

Optimisation multicritères de l'efficacité propulsive de mini-drônes biomimétiques à ailes battantes par algorithmes évolutionnaires

Hamdaoui Mohamed

Directeur de thèse: Pierre Sagaut (IJLRA), Co-directeur: Stéphane Doncieux (ISIR)

17 février 2010



- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives

Définition

Véhicule ou robot inhabité doté d'autonomie

Définition

Véhicule ou robot inhabité doté d'autonomie

Nous nous intéresserons

Drônes aériens

Définition

Véhicule ou robot inhabité doté d'autonomie

Nous nous intéresserons

Drônes aériens

Avantages

Définition

Véhicule ou robot inhabité doté d'autonomie

Nous nous intéresserons

Drônes aériens

Avantages

- Peu coûteux
- Simple d'utilisation
- Consommable

- Voilure fixe



FIG. 1: Drône militaire
GlobalHawk



FIG. 2: Drône militaire
Predator

Drônes classiques

- Voilure fixe



FIG. 1: Drône militaire *GlobalHawk*



FIG. 2: Drône militaire *Predator*

- Voilure tournante



FIG. 3: Drône hélicoptère *RMAX* de Yamaha



FIG. 4: Drône à voilure tournante *IMAV*, Université de Oldenburg

Micro drônes (inspirés des insectes) :

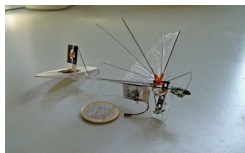


FIG. 5: *Delfly*, Université technique de Delft, 2006

Micro drônes (inspirés des insectes) :

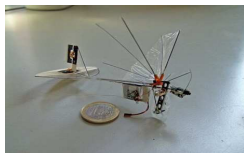


FIG. 5: *Delfly*, Université technique de Delft, 2006

Avantages

Micro drônes (inspirés des insectes) :

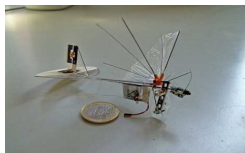


FIG. 5: *Delfly*, Université technique de Delft, 2006

Avantages

- Manœuvrabilité

Micro drônes (inspirés des insectes) :

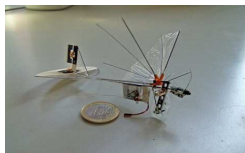


FIG. 5: *Delfly*, Université technique de Delft, 2006

Avantages

- Manœuvrabilité
- Vol stationnaire

Micro drônes (inspirés des insectes) :

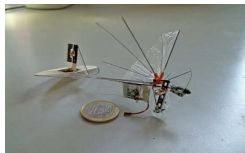


FIG. 5: *Delfly*, Université technique de Delft, 2006

Avantages

- Manœuvrabilité
- Vol stationnaire
- Furtivité

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Drônes à ailes battantes : Mini drônes

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer
- Furtivité

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer
- Furtivité

Projet ROBUR

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer
- Furtivité

Projet ROBUR

- Objectif : conception d'un ornithoptère (ou mini-drône à ailes battantes) autonome.

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer
- Furtivité

Projet ROBUR

- Objectif : conception d'un ornithoptère (ou mini-drône à ailes battantes) autonome.
- Pilote : ISIR

Mini drônes (inspirés des oiseaux) :



FIG. 6: *Robofalcon* de Intercept Technologies

Avantages

- + de charge utile
- + robustes vis à vis des turbulences
- + faciles à fabriquer
- Furtivité

Projet ROBUR

- Objectif : conception d'un ornithoptère (ou mini-drône à ailes battantes) autonome.
- Pilote : ISIR
- Collaborations : IJLRA, ISAE

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique**
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives

Définition

Ornithoptère : Machine construite par l'homme pour voler en battant des ailes. Le nom vient du grec "Ornithos" (oiseau) et "Pteron" (aile).

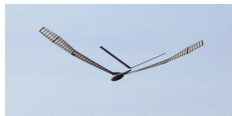


FIG. 7: Ornithoptère de Horst Rabiger, 1990



FIG. 8: Mr Bill de DeLaurier et Harris, 1991



FIG. 9: Ornithoptère Sean Kinkade, 1998

Définition

Ornithoptère : Machine construite par l'homme pour voler en battant des ailes. Le nom vient du grec "Ornithos" (oiseau) et "Pteron" (aile).



FIG. 7: Ornithoptère de Horst Rabiger, 1990



FIG. 8: Mr Bill de DeLaurier et Harris, 1991



FIG. 9: Ornithoptère Sean Kinkade, 1998

Mais ...

Leur rendement énergétique dépasse rarement 50 % !!

Des oiseaux efficaces

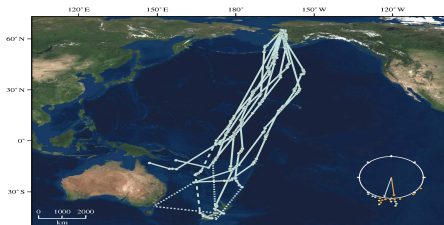


FIG. 10: Trajectoires de neuf barges rousses *Limosa Lapponica* d'Alaska en Nouvelle Zélande, [Gill et al. 2008]

Il a été prouvé [Kvist et al. 2001], [Weimerskirch et al. 2001], [Rayner et al. 1988], [Taylor et al. 2003] que les oiseaux possèdent de **faibles niveaux de traînée** et de **hauts niveaux d'efficacité propulsive** $\sim 80\%$.

Des oiseaux efficaces

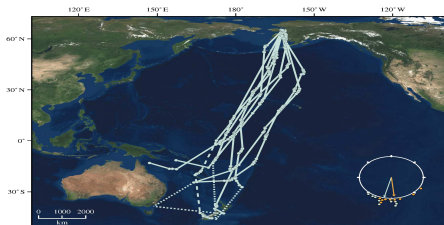


FIG. 10: Trajectoires de neuf barges rousses *Limosa Lapponica* d'Alaska en Nouvelle Zélande, [Gill *et al.* 2008]

Il a été prouvé [Kvist *et al.* 2001], [Weimerskirch *et al.* 2001], [Rayner *et al.* 1988], [Taylor *et al.* 2003] que les oiseaux possèdent de **faibles niveaux de traînée** et de **hauts niveaux d'efficacité propulsive** $\sim 80\%$.

Idée

L'optimisation **énergétique** des ornithoptères existants permettrait de concevoir des drônes plus efficaces.

Definition

Efficacité propulsive $\eta = \text{Force propulsive} \times \text{Vitesse} / \text{Puissance pour mouvoir les ailes}$

Definition

Efficacité propulsive $\eta = \text{Force propulsive} \times \text{Vitesse} / \text{Puissance pour mouvoir les ailes}$

- Mesure l'efficacité du battement d'ailes

Definition

Efficacité propulsive $\eta = \text{Force propulsive} \times \text{Vitesse} / \text{Puissance pour mouvoir les ailes}$

- Mesure l'efficacité du battement d'ailes
- Haute efficacité propulsive = utilisation au mieux des ressources énergétiques pour la propulsion

Divers facteurs peuvent influencer η , parmi lesquels :

- la Géométrie des ailes (rapport d'aspect, forme ...) [Ryzhov *et al.* 2003],

Divers facteurs peuvent influencer η , parmi lesquels :

- la Géométrie des ailes (rapport d'aspect, forme ...) [Ryzhov *et al.* 2003],
- la Flexibilité des ailes [Miao *et al.* 2006],

Divers facteurs peuvent influencer η , parmi lesquels :

- la Géométrie des ailes (rapport d'aspect, forme ...) [Ryzhov *et al.* 2003],
- la Flexibilité des ailes [Miao *et al.* 2006],
- les Cinématiques (Mouvement) de battement d'ailes [Ryzhov *et al.* 2003]

Divers facteurs peuvent influencer η , parmi lesquels :

- la Géométrie des ailes (rapport d'aspect, forme ...) [Ryzhov *et al.* 2003],
- la Flexibilité des ailes [Miao *et al.* 2006],
- les Cinématiques (Mouvement) de battement d'ailes [Ryzhov *et al.* 2003]

Nous nous focaliserons sur :

les Cinématiques (Mouvement) de battement

Caractéristiques de notre travail

$Re \sim 10^5$, 3D et multiobjectif

| Auteur | Multiobjectif | Reynolds | Dim. | Type |
|-------------------------------|---------------|---------------------|------|-----------|
| Anderson <i>et al.</i> 1998 | Non | 4×10^4 | 2D | Exp. |
| Read <i>et al.</i> 2003 | Non | 4×10^4 | 2D | Exp. |
| Techet <i>et al.</i> 2008 | Non | $2 - 5 \times 10^4$ | 3D | Exp. |
| Souied <i>et al.</i> 2008 | Non | 1100 | 2D | Num(N-S) |
| Tuncer <i>et al.</i> 2005 | Non | 10^4 | 2D | Num(N-S) |
| Lan <i>et al.</i> 1979 | Non | Potentiel | 3D | Théo. |
| DeMargerie <i>et al.</i> 2007 | Oui | 10^5 | 3D | Semi-emp. |
| Willis <i>et al.</i> 2006 | Non | Pot.-Visq. | 3D | Num |

Caractéristiques de notre travail

$Re \sim 10^5$, 3D et multiobjectif

| Auteur | Multiobjectif | Reynolds | Dim. | Type |
|-------------------------------|---------------|---------------------|------|-----------|
| Anderson <i>et al.</i> 1998 | Non | 4×10^4 | 2D | Exp. |
| Read <i>et al.</i> 2003 | Non | 4×10^4 | 2D | Exp. |
| Techet <i>et al.</i> 2008 | Non | $2 - 5 \times 10^4$ | 3D | Exp. |
| Souied <i>et al.</i> 2008 | Non | 1100 | 2D | Num(N-S) |
| Tuncer <i>et al.</i> 2005 | Non | 10^4 | 2D | Num(N-S) |
| Lan <i>et al.</i> 1979 | Non | Potentiel | 3D | Théo. |
| DeMargerie <i>et al.</i> 2007 | Oui | 10^5 | 3D | Semi-emp. |
| Willis <i>et al.</i> 2006 | Non | Pot.-Visq. | 3D | Num |

Donc

Les travaux sont **rare**s dans le segment qui nous intéresse.

Question :

Quelles sont les cinématiques optimales pour un ornithoptère en vol de croisière ?

Quelles sont les caractéristiques de ces cinématiques ?

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème**
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives

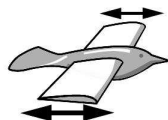
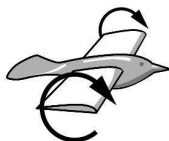
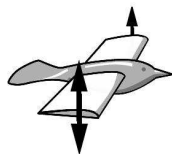
- Ailes rectangulaires

- Ailes rectangulaires
- Même profil selon l'envergure, LPT110A [DeLaurier *et al.* 1993]

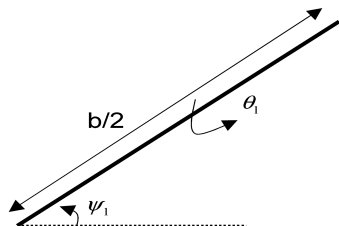
- Ailes rectangulaires
- Même profil selon l'envergure, LPT110A [DeLaurier *et al.* 1993]
- l'envergure b est fixée à 1 mètre

- Ailes rectangulaires
- Même profil selon l'envergure, LPT110A [DeLaurier *et al.* 1993]
- l'envergure b est fixée à 1 mètre
- la masse m (0.67kg) et la surface alaire S (0.15 m²) sont obtenues via des lois d'échelle pour les oiseaux [Shyy *et al.* 1999]

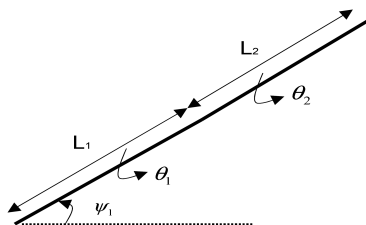
- Ailes rectangulaires
- Même profil selon l'envergure, LPT110A [DeLaurier *et al.* 1993]
- l'envergure b est fixée à 1 mètre
- la masse m (0.67kg) et la surface alaire S (0.15 m²) sont obtenues via des lois d'échelle pour les oiseaux [Shyy *et al.* 1999]
- l'envergure, la charge alaire et le rapport d'aspect ($b = 1$ m, $AR = 6.7$, $\frac{W}{S} = 43.8$) sont proches de ceux du *Phaethon lepturus* ($b = 1$ m, $AR = 10.06$, $\frac{W}{S} = 42.85$).



Cas1 : Dièdre + tangage ψ_1 et θ_1



Cas2 : Dièdre + tangage ψ_1, θ_1 et θ_2 , 2 panneaux



$$\psi_1 = C_{10} + A_{11} \cos(2\pi f t + \phi_{11})$$

$$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta\Theta_1 \cos(2\pi f t + \phi_{\theta_1})$$

$$\theta_2 = \theta_{20} + \Delta\Theta_2 \cos(2\pi f t + \phi_{\theta_2})$$

Plan de battement perpendiculaire à la direction d'avancée.

Caractéristiques de notre travail

Reynolds de travail 10^5

Problème 3D

Décrochage important [Hubel et Tropéa 2006,2009].

| Auteur | Type | Décrochage | Dim. | Visq. | Re |
|-----------------|----------------|---------------|------|-------|--------|
| Phlips, 1981 | Ligne Portante | Non | 3D | Non | — |
| Lan, 1979 | Surf. Portante | Non | 3D | Non | — |
| Jones, 2003 | Potentiel | Oui (LEV+TEV) | 2D | Non | 10^4 |
| Walker, 2002 | Semi-emp. | Non | 3D | Oui | 10^2 |
| Dickinson, 1999 | Analytique | Non | 3D | Oui | 10^2 |
| DeLaurier, 1993 | Semi-emp. | Oui | 3D | Oui | 10^5 |
| Dae Kwan, 2007 | Semi-emp. | Oui | 3D | Oui | 10^4 |
| Pesavanto, 2007 | Semi-emp. | Oui | 3D | Oui | 10^3 |

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Validation par des mesures en soufflerie [DeLaurier, 1993b]

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Validation par des mesures en soufflerie [DeLaurier, 1993b]

- Reynolds $\sim 2 \times 10^5$

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Validation par des mesures en soufflerie [DeLaurier, 1993b]

- Reynolds $\sim 2 \times 10^5$
- $St \in [0, 0.2]$

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Validation par des mesures en soufflerie [DeLaurier, 1993b]

- Reynolds $\sim 2 \times 10^5$
- $St \in [0, 0.2]$
- $k \in [0, 0.2]$

Modèle de mécanique du vol

Les efforts sont calculés par le modèle de [DeLaurier, 1993].

Caractéristiques

- Aile découpée en tranches
- Modèle Potentiel, Linéarisé
- Prise en compte de traînée de frottement, de traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de traînée induite
- Non-linéarité : prise en compte du décrochage

Validation par des mesures en soufflerie [DeLaurier, 1993b]

- Reynolds $\sim 2 \times 10^5$
- $St \in [0, 0.2]$
- $k \in [0, 0.2]$
- Conditions pour notre travail (Reynolds $\sim 10^5$, $k \sim 0.1$ et $St \sim 0.1 - 0.2$)

Validation du modèle

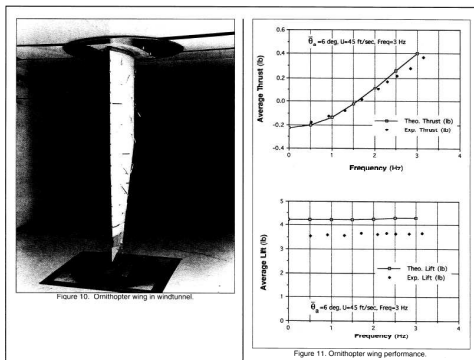
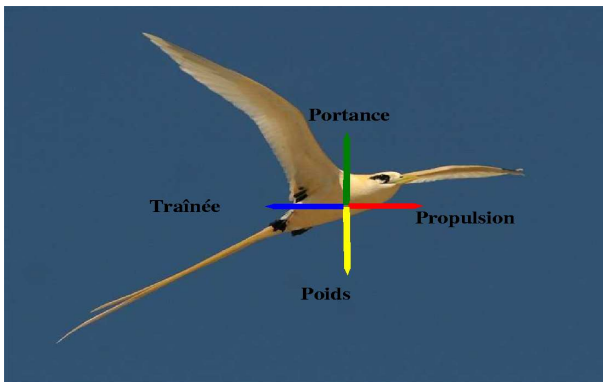


FIG. 11: Dispositif et résultats pour la validation du modèle de DeLaurier

Le vol de croisière

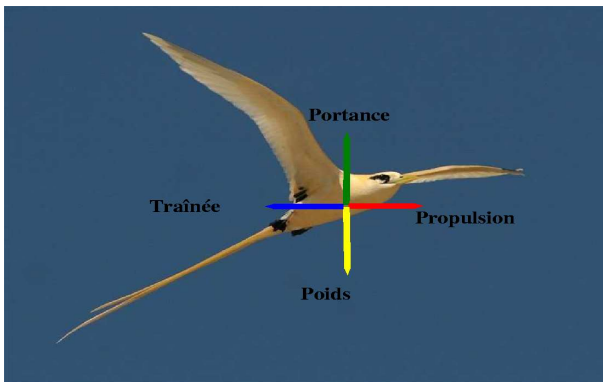
L'équilibre mécanique en vol de croisière impose :



- L'égalité entre la portance et le poids (I)

Le vol de croisière

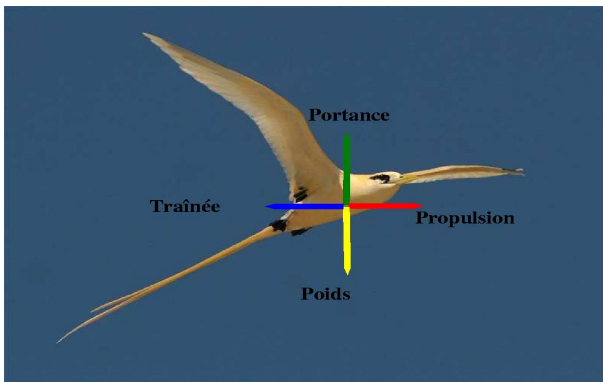
L'équilibre mécanique en vol de croisière impose :



- L'égalité entre la portance et le poids (I)
- L'égalité entre la propulsion et la traînée (II) (Hypothèse de travail)

Le vol de croisière

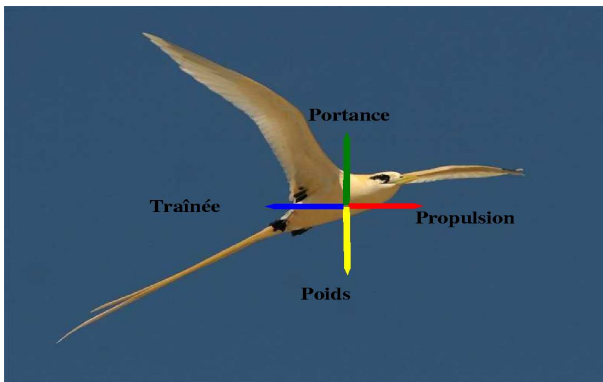
L'équilibre mécanique en vol de croisière impose :



- L'égalité entre la portance et le poids (I)
- L'égalité entre la propulsion et la traînée (II) (Hypothèse de travail)
- La nullité du moment global (III)

Le vol de croisière

L'équilibre mécanique en vol de croisière impose :



- L'égalité entre la portance et le poids (I)
- L'égalité entre la propulsion et la traînée (II) (Hypothèse de travail)
- La nullité du moment global (III)
- \implies **Problème multiobjectif**

Les objectifs à optimiser sont :

- Efficacité propulsive η (à MAXimiser)

Les objectifs à optimiser sont :

- Efficacité propulsive η (à MAXimiser)
- (I) \Rightarrow Différence entre portance et poids DC_z (à MINimiser)

Les objectifs à optimiser sont :

- Efficacité propulsive η (à MAXimiser)
- (I) \Rightarrow Différence entre portance et poids DC_z (à MINimiser)
- (III) \Rightarrow Norme du moment global C_m (à MINimiser)

Les objectifs à optimiser sont :

- Efficacité propulsive η (à MAXimiser)
- (I) \Rightarrow Différence entre portance et poids DC_z (à MINimiser)
- (III) \Rightarrow Norme du moment global C_m (à MINimiser)

(II) est toujours vérifiée : la force de propulsion calculée servira à déterminer la force de traînée (Hypothèse de travail).

Les contraintes à satisfaire par les solutions sont :

- Energie : $1 \geq \eta \geq 0$, Puissance ≥ 0

Les contraintes à satisfaire par les solutions sont :

- Energie : $1 \geq \eta \geq 0$, Puissance ≥ 0
- Portance : $C_{z_{min}} \leq C_z \leq C_{z_{max}}$

Les contraintes à satisfaire par les solutions sont :

- Energie : $1 \geq \eta \geq 0$, Puissance ≥ 0
- Portance : $C_{z_{min}} \leq C_z \leq C_{z_{max}}$
- Propulsion : $C_{T_{min}} \leq C_T \leq C_{T_{max}}$

Formalisation du problème

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(x_1, \dots, x_p), \dots, f_n(x_1, \dots, x_p)),$$

avec

$$\forall i \in [1, \dots, k_e] \quad , c_{e_i}(\mathbf{x}) = 0,$$

et

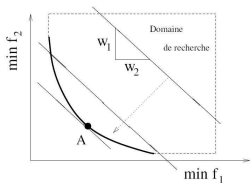
$$\forall j \in [1, \dots, k_{in}] \quad , c_{in_j}(\mathbf{x}) \leq 0,$$

avec \mathbf{x} le *vecteur de décision* et \mathbf{f} le *vecteur des objectifs*.

L'espace admissible \mathbf{S} est défini par :

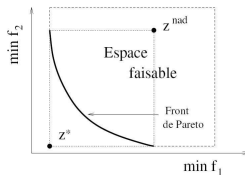
$$\{ \mathbf{x} \mid \forall i \in [1, \dots, k_e] \quad , c_{e_i}(\mathbf{x}) = 0 \text{ et } \forall j \in [1, \dots, k_{in}] \quad , c_{in_j}(\mathbf{x}) \leq 0 \}.$$

Un seul objectif



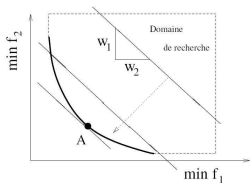
Ensemble solution
difficilement cernable

Tous les objectifs



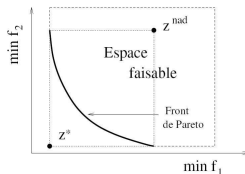
Ensemble solution
facilement cernable

Un seul objectif



Ensemble solution
difficilement cernable

Tous les objectifs



Ensemble solution
facilement cernable

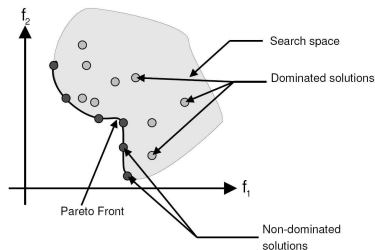
Nous opterons pour

Une approche prenant en compte **simultanément** tous les objectifs

Dominance au sens de Pareto

$\mathbf{x}^1 \succ \mathbf{x}^2$ si et seulement si

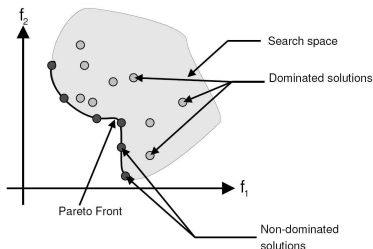
$$\begin{aligned} \exists i_0 \in [1, \dots, n] , f_{i_0}(\mathbf{x}^1) < f_{i_0}(\mathbf{x}^2), \\ \forall i \in [1, \dots, n] , f_i(\mathbf{x}^1) \leq f_i(\mathbf{x}^2) \end{aligned}$$



Dominance au sens de Pareto

$\mathbf{x}^1 \succ \mathbf{x}^2$ si et seulement si

$$\begin{aligned} \exists i_0 \in [1, \dots, n] , f_{i_0}(\mathbf{x}^1) < f_{i_0}(\mathbf{x}^2), \\ \forall i \in [1, \dots, n] , f_i(\mathbf{x}^1) \leq f_i(\mathbf{x}^2) \end{aligned}$$



- Numériquement, nous obtenons une approximation discrète de la surface de Pareto

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation**
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives

Modalités adoptées :

- Utilisation d'**algorithmes évolutionnaires** (ϵ -MOEA [Deb *et al.* 2003])

Modalités adoptées :

- Utilisation d'**algorithmes évolutionnaires** (ϵ -MOEA [Deb *et al.* 2003])
- Utilisation de différentes **cinématiques de battement** (Cas1 : **7 Paramètres** ou Cas2 : **10 Paramètres**)

Modalités adoptées :

- Utilisation d'**algorithmes évolutionnaires** (ϵ -MOEA [Deb *et al.* 2003])
- Utilisation de différentes **cinématiques de battement** (Cas1 : **7 Paramètres** ou Cas2 : **10 Paramètres**)
- Utilisation de **3 vitesses de croisière** (6, 10 et 14 m/s) par cinématique de battement

Modalités adoptées :

- Utilisation d'**algorithmes évolutionnaires** (ϵ -MOEA [Deb *et al.* 2003])
- Utilisation de différentes **cinématiques de battement** (Cas1 : **7 Paramètres** ou Cas2 : **10 Paramètres**)
- Utilisation de **3 vitesses de croisière** (6, 10 et 14 m/s) par cinématique de battement

Objectif :

Déterminer la cinématique permettant d'obtenir les meilleures performances.

Déterminer pour chaque cinématique la vitesse permettant d'obtenir les meilleures performances.

- **8 calculs identiques** sont lancés par **couple (cinématique,vitesse)**

| Paramètres de l'algorithme évolutionnaire | Valeurs |
|---|---------------|
| Taux de remplacement τ_r | 0.7 |
| Taille de la population τ_p | 100 |
| Nombre de générations n_g | 5000 |
| Evaluations | 350000/calcul |
| Heures de calcul | 40 hrs/calcul |

- **8 calculs identiques** sont lancés par **couple (cinématique,vitesse)**

| Paramètres de l'algorithme évolutionnaire | Valeurs |
|---|---------------|
| Taux de remplacement τ_r | 0.7 |
| Taille de la population τ_p | 100 |
| Nombre de générations n_g | 5000 |
| Evaluations | 350000/calcul |
| Heures de calcul | 40 hrs/calcul |

- La variabilité entre les calculs est faible \Rightarrow convergence des calculs

- **8 calculs identiques** sont lancés par **couple** (cinématique,vitesse)

| Paramètres de l'algorithme évolutionnaire | Valeurs |
|---|---------------|
| Taux de remplacement τ_r | 0.7 |
| Taille de la population τ_p | 100 |
| Nombre de générations n_g | 5000 |
| Evaluations | 350000/calcul |
| Heures de calcul | 40 hrs/calcul |

- La variabilité entre les calculs est faible \Rightarrow convergence des calculs
- Obtention de la **surface de Pareto finale** : **agrégation** des 8 surfaces de Pareto obtenues, puis **sélection des solutions non dominées**.

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations**
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives

Question 1

Quelles sont les relations entre les paramètres cinématiques et les objectifs optimisés ?

Question 1

Quelles sont les relations entre les paramètres cinématiques et les objectifs optimisés ?

Question 2

Quelle solution sélectionner ?

Questions principales

Question 1

Quelles sont les relations entre les paramètres cinématiques et les objectifs optimisés ?

Question 2

Quelle solution sélectionner ?

Question 3

Quels sont les paramètres cinématiques qui affectent le plus la solution choisie ?

- m_c^* est le quotient de la portance et du poids

- m_c^* est le quotient de la portance et du poids
- C_m^* est le quotient de C_m et de C_{m_0} (coefficient de moment à portance nulle)

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats**
- 7 Conclusion et Perspectives

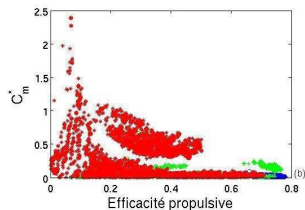
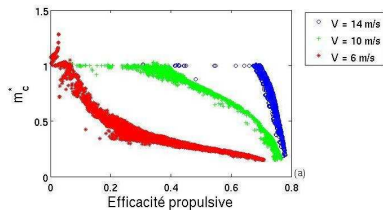


FIG. 12: Résultats Cas1

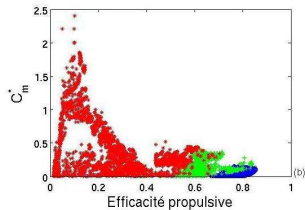
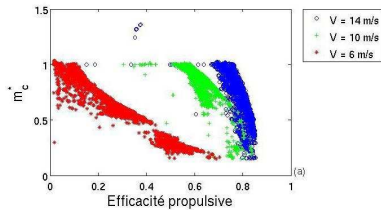


FIG. 13: Résultats Cas2

Surfaces de Pareto Cas1 et Cas2

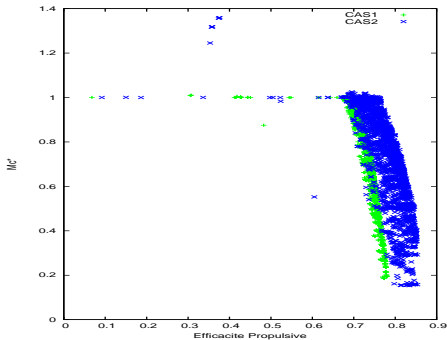


FIG. 14: Surfaces de Pareto à 14 m/s

Surfaces de Pareto Cas1 et Cas2

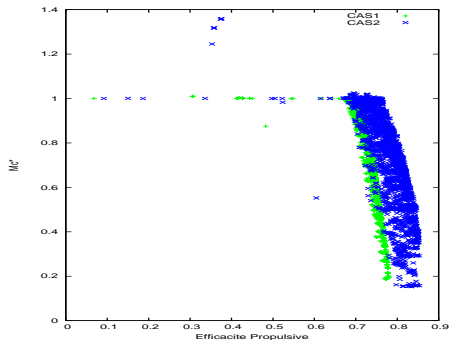


FIG. 14: Surfaces de Pareto à 14 m/s

Remarque

Plan de battement perpendiculaire à la direction d'avancée \Rightarrow Hautes vitesses privilégiées (typique chez les oiseaux [Tobalske et Dial, 1996]).

Question 1

Quelles sont les relations entre les paramètres cinématiques et les objectifs optimisés ?

Question 1

Quelles sont les relations entre les paramètres cinématiques et les objectifs optimisés ?

Outil : Régression multiple

Variable prédite : \hat{Y} , Prédicteurs : (X_1, \dots, X_p) , Modèle :

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^p \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i^2$$

Utilisation des fonctions *regstats* and *rstool* de la Statistics ToolboxTM de MATLAB ®.

Liste des paramètres

Cas1

- C_{10} , angle de dièdre moyen
- $k = \frac{\pi f c}{V}$, fréquence réduite
- $St = \frac{f b A_{11}}{2V}$, nombre de Strouhal
- θ_{10} , angle de tangage moyen
- $|\Delta\Theta_1|$, amplitude de tangage
- $\Delta\varphi_1 = \phi_{\theta_1} - \phi_{11}$, déphasage entre tangage et dièdre.

Cas2 = Cas1 +

- θ_{20} , angle de tangage moyen 2
- $|\Delta\Theta_2|$, amplitude de tangage 2
- $\Delta\varphi_2 = \phi_{\theta_1} - \phi_{\theta_2}$, déphasage en tangage entre les deux panneaux

Définition

m_c^* : rapport entre portance et poids

θ_{10} : angle moyen de tangage premier panneau

θ_{20} : angle moyen de tangage deuxième panneau

$\Delta\varphi_1$: Déphasage tangage-dièdre

$\Delta\varphi_2$: Déphasage tangage-tangage

Définition

m_c^* : rapport entre portance et poids

θ_{10} : angle moyen de tangage premier panneau

θ_{20} : angle moyen de tangage deuxième panneau

$\Delta\varphi_1$: Déphasage tangage-dièdre

$\Delta\varphi_2$: Déphasage tangage-tangage

Cas1 et Cas2

m_c^* dépend de :

| | θ_{10} | θ_{20} | $\Delta\varphi_1$ | $\Delta\varphi_2$ |
|-------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Cas1 | ↗ | x | x | x |
| Cas2 | 2↗ | 1↗ | 3↘ | 4↗ |

Cas1 et Cas2

η dépend de :

| | θ_{10} | St | k | $ \Delta\Theta_1 $ | θ_{20} | $ \Delta\Theta_2 $ |
|-------------|---------------|------|-----|--------------------|---------------|--------------------|
| Cas1 | 1 ↘ | 2 ↘ | 3 ↘ | 4 ↗ | x | x |
| Cas2 | 2 ↘ | 3 ↗ | x | 5 ↗ | 1 ↘ | 4 ↘ |

Cas1 et Cas2

η dépend de :

| | θ_{10} | St | k | $ \Delta\Theta_1 $ | θ_{20} | $ \Delta\Theta_2 $ |
|------|---------------|------|-----|--------------------|---------------|--------------------|
| Cas1 | 1 ↘ | 2 ↘ | 3 ↘ | 4 ↗ | x | x |
| Cas2 | 2 ↘ | 3 ↗ | x | 5 ↗ | 1 ↘ | 4 ↘ |

Pour Cas1

- Effet ↘ $St \sim$ [Phlips *et al.* 1981]
- Effet ↘ $k \sim$ [Garrick, 1937]
- Effet ↗ $|\Delta\Theta_1| \sim$ [Lan, 1979]

Question 2

Quelle solution sélectionner ?

Question 2

Quelle solution sélectionner ?

Outil : Diagramme de niveau [Blasco *et al.*, 2008]

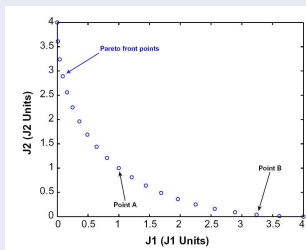


FIG. 15: Surface de Pareto pour un problème à deux objectifs et un paramètre

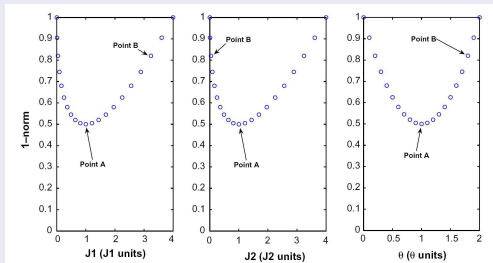


FIG. 16: Diagramme de niveau pour la norme L^1 pour la surface de Pareto en Figure 15

Le point idéal est obtenu lorsque la norme s'annule.

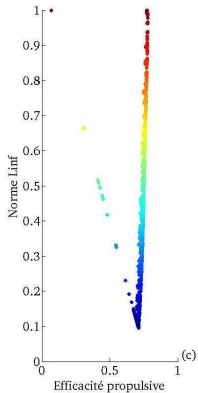


FIG. 17: Diagramme de niveau pour la norme L^∞ en fonction de η , **Cas1**

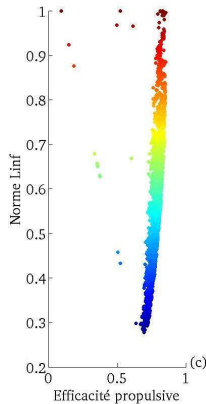


FIG. 18: Diagramme de niveau pour la norme L^∞ en fonction de η , **Cas2**

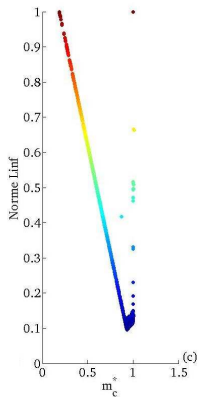


FIG. 19: Diagramme de niveau pour la norme L^∞ en fonction de m_c^* , Cas1

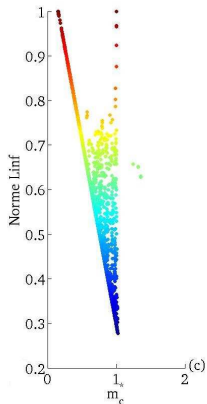


FIG. 20: Diagramme de niveau pour la norme L^∞ en fonction de m_c^* , Cas2

Caractéristiques du point compromis

Cas1 et Cas2

$$\chi = \frac{\Delta\Theta}{St}$$

| | η | m_c^* | C_m^* | k | St | χ_1 | χ_2 |
|-------------|--------|---------|---------|------|------|----------|----------|
| Cas1 | 0.7 | 0.935 | 0.027 | 0.12 | 0.13 | 0.95 | x |
| Cas2 | 0.7 | 1.025 | 0.0112 | 0.14 | 0.23 | 0.27 | 1.78 |

| | C_{10} | A_{11} | ϕ_{11} | f | θ_{10} | $\Delta\Theta_1$ | ϕ_{θ_1} |
|-------------|----------|----------|-------------|---------|---------------|------------------|-------------------|
| Cas1 | -0.55° | 30.47° | -10.3° | 3.58 Hz | 3.6° | 7.6° | -85° |
| Cas2 | 14.6° | 45.9° | 56.9° | 4.08 Hz | 3.44° | 3.62° | 23.9° |

| | θ_{20} | $\Delta\Theta_2$ | ϕ_{θ_2} |
|-------------|---------------|------------------|-------------------|
| Cas1 | x | x | x |
| Cas2 | 5.88° | 23.51° | 34.5° |

Remarques

Remarques

- $k, St \ll 1$ et $\chi_1 \sim 1 \implies$ le modèle linéarisé actif.

Remarques

- $k, St \ll 1$ et $\chi_1 \sim 1 \implies$ le modèle linéarisé actif.
- $\chi_2 \geq 1 \implies$ modèle de décrochage actif sur 2^{ième} panneau

Remarques

- $k, St \ll 1$ et $\chi_1 \sim 1 \implies$ le modèle linéarisé actif.
- $\chi_2 \geq 1 \implies$ modèle de décrochage actif sur 2^{ième} panneau

Comparaison **Cas1** et **Cas2**

Remarques

- $k, St \ll 1$ et $\chi_1 \sim 1 \implies$ le modèle linéarisé actif.
- $\chi_2 \geq 1 \implies$ modèle de décrochage actif sur 2^{ième} panneau

Comparaison **Cas1** et **Cas2**

- **Cas2** est meilleur que **Cas1** sur m_c^* et C_m^*

Remarques

- $k, St \ll 1$ et $\chi_1 \sim 1 \implies$ le modèle linéarisé actif.
- $\chi_2 \geq 1 \implies$ modèle de décrochage actif sur 2^{ième} panneau

Comparaison **Cas1** et **Cas2**

- **Cas2** est meilleur que **Cas1** sur m_c^* et C_m^*
- **Cas2** présente un décrochage sur le deuxième panneau

Cas1 et Cas2

| | Puissance massique | C_x | Fréquence |
|-------------|--------------------|-------|-----------|
| Cas1 | 27.6W/kg | 0.05 | 3.58 Hz |
| Cas2 | 25.37W/kg | 0.05 | 4.08 Hz |

Cas1 et Cas2

| | Puissance massique | C_x | Fréquence |
|-------------|--------------------|-------|-----------|
| Cas1 | 27.6W/kg | 0.05 | 3.58 Hz |
| Cas2 | 25.37W/kg | 0.05 | 4.08 Hz |

- Puissance par unité de masse \sim valeurs aviaires (17-30 W/kg)
[Tobalske *et al.* 2003]

Cas1 et Cas2

| | Puissance massique | C_x | Fréquence |
|-------------|--------------------|-------|-----------|
| Cas1 | 27.6W/kg | 0.05 | 3.58 Hz |
| Cas2 | 25.37W/kg | 0.05 | 4.08 Hz |

- Puissance par unité de masse \sim valeurs aviaires (17-30 W/kg) [Tobalske *et al.* 2003]
- Faible valeur du coefficient de traînée (0.1-0.4)[Tobalske 2007]

Cas1 et Cas2

| | Puissance massique | C_x | Fréquence |
|-------------|--------------------|-------|-----------|
| Cas1 | 27.6W/kg | 0.05 | 3.58 Hz |
| Cas2 | 25.37W/kg | 0.05 | 4.08 Hz |

- Puissance par unité de masse \sim valeurs aviaires (17-30 W/kg) [Tobalske *et al.* 2003]
- Faible valeur du coefficient de traînée (0.1-0.4)[Tobalske 2007]
- Fréquence se rapproche de la fréquence (4.22 Hz) du *Phaethon lepturus*.

Question 3

Quels sont les paramètres cinématiques qui affectent le plus la solution choisie ?

Question 3

Quels sont les paramètres cinématiques qui affectent le plus la solution choisie ?

Outil

Question 3

Quels sont les paramètres cinématiques qui affectent le plus la solution choisie ?

Outil

- Voisinage proche = solutions de norme L^∞ proche à 1 % de celle du point compromis

Question 3

Quels sont les paramètres cinématiques qui affectent le plus la solution choisie ?

Outil

- Voisinage proche = solutions de norme L^∞ proche à 1 % de celle du point compromis
- Utilisation d'arbres de décision (**Data-Mining**) pour expliquer ce voisinage proche en fonction des paramètres cinématiques

Cas1

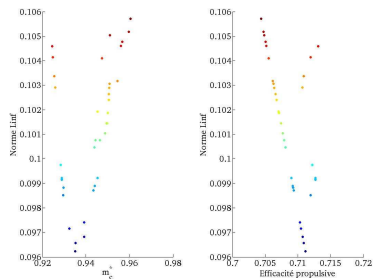


FIG. 21: Voisinage proche du point compromis.

Voisinage proche du point compromis

Cas1

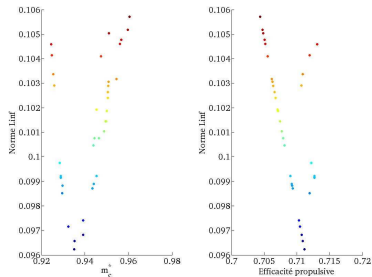


FIG. 21: Voisinage proche du point compromis.

Cas2

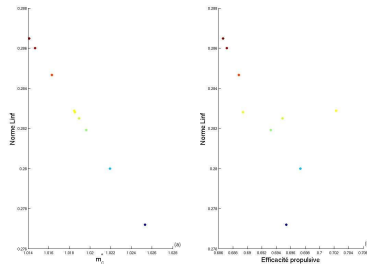


FIG. 22: Voisinage proche du point compromis.

Cas1

L'arbre de décision donne une règle pour le voisinage proche avec un risque 0.0006 :

$$3.55^\circ \leq \theta_{10} \leq 3.74^\circ \text{ et } f \geq 3.28\text{Hz}$$

⇒ le voisinage du point compromis est sensible à la **fréquence** f et à l'**angle de tangage moyen** θ_{10} .

Cas1

L'arbre de décision donne une règle pour le voisinage proche avec un risque 0.0006 :

$$3.55^\circ \leq \theta_{10} \leq 3.74^\circ \text{ et } f \geq 3.28\text{Hz}$$

⇒ le voisinage du point compromis est sensible à la **fréquence** f et à l'**angle de tangage moyen** θ_{10} .

Cas2

L'arbre de décision donne une règle pour le voisinage proche avec un risque 0 :

$$\Delta\Theta_1 \leq 3.68^\circ \text{ et } \theta_{10} \geq 3.15^\circ$$

⇒ le voisinage du point compromis est sensible à l'**amplitude de tangage** $\Delta\Theta_1$ et l'**angle de tangage moyen** θ_{10} du premier panneau.

- 1 Contexte et Motivations
- 2 Problématique
- 3 Formulation du problème
- 4 Optimisation
- 5 Questions et notations
- 6 Résultats
- 7 Conclusion et Perspectives**

Conclusions

- Approche multiobjectif

Conclusions

- Approche multiobjectif
- Modèle de mécanique du vol efficace et simple

Conclusions

- Approche multiobjectif
- Modèle de mécanique du vol efficace et simple
- Obtention de cinématiques et vitesses optimales (Cas2 à 14 m/s)

Conclusions

- Approche multiobjectif
- Modèle de mécanique du vol efficace et simple
- Obtention de cinématiques et vitesses optimales (Cas2 à 14 m/s)
- Relations entre paramètres cinématiques et solutions optimales relayées par la littérature (Cas1)

Conclusions

- Approche multiobjectif
- Modèle de mécanique du vol efficace et simple
- Obtention de cinématiques et vitesses optimales (Cas2 à 14 m/s)
- Relations entre paramètres cinématiques et solutions optimales relayées par la littérature (Cas1)
- Solutions compromis réalistes \sim données aviaires

Conclusions

- Approche multiobjectif
- Modèle de mécanique du vol efficace et simple
- Obtention de cinématiques et vitesses optimales (Cas2 à 14 m/s)
- Relations entre paramètres cinématiques et solutions optimales relayées par la littérature (Cas1)
- Solutions compromis réalistes \sim données aviaires
- Rôle critique de certains paramètres cinématiques (fréquence et calage pour Cas1, amplitude de tangage et calage pour Cas2)

Perspectives

- Réalisation de l'optimisation sur un prototype réel (vérification de Cas2)

Perspectives

- Réalisation de l'optimisation sur un prototype réel (vérification de Cas2)
- Impact de l'ajout de plusieurs panneaux (Cas2)

Perspectives

- Réalisation de l'optimisation sur un prototype réel (vérification de Cas2)
- Impact de l'ajout de plusieurs panneaux (Cas2)
- Possibilité de contrôler le système via les paramètres critiques identifiés

