce problème en forme, la plus courante reposant sur une méthode de singularités. Nous avons pour notre part généralisé la méthode "Couchet" [2]. Ayant recours au cheminement utilisant la transformation conforme de l'extérieur de l'obstacle en l'extérieur d'un cercle, cela nous ramène à la résolution d'un problème de Green autour du cercle. La formule de Schwartz-Villat donne alors une solution analytique exprimant le potentiel de l'écoulement au point  $z$  du profil.

$$f(z, t) = F(Z, t) = l(t)G_z^1 + m(t)G_z^2 + \omega(t)G_z^3 - \frac{i\Gamma}{2\pi} \text{Log}Z$$

Avec -  $z = H(Z)$  expression de la transformation conforme.

-  $l(t)$ ,  $m(t)$ ,  $\omega(t)$  définissant le torseur des vitesses du mouvement plan sur plan.

-  $G_z^1$ ,  $G_z^2$ ,  $G_z^3$  fonctions de la forme du profil calculées à partir de  $H(Z)$ .

Cette formule est valable pour une circulation  $\Gamma$  établie autour du profil.

$$\text{On y ajoute : } \sum_{n=1}^N = -\frac{i\gamma_n}{2\pi} \text{Log} \frac{Z - \zeta_n(t)}{Z - \zeta'_n(t)}$$

tenant compte du tourbillon de densité  $\gamma_n$  situé en :  $z_n = H(\zeta_n)$

$$\text{Avec : } \bar{\zeta}'_n = \frac{a^2}{\zeta_n}$$

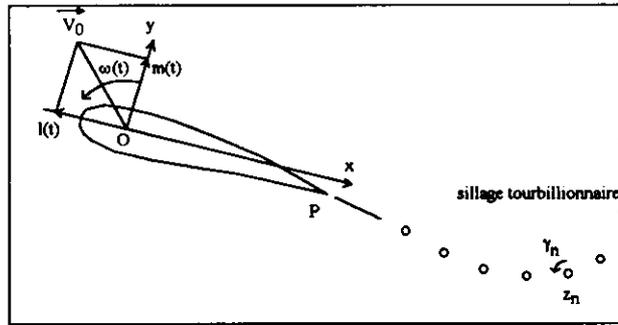


fig. 9 : sillage derrière une pale.

La condition de liberté des tourbillons (au préalable discrétisés) permettra de suivre l'évolution du sillage  $z_n(t)$ .

L'écriture de la condition de Joukowski permettra de déterminer la densité du rotationnel lâché à tout instant (émission continue du rotationnel à la pointe).

**4. RESULTATS ET COMPARAISONS :**

**4.1. Résultats du calcul numérique :**

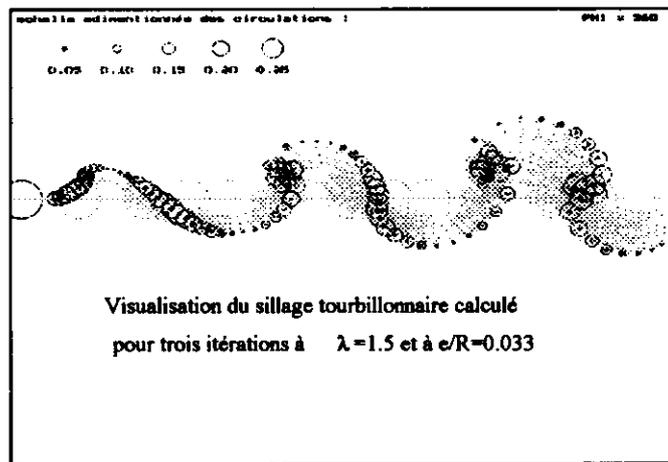


fig. 10 :

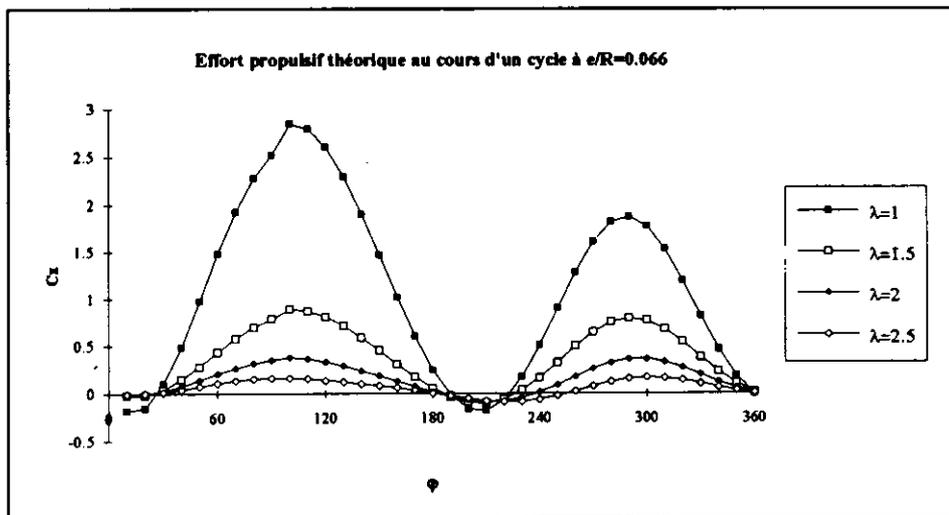


fig. 11 :

## 4.2 Résultats expérimentaux :

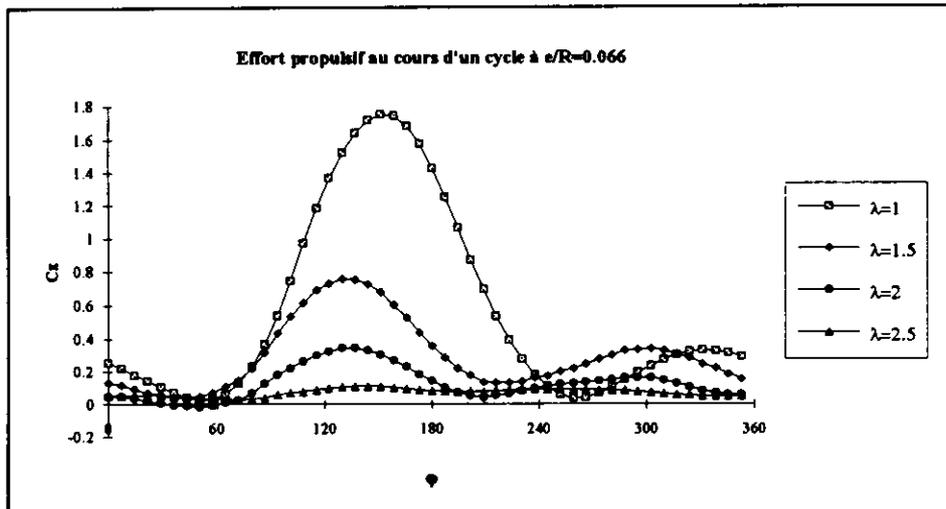


fig. 12 :

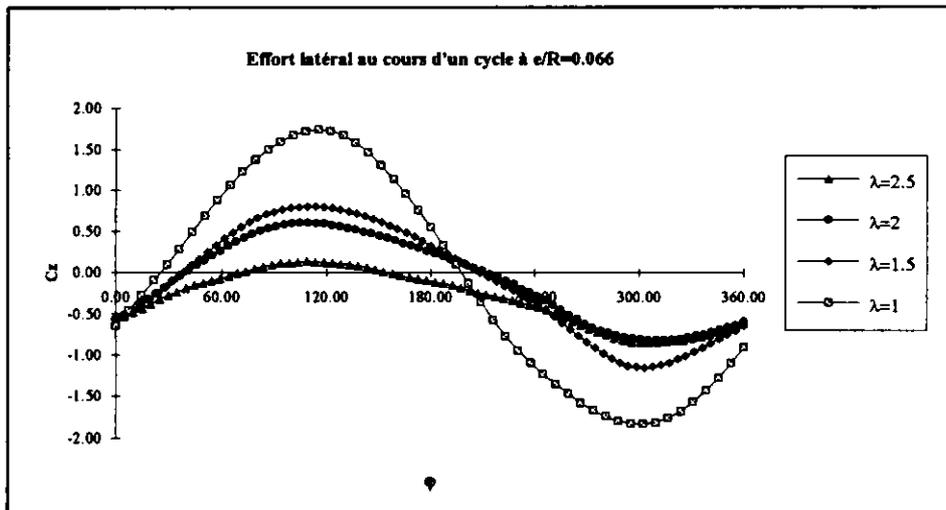


fig. 13 :

## 4.3 Comparaison numérique, expérimentale :

Nos premiers essais ont été effectués pour plusieurs excentrements  $e$  à divers  $\lambda$  en ne montant qu'une seule pale sur le propulseur, afin de pouvoir comparer les  $C_x$  numériques et expérimentaux.

On peut noter deux différences principales entre les efforts de propulsion instantanés théoriques (cf. fig. 11) et expérimentaux (cf. fig. 12):

- La deuxième "bosse" de propulsion correspondant à la position arrière ( $\varphi = 270^\circ$ ) de la pale est beaucoup plus faible dans la réalité que dans le calcul mais la différence tend à s'atténuer à mesure que  $\lambda$  augmente.
- Il y a un décalage entre le maximum de propulsion théorique et expérimentale qui a tendance à s'amoinrir quand  $\lambda$  augmente.

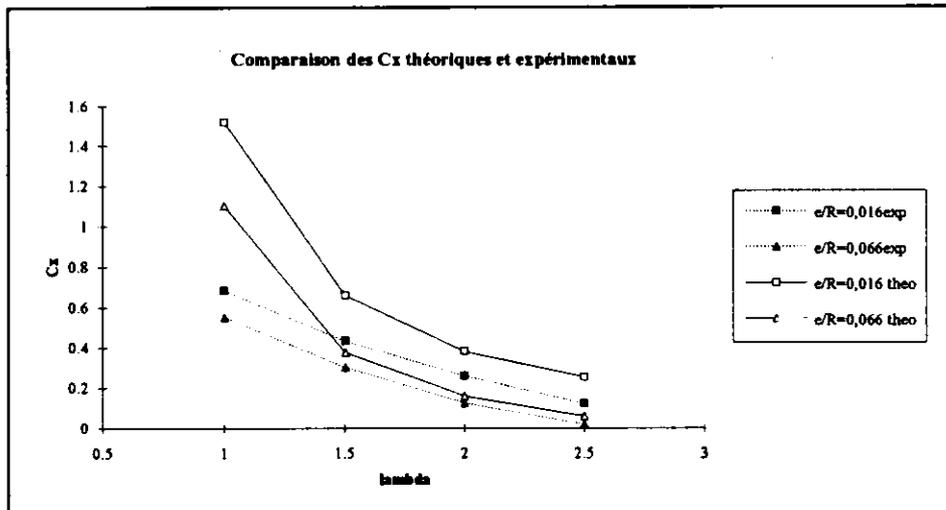


fig. 14 :

Sur la figure 14 on peut voir que les valeurs de  $C_x$  expérimentaux sont plus faibles que les valeurs calculées mais que la différence diminue quand  $\lambda$  augmente. De plus on voit que les meilleures propulsions sont atteintes lorsque la valeur de  $\beta$  est faible, c'est à dire que les angles  $\theta$  de calage restent modérés au cours du cycle (cf. § ANNEXE).

#### 4.4 Comparaison Voith-Schneider, Lipp :

Le graphique ci-dessous nous permet de comparer les efforts propulsifs (sous la forme adimensionnée  $K_s = \frac{F_x}{1/2\rho LD(\omega R)^2}$ ) d'un propulseur Voith-Schneider 5 pales et du propulseur Lipp 1 pale.

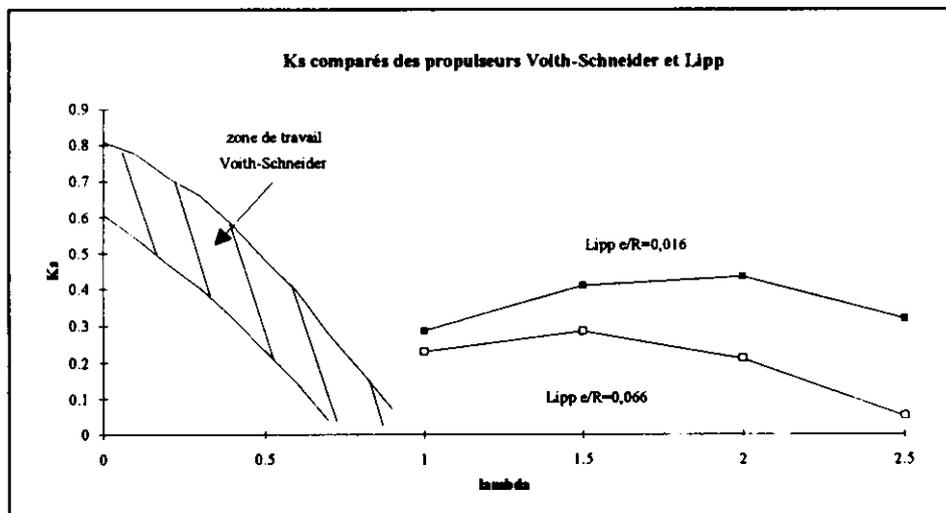


fig. 15 :

On peut remarquer sur le graphique suivant que les deux propulseurs ne fonctionnent pas sur la même plage de vitesse de rotation tout en ayant des valeurs de rendements du même ordre.

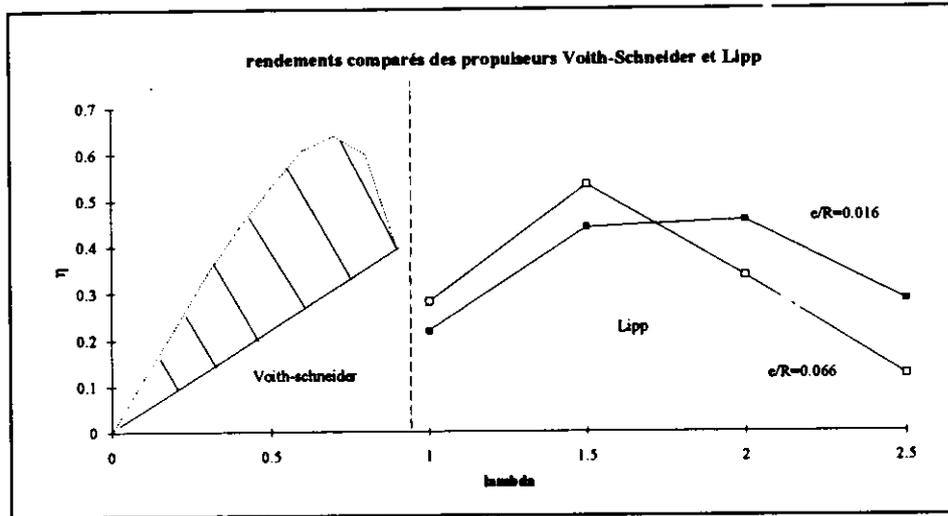


fig. 16 :

## 5. CONCLUSION :

Les essais effectués jusqu'à maintenant ont été réalisés en ne montant qu'une seule pale sur le propulseur. Bien que cette configuration reste très théorique (effectivement 4 ou 5 pales sont en général montées sur un Voith-Schneider), nous avons pu collecter des éléments de comparaison avec le calcul.

Nous avons tout d'abord observé sur les courbes d'effort instantané un décalage et une diminution des maximums de propulsion. Ces différences s'atténuent à mesure que  $\lambda$  augmente, c'est à dire que la vitesse de rotation diminue par rapport à la vitesse d'avance. Après une série d'essais à plusieurs valeurs de  $\beta$ , nous avons aussi constaté que les meilleures propulsions étaient atteintes expérimentalement comme théoriquement pour de faibles excentremets. Les différences constatées dans cette première comparaison peuvent être en grande partie expliquées par des effets de fluide réel (viscosité, décrochage local, turbulence).

La seconde comparaison avec un propulseur existant est encourageante mais demeure limitée par le fait que nous n'avons monté qu'une seule pale sur notre prototype, cependant les coefficient de poussée et le rendement reste dans le même ordre de grandeur.

En plus de ces résultats quantitatifs, nous avons essayé de visualiser le sillage tourbillonnaire, pour le comparer à la traîne calculée. Nos moyens ne nous ont pas permis d'avoir des images suffisamment nettes pour avoir un bon aperçu de ces phénomènes. Il faudrait réaliser un montage mobile de façon à suivre les tourbillons au cours de leur déplacement.

L'évolution de cette étude va nous amener naturellement à installer une deuxième pale sur le propulseur, ce qui nous permettra d'avoir une idée plus précise de l'influence de la fraction de surface développée  $\Phi = \frac{n c}{\pi D}$  ( $n$  : nombre de pales) sur la propulsion et sur le rendement et d'aborder les problèmes d'interaction.

Nous envisageons par la suite des études sur l'influence du calage préalable et du facteur de forme des pales.

Il est également dans nos intentions de réaliser un prototype de plus grosse taille destiné à être installé sur une embarcation afin d'apprécier ses performances in-situ.

**Références**

- [1] COUCHET G.  
La condition de Joukowsky en mouvements non-stationnaires  
Application  
Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier, n°74, 1970
  
- [2] BRAKEZ A.  
Thèse de l'université CADI AYYAD Marrakech  
Modélisation en fluide parfait incompressible d'un rotor portant  
propulsif, 1990
  
- [3] CORNIGLION J., ROUCOUS R.  
Mouvements non stationnaires d'un fluide parfait incompressible  
en présence d'un profil mobile  
dans : Compte-rendus de l'Académie des sciences, Série A, t. 277  
(1973), n°12, pp. 551-554
  
- [4] WERNERT Ph.  
Etude théorique de mouvements plans quelconques de profils  
d'ailes, à circulation constante  
Rapport ISL - S 112/93

ANNEXE :**1. L'étude du mouvement d'une pale : détermination de la loi  $\theta(\varphi)$ :**

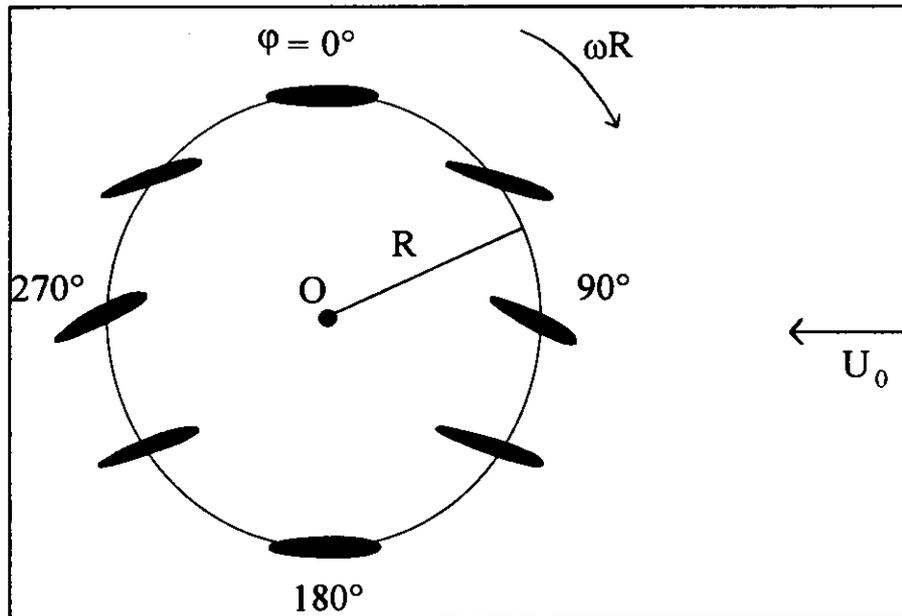
La loi qui nous intéresse est  $\theta(\varphi)$ , que nous cherchons à exprimer en fonction des paramètres géométriques du propulseur:

- R : Rayon à l'axe de la pale (OA).  
 r : Rayon d'un pignon (3 pignons identiques, 5 pour un système à deux pales).  
 $\varphi$  : Angle de l'axe de la pale avec l'origine.  
 $\theta$  : Angle du profil par rapport à la vitesse de l'écoulement (angle de calage).  
 e : Décentrement du pignon central vers l'avant (grandeur adimensionnée :  $\beta = e/R$ ).

$$\theta = 4[\text{Arccos}((R/4r)\sqrt{(1+\beta^2) - 2\beta \cos \varphi}) - \text{Arccos}(R/4r)]$$

$\varphi$	$\beta=0$	$\beta=0.016$	$\beta=0.033$	$\beta=0.05$	$\beta=0.066$
0	0	0.033	0.142	0.325	0.566
10	0	0.756	1.632	2.585	3.552
20	0	1.457	3.08	4.783	6.458
30	0	2.115	4.441	6.851	9.198
40	0	2.71	5.674	8.727	11.686
50	0	3.225	6.74	10.351	13.844
60	0	3.642	7.606	11.673	15.601
70	0	3.95	8.244	12.648	16.901
80	0	4.138	8.636	13.247	17.699
90	0	4.202	8.768	13.448	17.968
100	0	4.138	8.636	13.247	17.699
110	0	3.95	8.244	12.648	16.901
120	0	3.642	7.606	11.673	15.601
130	0	3.225	6.74	10.351	13.844
140	0	2.71	5.674	8.727	11.686
150	0	2.115	4.441	6.851	9.198
160	0	1.457	3.08	4.783	6.458
170	0	0.756	1.632	2.585	3.552
180	0	0.033	0.142	0.325	0.566
190	0	-0.688	-1.347	-1.93	-2.409
200	0	-1.388	-2.788	-4.111	-5.287
210	0	-2.044	-4.138	-6.154	-7.981
220	0	-2.636	-5.357	-7.999	-10.413
230	0	-3.147	-6.409	-9.589	-12.512
240	0	-3.561	-7.261	-10.879	-14.213
250	0	-3.866	-7.889	-11.829	-15.467
260	0	-4.053	-8.273	-12.411	-16.234
270	0	-4.116	-8.403	-12.607	-16.493
280	0	-4.053	-8.273	-12.411	-16.234
290	0	-3.866	-7.889	-11.829	-15.467
300	0	-3.561	-7.261	-10.879	-14.213
310	0	-3.147	-6.409	-9.589	-12.512
320	0	-2.636	-5.357	-7.999	-10.413
330	0	-2.044	-4.138	-6.154	-7.981
340	0	-1.388	-2.788	-4.111	-5.287
350	0	-0.688	-1.347	-1.93	-2.409
360	0	0.033	0.142	0.325	0.566

Angle de calage  $\theta = f(\varphi, \beta)$  calculé.



Positionnement de la pale en fonction de l'angle  $\varphi$ .

### 2. Variables de vitesse :

$U_0$  : Vitesse de l'écoulement .

$\omega$  : Vitesse angulaire  $\omega = 2\pi n$ .

$\lambda$  : Paramètre d'avancement  $\lambda = \frac{U_0}{\omega R}$

### 3. Variables d'effort :

$\overline{F_x}$  : Effort propulsif moyenné sur un cycle (grandeur adimensionnée  $\overline{C_x} = \frac{\overline{F_x}}{1/2\rho S U_0^2}$ ).

$\overline{F_y}$  : Effort de dérive moyenné sur un cycle.

$\overline{M_0}$  : Moment aérodynamique moyen  $\overline{M_0} = \overline{F_x} \times R \times \cos\varphi + \overline{F_y} \times R \times \sin\varphi$

$\eta$  : Rendement aérodynamique  $\eta = \frac{U_0 \overline{F_x}}{\omega \overline{M_0}}$