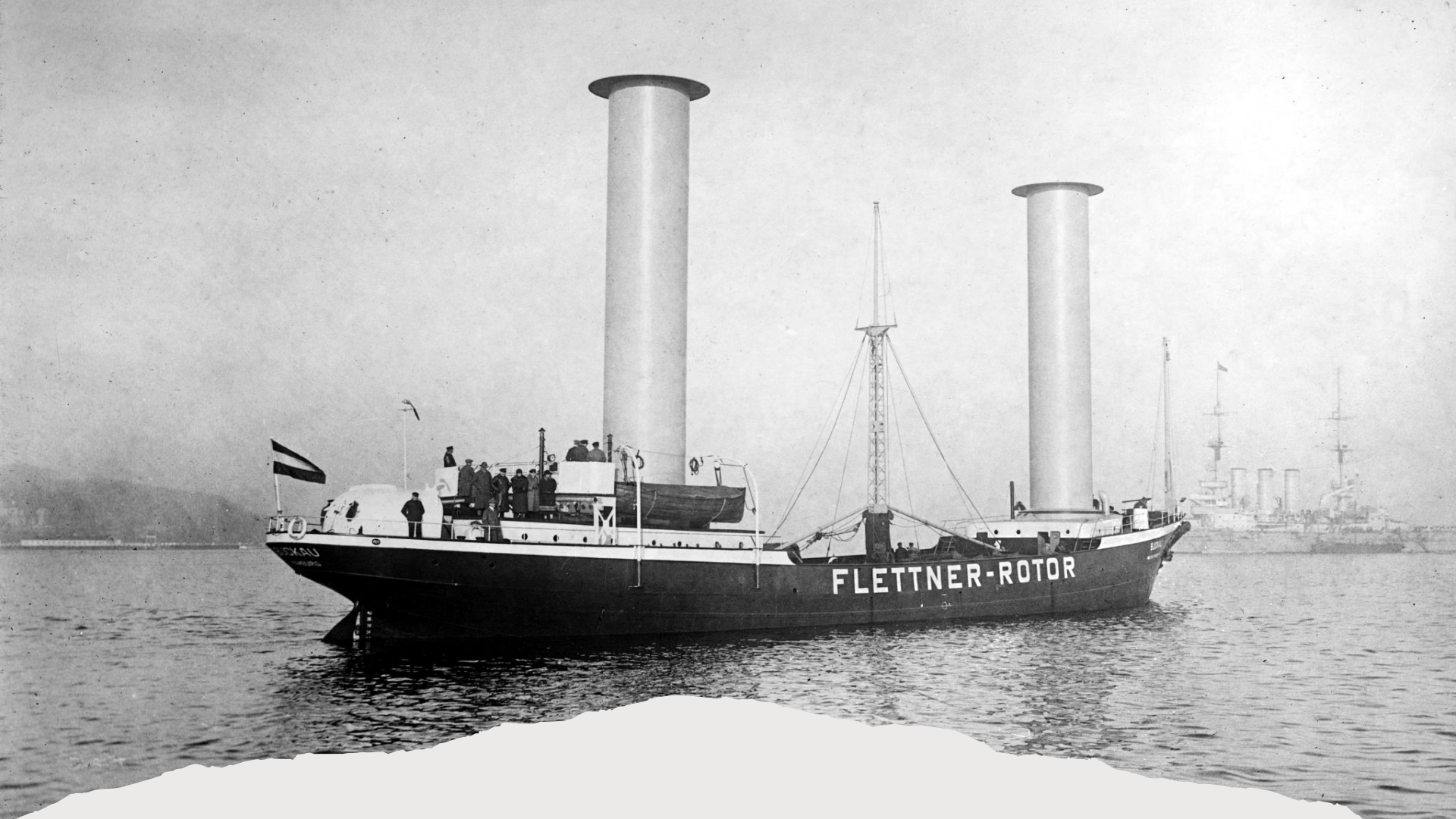




Rotor Flettner : utiliser le vent pour propulser demain

Contexte

Fioul lourd :

La combustion d'une tonne de fioul lourd génère 3,114 tonnes de CO₂

Consommation :

250 millions de tonnes par an (*d'après [Le Temps](#), média suisse*)

Soit :

- 778,5 millions de tonnes de CO₂ par an.
- 1,5 fois les émissions annuelles de la France.
- Cela équivaut à la consommation annuelle de 169 millions de voitures.



Lien avec le thème de l'année

Thème : Transition, transformation, conversion

- **Transition** vers un mode de propulsion écologique pour les navires
- **Conversion** de l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique du bateau



https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:E-SHIP_1_%2820037221244%29.jpg

Problématique :

Dans quelles mesures les technologies alternatives à base d'énergies renouvelables peuvent-elles aider le transport maritime à relever les défis énergétiques et écologiques ?

Plan

I. Le Rotor Flettner

II. Voile solide et souple

**III. Retour sur le rotor
Flettner**

**IV. Approfondissements
sur SolidWorks**

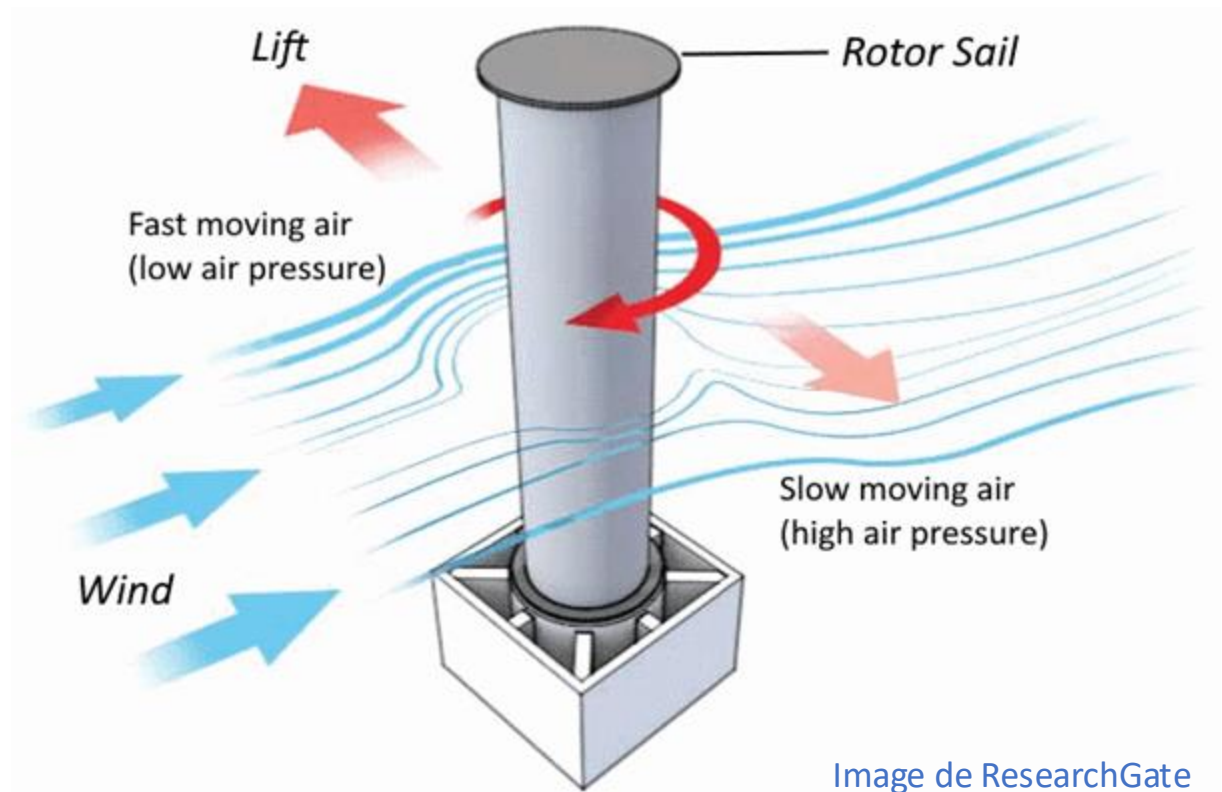


I ~ Le rotor Flettner

A. Théorie

Fonctionnement d'un rotor Flettner

- L'effet Magnus



Mise en équation du phénomène

$$F = 2\pi R^2 \rho u \omega h$$

Avec :

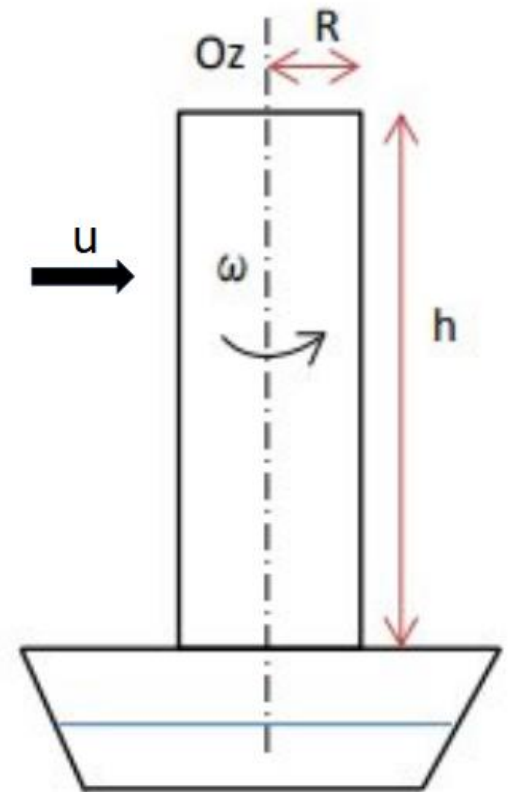
R : rayon du rotor

h : longueur du rotor

ρ : la masse volumique de l'air

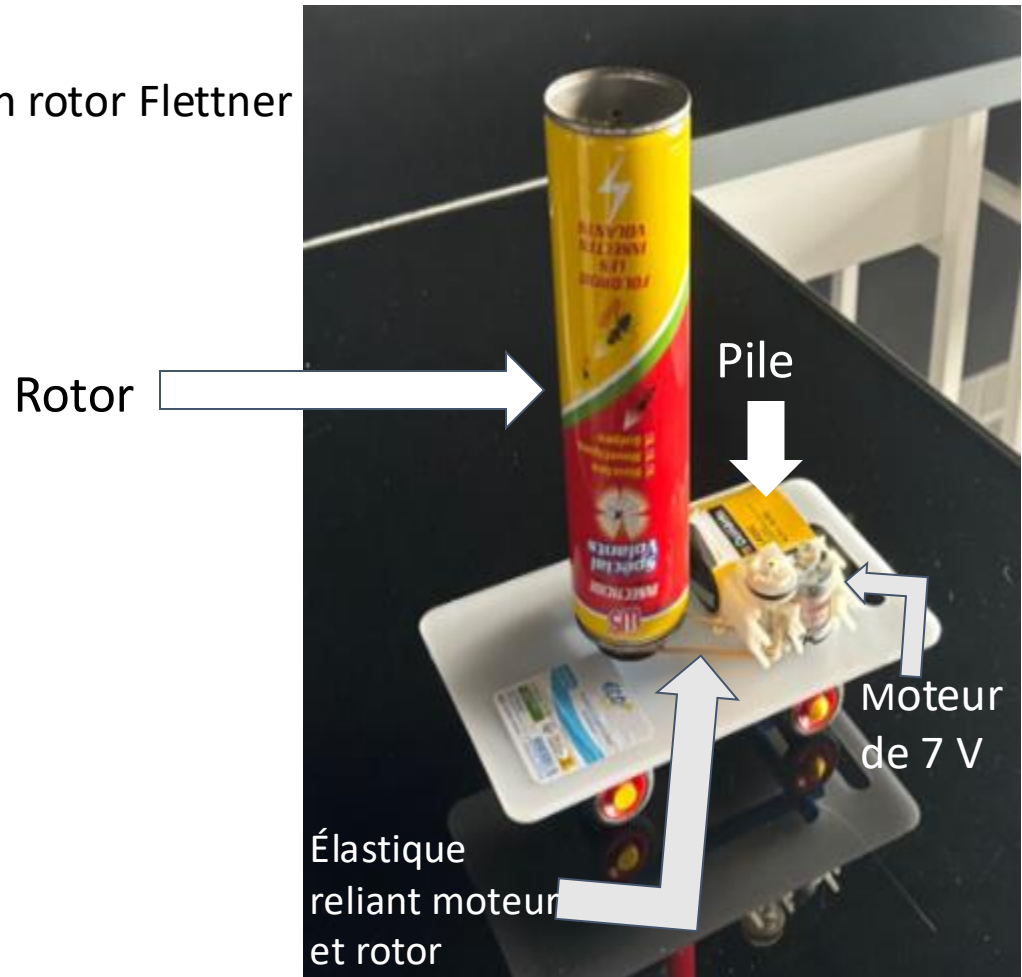
ω : vitesse de rotation du rotor

u : vitesse du vent

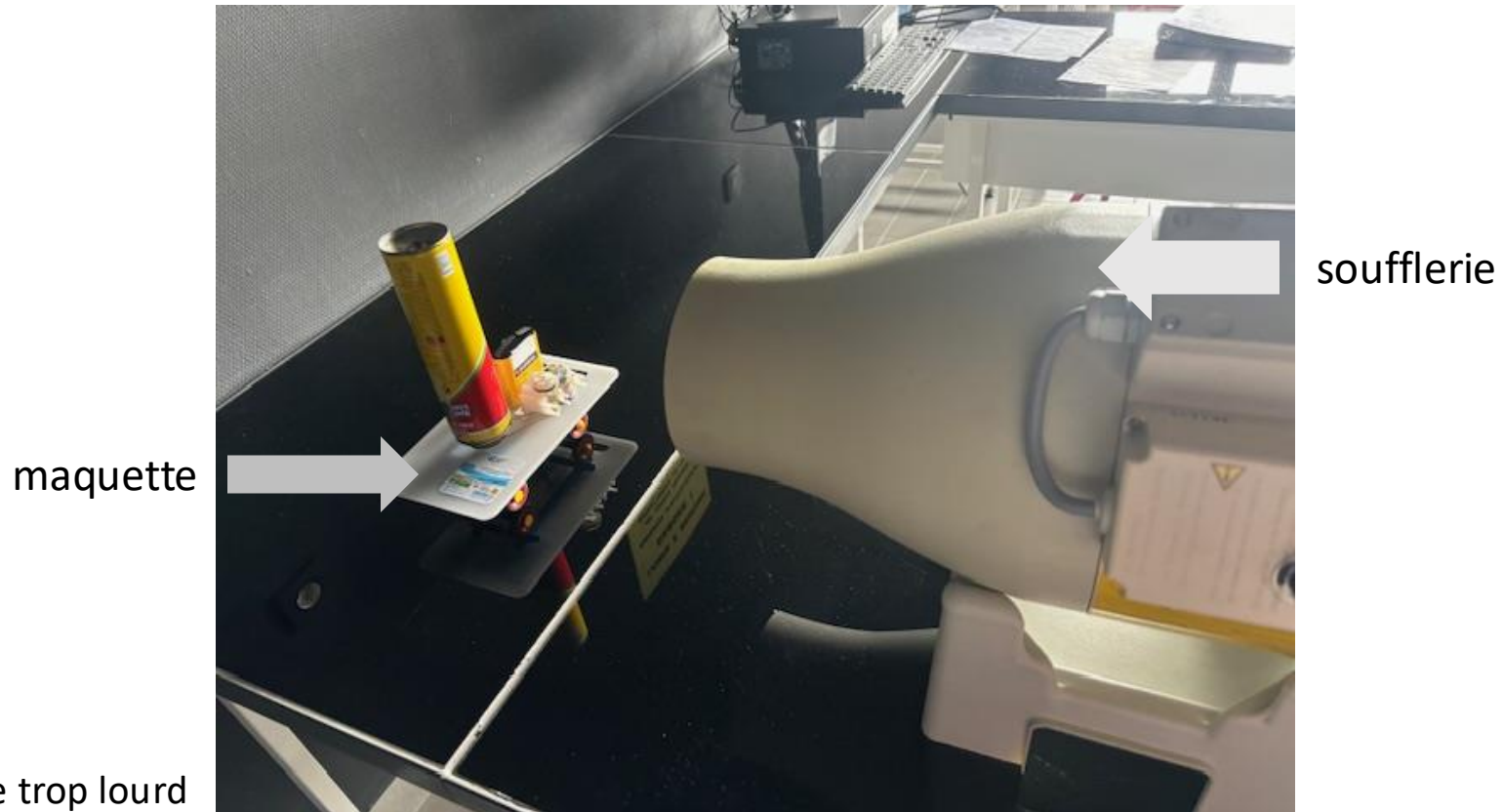


B. Création d'une maquette et expérimentations

1. Création d'un véhicule équipé d'un rotor Flettner



B. Création d'une maquette et expérimentations



Problème : véhicule trop lourd

Solution envisagée : coussin d'air pour réduire les frottements

B. Création d'une maquette et expérimentations

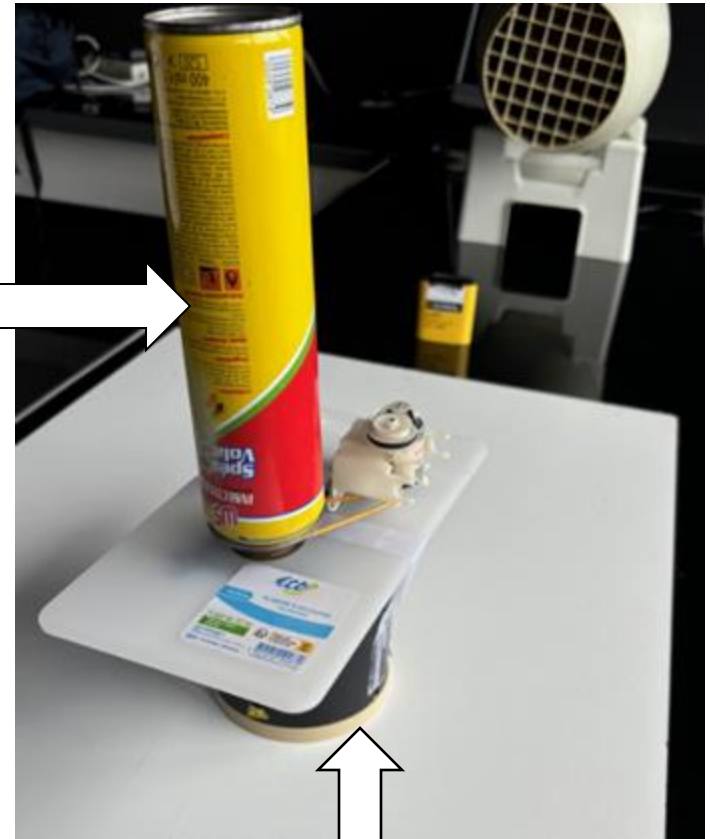
2. Expérience avec le coussin d'air



Problème : le mobile vibre excessivement et se déplace de manière instable

Solution envisagée : trouver un autre mobile

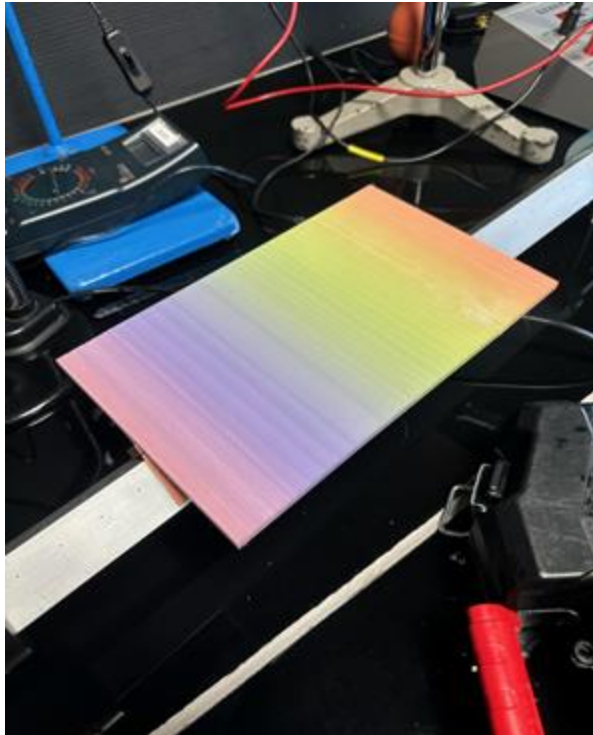
Maquette



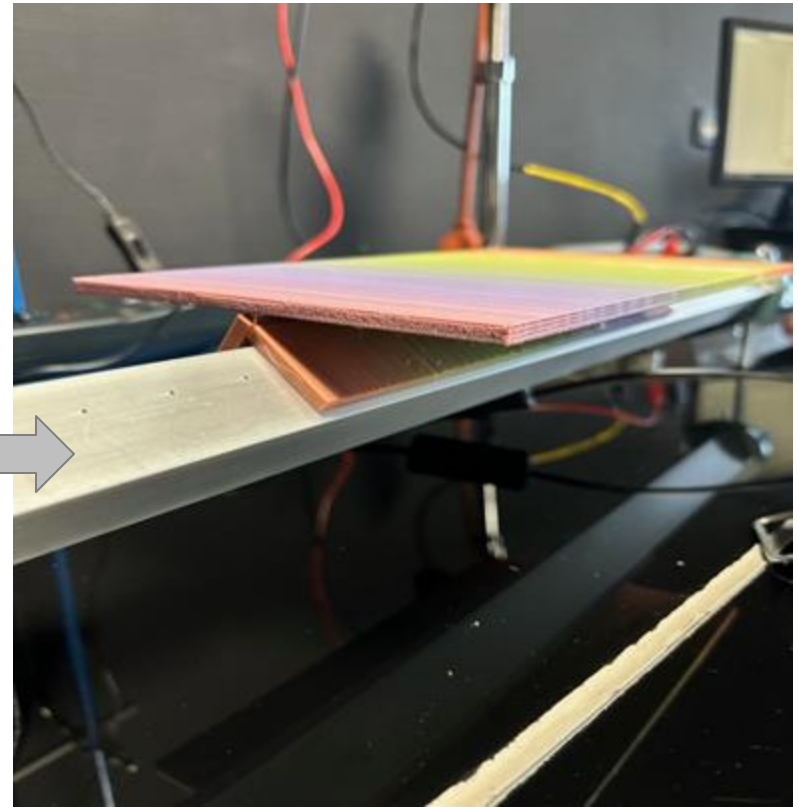
Mobile

B. Création d'une maquette et expérimentations

3. Modélisation sur SolidWorks d'un support pouvant soutenir notre mobile sur le banc d'air



Banc
souffleur
d'air



Conclusion : le mobile est trop lourd pour se déplacer

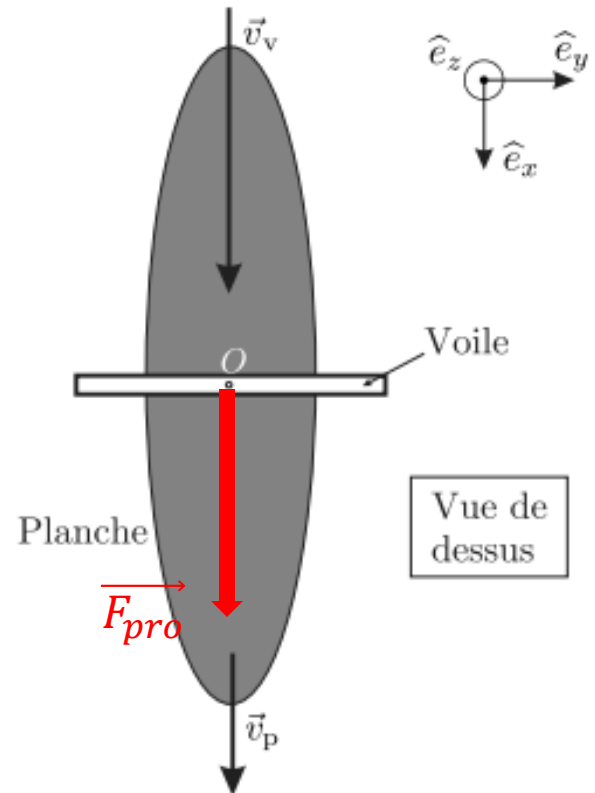


II ~ Voile solide et souple

A. Équation de la force propulsive

La force propulsive de la voile solide est :

$$\vec{F}_{pro} = \frac{1}{2} \rho_a C_v S v_v^2 \hat{e}_x$$



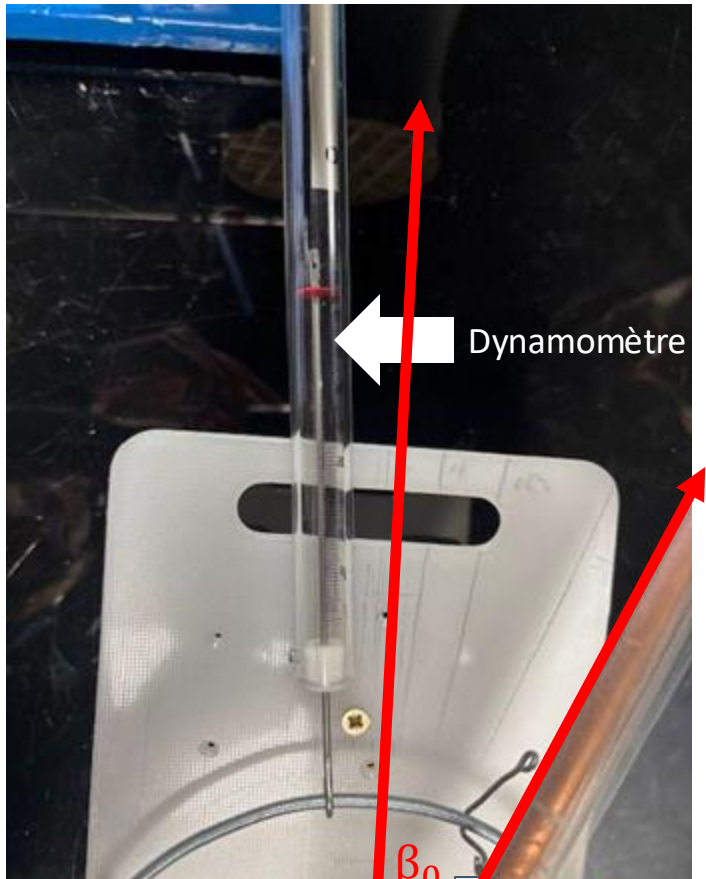
B. Expérimentations avec la voile solide

But :

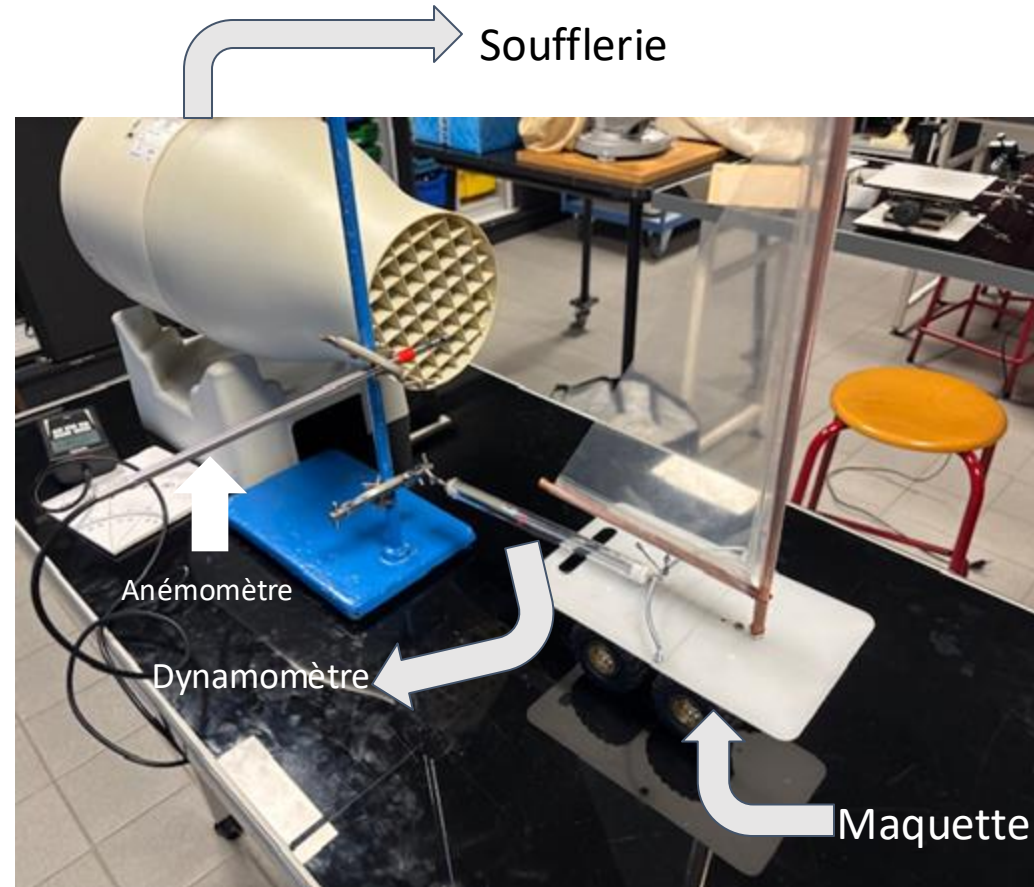
obtenir des valeurs de force propulsive pour différents angles de voiles.



B. Expérimentations avec la voile solide

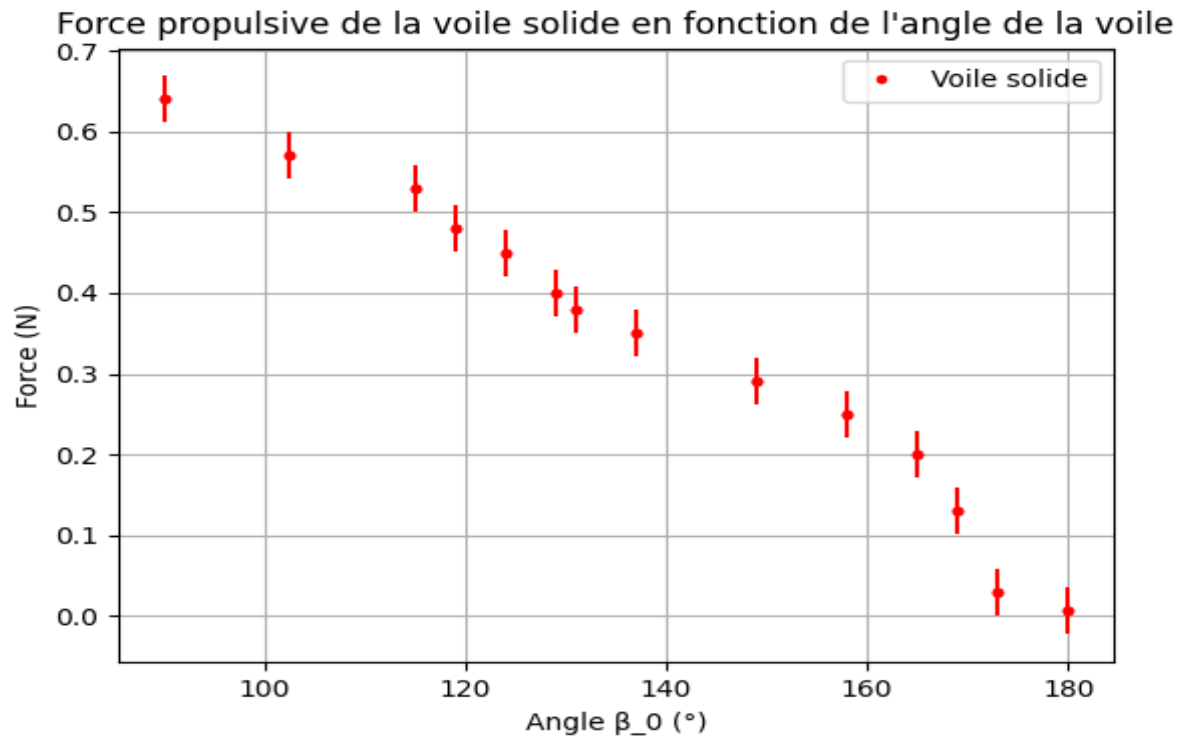


Crochet



B. Expérimentations avec la voile solide

Résultats expérimentaux :



Conclusion :

on obtient une force maximale de 0,64 N

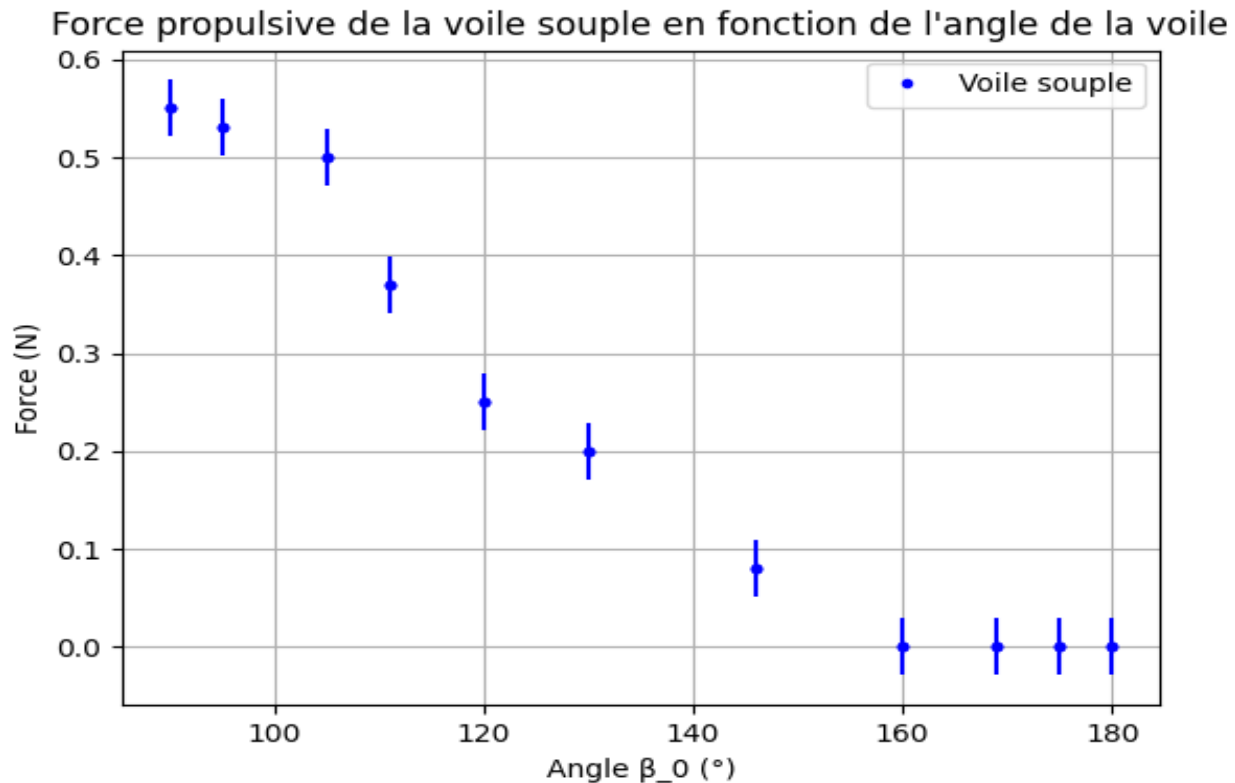
C. Expérimentations avec une voile souple

Expériences réalisées par mon binôme :



C. Expérimentations avec une voile souple

Résultats expérimentaux fournis par mon binôme :



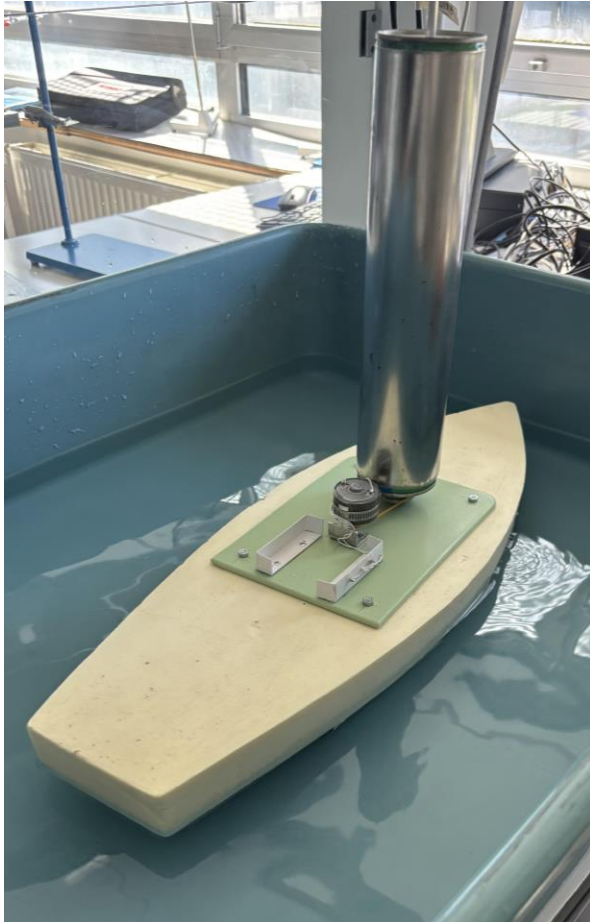
Conclusion :

on obtient une force maximale de 0,55 N



III. Retour sur le rotor Flettner

A ~ Une deuxième maquette



Expérience réalisée par mon binôme

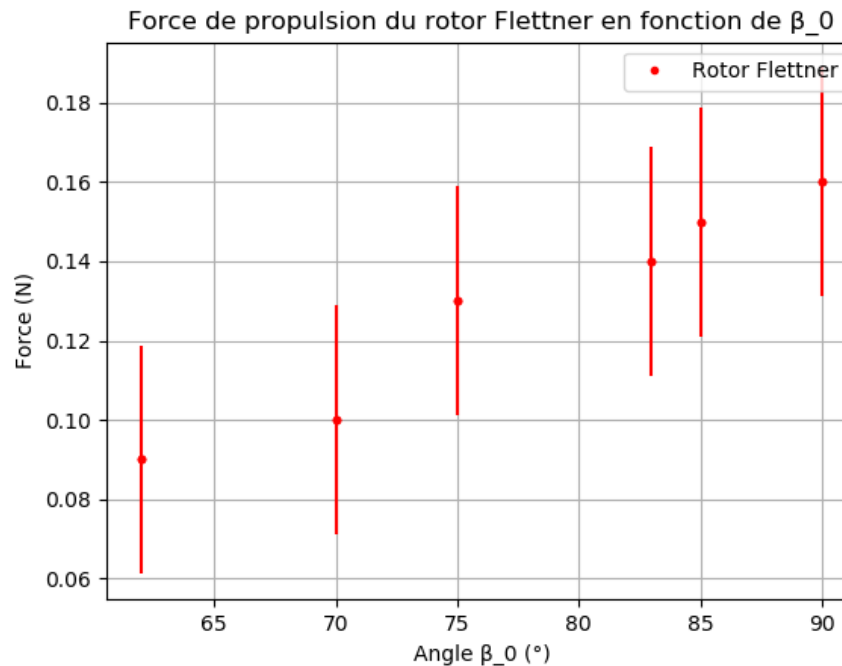
Conçu à l'aide :

- D'un moteur de lecteur CD de 7 V
- D'une pile
- D'un tube en aluminium de même hauteur que le mât de la voile

B ~ Expérimentation avec le rotor Flettner

Résultats expérimentaux :

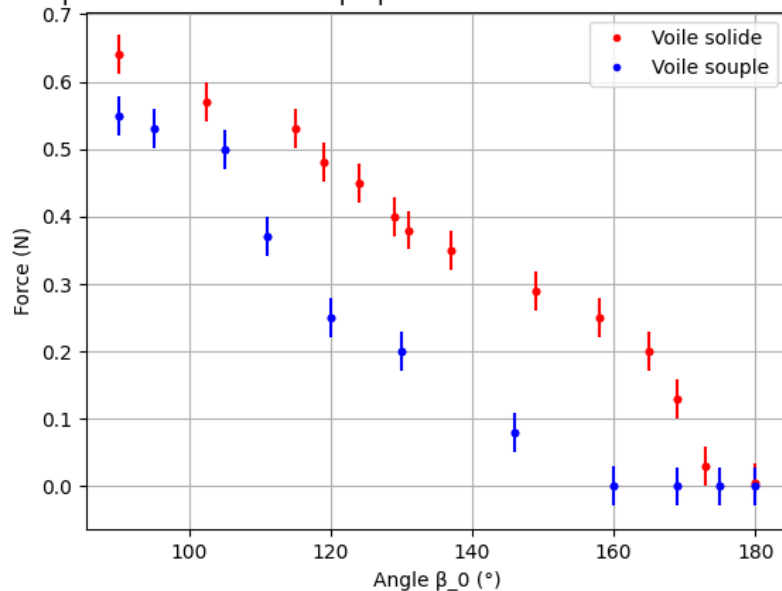
- Aucune mesure possible en dessous de 60°



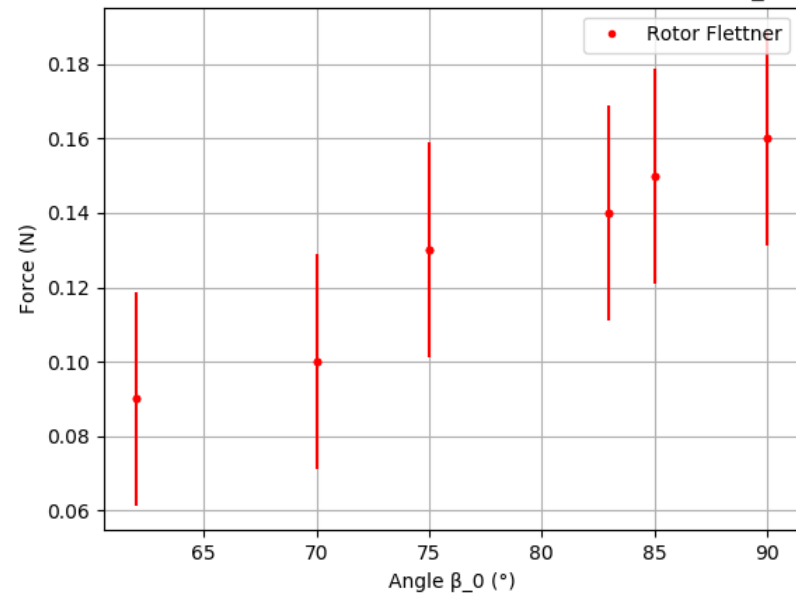
Conclusion : on obtient une force propulsive de **0.16N**

C ~ Comparaison des modèles expérimentaux

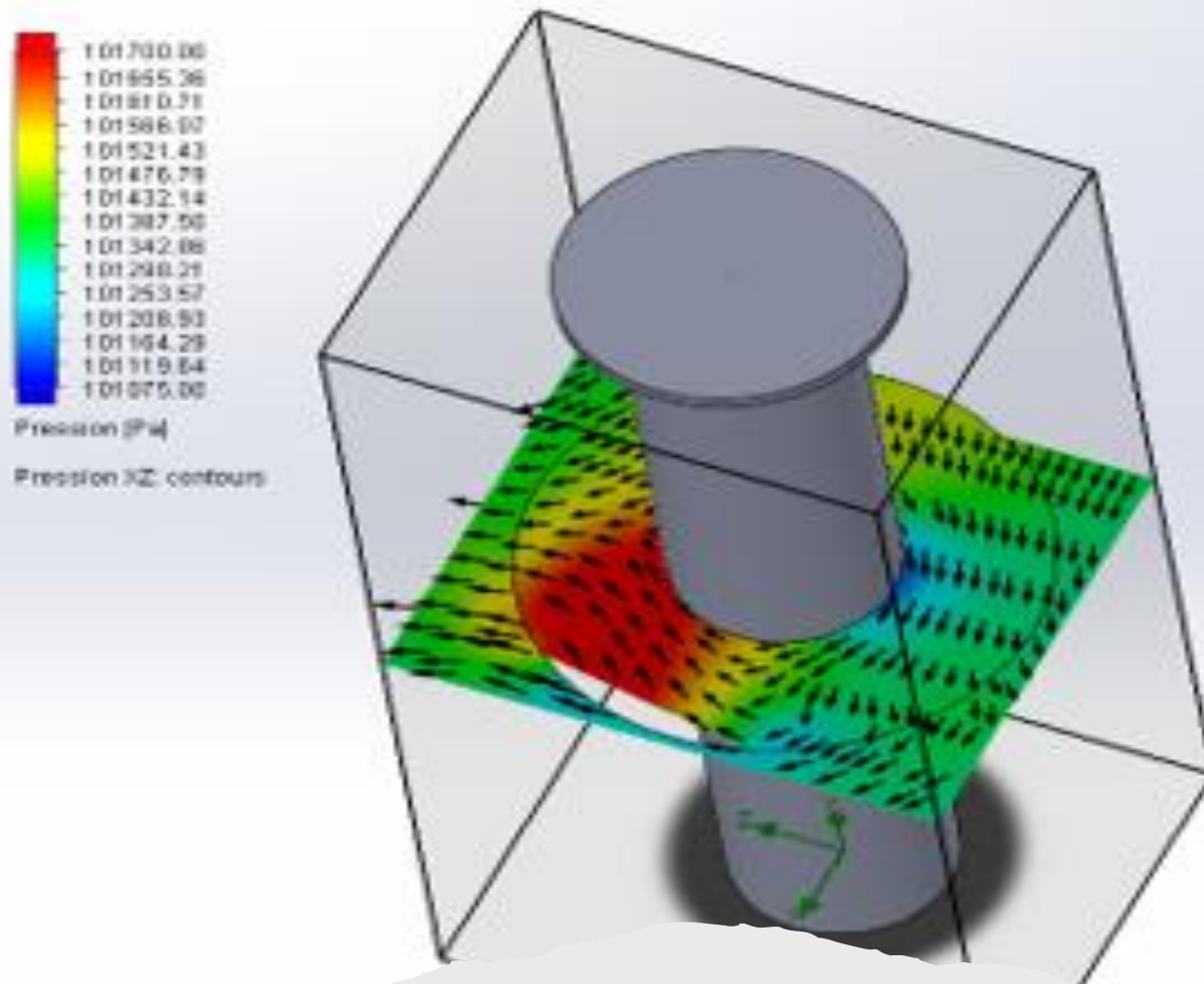
Comparaison de la force de propulsion de la voile solide à la voile souple



Force de propulsion du rotor Flettner en fonction de β_0

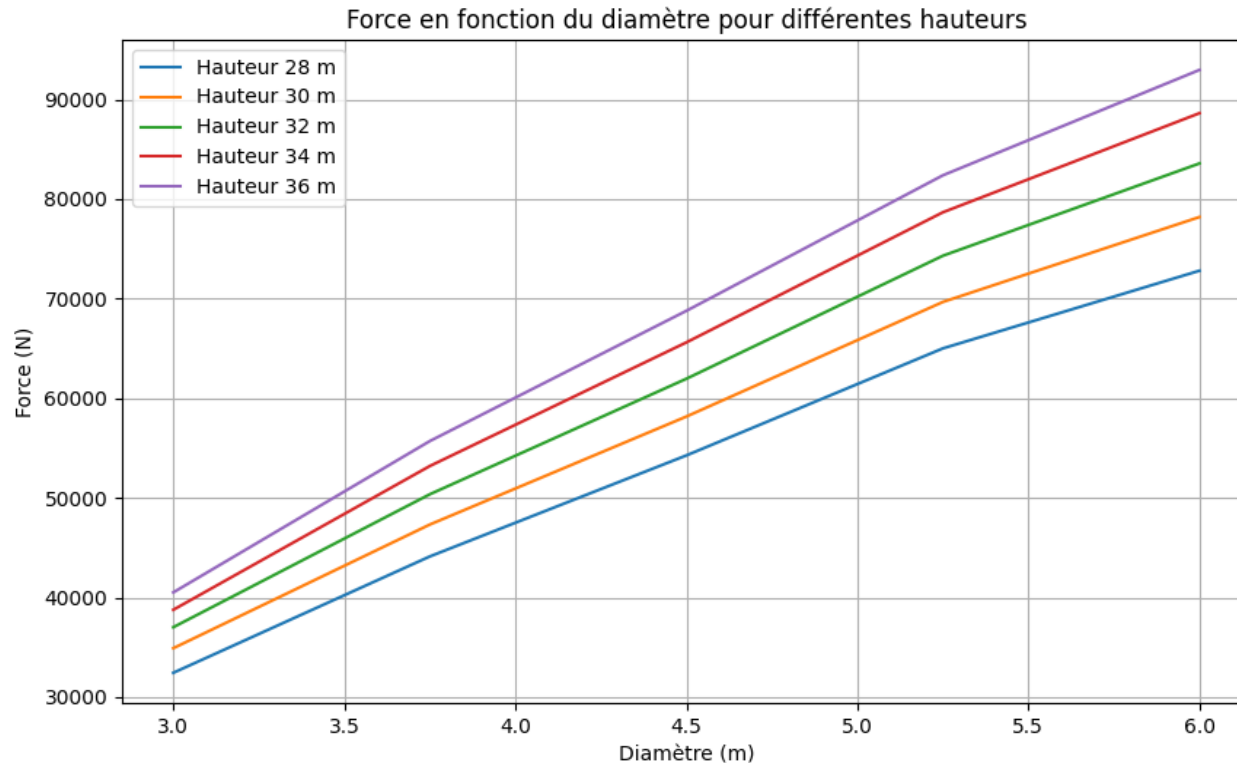


Conclusion : pour des modèles réduits, le rotor Flettner ne constitue pas une solution avantageuse



IV ~ Une modélisation sur SolidWorks

Comparaison de la force de propulsion d'un rotor pour différentes hauteurs et différents diamètres



On constate l'influence du rayon faisant augmenter de manière quadratique la force

Comparaison finale

	Force propulsive	Surface	Force surfacique
Rotor <u>Flettner</u>	94 000 N	678 m ²	$F_{SR} = 139 \text{ N.m}^{-2}$
Voile Solide	61 000 N	678 m ²	$F_{SV} = 90,3 \text{ N.m}^{-2}$

$$F_{SR} \geq 1,54 F_{SV}$$

Comment expliquer le fonctionnement à grande échelle ?

Par les écoulements similaires :

Il faut même nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{\mu v L}{\eta}$$

Avec :

μ : masse volumique du fluide (ici air)

v : vitesse caractéristique

L : longueur caractéristique

η : viscosité dynamique (ici de l'air)

$$R_{e_{réel}} = \frac{\mu_{air} v_{réel} L_{réel}}{\eta_{air}} = R_{e_{maquette}} = \frac{\mu_{air} v_{maquette} L_{maquette}}{\eta_{air}}$$

$$\underline{R_{e_{réel}} = 3,9 \cdot 10^6}$$

Pour un même nombre de Reynolds on a $v_{maquette} = 970 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Émissions de CO₂ sauvées grâce aux rotors Flettner

Étude réalisée par l'A.T.M.A en 2014

Caractéristique du bateau :

Type de propulseurs	Ailes aspirées	développement CRAIN
Nombre de propulseurs	4	
Hauteur d'un propulseur	24m	
Surface d'un propulseur	96 m ²	



Les rotors Flettner ont permis d'économiser 3,8t/j de fuel soit 12t de CO₂ par jour soit 4 380 tonnes de CO₂ évitées par an.

Cela correspond aux émissions annuelles de 952 voitures thermiques.

Conclusion

- Les rotors Flettner sont une solution non négligeable pour le secteur maritime
- Cependant ils restent une aide complémentaire à la propulsion et ne sont pas adaptés à toutes les échelles
- À petite échelle : privilégier les voiles.
- Grande échelle : opter pour les rotors Flettner

Annexe

Annexe

Aperçu des principaux combustibles utilisés en navigation

Carburants marins les plus utilisés + Type de bateau associé

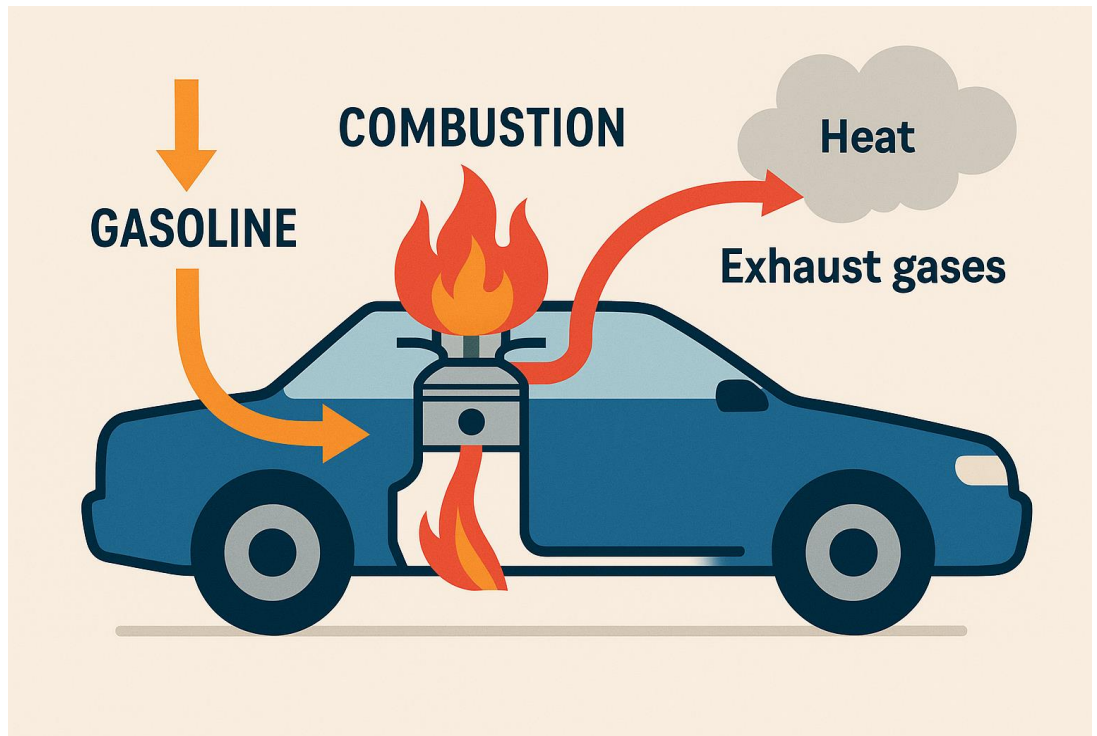
Carburant	Type de bateau	Caractéristiques principales
 Fioul lourd (HFO)	Grands cargos, navires de croisière, tankers	Très économique, visqueux, polluant, nécessite chauffage
 MDO / MGO	Ferries, navires côtiers, navires militaires	Plus propre que HFO, pas de chauffage requis, plus coûteux
 Diesel marin classique	Bateaux de pêche, vedettes, bateaux de plaisance diesel	Facile à utiliser, très courant sur petits navires
 GNL (LNG)	Ferries modernes, cargos récents, navires "verts"	Faible pollution, stockage cryogénique, en expansion

Autres combustibles alternatifs : méthanol, ammoniac, hydrogène, GPL

Annexe

Combustion du diesel:

Le diesel rejette environ 2,68 tonnes de CO₂ pour chaque tonne de diesel brûlée.



Annexe

Calcul de l'émission en tonnes de CO₂ par an:

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Consommation de fioul} \times \text{Facteur d'émission}$$

Consommation = 250 millions de tonnes par an

Facteur d'émission = 3,114 tCO₂ par tonne de fioul

D'après une étude par Citepa et l'ABC, en 2022 les Français consommaient en moyenne 8 tonnes de CO₂.

$$\frac{778\,500\,000}{8} = 97,312,500 \text{ Français}$$

Le secteur maritime représente 1,5 fois les émissions de la France sur an.

D'après D-Carbyze une voiture émet annuellement en moyenne 4,6 tonnes de CO₂ par an:

$$\frac{778\,500\,000}{4,6} = 169,0 \text{ millions de voitures}$$

Annexe

Le nombre de molécule entrant en collision avec la voile pendant dt est :

$$N = nSv_v\tau$$

On considère que les molécules cèdent intégralement leur quantité de mouvement à la voile :

$$\Delta\vec{p}_{molécule} = -mv_v\widehat{e}_x$$

Par conservation de la quantité de mouvement on a :

$$\Delta\vec{p}_{voile} = -\Delta\vec{p}_{molécule} = mv_v\widehat{e}_x$$

Puisque le choc dure un temps τ , la force subit par la voile est :

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}_{voile}}{dt} = \frac{\vec{p}_{voile}}{\tau} = \frac{mv_v\widehat{e}_x}{\tau}$$

Puisque N molécules cèdent leurs quantités de mouvement on a :

$$\vec{F} = N\vec{f} = \rho_a S v_v^2 \widehat{e}_x$$

Annexe

Démo force propulsive du rotor Flettner

Hypothèses :

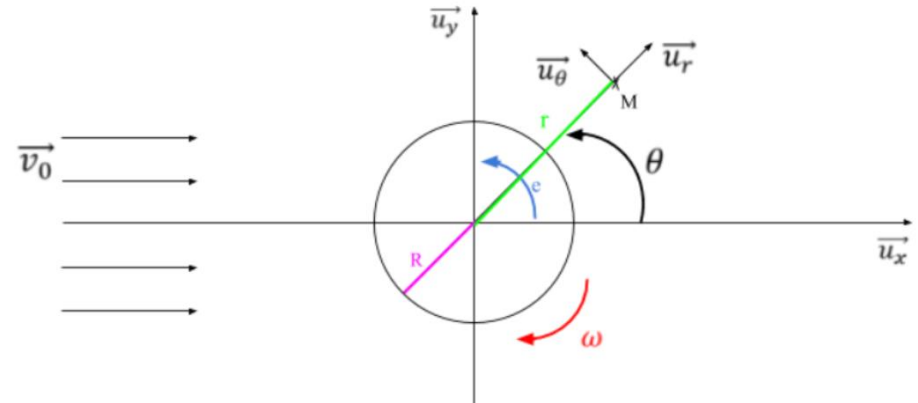
- Le fluide est supposé irrotationnel et parfait

Le théorème de Bernoulli donne :

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g z + P = cste$$

Soit ϕ le potentiel des vitesses le Laplacien en cylindrique donne:

$$\Delta\phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial\theta^2} = 0$$



Annexe

Démo force propulsive du rotor Flettner

On pose :

$$\phi(r, \theta) = f(r)\cos(\theta)$$

On obtient :

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} - \frac{f}{r^2} = 0$$

Soit :

$$f(r) = \left(Ar + \frac{B}{r} \right) \cos(\theta)$$

La résolution avec les conditions initiales donne :

$$\phi(r, \theta) = v_0 \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos(\theta)$$

De plus : $\vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}(\phi)}$

On obtient :

$$\vec{v} = v_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) (\cos(\theta) \overrightarrow{u_r} + \sin(\theta) \overrightarrow{u_\theta}) + \frac{\omega R^2}{r} \overrightarrow{u_\theta}$$

Annexe

Démo force propulsive du rotor Flettner

Par le théorème de Kutta-Joukowski on a :

$$F = \rho v \Gamma$$

Avec Γ la circulation donné par :

$$\Gamma = \oint \vec{v}_\theta \cdot d\vec{l} \Leftrightarrow \Gamma = \int_0^{2\pi} v_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \sin(\theta) + \left(\frac{\omega R^2}{r}\right) r d\theta$$

$$\Leftrightarrow \Gamma = v_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \int_0^{2\pi} \sin(\theta) + \omega R^2 \int_0^{2\pi} d\theta$$

$$\Leftrightarrow \Gamma = 2\pi\omega R^2$$

Soit finalement :

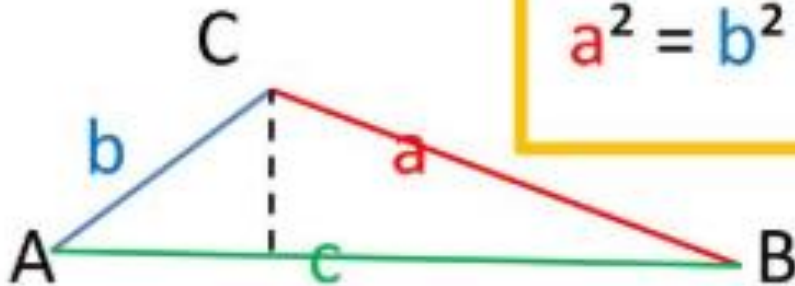
$$F = 2\pi\rho v\omega R^2$$

Annexe

Mesure des angles pour le rotor

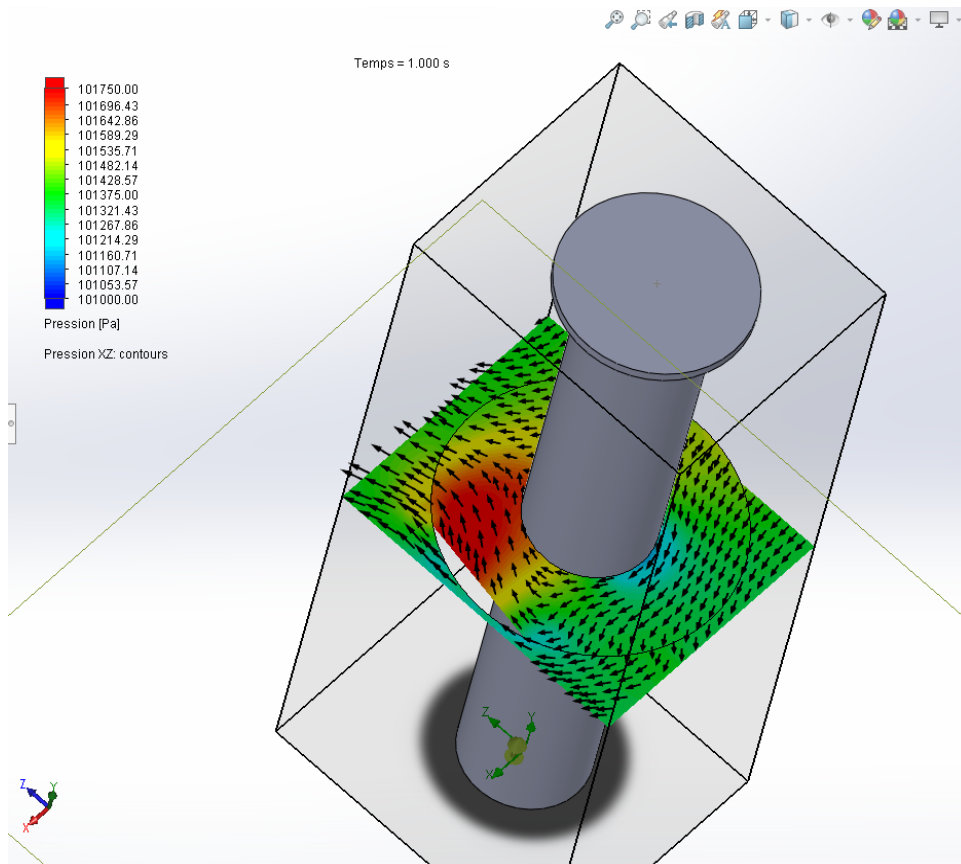
Formule d'Al-Kashi

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \hat{A}$$



Annexe

Détails des valeurs pour l'étude paramétrique du rotor Flettner sur SolidWorks



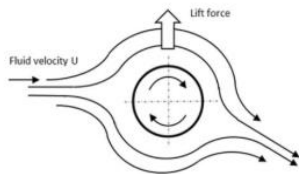
$$u = 10 \text{ m/s}$$
$$\omega = 3.33 \text{ rad/s}$$

Annexe

Une entreprise française utilisant les rotors Flettner:

1. ÉNERGIE DU VENT

A l'aide de voiles modernes (rotors Flettner), l'énergie du vent est utilisée pour propulser le navire.



2. PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

La vitesse du navire fait tourner des hydroliennes qui produisent ainsi de l'électricité

3. STOCKAGE D'ÉNERGIE

L'électricité produite est stockée à bord. En fonction des marchés, elle est stockée dans des batteries, ou convertie en hydrogène par électrolyse ou en carburant liquide (méthanol) par une installation de power-to-X.



Annexe

Programme Python pour les différents rotors

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Nouvelles données
hauteurs = np.array([
    28, 30, 32, 34, 36])

diametres = np.array([
    3, 3.75, 4.5, 5.25, 6])

# Les forces sont données pour 6 colonnes (6 diamètres), donc on doit ajuster
forces_15 = np.array([
    [32436.48179, 44118.73908, 54262.98749, 65009.91491, 72808.80824],
    [34904.29725, 47322.7654, 58164.82503, 69672.37925, 78198.92842],
    [37012.31852, 50362.83453, 61961.08832, 74312.89137, 83579.28083],
    [38763.80782, 53198.6331, 65611.10954, 78675.60381, 88625.7361],
    [40509.18694, 55704.93212, 68781.29354, 82389.27794, 92970.22686],
    [40797.76907, 56323.3264, 69623.74535, 83625.21864, 94358.74071]
])

forces = forces_15[:5, :5]

# Tracé
plt.figure(figsize=(10, 6))

for i in range(len(hauteurs)):
    plt.plot(diametres[:5], forces[i], label= 'Hauteur ' + str(hauteurs[i]) + ' m')

plt.title('Force en fonction du diamètre pour différentes hauteurs')
plt.xlabel('Diamètre (m)')
plt.ylabel('Force (N)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Annexe

Programme Python pour la comparaison voile souple voile solide

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

force_solide = [0.64, 0.57, 0.53, 0.48, 0.45, 0.4, 0.38, 0.35, 0.29, 0.25, 0.2, 0.13, 0.03, 0.006]
beto0_solide = [90, 102, 115, 119, 124, 129, 131, 137, 149, 158, 165, 169, 172, 180]

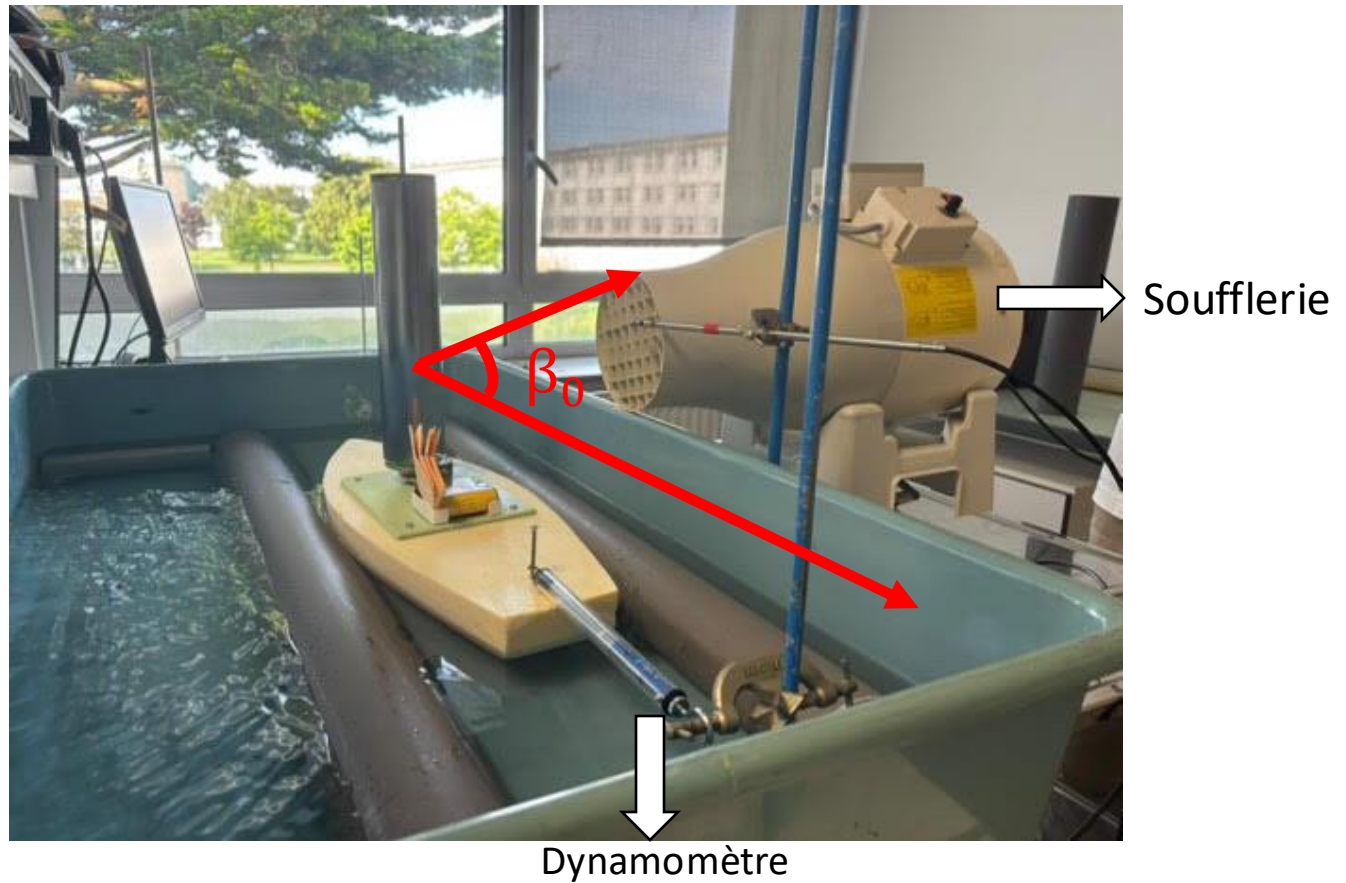
force_souple = [0.55, 0.53, 0.5, 0.37, 0.25, 0.2, 0.08, 0.001, 0, 0, 0]
angle_souple = [90, 95, 105, 111, 120, 130, 146, 160, 169, 175, 180]

u_force = 0.05 / np.sqrt(3)
u_angle = 0.05 / np.sqrt(3)

plt.figure(1)
plt.plot(beto0_solide, force_solide, '.', color = 'red', label = 'Voile solide')
plt.errorbar(beto0_solide, force_solide, yerr = u_force, fmt='.', color='red') # barre d'incertitude
plt.errorbar(beto0_solide, force_solide, xerr = u_angle, fmt='.', color='red') # barre d'incertitude
plt.plot(angle_souple, force_souple, '.', color = 'blue', label = 'Voile souple')
plt.errorbar(angle_souple, force_souple, yerr = u_force, fmt='.', color='blue') # barre d'incertitude
plt.errorbar(angle_souple, force_souple, xerr = u_angle, fmt='.', color='blue') # barre d'incertitude
plt.xlabel('Angle  $\beta_0$  (°)')
plt.ylabel('Force (N)')
plt.title('Comparaison de la force de propulsion de la voile solide à la voile souple')
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()
```

Annexe

Expérimentation avec le rotor Flettner



Annexe

Comment fonctionne un anémomètre à fil chaud

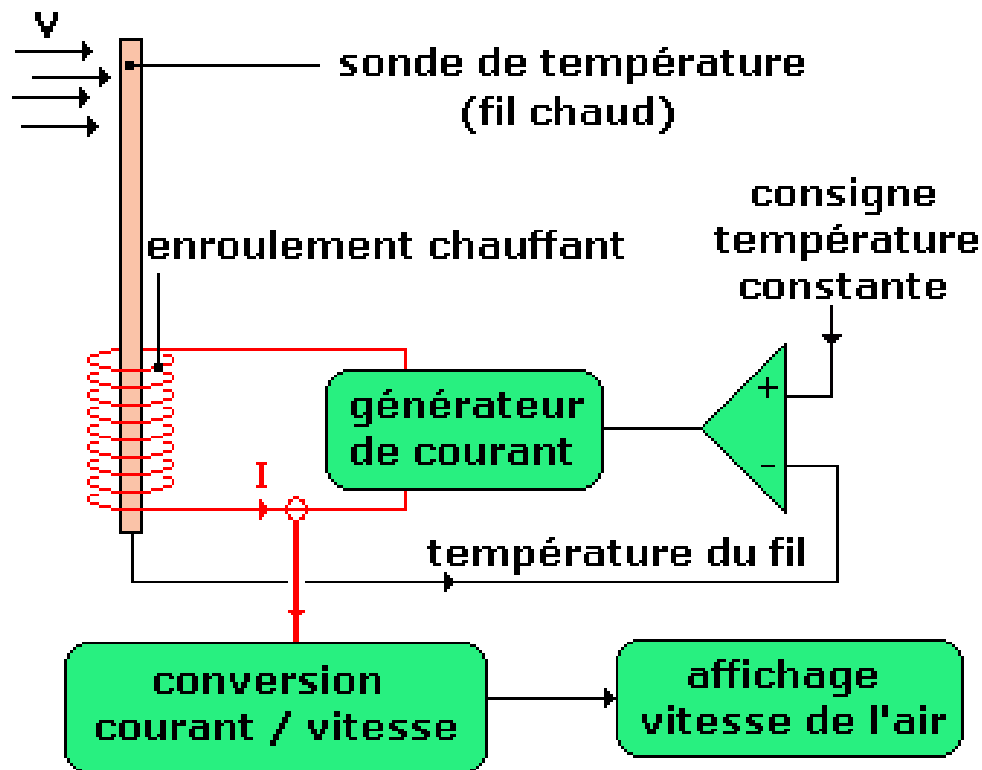


Image de la-fayette