

JOURNÉE
SCIENTIFIQUE



BIOINSPIRATION & SOLUTIONS BASÉES SUR LA NATURE

5 NOV
2020
9h-17h30



Théo SIMONET

Laboratoire LMGC - Mécanique et de Génie Civil, Montpellier

Étude de l'efficacité d'un système de propulsion maritime par foil oscillant souple

Auteurs : T. Simonet ⁽¹⁾, K. Roncin ⁽²⁾, L. Lapierre ⁽³⁾, L. Daridon ⁽¹⁾

⁽¹⁾ LMGC, Université Montpellier, CNRS (UMR 5508)

⁽²⁾ CREA, Ecole de l'Air, BA 701, F-13661 Salon Air, France

⁽³⁾ LIRMM, Université Montpellier, CNRS

En partenariat avec



Institut
de Futurs
souhaitables

GROW
BOT



Sujet: Étude de l'efficacité d'un système de propulsion maritime par foil oscillant souple

Efficacité: Le Rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie.



Overboat, Neocean, Eugénie Grondin

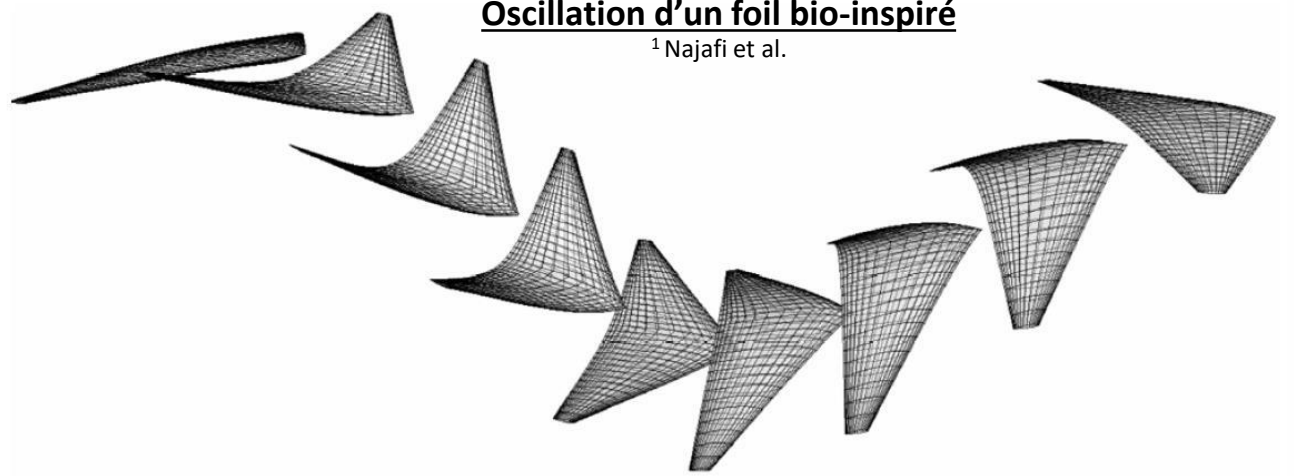
Foil pour le kitesurf

Foil: Désigne une aile sous un bateau qui permet à celui-ci de se déplacer en étant surélevé par rapport à la surface de l'eau.

Bio-inspiration:

Oscillation d'un foil bio-inspiré

¹Najafi et al.



Motivations

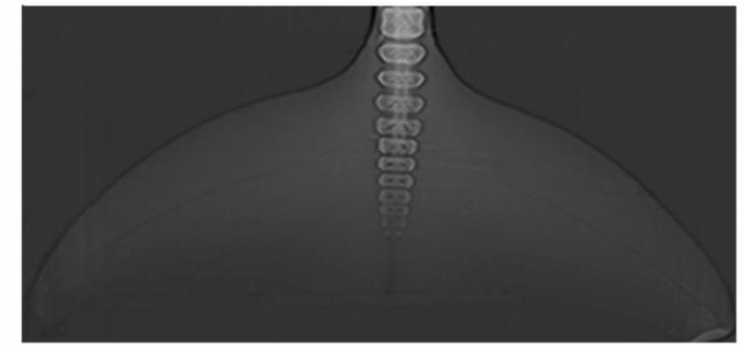
La propulsion marine par foil oscillant utilisée par les cétacés permet :

- Une haute efficacité pour une large plage de vitesses
- Un risque de blessure faible
- Une nuisance sonore faible (faune et flore)

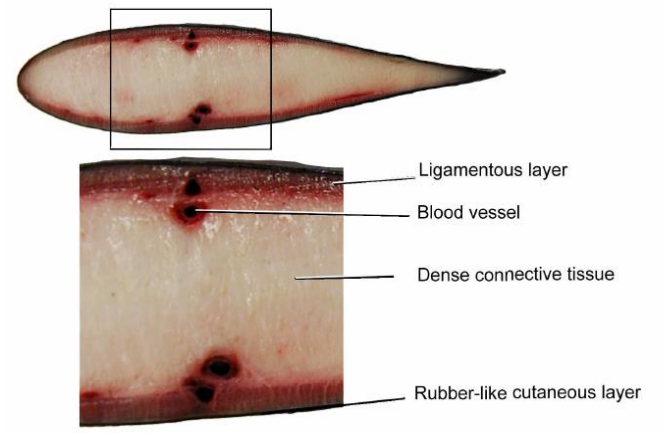
Constitution de la nageoire caudale

Partie osseuse uniquement au centre
 Couche extérieure: Tissu de type ligament
 Couche intérieure: Tissu conjonctif dense

Rayon X d'une nageoire caudale de dauphin (*Tursiops truncatus*) ²Sun et al.



Coupe d'une nageoire caudale de dauphin (*Tursiops truncatus*) ²Sun et al.



¹ S. Najafi and P. Liu, "Propulsion Performance of Spanwise Flexible Wing Using Unsteady Panel Method," *J. Ocean Univ. China (Journal of Ocean University of China)*, 2020.
² Sun, Q., Morikawa, H., Kobayashi, S., Ueda, K., Miyahara, H. and Nakajima, M.: Structure and Mechanical Properties on Tail Flukes of Dolphin, *J. Aero Aqua Bio-Mech.*, 1, 1 (2011), pp. 45–50.

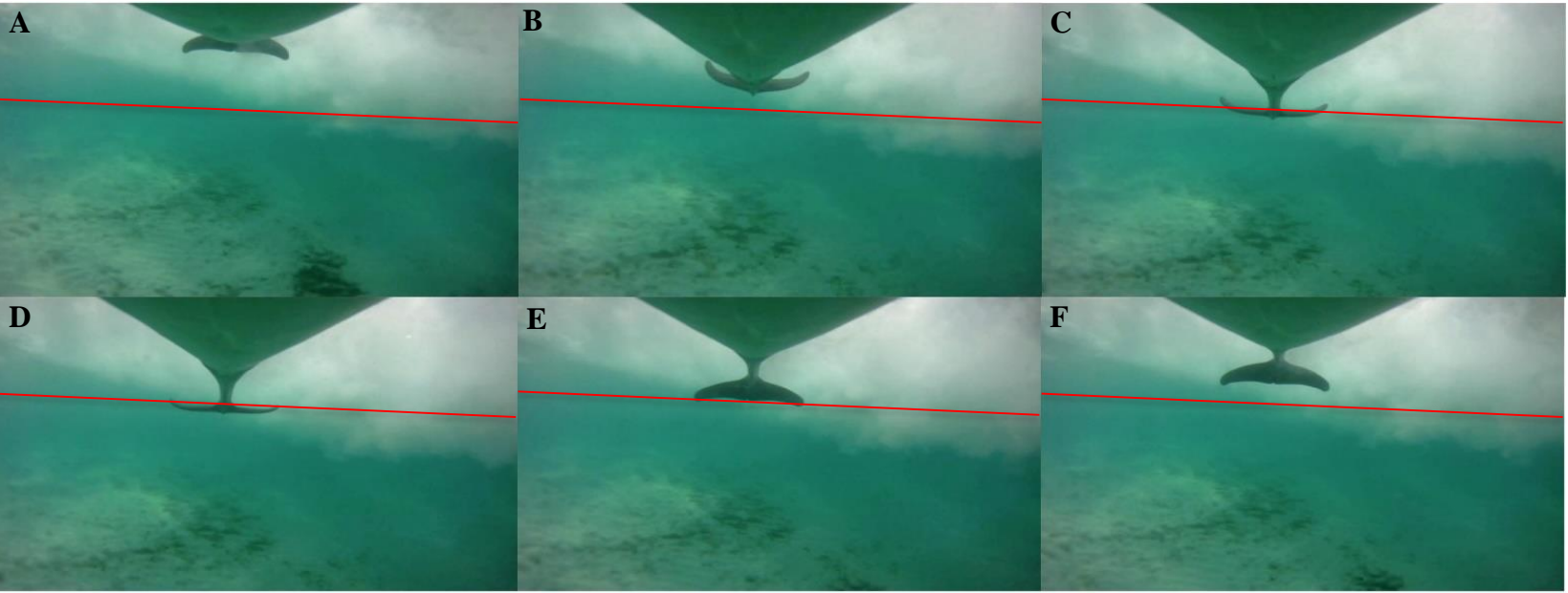
Bio-inspiration:



Photos de M. Robert Eiser

Caractéristiques de la souplesse

- Le changement de courbure de la nageoire (passage de D à E) se fait rapidement et avec un déplacement vertical quasi nul de ses extrémités.
- La déformation est localisée vers les extrémités de la nageoire.



Photos de M. Robert Eiser



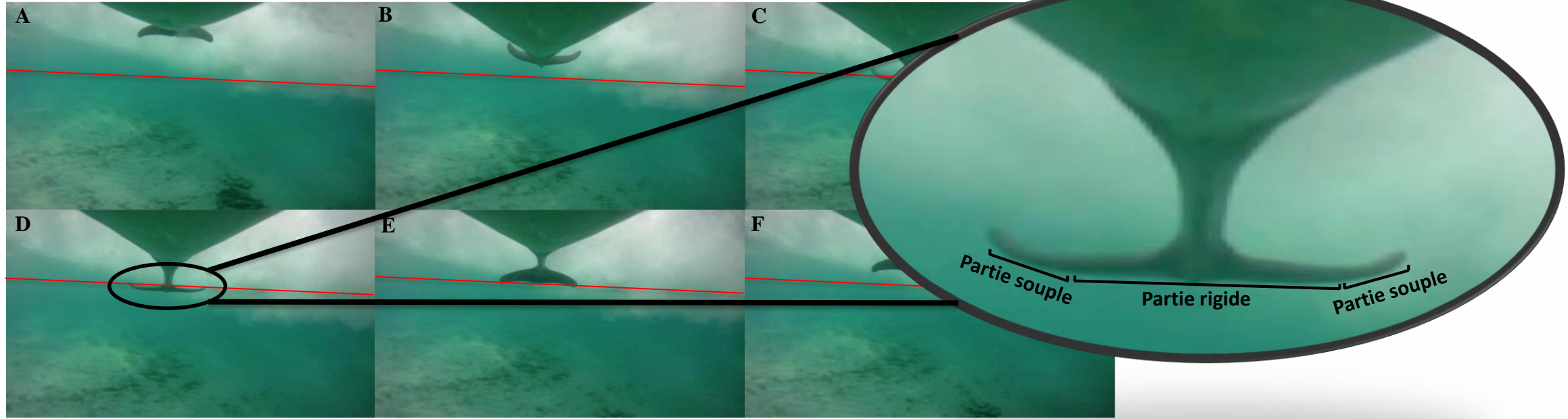
Bio-inspiration:



Photos de M. Robert Eiser

Caractéristiques de la souplesse

- Le changement de courbure de la nageoire (passage de D à E) se fait rapidement et avec un déplacement vertical quasi nul de ses extrémités.
- La déformation est localisée vers les extrémités de la nageoire.

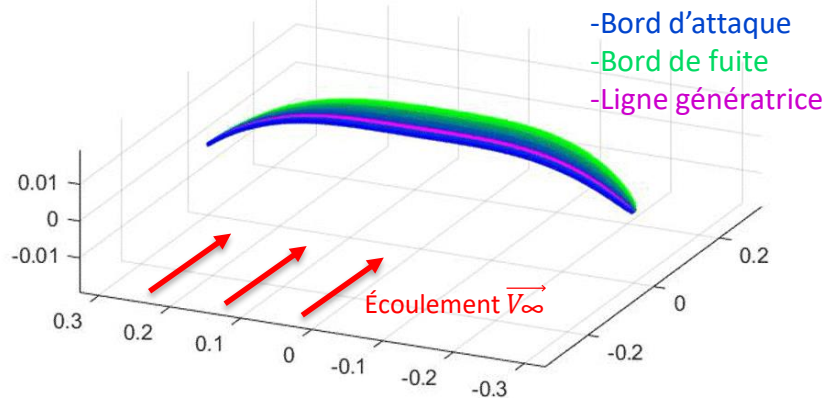


Photos de M. Robert Eiser



Modélisation: Cinématique bio-inspirée

Foil souple en pilonnement: **vue 3D**



Equations du mouvement ¹

$$z(s,t) = h_r(t) + d(s,t)$$

$$h_r(t) = h_0 \cos(\omega t)$$

$$d(s,t) = f(s) * g(t)$$

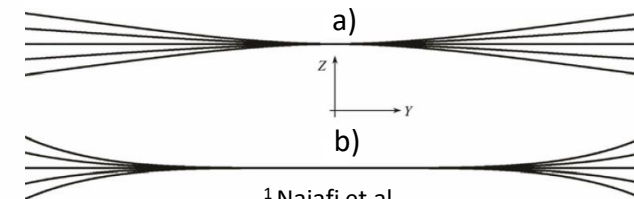
$$f(s) = d_0 \left[2 \left(\frac{s}{l} \right)^2 \pm \frac{4}{3} \left(\frac{s}{l} \right)^3 + \frac{1}{3} \left(\frac{s}{l} \right)^4 \right] \left| \frac{s}{l} \right|^\varepsilon$$

$$g(t) = \sin(\omega t + \theta)$$

$$g_{bio}(t) : \text{bio-inspirée}$$

Localisation de la déformation

a) $\varepsilon = 0$ b) $\varepsilon = 3$



Paramètres du mouvement:

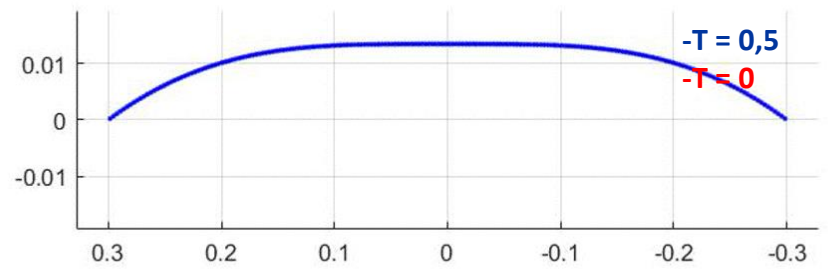
$l = 0,3 \text{ m}$
 $d_0 = 0,0148 \text{ m}$
 $\theta = -25^\circ$
 $\varepsilon = 2$

Cinématique bio-inspirée:

- Fonction $g_{bio}(t)$ donnant aux extrémités du foil une vitesse nulle lors du changement de courbure.
- Paramètre T : Fraction du temps ou la cinématique est modifiée ($0 < T < 1$).

Modélisation: Cinématique bio-inspirée

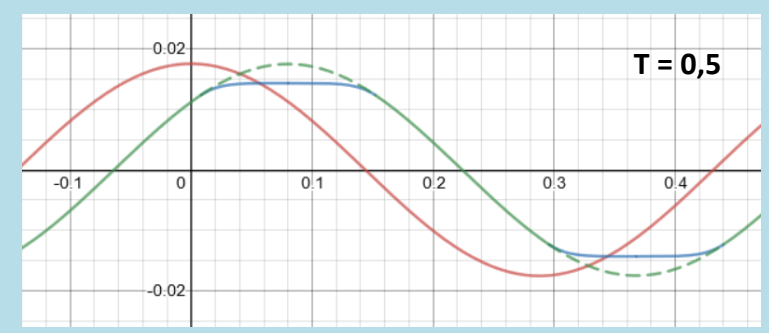
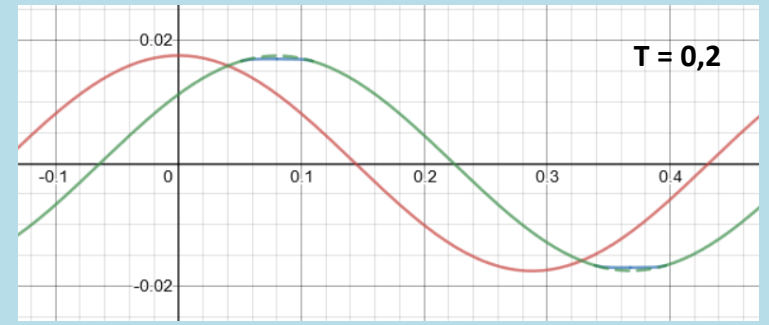
Foil souple en pilonnement: **vue de face**



Paramètres du mouvement:
 $l = 0,3 \text{ m}$
 $d_0 = 0,0148 \text{ m}$
 $\theta = -25^\circ$
 $\varepsilon = 2$

Illustration du mouvement bio-inspiré

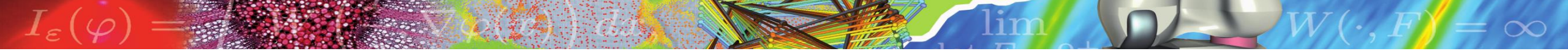
- Déplacement vertical de l'emplanture
- Déplacement vertical de l'extrémité
- Cinématique classique ¹
- Cinématique bio-inspirée



Cinématique bio-inspirée:

- Fonction $g_{bio}(t)$ donnant aux extrémités du foil une vitesse nulle lors du changement de courbure.
- Paramètre T : Fraction du temps ou la cinématique est modifiée ($0 < T < 1$).

¹ S. Najafi and P. Liu, "Propulsion Performance of Spanwise Flexible Wing Using Unsteady Panel Method," *J. Ocean Univ. China (Journal of Ocean University of China)*, 2020.

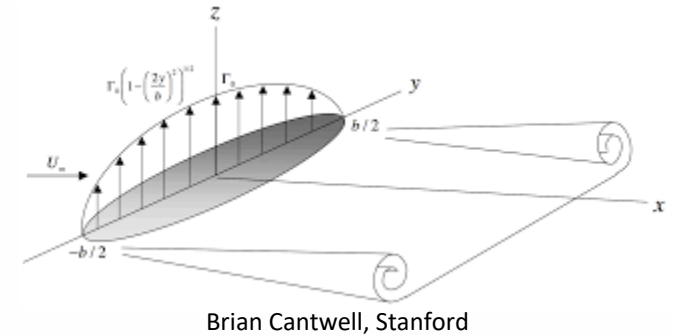


Outil numérique: Ligne Portante 3D Non Linéaire (LP3DNL)

Ligne portante 3D non linéaire:
 Méthode permettant un calcul rapide des efforts hydrodynamiques d'un foil souple d'envergure finie.

- Fluide incompressible, irrotationnel et stationnaire.
- Géométrie 3D (flèche et dièdre)
- Méthode de résolution non linéaire

Ligne portante (Prandtl 1918)

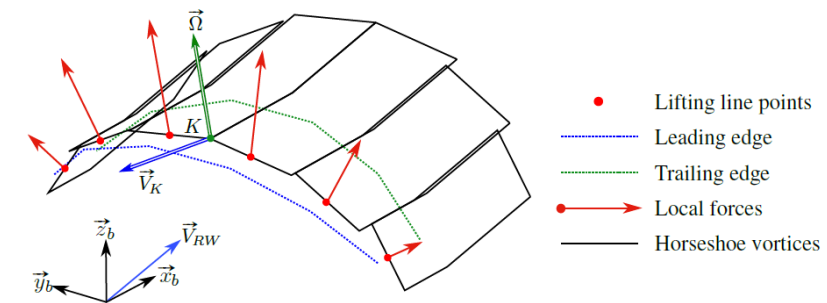


Modélisation de l'oscillation : Calcul pseudo-statique

- L'oscillation du foil est modélisée par une succession de calculs stationnaires.
- A chaque pas de temps la géométrie et les vitesses apparentes sont actualisées.
- La déformation est postulée à l'avance.

On définit le coefficient de poussée moyen $\overline{C_T}$.

LP3DNL (Duport et al. ¹)



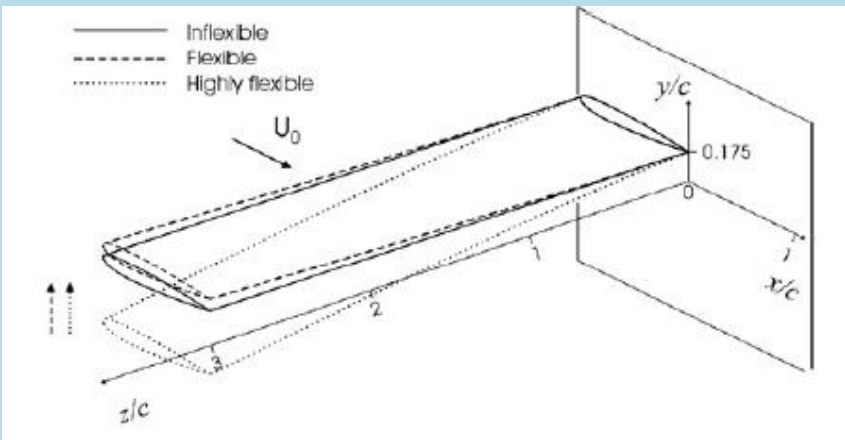
¹Duport C, "Comparaison d'une méthode de ligne portante 3d non linéaire avec des simulations RANSE 3d et application à la prédiction du chargement global d'un cerf-volant en virage," 15ème Journées de l'hydrodynamique, 2016.

Validation de l'implémentation et optimisation

Mise en lumière et détermination de la souplesse optimale

Description de l'expérience¹ : Etude de la poussée obtenue avec trois ailes différentes (« rigide », flexible et très flexible), en pilonnement pur (profil NACA0012).

Schéma de l'expérience (Heathcote et al.¹)



Paramètres de l'expérience

V_∞ (m/s), vitesse infinie amont	0.3	c (m), longueur de corde	0.1
ρ (kg/m ³), densité du fluide	1000	L (m), demi-envergure	0.3
Re , nombre de Reynolds	30000	h_0 (m), amplitude de pilonnement	0.0175
k_G , fréquence réduite	1.82	$h_r(t)$ (m), pilonnement à l'emplanture	$h_0 \cos(2\pi ft)$

Données expérimentales¹ :

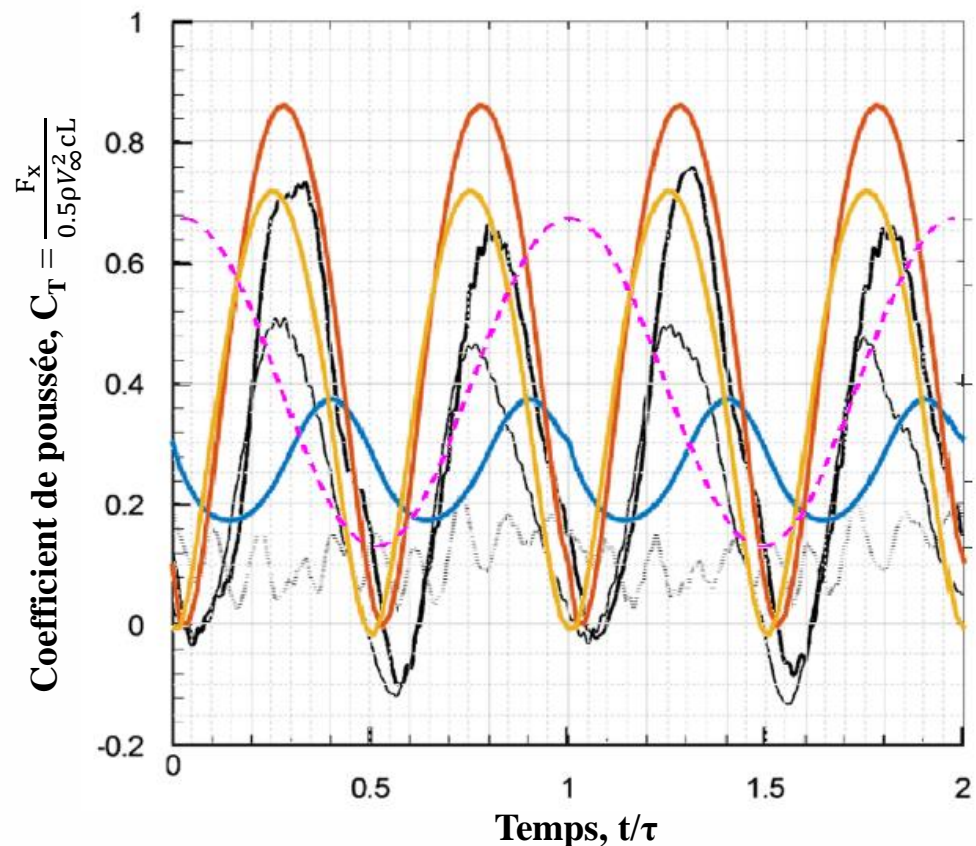
- Evolution des coefficients de poussée au cours de l'oscillation
- Description des déformations



¹Heathcote S, Wang Z, Gursul I. Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. J Fluid Struct 2008;24:183–99.

Validation de l'implémentation

Coefficient de poussée en fonction du temps:



- Aile « rigide » (Heathcote¹)
- Aile souple (Heathcote¹)
- ... Aile très souple (Heathcote¹)
- Aile « rigide »
- Aile souple
- Aile très souple
- - - Position réduite de l'emplanture

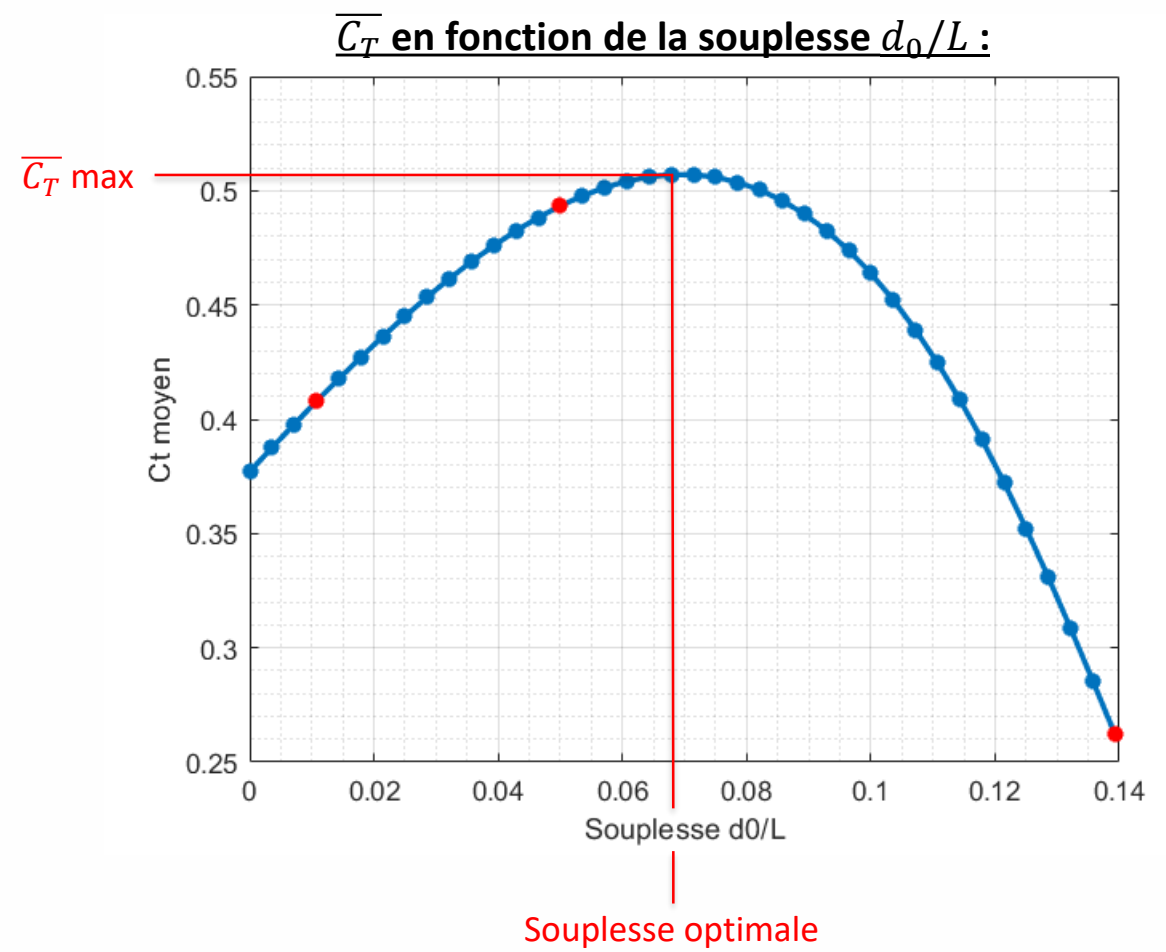
Calcul de ligne portante:

- Cinématique donnée par les données expérimentales
- 40 sections le long de l'envergure
- 50 pas de temps
- $C_L = 2\pi\alpha$

¹Heathcote S, Wang Z, Gursul I. Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. J Fluid Struct 2008;24:183–99.

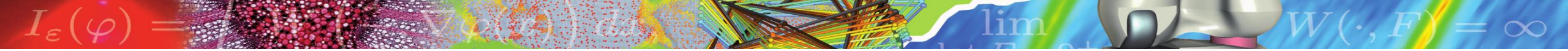
Optimisation

- Interpolation des paramètres expérimentaux pour définir d'autres souplesses plausibles.
- $\overline{C_T}$ maximum de 0.51 pour une souplesse $d_0/L = 0,07$.



- Souplesses expérimentales
- Souplesses interpolées



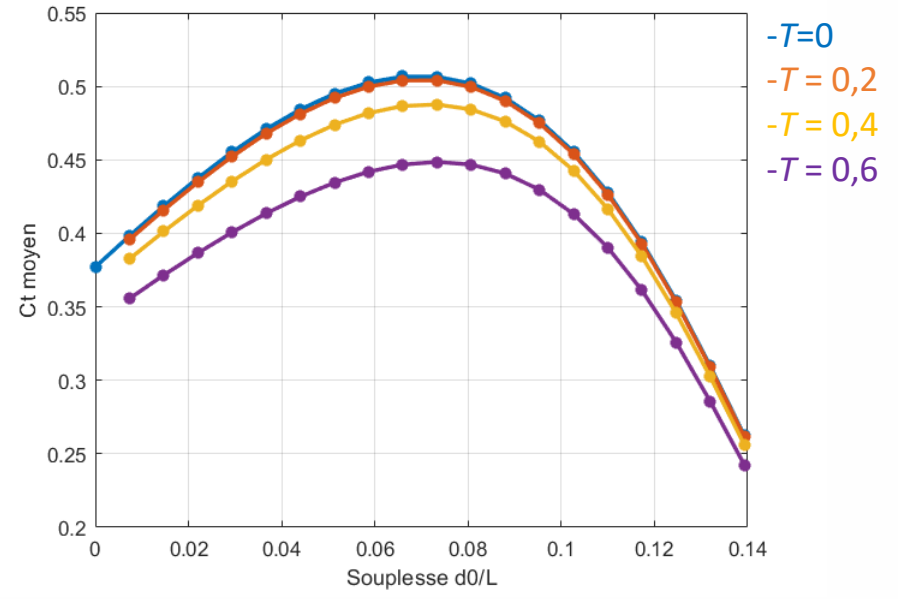


Étude paramétrique

Influence de T:

- T: Fraction du temps ou la cinématique est modifiée ($0 < T < 1$)
- L'influence de T est défavorable à la poussée.

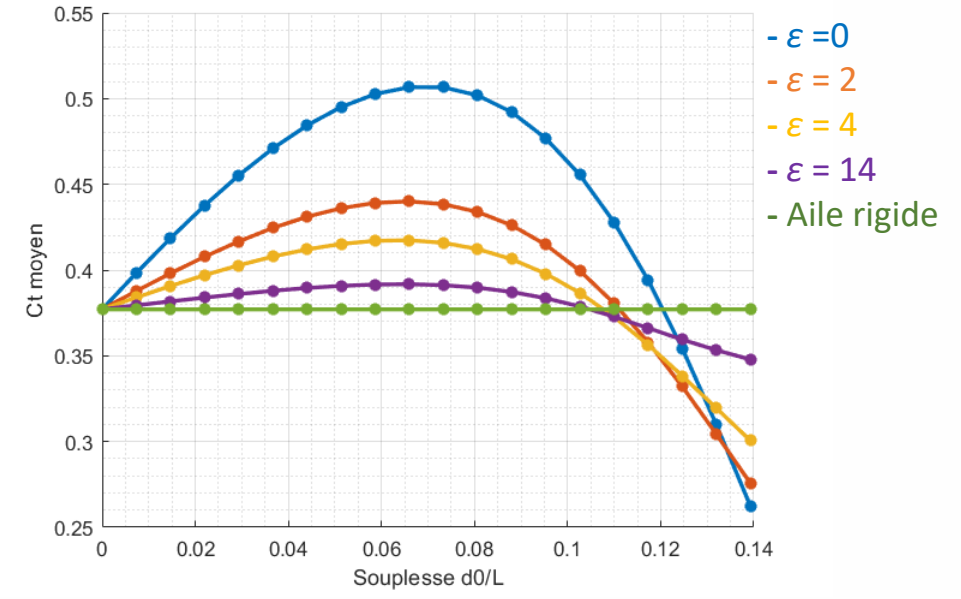
$\overline{C_T}$ en fonction de la souplesse:



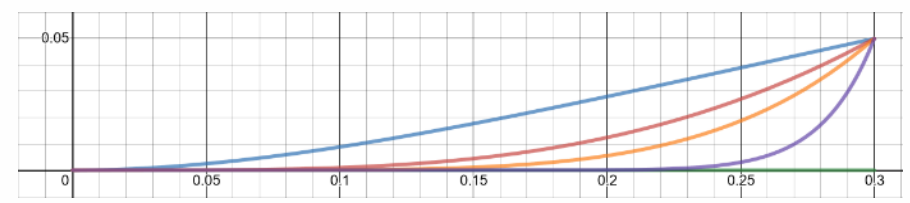
Influence de epsilon :

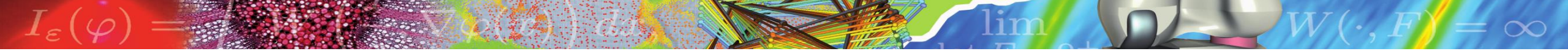
- epsilon: Paramètre de localisation de la déformation.
- L'influence de epsilon est défavorable à la poussée.

$\overline{C_T}$ en fonction de la souplesse:



Représentation des déformées:





Conclusion

- Positif / satisfaisant
- À améliorer / non satisfaisant

Conclusion

- LP3DNL: Outil permettant d'étudier qualitativement les performances des foils oscillants.
 - Validation qualitative avec des données issues de la littérature
 - Recherche d'une flexibilité optimale
- Cinématique bio-inspirée:
 - Temps d'arrêt des extrémités
 - Localisation de la déformation

Futur travail

- Biomimétisme:
 - Ajout d'un mouvement de tangage
 - Loi de corde non constante
- Modèle fluide:
 - Effet de masse ajoutée, calcul d'efficacité
 - Polaire de portance non linéaire
- Autre:
 - Considérer différentes fréquences d'oscillation et différents nombres de Reynolds
 - Utiliser des sections non symétriques pour générer de la portance





Merci de votre attention

Conclusion

- LP3DNL: Outil permettant d'étudier qualitativement les performances des foils oscillants.
 - Validation qualitative avec des données issues de la littérature
 - Recherche d'une flexibilité optimale
- Cinématique bio-inspirée:
 - Temps d'arrêt des extrémités
 - Localisation de la déformation



En partenariat avec

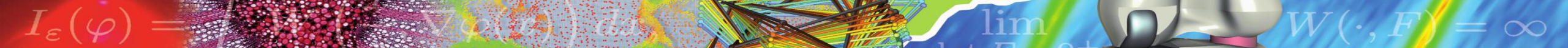


Ceebios



Institut
de Futurs
souhaitables

GROW
BOT



Fonction $g_{bio}(t)$:

t	$-D/\omega$	$a-B$	a	$a+B$	$a-B+\pi/\omega$	$a+\pi/\omega$	$a+B+\pi/\omega$	$(2\pi-D)/\omega$
$g_{bio}(t)$		g	g^1	g^2	g	g^3	g^4	g
$g_i(t) = \frac{1}{d_0} (G_i(t) - h_r(t))$ pour $i = 1,2,3,4$								
$G_1(t) = -b(-t + a)^n + c$				$a = \frac{\frac{\pi}{2} - D}{\omega}$				
$G_2(t) = -b(t - a)^n + c$				$b = \frac{A\omega}{nB^{n-1}} \sin(\omega B)$				
$G_3(t) = b\left(-t + a + \frac{\pi}{\omega}\right)^n - c$				$c = A \cos(\omega B) + bB^n$				
$G_4(t) = b\left(t - a - \frac{\pi}{\omega}\right)^n - c$				$B = \frac{T\pi}{2\omega}$				
$A = h_0 \sin(D) + d_0 \cos(\theta - D)$				$D = \arctan\left(\frac{\sin(\theta) + \frac{h_0}{d_0}}{\cos(\theta)}\right)$				

Paramètres expérimentaux

Aile	a_t	φ	d_0 (m)	θ
« Rigide »	1.13	-4.2°	0.00265	56.9°
Flexible	1.64	-25.1°	0.0148	34.9°
Très flexible	1.76	-117°	0.0418	-48.9

- at** : Rapport d'amplitude entre le mouvement de l'emplanture et des extrémités
- phi** : Déphasage temporel entre le mouvement de l'emplanture et des extrémités
- d0** : Déplacement relatif maximal entre les extrémités et l'emplanture
- thêta** : Déphasage temporel entre le mouvement de pilonnement et de déformation

Interpolation de thêta

