

## TD 6

# Turbovoile

### Mise en situation

#### Intérêt et fonction principale

Le système de propulsion par turbovoile est un concept de propulsion économique de navires par l'utilisation du vent comme source complémentaire d'énergie. Il permet ainsi de diminuer l'énergie nécessaire à une propulsion par hélice au moyen de moteurs.



Figure 1 : L'Alcyone est équipé de deux turbovoiles

L'Alcyone, ancien navire du commandant Jacques-Yves Cousteau, est propulsé par turbovoiles. Aujourd'hui, quelques prototypes de navires, plus imposants que l'Alcyone, sont en cours d'expérimentation.

#### Principe de fonctionnement

Ce système utilise un ingénieux moyen de contrôle de la couche limite développée par l'écoulement de l'air sur des cylindres métalliques, et donc par le contrôle de la traînée et de la portance : la turbovoile joue le rôle d'une aile d'avion.

Pour ce faire, chaque turbovoile est mise en rotation, créant ainsi l'effet Magnus : lorsqu'un corps est en rotation tout en se déplaçant dans l'air, la vitesse d'écoulement le long de sa paroi n'est pas la même d'un point à l'autre de celle-ci. Elle résulte de la combinaison de la vitesse de rotation et de la vitesse propre de l'objet. Par conséquent, elle sera moins importante sur les parties de la paroi où la vitesse de rotation est dans le sens opposé à la vitesse propre, et plus importante sur les parties de la paroi où les deux vitesses sont dans le même sens. Or, d'après le théorème de Bernoulli, le long d'un filet

d'écoulement, la pression est plus élevée si la vitesse d'écoulement est petite, et plus faible lorsque la vitesse d'écoulement est plus grande.

La pression sera donc plus importante du côté du corps où la vitesse de rotation est de sens inverse à la vitesse propre, et plus petite du côté où la vitesse de rotation et la vitesse propre sont de même sens.

Entre ces deux zones, il apparaît alors une force, due à la différence des pressions. On l'appelle force de Magnus, elle est dirigée suivant l'axe  $(O, \vec{y})$  passant par les deux points du profil où la vitesse d'écoulement est extrême.

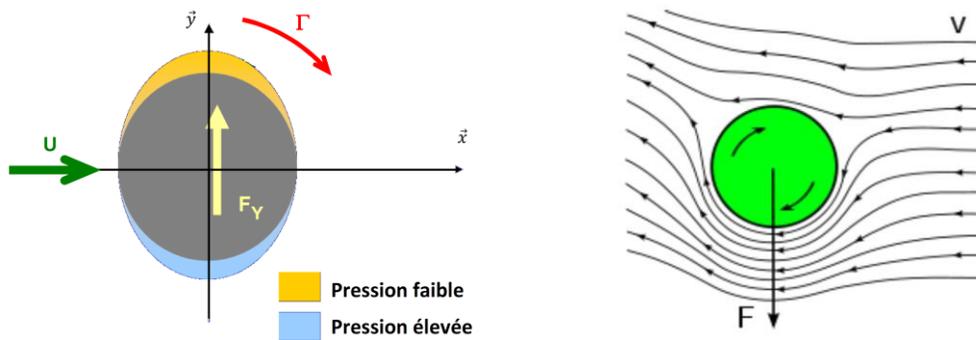


Figure 2 : Illustrations de l'effet Magnus

### Performance et cahier des charges

Les deux turbovoiles de l'Alcyone ont été dimensionnées pour que le navire atteigne une vitesse de 10 nœuds pour des vents soufflant à 30 nœuds, soit environ 19 km/h pour des vents soufflant à 56 km/h. Ainsi, ce système de propulsion lui permet de faire une économie de 35 % de carburant.

Critère	Niveau	Flexibilité
Vitesse du navire pour un vent de 56 km/h (km/h)	19	mini

Figure 3 : Extrait du cahier des charges

**Objectif :** On se propose de vérifier le critère en vitesse annoncé.

### Modélisation, paramétrage, données et hypothèses

On suppose un vent latéral constant, soufflant à  $V_0 = 56$  km/h, venant de bâbord, et une rotation en sens non trigonométrique des turbovoiles, comme indiqué sur le schéma ci-dessous.

On récupère alors une force propulsive orientée suivant  $\vec{y}$ .

Les turbovoiles sont composées de deux rotors verticaux de 2 m de diamètre et de 10,2 m de hauteur, en rotation autour de leur axe géométrique  $(O, \vec{z})$ , à la vitesse angulaire de 200 tr/min.

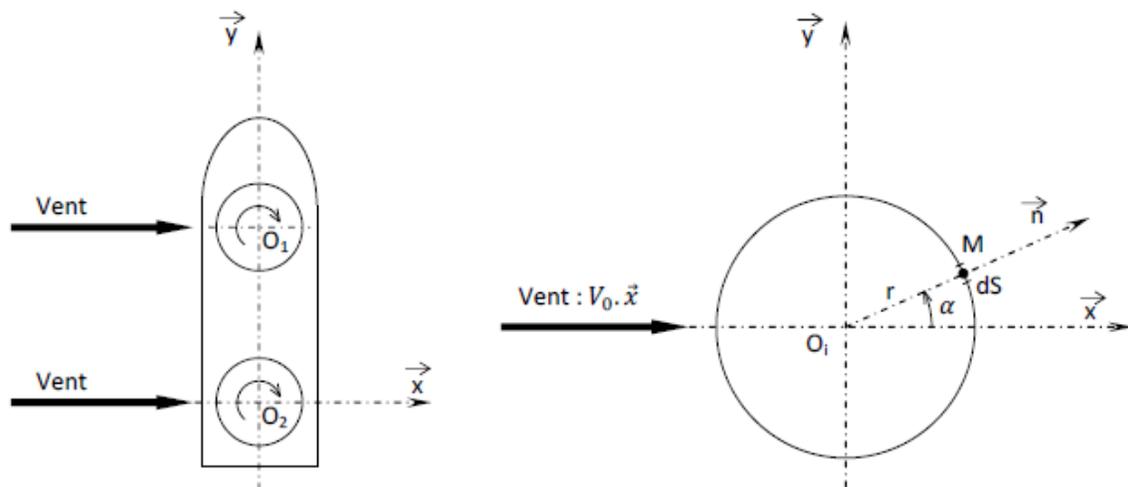
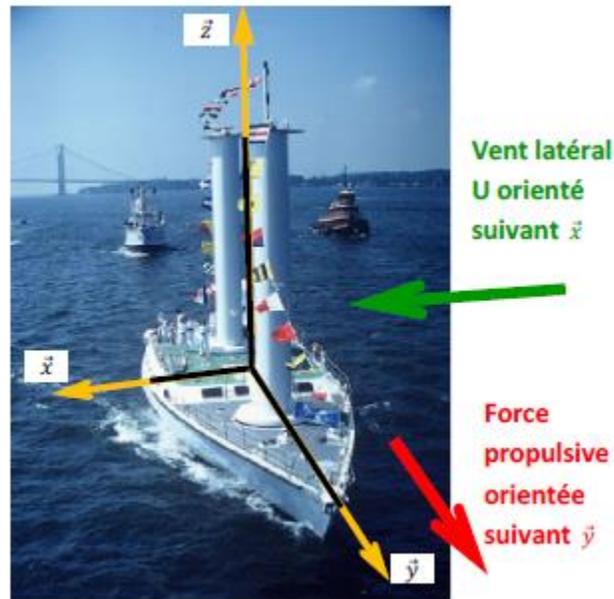


Figure 4 : Paramétrage du système étudié

On montre en aérodynamique que, dans de tels écoulements, la répartition de la pression de l'air sur la surface cylindrique est :

$$\overline{p(M)} = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{r \cdot \omega}{V_0} - 2 \cdot \sin \alpha \right)^2 \right] \cdot \vec{n}$$

Avec :

- $\rho$  la masse volumique de l'air :  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  ;
- $V_0$  la vitesse du vent selon  $\vec{x}$  ;
- $\omega$  la vitesse de rotation du cylindre autour de son axe géométrique ;
- $r$  le rayon du cylindre ;
- $h$  la hauteur du cylindre ;
- $\vec{n}$  le vecteur unitaire normal à l'élément de surface  $dS$  du cylindre et orienté vers l'extérieur ;
- $\alpha$  l'angle  $(\vec{x}, \vec{n})$ .

**Aide pour les calculs :**

- $\int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \, d\alpha = \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \, d\alpha = \pi$
- $\int_0^{2\pi} \sin \alpha \, d\alpha = \int_0^{2\pi} \cos \alpha \, d\alpha = \int_0^{2\pi} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \, d\alpha = \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \, d\alpha = \int_0^{2\pi} \sin^3 \alpha \, d\alpha = 0$

## Détermination de la vitesse d'avance du navire

**Q1 :** Exprimer l'élément de surface  $dS$  sur lequel s'exerce la pression  $\overrightarrow{p(M)}$ .

**Q2 :** Exprimer le vecteur unitaire  $\vec{n}$  dans le repère cartésien.

**Q3 :** Donner alors l'expression de la résultante des actions locales aérodynamiques  $\overrightarrow{R_{air \rightarrow C_1}}$  en fonction de  $\rho$ ,  $V_0$ ,  $r$ ,  $h$  et  $\omega$ .

**Q4 :** Montrer que  $\overrightarrow{M_{O_1, air \rightarrow C_1}} = \vec{0}$  si  $O_1$  se trouve sur l'axe et au milieu du cylindre  $C_1$ .

**Q5 :** Calculer alors  $\overrightarrow{M_{O_2, air \rightarrow C_1}}$  avec  $\overrightarrow{O_2 O_1} = 10 \cdot \vec{y}$ .

**Q6 :** En déduire le torseur de l'action de l'air sur le navire. On négligera l'action de l'air sur la coque devant celle sur les cylindres.

**Q7 :** Faire l'application numérique.

On modélise l'action de l'eau sur la coque du navire par un glisseur  $\overrightarrow{R_{eau \rightarrow navire}} = -k_v \vec{v}$  s'appliquant au centre de gravité  $G$  du navire.  $\vec{v} = v \cdot \vec{y}$  est la vitesse du navire.  $k_v$  un coefficient de frottement visqueux qui dépend de la masse du navire, de la forme et du matériau de la carène. Ici, on prend  $k_v = 8370 \text{ N/(m/s)}$ .

**Q8 :** En écrivant le principe fondamental de la dynamique au navire évoluant à vitesse constante, vérifier le cahier des charges.