

NFI/GE3A.  
Option « Energies Renouvelables ».  
Energies Marines.  
TD hydrolienne

C. Sarraf<sup>a</sup>, F. Ravelet<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Arts et Metiers Science and Technology*,  
LIFSE (Lab. Ingénierie des Fluides et des Systèmes Energétiques),  
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.  
contact: florent.ravelet@ensam.eu

20 octobre 2020

L'hélice de l'hydrolienne est constituée de profils hydrodynamiques disposés radialement. Son axe de rotation est horizontal. A tout instant, le plan balayé par l'hélice est perpendiculaire à la direction du courant marin. La machine est constituée de 6 pales identiques formées de profils NACA 0015 (voir Fig. 1).

On fera l'hypothèse que le serrage des pales est suffisamment faible pour considérer chaque pale comme un profil isolé. La machine est immergée à  $h_0 = 15$  m et soumise à un courant marin de vitesse  $C_0 = 3.3$  m.s<sup>-1</sup>. L'eau de mer a une densité  $\rho = 1027$  kg.m<sup>-3</sup>.

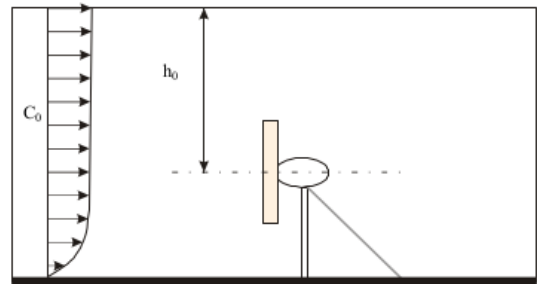


FIGURE 1 – Vue du rotor et implantation

Le rendement global de l'ensemble formé par l'hélice, le multiplicateur et le récepteur est égal à  $\eta_g = 0.65$ .

# 1 Dimensionnement global

On se propose tout d'abord de trouver la puissance théorique maximale récupérable par l'hydrolienne (limite de Betz). Les hypothèses principales sont les suivantes :

- Le fluide est incompressible ;
- Les frottements sont négligés ;
- Les rotations des écoulements amont et aval sont négligées.

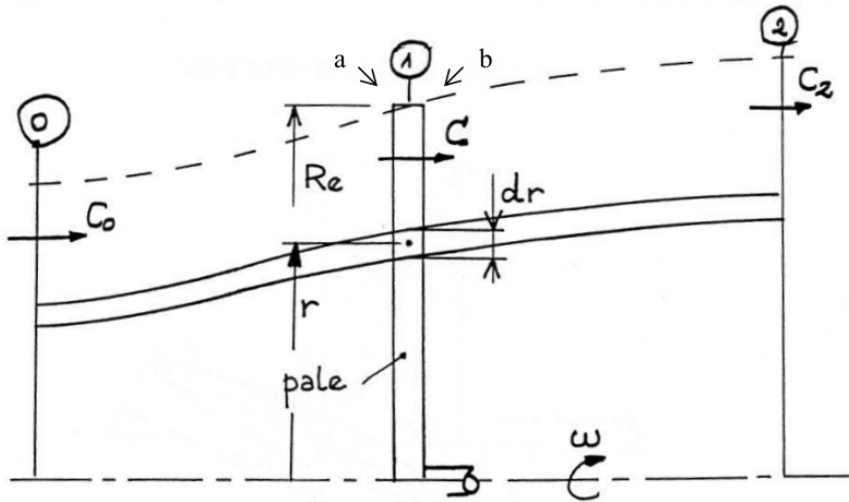


FIGURE 2 – Modèle global de Froude - Betz

1. Déterminer la puissance motrice de l'eau  $P_m$  par unité de surface, en fonction de la vitesse  $C_0$  et de la masse volumique  $\rho$ .
2. Exprimer  $E$  l'énergie par unité de masse cédée à l'hélice par le courant en fonction des vitesses amont et aval, respectivement  $C_0$  et  $C_2$  (Fig. 2).  
En déduire la puissance  $P$  correspondante fonction du débit massique  $q_m$  qui traverse toute l'hélice.
3. Montrer que la vitesse débitante au niveau de l'hélice est telle que

$$C = \frac{1}{2}(C_0 + C_2)$$

Pour cela :

- Utiliser le théorème de Bernoulli entre 0 et  $a$  puis entre  $b$  et 2 pour exprimer la force  $F$  appliquée sur le disque hélice.
  - Ecrire le théorème de variation de quantité de mouvement dans le système.
4. Montrer que la puissance cédée par le courant en fonction de  $x = C_2/C_0$  présente un maximum égal à :

$$P_{max} = \frac{16}{27}P_m$$

pour une valeur de  $x$  à définir. Écrire  $C$  en fonction de  $C_0$ .

5. Calculer le rayon  $R_e$  de la pale nécessaire pour atteindre une puissance utile de 200 kW en courant nominal si le rendement global de l'ensemble formé par l'hélice, le multiplicateur et le récepteur est égal à  $\eta_g = 0.65$ .

Compte tenu des rendements des différents organes rencontrés jusqu'à l'utilisation finale listée ci-dessous, quel est le pourcentage maximum de la limite de Betz que l'on peut espérer obtenir en utilisation après stockage en batterie ?

- Hélice :  $0.20 < \eta < 0.85$
  - Le multiplicateur ou le réducteur :  $0.70 < \eta < 0.98$
  - L'alternateur :  $0.80 < \eta < 0.98$
  - Le transformateur :  $0.85 < \eta < 0.98$
  - Le redresseur :  $0.90 < \eta < 0.98$
  - Les batteries :  $0.70 < \eta < 0.80$
  - Les pertes de lignes :  $0.90 < \eta < 0.99$
6. Calculer la vitesse angulaire pour imposer une rapidité spécifique  $\lambda = 3$  (rappel :  $\lambda = \frac{\omega R_e}{C_0}$ ).
- Quels peuvent être les inconvénients présentés par une hydrolienne rapide ?

## 2 Etude de l'élément de pale

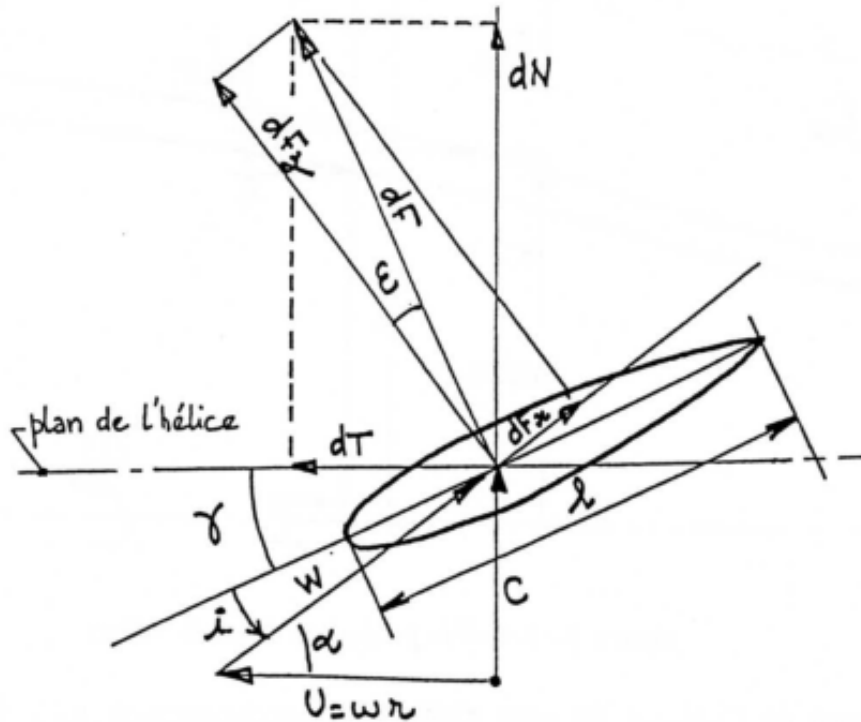


FIGURE 3 – Triangle des Vitesses, angles et efforts élémentaires à un rayon  $r$  quelconque

On notera sur la figure 3 :

- Les différents efforts hydrodynamiques générés par le courant relatif issu de la composition des vitesses absolue  $C$  et d'entraînement  $U = r\omega$ .
- Les différents angles :
  - $\alpha$  : angle du vent relatif
  - $\gamma$  : angle de calage de la pale
  - $i$  : angle d'incidence ( $i = \alpha - \gamma$ )

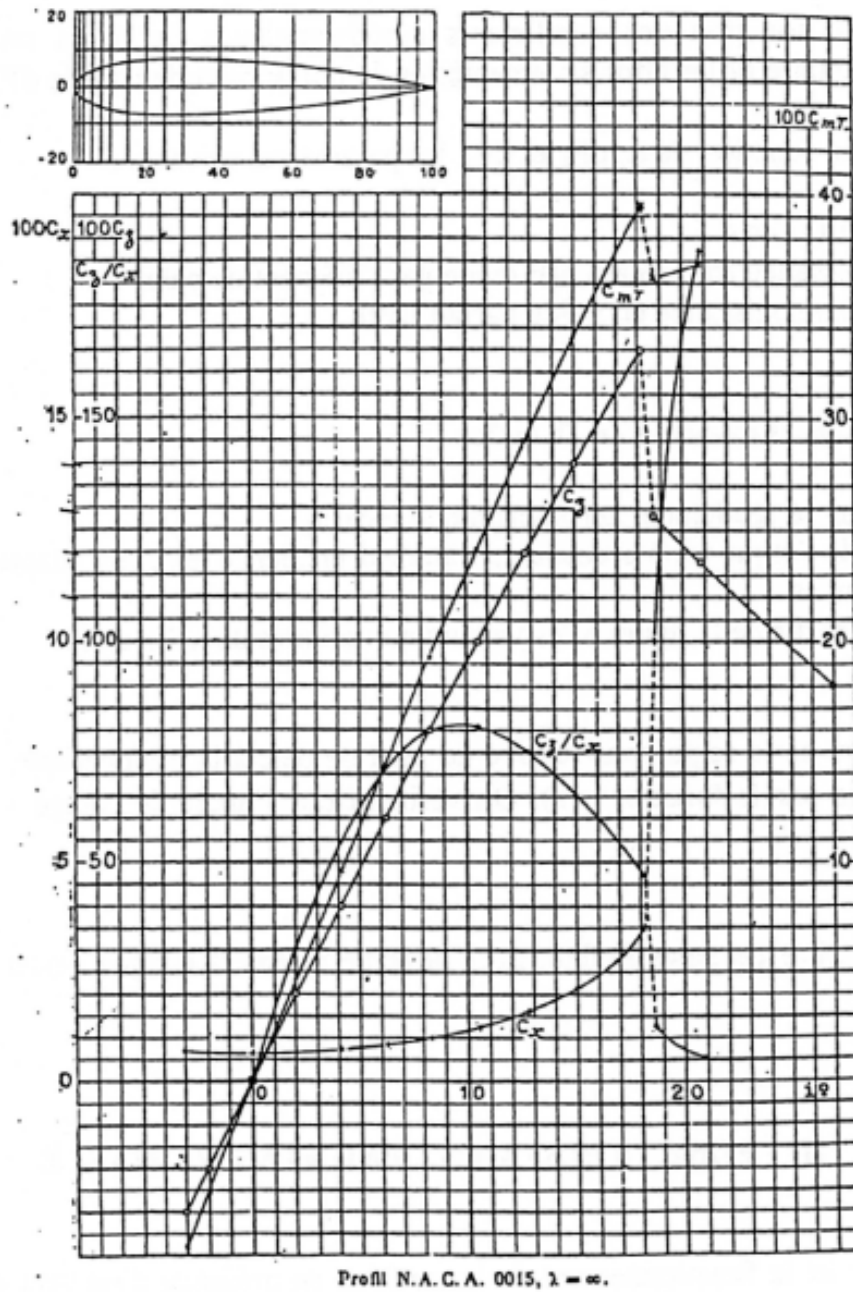


FIGURE 4 – Polaire du NACA0015

Les performances du profil isolé sont données en figure 4 pour un allongement infini. On notera le coefficient de portance  $C_z$ , le coefficient de traînée  $C_x$ , et l'angle de perte  $\epsilon$  tel que :

$$\tan\epsilon = \frac{C_x}{C_z}$$

7. Exprimer les efforts élémentaires de portance et de traînée  $dF_z$ , et  $dF_x$ , en fonction des coefficients hydrodynamiques du profil retenu et pour une envergure élémentaire  $dr$ .
8. Exprimer les paramètres suivants, en fonction de  $dF_z$ ,  $dF_x$ , et  $\alpha$  puis de  $dF$ ,  $\alpha$  et  $\epsilon$  :
  - (a) L'effort élémentaire utile  $dT$  et l'effort normal  $dN$ .
  - (b) La puissance élémentaire  $dP_u$  utile reçue par l'élément de pale.
  - (c) La puissance élémentaire  $dP_c$  fournie par le courant.
9. Partant des valeurs calculées en 8b et 8c :
  - (a) Déterminer le rendement aérodynamique local  $\eta$ .
  - (b) Déduire de l'expression précédente l'angle d'incidence  $i_0$  le mieux adapté pour optimiser ce rendement.
  - (c) Définir à partir de la figure 4 les valeurs numériques de  $i_0$ ,  $C_{z,0}$  et  $C_{x,0}$ .
10. Déterminer la loi de vrillage définie par  $\gamma(r)$  en suivant la règle constructive établie au 9b.
11. Le principe de détermination de la loi  $l(r)$  est le suivant :  
 On considère que la puissance récupérée par  $Z$  éléments de pale de corde  $l(r)$  correspond à la puissance maximum (limite de Betz) récupérable dans le tube de courant correspondant.  
 Déterminer la loi  $l(r)$  (on évaluera préalablement l'angle de perte  $\epsilon$  pour le négliger).

### 3 Cavitation

- Rappeler la condition d'apparition de la cavitation en fonction de  $\sigma$  le nombre de cavitation et de  $c_p$  le coefficient de pression le long du profil.

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_{sat}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$$

$$c_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$$

- La pression de vapeur saturante est donnée par la relation empirique de Rankine ( $T$  en K) :

$$P_{sat} = \exp\left(13.7 - \frac{5120}{T}\right)$$

Quelle est la position la plus défavorable sur l'hydrolienne relativement à la cavitation ?

- Calculer  $\sigma$  à cette position compte tenu des valeurs de  $h_0$  et de  $R_e$ .
- Relever sur la figure 5 la valeur minimum du  $c_p$ .
- Placer la valeur correspondante sur la carte de cavitation obtenue expérimentalement en tunnel hydrodynamique, figure 6.
- Est-ce que la machine est sujette à la cavitation ?
- S'il y a cavitation, quelles solutions sont envisageables ?
- Calculer la corde  $l(R_e)$ .
- Calculer le nombre de Reynolds correspondant  $\mathcal{R}$ .

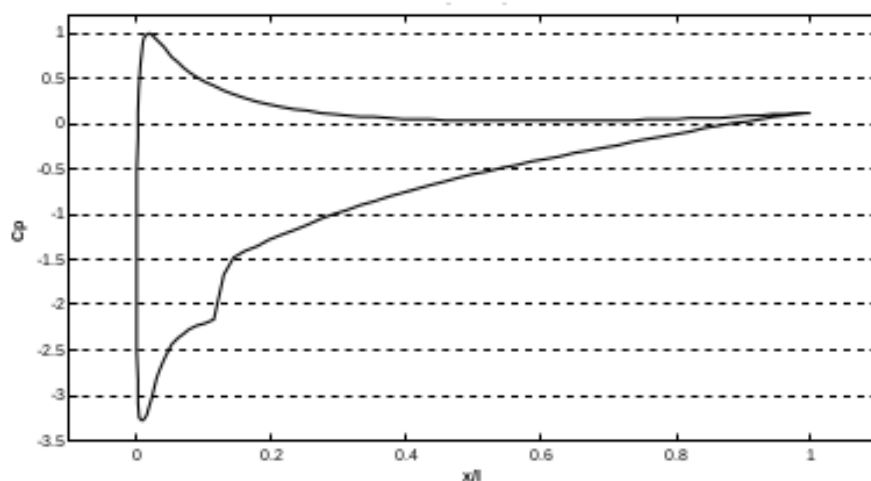


FIGURE 5 – Coefficient de pression, NACA0015,  $i = 10^\circ$ ,  $\mathcal{R} = 2 \times 10^6$

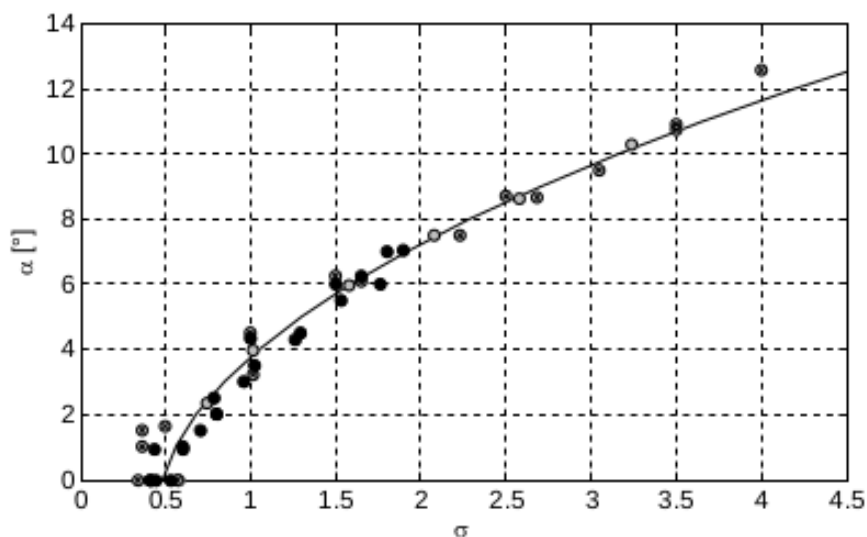


FIGURE 6 – Carte de cavitation du NACA0015