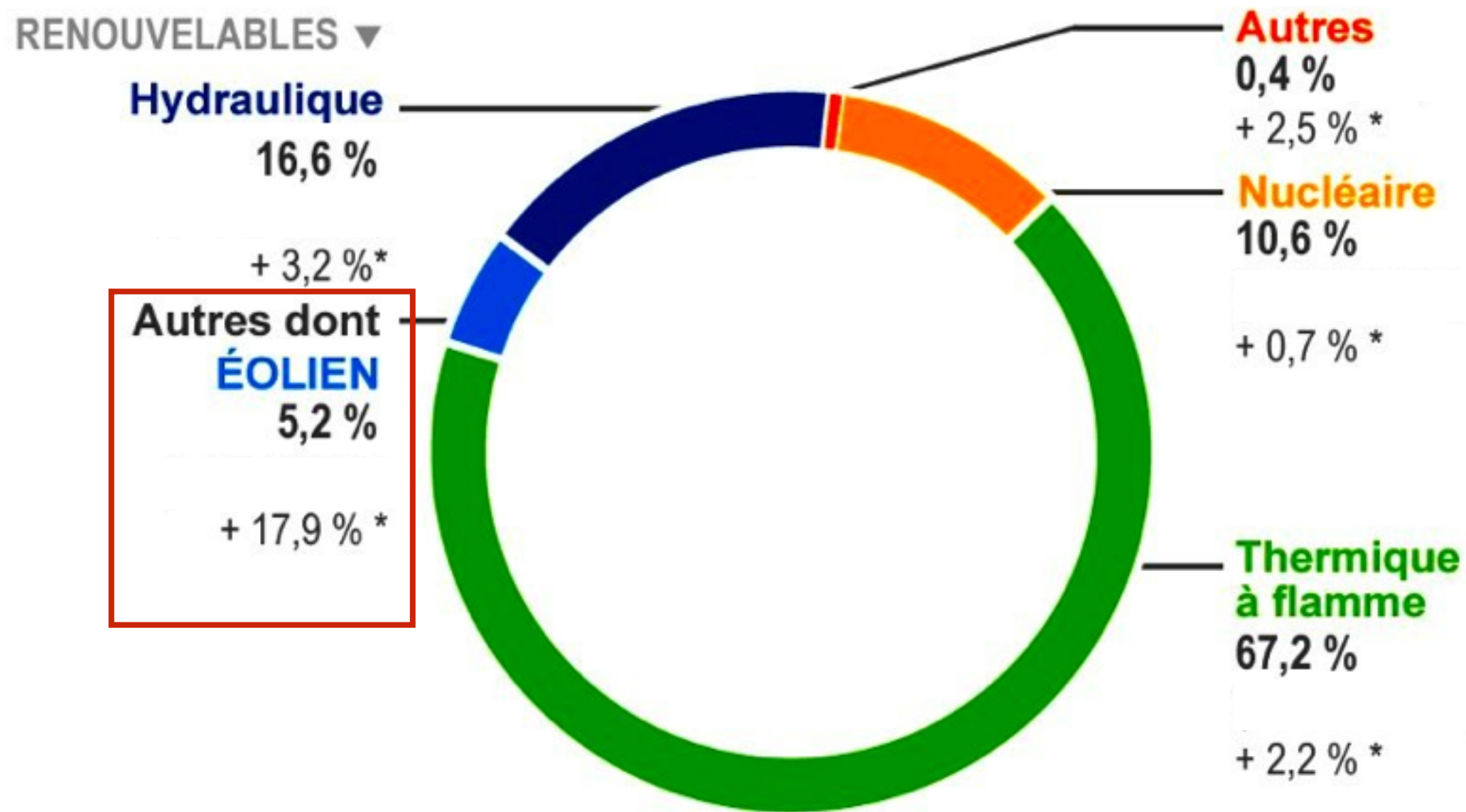


Modélisation de
l'écoulement de Betz et
rendement d'hélices
réceptrices

Introduction, contextualisation:



Répartition de la production d'électricité mondiale en 2014

Objectif, démarche:

Comment optimiser la forme des hélices pour avoir un meilleur rendement?

Objectif, démarche:

Comment optimiser la forme des hélices pour avoir un meilleur rendement?

Stratégie adoptée:

1.Utiliser un modèle réduit
reproduisant l'écoulement
de Betz

Contrainte



Vérifier que ce modèle
expérimental est conforme à la
théorie

Objectif, démarche:

Comment optimiser la forme des hélices pour avoir un meilleur rendement?

Stratégie adoptée:

1.Utiliser un modèle réduit reproduisant l'écoulement de Betz

Contrainte

Vérifier que ce modèle expérimental est conforme à la théorie

2.Comparer des hélices de forme et taille différentes

Mesure des vitesses d'écoulement

Objectif, démarche:

Comment optimiser la forme des hélices pour avoir un meilleur rendement?

Stratégie adoptée:

1.Utiliser un modèle réduit reproduisant l'écoulement de Betz

Contrainte

Vérifier que ce modèle expérimental est conforme à la théorie

2.Comparer des hélices de forme et taille différentes

Mesure des vitesses d'écoulement

3.Calculer le rendement de chacune

Utilisation de la théorie de Betz

Objectif, démarche:

Comment optimiser la forme des hélices pour avoir un meilleur rendement?

Stratégie adoptée:

1.Utiliser un modèle réduit reproduisant l'écoulement de Betz

Contrainte

Vérifier que ce modèle expérimental est conforme à la théorie

2.Comparer des hélices de forme et taille différentes

Mesure des vitesses d'écoulement

3.Calculer le rendement de chacune

Utilisation de la théorie de Betz

4.Déduire celle qui détient le meilleur rendement et quels sont les facteurs qui l'influencent.

Discussions et limites

1. Théorie de l'écoulement de Betz et mise en place expérimentale

1.1. Modèle théorique de Betz

1.2. Montage expérimental

2. Validité du modèle: visualisation des lignes de champ

2.1. Première tentative: utilisation d'une fumée

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau

3. Mesures de vitesses et comparaison des hélices

3.1. Calcul de rendement

3.2. Vitesse de rotation limite et couple exercé par l'hélice

3.3. Comparaisons et conclusion

1. Théorie de l'écoulement de Betz et mise en place expérimentale

1.1. Modèle théorique de Betz

1.2. Montage expérimental

2. Validité du modèle: visualisation des lignes de champ

2.1. Première tentative: utilisation d'une fumée

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau

3. Mesures de vitesses et comparaison des hélices

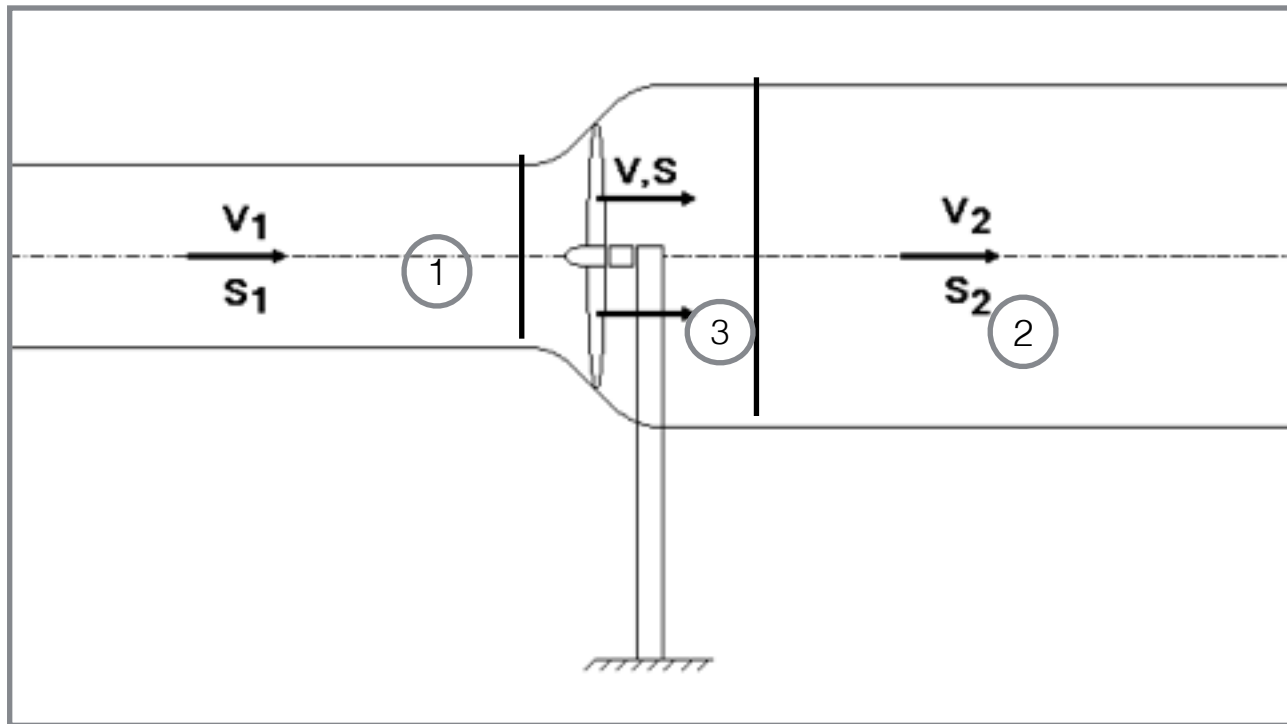
3.1. Calcul de rendement

3.2. Vitesse de rotation limite et couple exercé par l'hélice

3.3. Comparaisons et conclusion

1.1. Modèle théorique de Betz:

- Permet de déterminer la quantité d'énergie cinétique que l'on peut extraire d'un flux d'air



- Hypothèses:
 - écoulement incompressible et stationnaire
 - fluide parfait
 - l'air forme un cylindre infini en amont et en aval
 - pas d'interactions extérieures sur l'hélice

Notations:

v_1 : vitesse du vent loin de l'hélice en amont

v_2 : vitesse à l'infini en aval de l'hélice

v : vitesse à la traversée des pales de l'éolienne

s_1 : section du cylindre en amont

s_2 : section du cylindre en aval

s : section à la traversée de l'éolienne

P : puissance recueillie par l'éolienne

Q : puissance du vent

ρ : masse volumique de l'air

1.1. Modèle théorique de Betz

Prévisions:

Ecoulement de l'air modifié:

- Ralentissement du flux d'air
- Elargissement du tube de champ

- On définit un système fermé S' constitué des zones 1,2 et 3. Un bilan d'énergie cinétique donne la puissance P absorbée par le rotor :

$$P = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2)$$

- On définit Q la puissance cinétique du vent:

$$Q = \frac{1}{2} \rho S v_1^3$$

- Rendement de l'hélice = coefficient de puissance Cp:

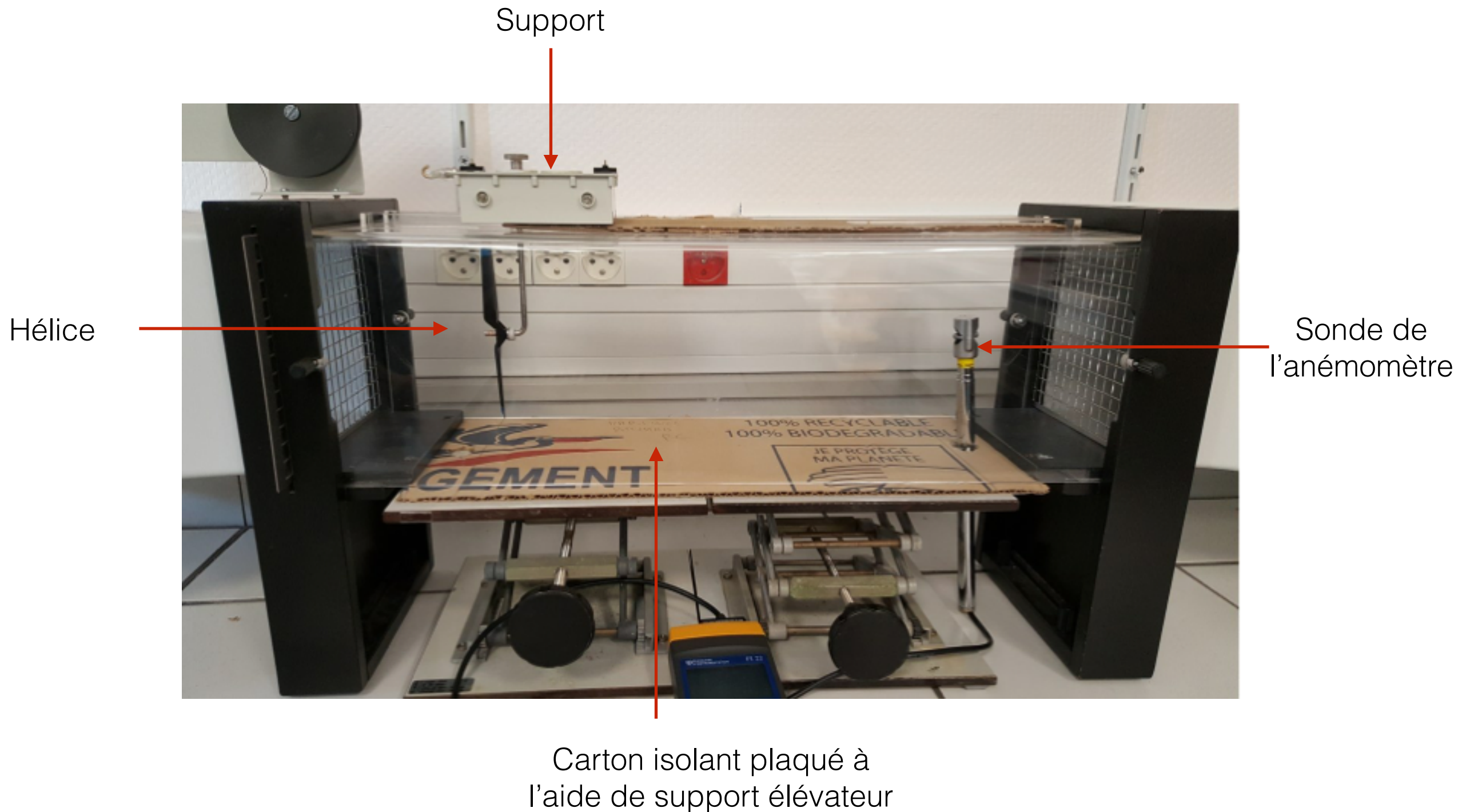
$$C_p = \frac{P}{Q}$$

$$\text{Coefficient de puissance max } C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

1.2. Montage expérimental: mesure de vitesse

Appareils utilisés:

- Tunnel aérodynamique Leybold Didactic
- Anémomètre à sonde déportée



1. Théorie de l'écoulement de Betz et mise en place expérimentale

1.1. Modèle théorique de Betz

1.2. Montage expérimental

2. Validité du modèle: visualisation des lignes de champ

2.1. Première tentative: utilisation d'une fumée

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau

3. Mesures de vitesses et comparaison des hélices

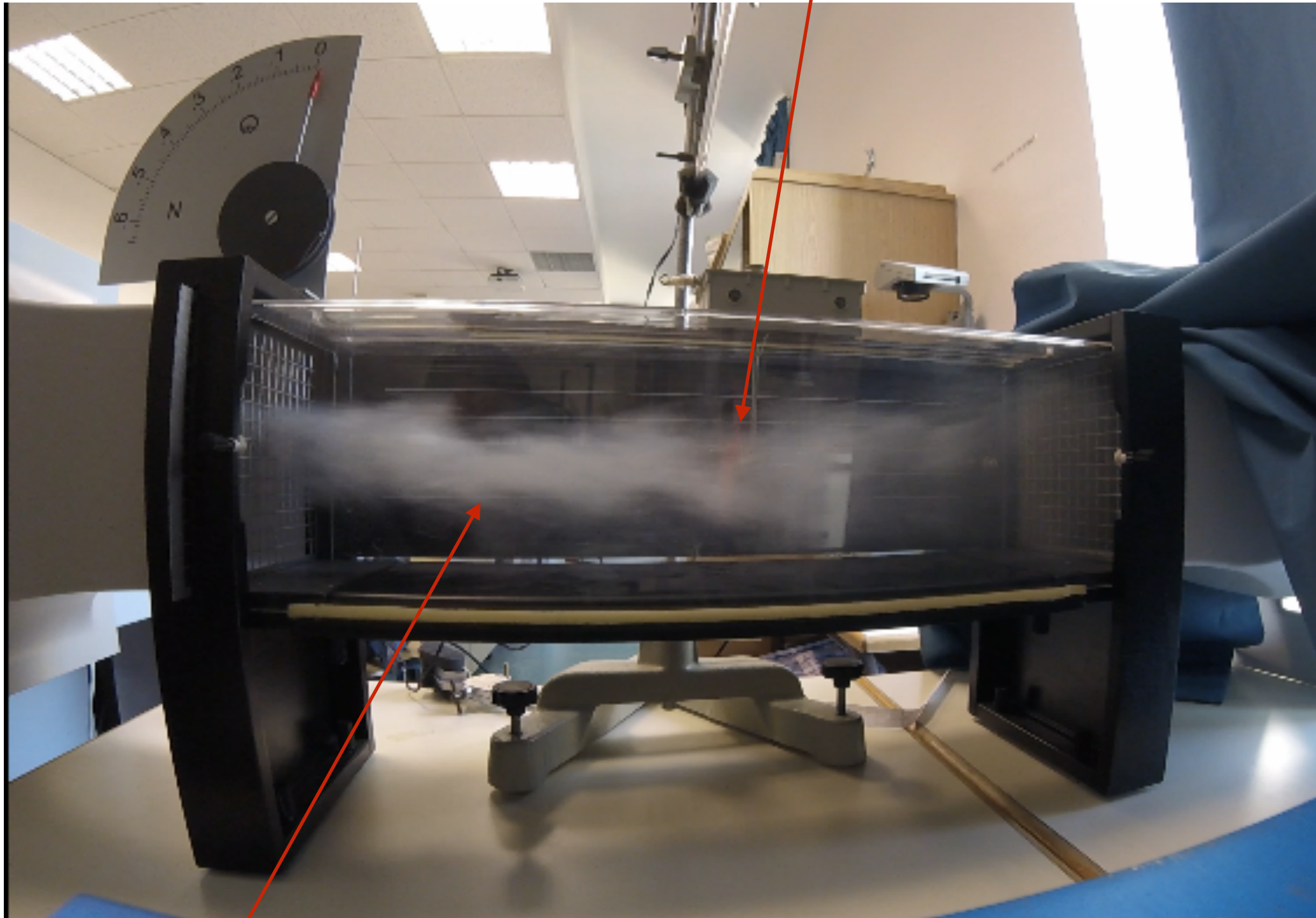
3.1. Calcul de rendement

3.2. Vitesse de rotation limite et couple exercé par l'hélice

3.3. Comparaisons et conclusion

2.1.Première tentative avec avec de la fumée

Hélice

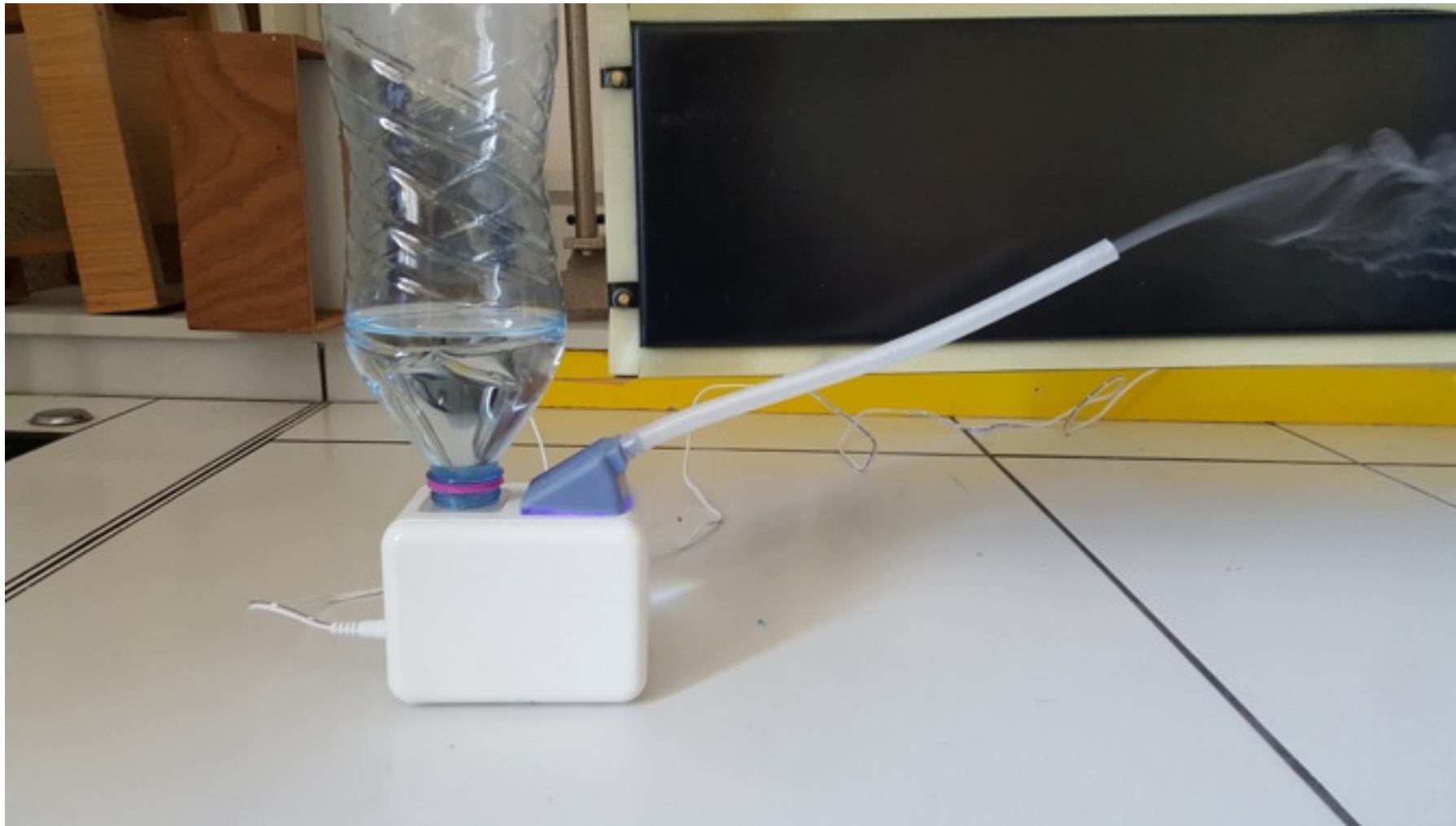


Fumée

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau:

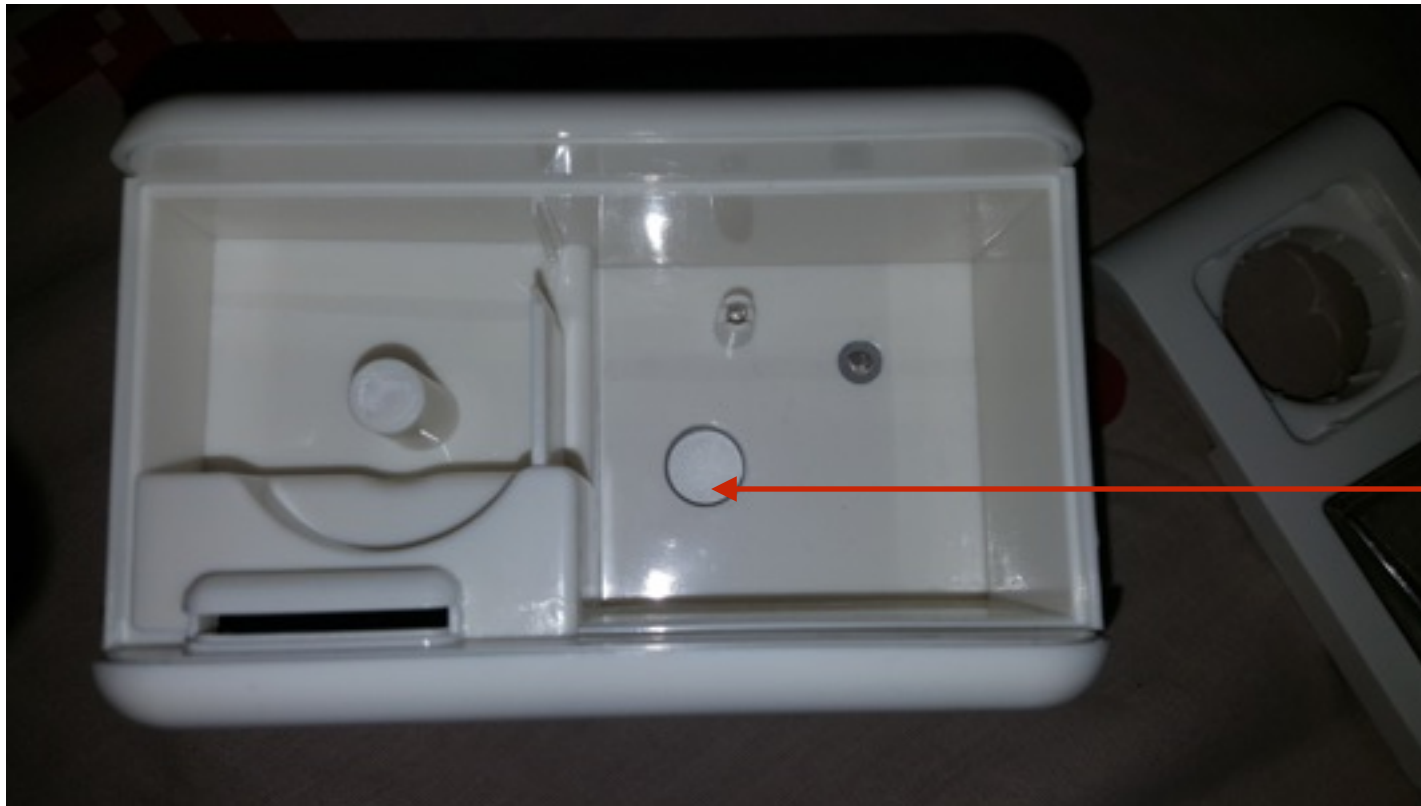
Matériel utilisé:

- Brumisateur d'eau par ultrason A4 Technologie
- Pailles

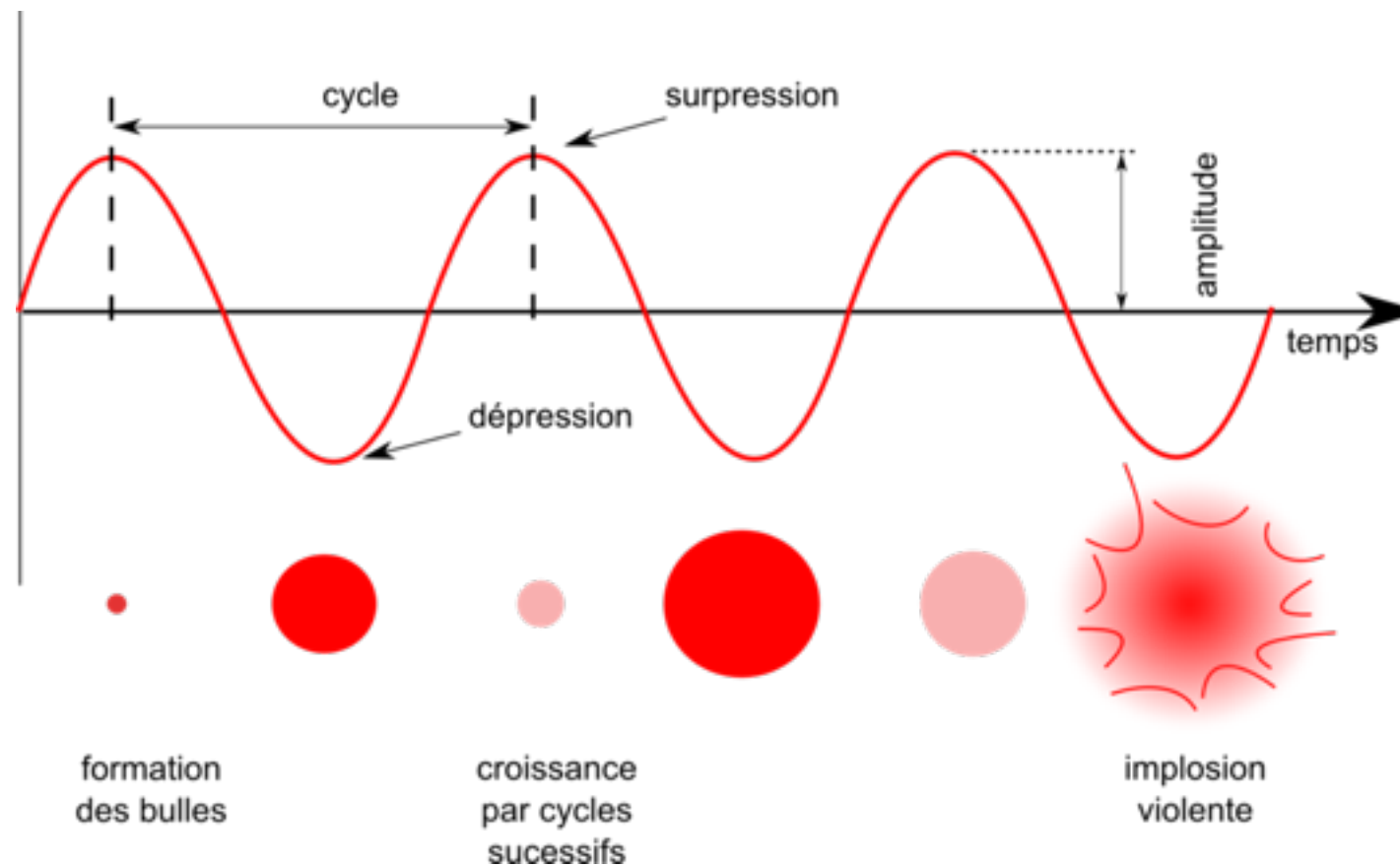


Entrée de la
soufflerie

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau: principe de fonctionnement



Pièce
piézoélectrique
oscillante à $f \approx 1$ MHz



2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau: résultat



1. Théorie de l'écoulement de Betz et mise en place expérimentale

1.1. Modèle théorique de Betz

1.2. Montage expérimental

2. Validité du modèle: visualisation des lignes de champ

2.1. Première tentative: utilisation d'une fumée

2.2. Deuxième tentative par brumisation d'eau

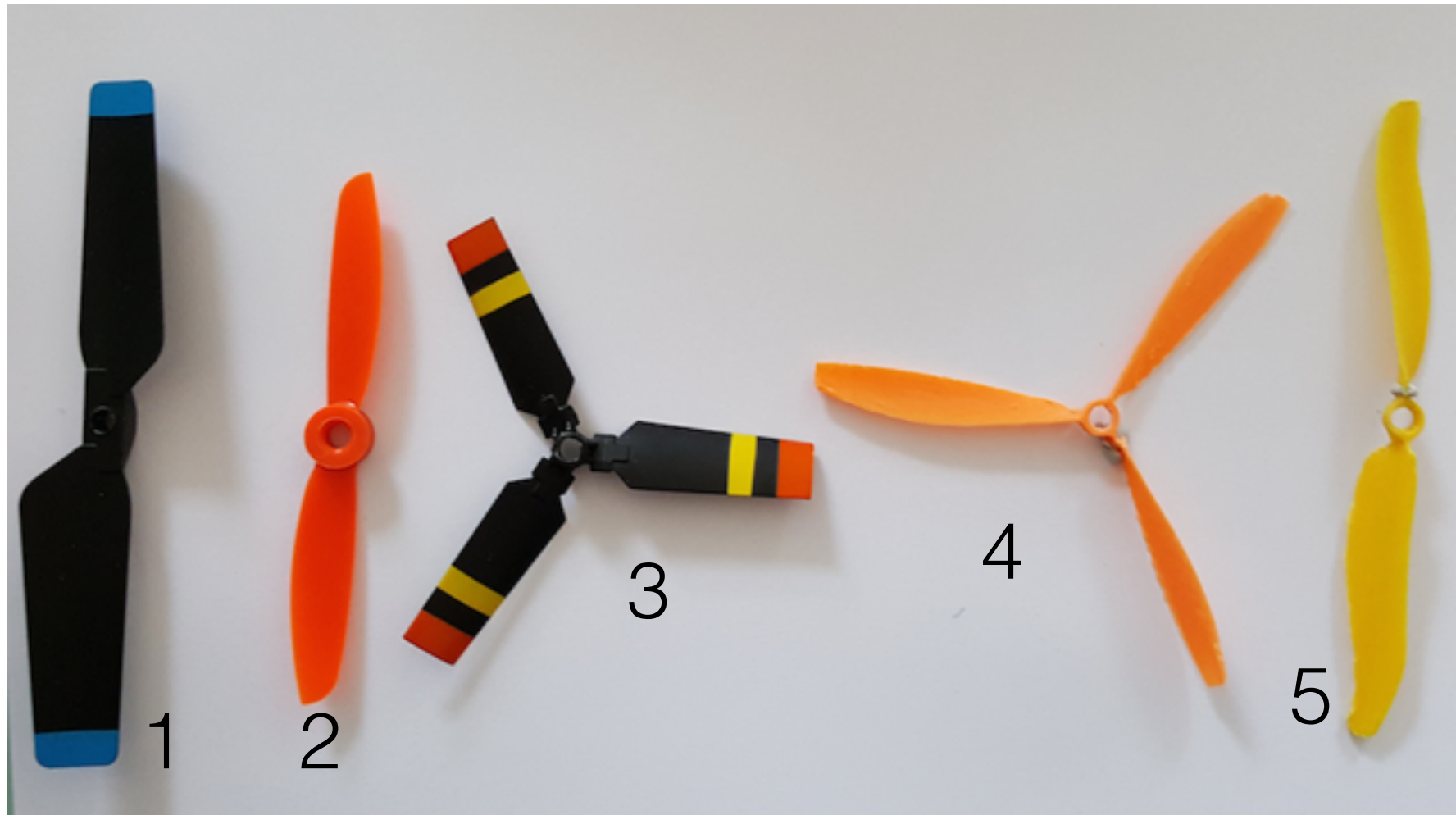
3. Mesures de vitesses et comparaison des hélices

3.1. Calcul de rendement

3.2. Vitesse de rotation limite et couple exercé par l'hélice

3.3. Comparaisons et conclusion

3.1. Calcul de rendement



Hélices 1 à 3 : achetées dans le commerce
Hélices 4 et 5: hélices imprimées en 3D

3.1. Calculs de rendement: résultats bruts

$v_1=4,0m.s^{-1}$

	Surface des pales Sp (cm²)	Coefficient de puissance Cp
Bipale noire (1)	19,45	0,409
Tripale noire (3)	17,25	0,324
Bipale orange (2)	9,45	0,183
Tripale orange (4)	13,02	0,095
Bipale jaune (5)	12,45	0,049

$v_1=2,2m.s^{-1}$

	Surface des pales Sp (cm²)	Coefficient de puissance Cp
Bipale noire (1)	19,45	0,518
Tripale noire (3)	17,25	0,407
Bipale orange (2)	9,45	0,239
Tripale orange (4)	13,02	0,202
Bipale jaune (5)	12,45	0,166

3.1. Calcul de rendement: influence de la surface des pales

$v_1=4,0\text{m.s}^{-1}$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	$\frac{C_p}{S_p} \times 100$
Bipale noire (1)	19,45	0,409	2,1
Tripale noire (3)	17,25	0,324	1,9
Bipale orange (2)	9,45	0,183	1,9
Tripale orange (4)	13,02	0,095	0,73
Bipale jaune (5)	12,45	0,049	0,4

$v_1=2,2\text{m.s}^{-1}$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	$\frac{C_p}{S_p} \times 100$
Bipale noire (1)	19,45	0,518	2,6
Tripale noire (3)	17,25	0,407	2,4
Bipale orange (2)	9,45	0,239	2,5
Tripale orange (4)	13,02	0,202	1,6
Bipale jaune (5)	12,45	0,166	1,4

3.1. Calcul de rendement: influence de la surface des pales

$$v_1 = 4,0 \text{ m.s}^{-1}$$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	$\frac{C_p}{S_p} \times 100$
Bipale noire (1)	19,45	0,409	2,1
Tripale noire (3)	17,25	0,324	1,9
Bipale orange (2)	9,45	0,183	1,9
Tripale orange (4)	13,02	0,095	0,73
Bipale jaune (5)	12,45	0,049	0,4

$$v_1 = 2,2 \text{ m.s}^{-1}$$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	$\frac{C_p}{S_p} \times 100$
Bipale noire (1)	19,45	0,518	2,6
Tripale noire (3)	17,25	0,407	2,4
Bipale orange (2)	9,45	0,239	2,5
Tripale orange (4)	13,02	0,202	1,6
Bipale jaune (5)	12,45	0,166	1,4

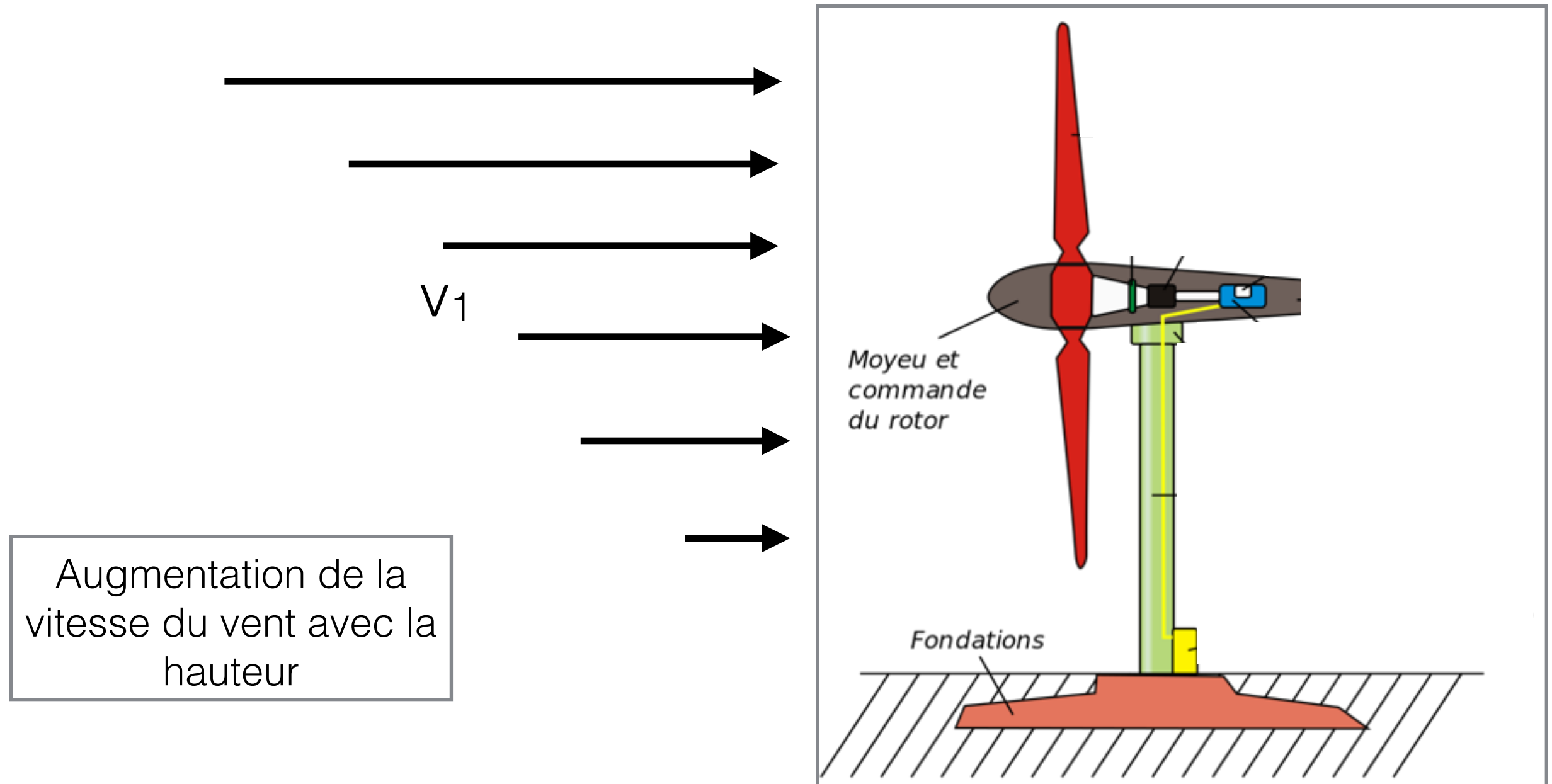
Analyse des résultats:

$$\frac{C_p}{S_p} \approx \text{constante} \quad \longrightarrow$$

Seul facteur influençant le rendement : surface des pales

C_p augmente si S_p augmente

3.1. Calcul de rendement: influence de la surface des pales



- Conséquences d'une grande envergure de pale



Apparition d'un phénomène de **cisaillement**



Usure



Pour augmenter S_p : augmenter le nombre de pales

3.2. Mesure de la vitesse de rotation limite et calcul du couple

Tachymètre



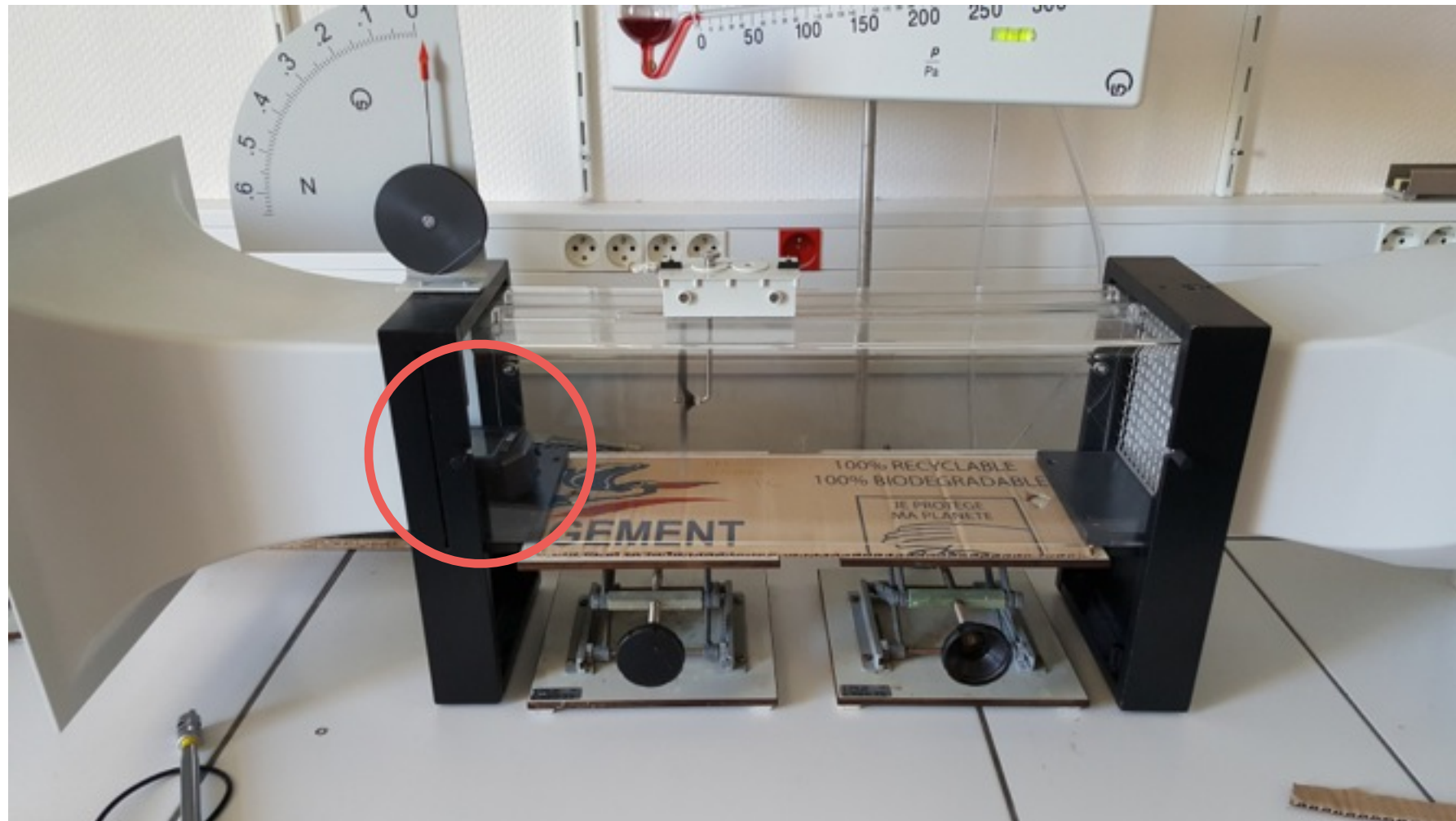
Pastille réfléchissante



Emission du rayonnement infrarouge incident



Réflexion du rayonnement infrarouge



3.2. Mesure de la vitesse de rotation limite et calcul du couple

$$\Gamma = \frac{P}{\omega_L}$$

P: Puissance (Watt)

Γ : Couple (N.m⁻¹)

ω : vitesse de rotation (rad.s⁻¹)

	Surface des pales Sp (cm ²)	P(mW)	ω_L (rad.s ⁻¹)	Γ (mN.m ⁻¹)
Bipale noire (1)	19,45	40,24	137,8	0,292
Tripale noire (3)	17,25	17,60	142,7	0,123
Bipale orange (2)	9,45	17,46	179,7	0,097
Tripale orange (4)	13,02	11,96	143,4	0,083
Bipale jaune (5)	12,45	12,49	141,30	0,088

Analyse des résultats:

- Augmentation de Sp entraine une diminution de ω_L

- Apparition d'une vitesse limite



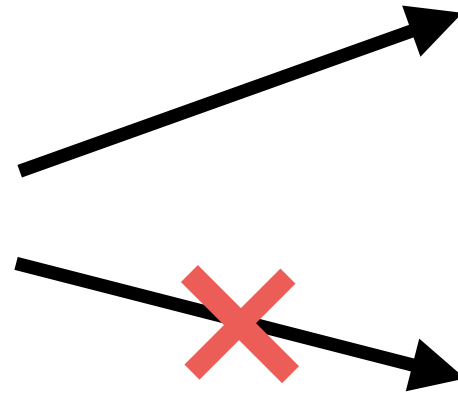
Présence de frottements



Fluide visqueux

3.3. Comparaison et conclusion

- Modèle théorique de Betz



Elargissement du tube de champ
et ralentissement du flux d'air

Fluide parfait

- Optimisation de l'éolienne



Influence de la longueur
des pales



Influence de la
surface des pales



Influence du nombre
de pales

Annexe

$$\underline{v=4,0\text{m.s}^{-1}}$$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	Envergure des pales (cm)	Vitesse de sortie v_2 (m.s ⁻¹)
Bipale noire (1)	19,45	0,409	6,3	2,9
Tripale noire (3)	17,25	0,324	4,7	3,2
Bipale orange (2)	9,45	0,183	5	3,3
Tripale orange (4)	13,02	0,095	5,5	3,8
Bipale jaune (5)	12,45	0,049	6,3	3,9

$$\underline{v=2,2\text{m.s}^{-1}}$$

	Surface des pales S_p (cm ²)	Coefficient de puissance C_p	Envergure des pales (cm)	Vitesse de sortie v_2 (m.s ⁻¹)
Bipale noire (1)	19,45	0,518	6,3	1,3
Tripale noire (3)	17,25	0,407	4,7	1,6
Bipale orange (2)	9,45	0,239	5	1,7
Tripale orange (4)	13,02	0,202	5,5	1,9
Bipale jaune (5)	12,45	0,166	6,3	2,0