

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 <sup>(1)</sup>, K. Roncin <sup>(2)</sup>, L. Lapierre <sup>(3)</sup>, L. Daridon <sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> LMGC, Université Montpellier, CNRS (UMR 5508)

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

<sup>(3)</sup> LIRMM, Université Montpellier, CNRS

En partenariat avec



# 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.

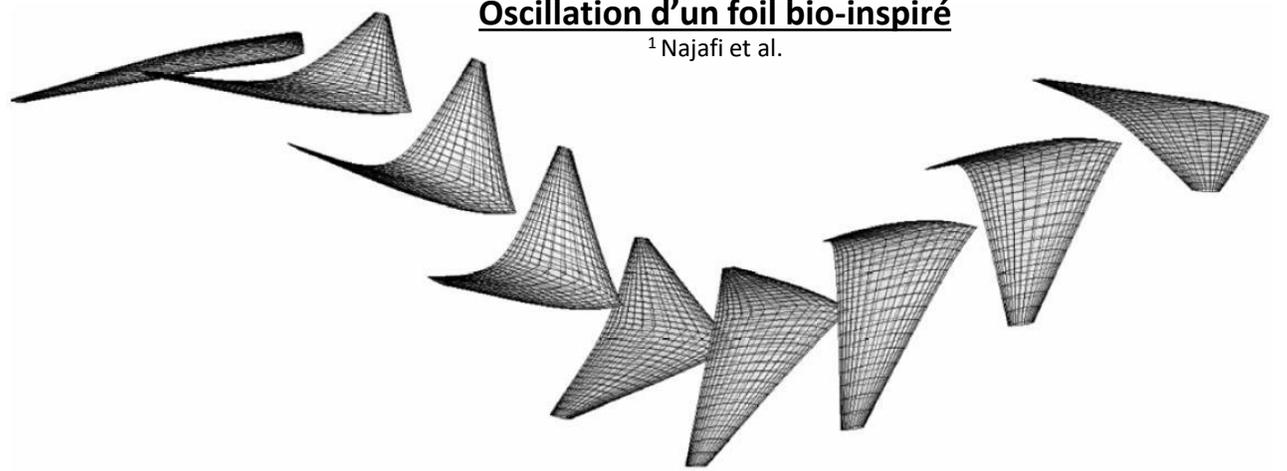


Foil:  
Désigne une aile sous un bateau qui permet à celui-ci de se déplacer en étant surélevé par rapport à la surface de l'eau.

# Bio-inspiration:

## Oscillation d'un foil bio-inspiré

<sup>1</sup>Najafi et al.



### Motivations

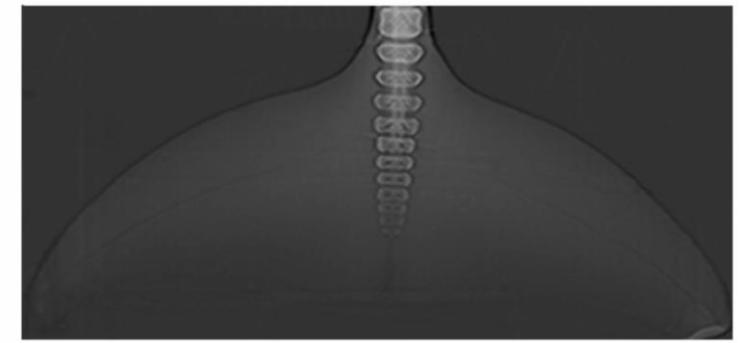
La propulsion marine par foil oscillant utilisée par les cétacés permet :

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

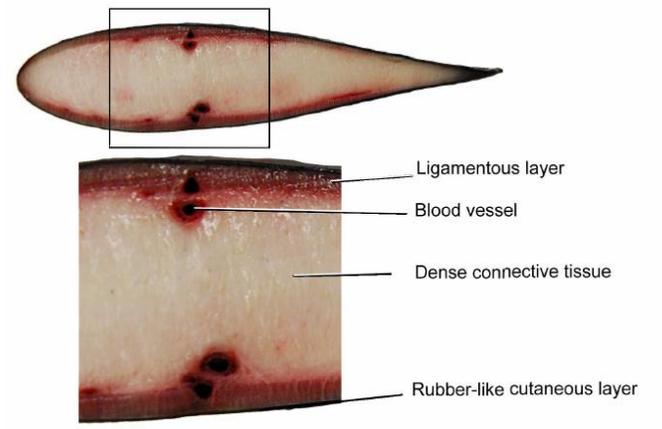
### Constitution de la nageoire caudale

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*) <sup>2</sup>Sun et al.



## Coupe d'une nageoire caudale de dauphin (*Tursiops truncatus*) <sup>2</sup>Sun et al.



<sup>1</sup> 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.  
<sup>2</sup> 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.

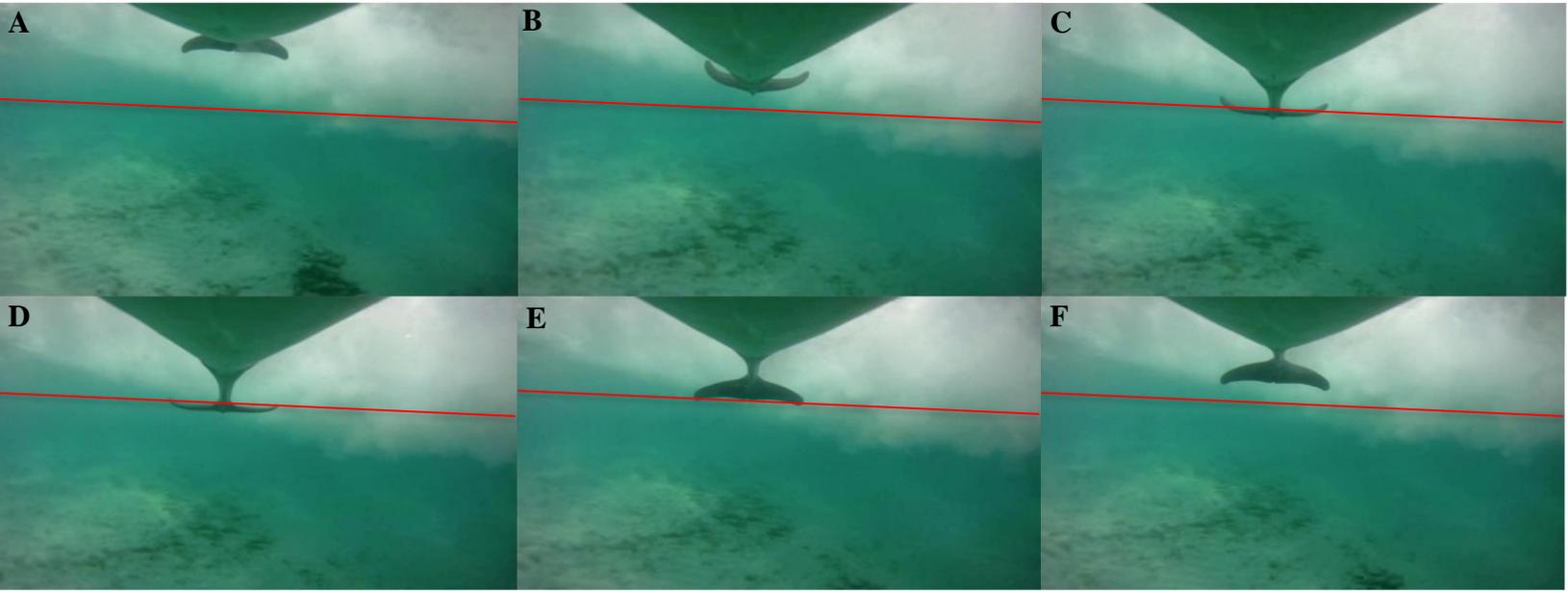
# Bio-inspiration:



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



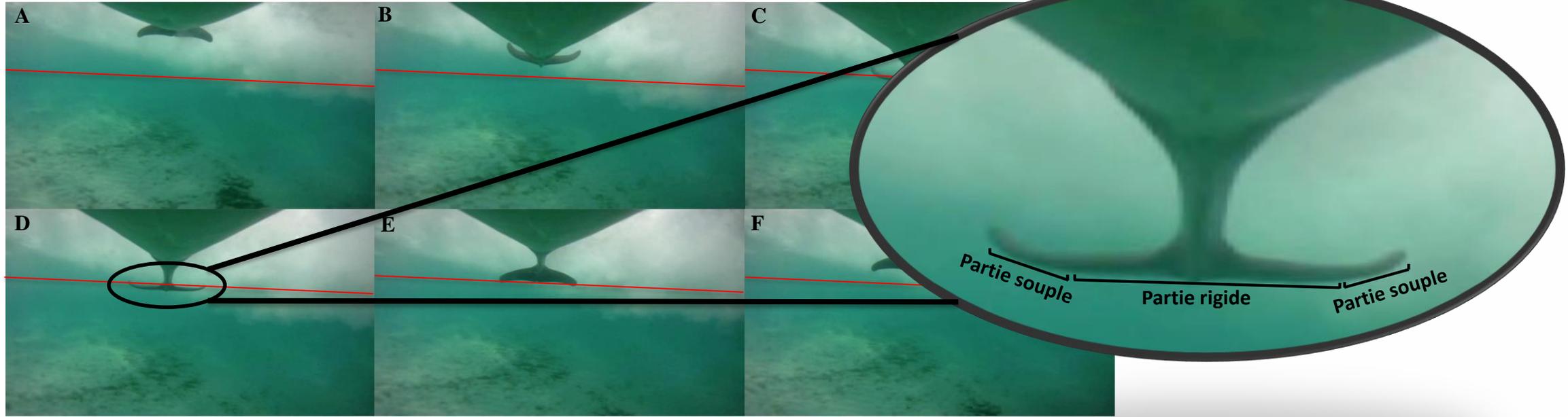
# Bio-inspiration:



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.

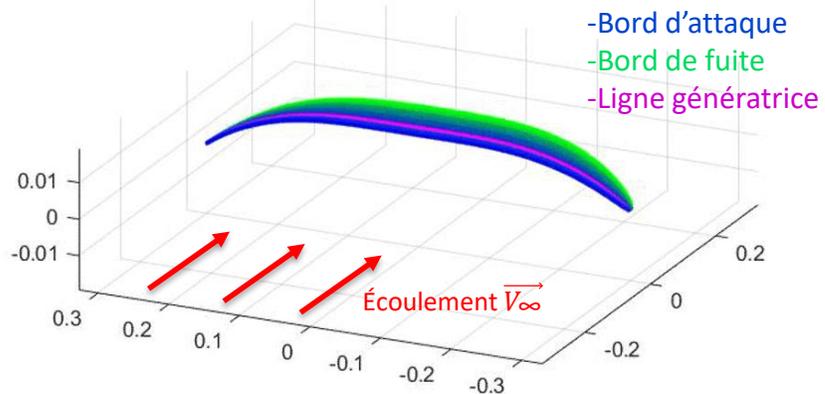


Photos de M. Robert Eiser



# Modélisation: Cinématique bio-inspirée

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



## Equations du mouvement <sup>1</sup>

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

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

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

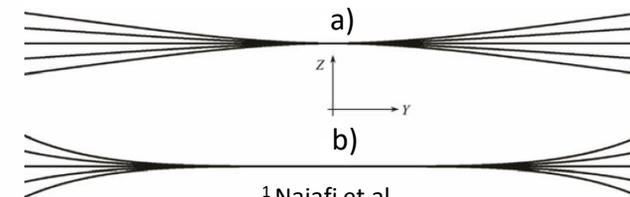
$$f(s) = d_0 \left[ 2 \left( \frac{s}{l} \right)^2 \pm \frac{4}{3} \left( \frac{s}{l} \right)^3 + \frac{1}{3} \left( \frac{s}{l} \right)^4 \right] \left| \frac{s}{l} \right|^\varepsilon$$

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

$$g_{bio}(t) : \text{bio-inspirée}$$

## Localisation de la déformation

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



### Paramètres du mouvement:

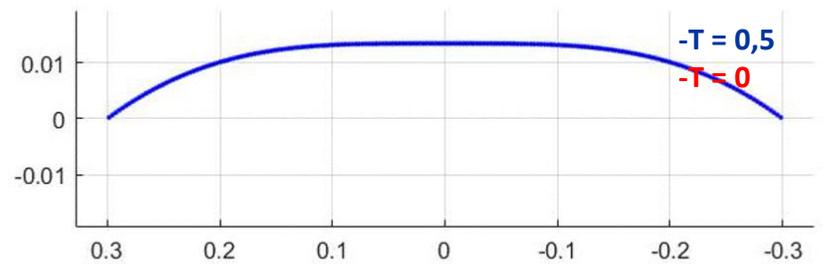
$l = 0,3 \text{ m}$   
 $d_0 = 0,0148 \text{ m}$   
 $\theta = -25^\circ$   
 $\varepsilon = 2$

### 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

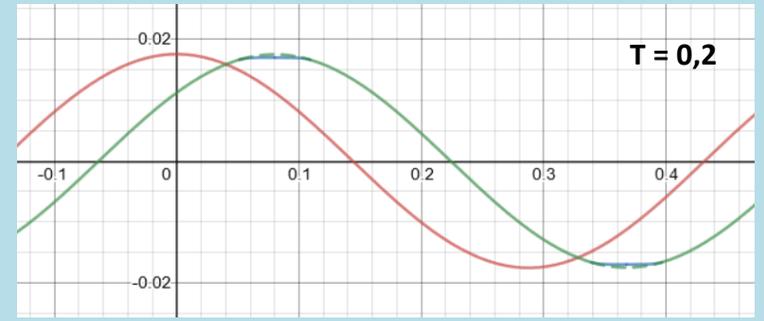
Foil souple en pilonnement: **vue de face**



**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 <sup>1</sup>
- 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 ( $0 < T < 1$ ).

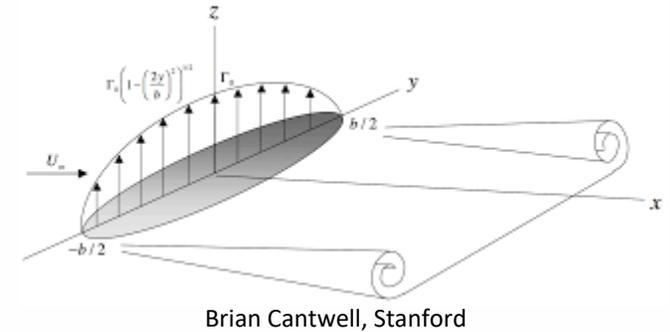
<sup>1</sup> S. Najafi and P. Liu, "Propulsion Performance of Spanwise Flexible Wing Using Unsteady Panel Method," *J. Ocean Univ. China (Journal of Ocean University of China)*, 2020.

# 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)

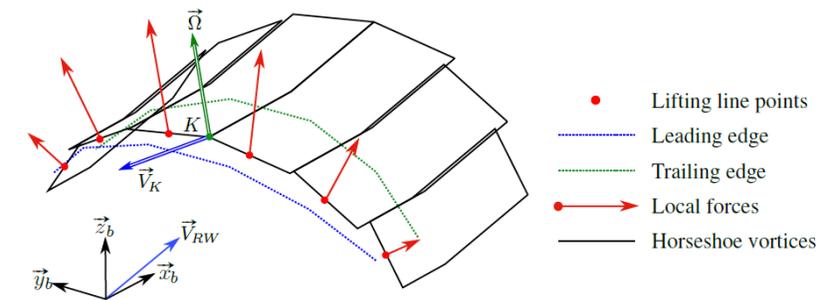


**Modélisation de l'oscillation : Calcul pseudo-statique**

- 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. <sup>1</sup>)



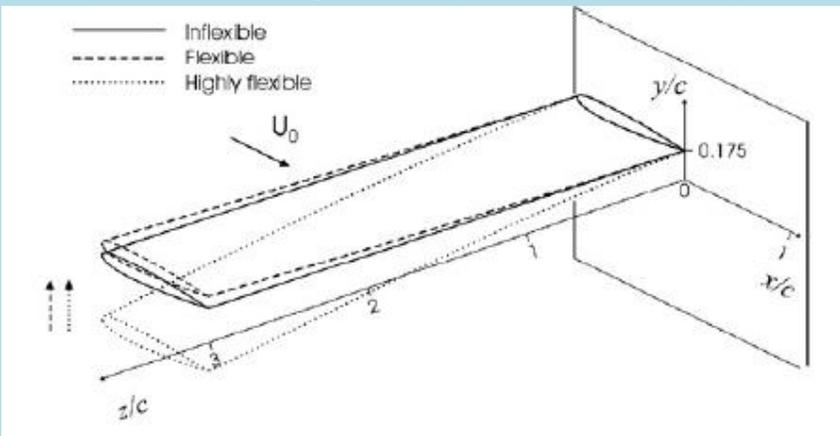
<sup>1</sup>Duport C, "Comparaison d'une méthode de ligne portante 3d non linéaire avec des simulations RANSE 3d et application à la prédiction du chargement global d'un cerf-volant en virage," 15ème Journées de l'hydrodynamique, 2016.

# Validation de l'implémentation et optimisation

## Mise en lumière et détermination de la souplesse optimale

**Description de l'expérience<sup>1</sup>** : 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.<sup>1</sup>)**



**Paramètres de l'expérience**

$V_\infty$ (m/s), vitesse infinie amont	0.3	$c$ (m), longueur de corde	0.1
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ), 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 expérimentales<sup>1</sup>** :

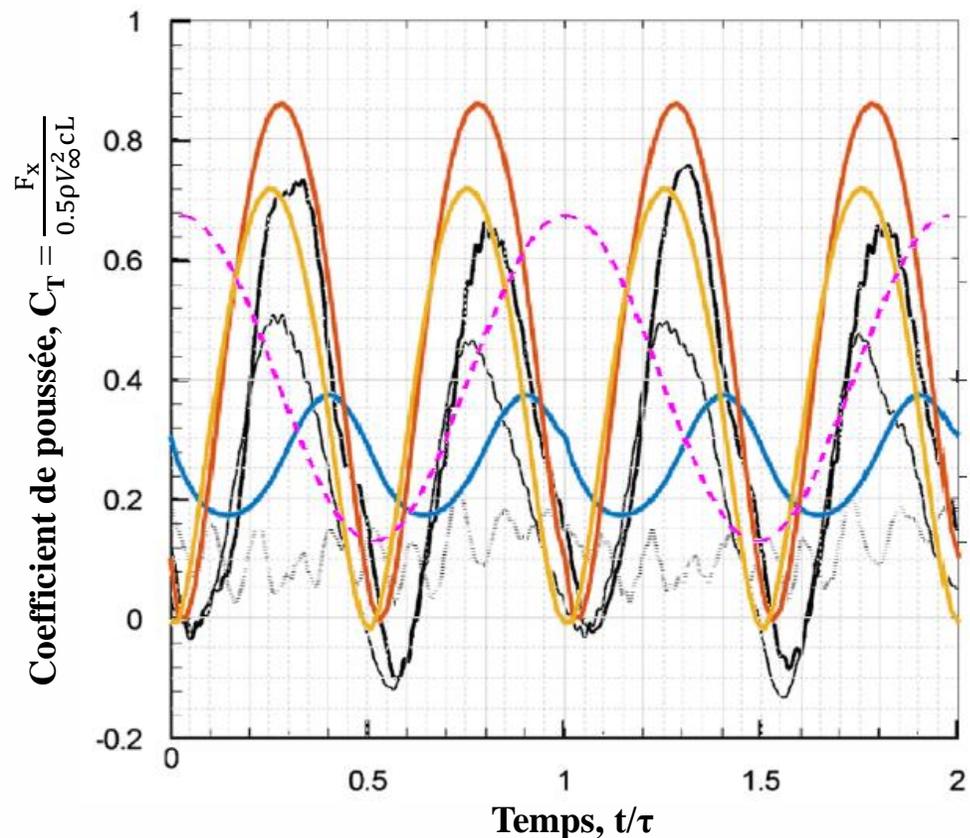
- Evolution des coefficients de poussée au cours de l'oscillation
- Description des déformations



<sup>1</sup>Heathcote 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 » (Heathcote<sup>1</sup>)
- Aile souple (Heathcote<sup>1</sup>)
- ⋯ Aile très souple (Heathcote<sup>1</sup>)
- Aile « rigide »
- Aile souple
- Aile très souple
- - - Position réduite de l'emplanture

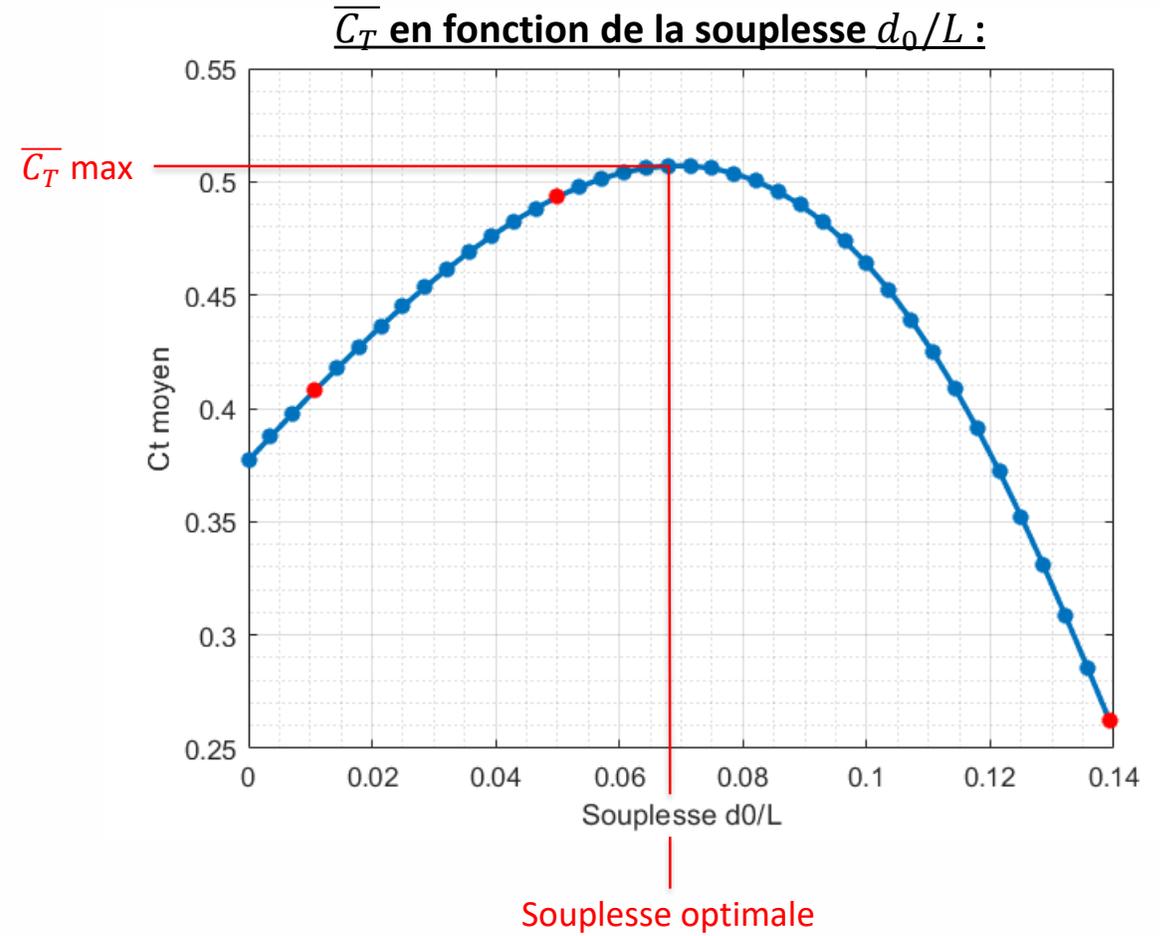
**Calcul de ligne portante:**

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

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

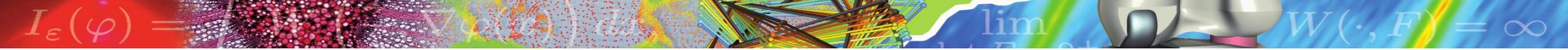
# Optimisation

- 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



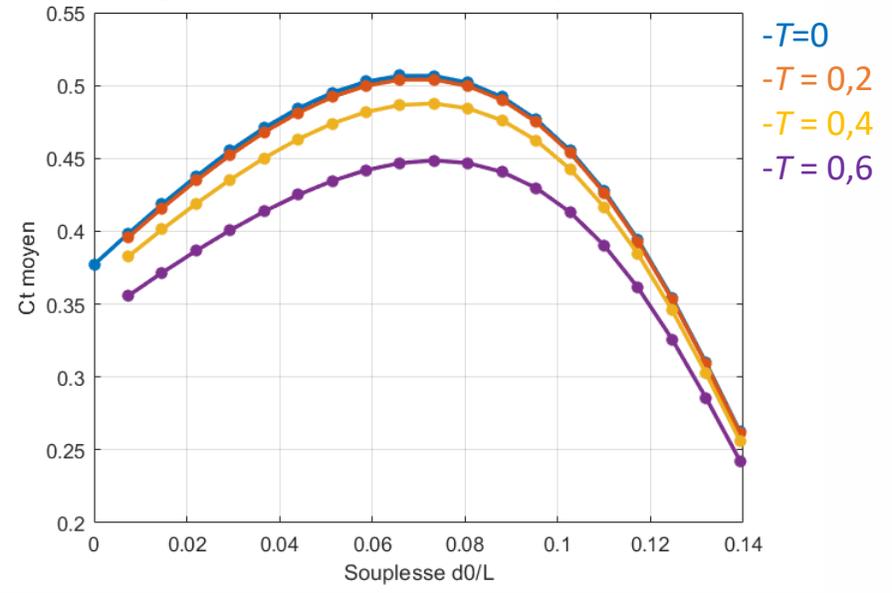


# Étude paramétrique

## Influence de T:

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

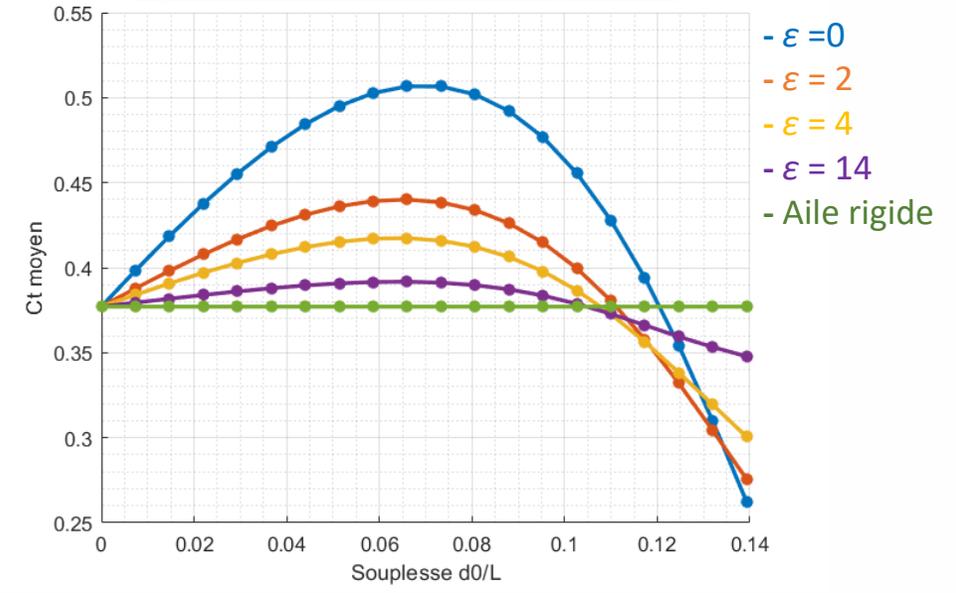
$\overline{C_T}$  en fonction de la souplesse:



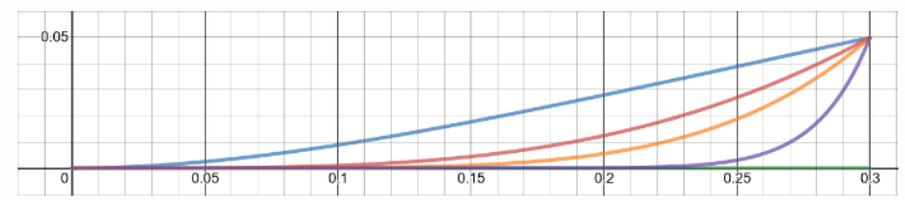
## Influence de epsilon :

- 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

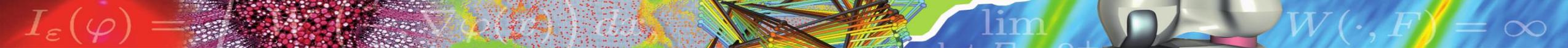


Ceebios



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	$a_t$	$\varphi$	$d_0$ (m)	$\theta$
« 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

