

Analyse du vol battu par une approche multi-objectif

Stéphane Doncieux

ISIR, UPMC - stephane.doncieux@isir.upmc.fr



Introduction

Introduction

Objet de cette présentation :

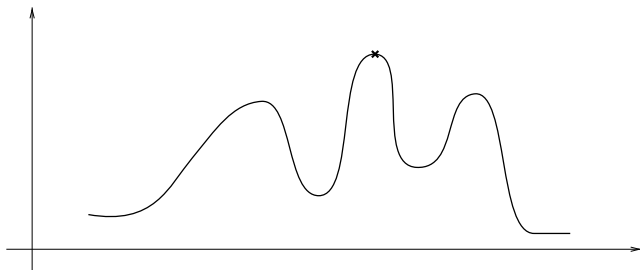
- présentation du concept de l'analyse multi-objectif
- application au vol battu

Optimisation

Qu'est-ce que c'est ?

La problématique de l'optimisation est de trouver le ou les optima globaux de fonctions données.

Optimisation = algorithmes et méthodes permettant de déterminer ces optima.



Optimisation

Pourquoi faire ?

- utilisation en ingénierie : optimisation de processus industriels en vue de gains de productivité
- utilisation en science :
 - ▶ aide à la conception de modèles computationnels (optimisation de paramètres)
 - ▶ aide à l'étude de modèles computationnels paramétrés
- utilisation en science de l'ingénierie : méthode d'aide à la conception de comportements pour des robots (volants)

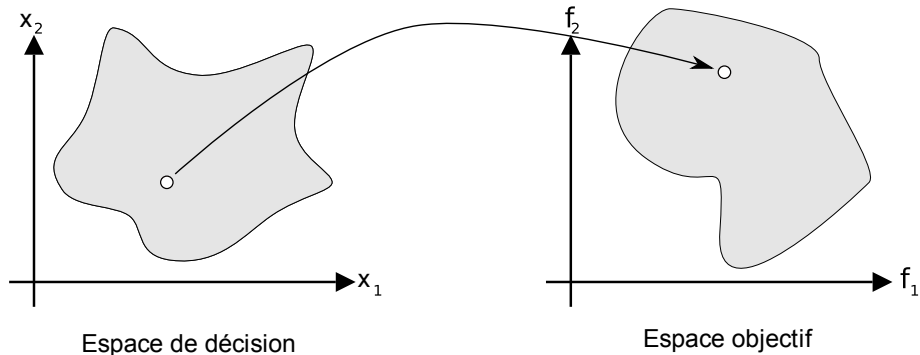
Optimisation

Pourquoi faire ?

- utilisation en ingénierie : optimisation de processus industriels en vue de gains de productivité
- utilisation en science :
 - ▶ aide à la conception de modèles computationnels (optimisation de paramètres)
 - ▶ aide à l'étude de modèles computationnels paramétrés
- utilisation en science de l'ingénierie : méthode d'aide à la conception de comportements pour des robots (volants)

Introduction à l'optimisation

Définitions et formalisme



Définitions et formalisme

Mono-objectif

Trouver $\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix}$ minimisant/maximisant

$f(\mathbf{X})$

avec les contraintes :

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$l_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

Multi-objectif

Trouver $\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix}$ minimisant/maximisant

$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{Bmatrix} f_1(\mathbf{X}) \\ f_2(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{X}) \end{Bmatrix}$

avec les contraintes :

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$l_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

Définitions et formalisme

Mono-objectif

Trouver $\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix}$ minimisant/maximisant

$f(\mathbf{X})$

avec les contraintes :

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$l_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

Multi-objectif

Trouver $\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix}$ minimisant/maximisant

$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{Bmatrix} f_1(\mathbf{X}) \\ f_2(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{X}) \end{Bmatrix}$

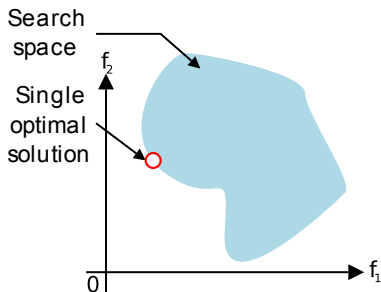
avec les contraintes :

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$l_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q$$

Résolution de problèmes multi-objectif

Mono-objective algorithms

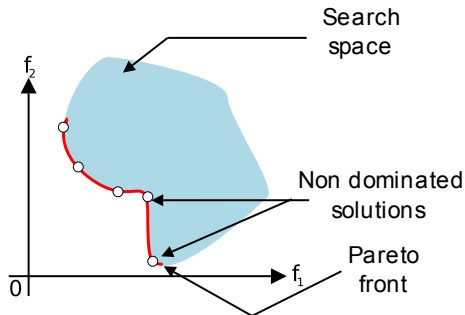


minimisation de f_1 et f_2

Résultat

une seule solution optimale

Multi-objective algorithms



Résultat

Ensemble des meilleurs solutions **compromis**

Analyse multi-objectif

Analyse multi-objectif

Innovization

Innovation+Optimization

Les solutions Pareto-optimales sont (généralement) nombreuses, optimales (!) et arbitrairement proches :

- elles donnent un retour sur ce qui est faisable dans un espace de recherche donné
- analyser comment les paramètres optimaux sont reliés entre eux ou aux objectifs renseigne sur le système étudié



K. Deb and A. Srinivasan, "INNOVIZATION : Discovery of Innovative Design Principles Through Multiobjective Evolutionary Optimization," *Multiobjective Problem Solving from Nature : From Concepts to Applications*, p. 243, 2007.

Analyse multi-objectif

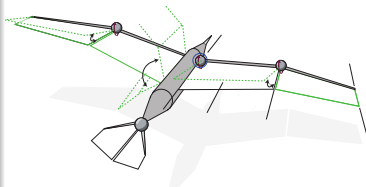
Principes

- 1 Choisir quelques objectifs antagonistes
- 2 Définir l'espace de recherche
- 3 Trouver une approximation du front de Pareto
- 4 Analyser les résultats

Application : robot à ailes battantes

Questions

- Quelles sont les caractéristiques atteignables (vitesse/énergie consommée) pour un drone à ailes battante de morphologie donnée ?
- Quelle est l'importance des différents degrés de liberté ?
- Quels sont les paramètres importants ?
- Comment sont-ils reliés aux critères importants ?



Doncieux, S. (2009).

Evolutionary Algorithms as Exploration and Analysis Helper tools, Application to a Flapping Wings aircraft.
IROS workshop Exploring new horizons in Evolutionary Design of Robots. 11th october 2009, St. Louis, USA.



Hamdaoui, M. (2009).

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

Paris, France. Thèse de doctorat. IJLRA/ISIR, Université Pierre et Marie Curie.

Comment trouver le front de Pareto ?

Evaluation d'un jeu de paramètres :
observation du comportement d'un robot à ailes battantes simulé pendant une période de temps suffisante.

Recherche exhaustive ?

- 7 à 10 paramètres
 - discrétisation grossière : 10 valeurs possibles par paramètre
- de 10^7 à 10^{10} jeux de paramètres différents pour une précision faible...

L'utilisation d'heuristiques est nécessaire pour réduire le nombre de valeurs explorées et obtenir une plus grande précision.

Comment trouver le front de Pareto ?

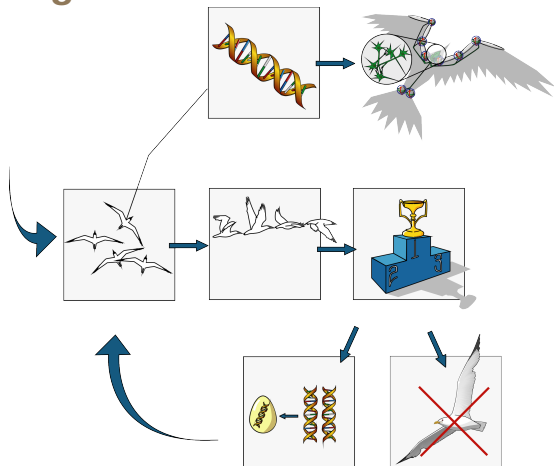
Evaluation d'un jeu de paramètres :
observation du comportement d'un robot à ailes battantes simulé pendant une période de temps suffisante.

Recherche exhaustive ?

- 7 à 10 paramètres
 - discrétisation grossière : 10 valeurs possibles par paramètre
- de 10^7 à 10^{10} jeux de paramètres différents pour une précision faible...

L'utilisation d'heuristiques est nécessaire pour réduire le nombre de valeurs explorées et obtenir une plus grande précision.

Algorithmes Evolutionnistes



Pourquoi des algorithmes évolutionnistes ?

→ algorithme d'optimisation combinatoire stochastique basé sur une population : adapté aux problèmes multi-objectifs !



Deb, K.(2001).
Multi-objective optimization using evolutionary algorithms.
Wiley. ISBN : 978-0471873396

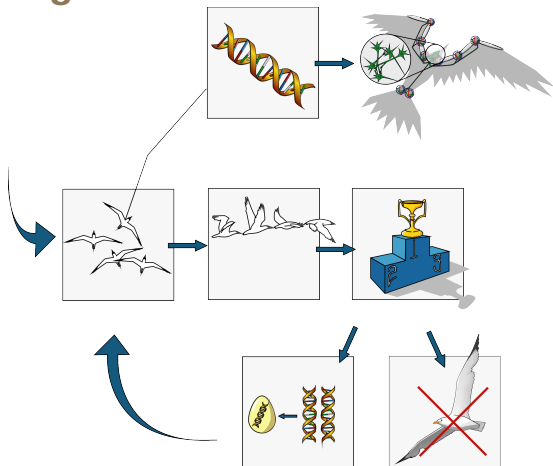


K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan(2002).
A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II.
IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2) :182–197.



Deb, K., M. Mohan, and S. Mishra(2003).
A Fast Multi-objective Evolutionary Algorithm for Finding Well-Spread Pareto-Optimal Solutions
Technical Report 2003002. Indian Institute of Technology : Kanpur (KanGAL), India.

Algorithmes Evolutionnistes



Pourquoi des algorithmes évolutionnistes ?

→ algorithme d'optimisation combinatoire stochastique basé sur une population : adapté aux problèmes multi-objectifs !



Deb, K.(2001).
Multi-objective optimization using evolutionary algorithms.
Wiley. ISBN : 978-0471873396



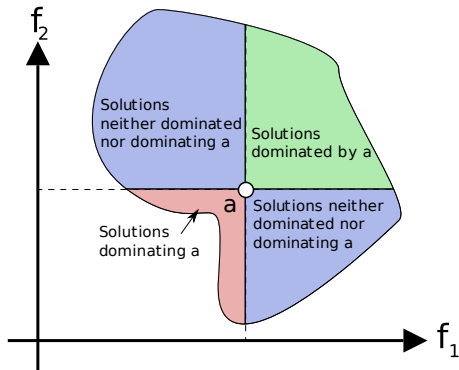
K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan(2002).
A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II.
IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2) :182–197.



Deb, K., M. Mohan, and S. Mishra(2003).
A Fast Multi-objective Evolutionary Algorithm for Finding Well-Spread Pareto-Optimal Solutions
Technical Report 2003002. Indian Institute of Technology : Kanpur (KanGAL), India.

Multi-objectif

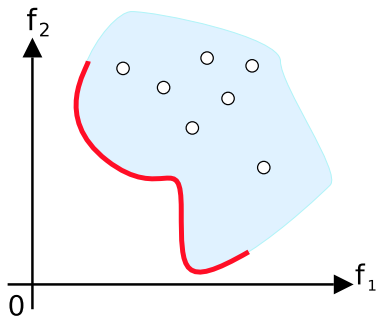
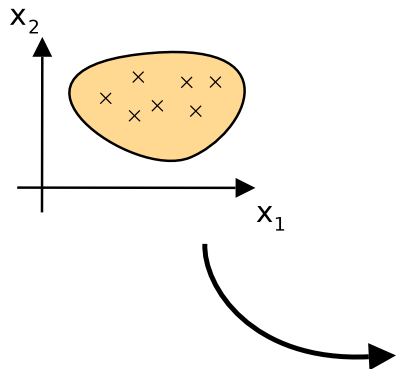
Relation de domination de Pareto



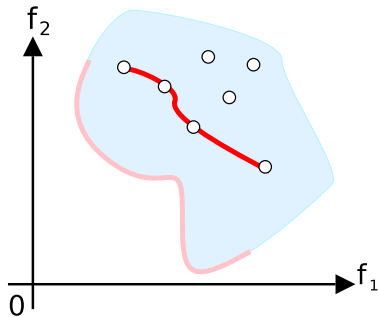
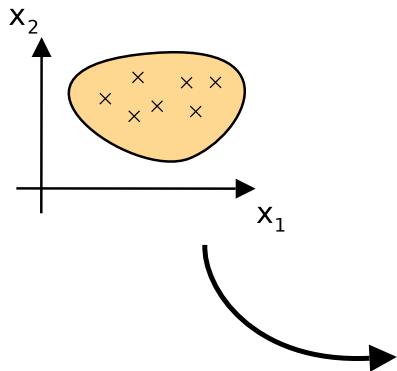
Définitions

- x_1 **domine** x_2 si :
 - 1 x_1 est aussi bon que x_2 sur tous les objectifs
 - 2 x_1 est strictement meilleur que x_2 sur au moins un objectif
- l'ensemble des solutions non-dominées est appelé le front de Pareto.

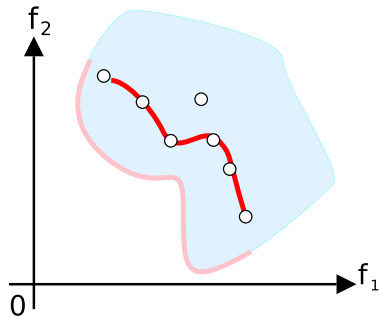
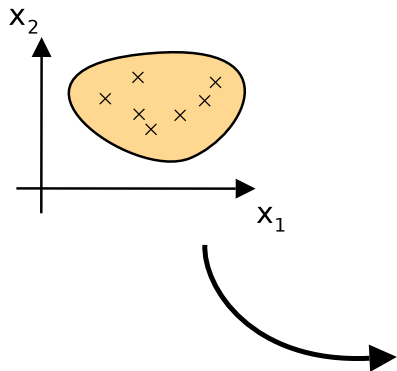
Algorithmes Évolutionnistes



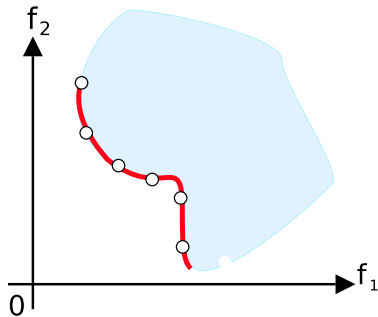
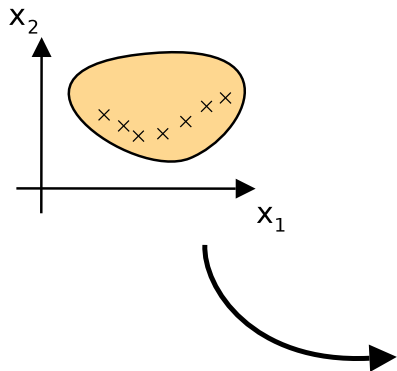
Algorithmes Évolutionnistes



Algorithmes Évolutionnistes



Algorithmes Évolutionnistes



Exemple 1

Motivations

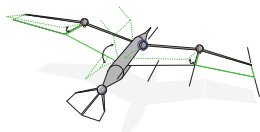
- 1 trouver la courbe énergie= f (vitesse) caractéristique d'un drone donné
- 2 quelle est l'influence des différents paramètres sur cette courbe ?

Caractéristiques

- 3 DDL/aile
- mouvement sinusoïdal des ailes
- envergure : 1.93m, masse : 1.3kg

Objectifs (fitness) : 2 expériences

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1 minimiser l'énergie | 1 minimiser l'énergie |
| 2 minimiser la vitesse | 2 maximiser la vitesse |



Cinématique des ailes

$$\begin{aligned}DI &= x_1 \sin(2\pi t/x_2) \\TWi &= x_3 + x_4 \sin(2\pi(t/x_2 + x_5)) \\TWe &= x_6 + x_7 \sin(2\pi(t/x_2 + x_8))\end{aligned}$$

Paramètres explorés par l'AE :
 x_1, \dots, x_8

Setup

- Algorithme évolutionniste : NSGA-2
- Taille de la pop : 500 ; 1000 gen

Exemple 1

Simulation

- semi-empirique, modèle aérodynamique quasi stationnaire
- simulateur physique (ODE) pour calculer les mouvements des ailes et la trajectoire globale

Evaluation

- vol "libre", lancé à $11 m.s^{-1}$
- 10 secondes simulées

Fitness function

- 1 énergie (à maximiser ou minimiser) : ($\tau_i(t)$ torseur instantané sur le DDL i $\omega_i(t)$ vitesse de rotation instantanée)

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{n_{DOF}} |\tau_i(t) \cdot \omega_i(t)|$$

- 2 vitesse moyenne

Contrainte de fitness sur le contrôle d'altitude ($\overline{v_z} > 0$) et stabilité de la simulation

Exemple 1

Simulateur

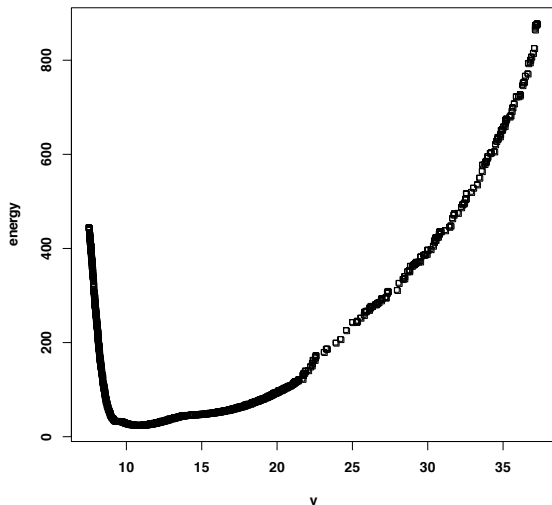
- modèle semi-empirique, quasi stationnaire
- ailes décomposées en panneaux rectangulaires
- forces aérodynamiques = superposition de 5 contributions :
 - ▶ traînée de plaque
 - ▶ force de profil
 - ▶ contribution parachutale
 - ▶ portance de bord libre
 - ▶ portance tourbillonnaire de bord libre
- pas de temps : 0.005s
- profil : Selig 4083
- modèle validé en soufflerie sur un mini-drone à voilure fixe.



T., Druot (2004).

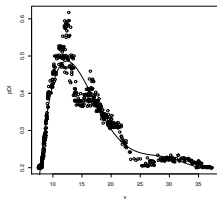
Technical report on the implementation and validation of a flight mechanics simulator for flapping articulated wings.

Exemple 1

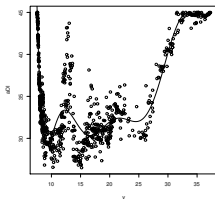


Fronts de Pareto fusionnés

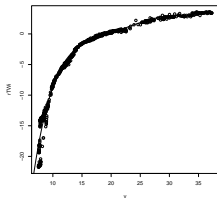
Exemple 1



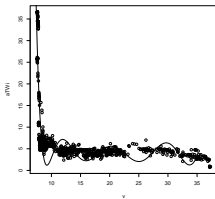
(a) dihedral period in s



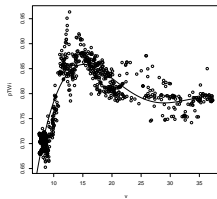
(b) dihedral amplitude in *deg*



(c) internal twist reference in *deg*

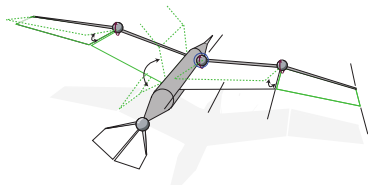


(d) internal twist amplitude in *deg*



(e) internal twist phase

Exemple 1



Quelques résultats tirés du front de Pareto

- Vitesse de croisière optimale : $10.7 m.s^{-1}$ pour $24 W$
- Vitesses atteignable pour une énergie $< 100 W$: $[8.5; 20.4] m.s^{-1}$

Quelques résultats sur l'analyse de paramètres

- intervalle de fréquences de battement autorisé suffisant pour des vitesses allant de 8 à $25 m.s^{-1}$
- amplitude de dièdre entre 30 et 35°
- fréquence de $1.6 Hz$ à $5 Hz$
- ...

Exemple 2

Motivations

Etudier les cinématiques maximisant l'efficacité propulsive $\eta = \frac{\text{Force propulsive} \times \text{Vitesse}}{\text{Puissance}}$:

- 1 Quelle vitesse est la plus intéressante pour un drone donné ?
- 2 Quelles sont les relations entre paramètres cinématiques et objectifs optimisés ?
- 3 Quelle solution choisir et quels sont ses paramètres clé ?
- 4 Quelle est l'influence du choix des degrés de liberté ?

Travaux de thèse de M. Hamdaoui (co-encadré par P. Sagaut et S. Doncieux).

Caractéristiques

- 2 à 3 DDL/aile : dièdre, tangage 1, [tangage 2]
- mouvement sinusoïdal des ailes
- envergure : 1m, masse 0.67kg

Objectifs (fitness)

- efficacité propulsive η
- égalité entre portance et poids
- nullité du moment global

Cinématique des ailes

$$\begin{aligned}DI &= x_1 + x_2 \cos(2\pi x_3 t + x_4) \\TWi &= x_5 + x_6 \sin(2\pi x_3 t + x_7) \\TWe &= x_8 + x_9 \sin(2\pi x_3 t + x_{10})\end{aligned}$$

Paramètres explorés par l'AE :
 $x_1, \dots, x_7, [x_8, \dots, x_{10}]$

3 vitesses de croisière : 6, 10 et $14m.s^{-1}$

Exemple 2

Simulateur 2

- aile découpée en tranches
- modèle potentiel, linéarisé
- prise en compte de la traînée de frottement, de la traînée de cambrure, de la succion de bord d'attaque et de la traînée induite
- non-linéarité : prise en compte du décrochage
- profil : LPT110A
- validé par des mesures en soufflerie (valeur pour l'expérience présentée) :
 - ▶ Reynolds environ 2×10^5 (10^5)
 - ▶ $St \in [0, 0.2]$ (0.1 – 0.2)
 - ▶ $k \in [0, 0.2]$ (0.1)

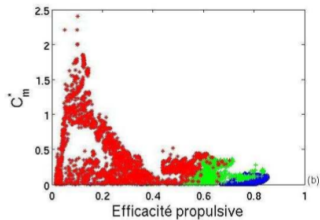
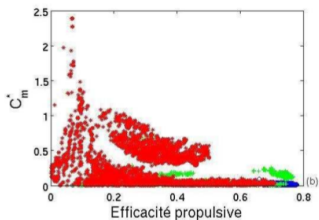
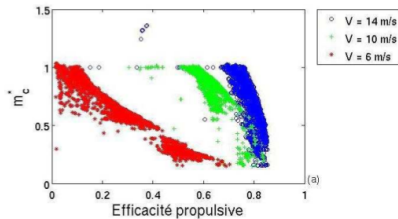
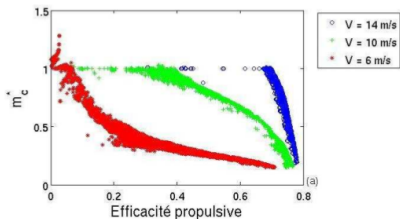


J.D., DeLaurier (1993).

An aerodynamic model for flapping-wing flight

The aeronautical journal of the royal aeronautical society, April 1993.

Exemple 2



1 panneau

2 panneaux

Exemple 2

Quelques résultats tirés du front de Pareto

- fréquence de battement de 4Hz environ
- puissance par unité de masse de 25W/kg
- performances meilleures pour η et m_c^* pour le cas à 2 panneaux

Quelques résultats sur l'analyse de paramètres

m_c^*	θ_{10}	θ_{20}	$\Delta\varphi_1$	$\Delta\varphi_2$
1 p.	↗	x	x	x
2 p.	2 ↗	1 ↗	3 ↘	4 ↗

η	θ_{10}	St	k	$ \Delta\Theta_1 $	θ_{20}	$ \Delta\Theta_2 $
1 p.	1 ↘	2 ↘	3 ↘	4 ↗	x	x
2 p.	2 ↘	3 ↗	x	5 ↗	1 ↘	4 ↘

1 panneau, comparaison avec l'état de l'art :

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



Hamdaoui, M. (2009).

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

Paris, France. Thèse de doctorat. IJLRA/ISIR, Université Pierre et Marie Curie.

Conclusion

Les méthodes d'optimisation ne servent pas uniquement à gagner $\varepsilon\%$ de performances...

... elles peuvent être un outil au service des scientifiques dans la construction et l'étude de modèles computationnels complexes.

Élément clé de l'approche présentée :

- utiliser une approche multi-objectif pour obtenir un ensemble de solutions Pareto-optimales à étudier ;

Autre possibilité offerte par les méthodes évolutionnistes :

- utiliser une approche de type synthèse pour générer de nouveaux modèles et étudier leurs propriétés.

Conclusion

Avantages

- approche empirique
- pas de contraintes mathématiques
- algorithmes "simples" à utiliser

Inconvénients

- approche empirique
- analyses du front de Pareto *approché*
- nécessite de nombreuses évaluations

Questions



Questions ?

`stephane.doncieux@isir.upmc.fr`

