

## Submeeting 2023 Conception d'AUV sous-actionnés à propulsion reconfigurable

Olivier CHOCRON – Emmanuel DELALEAU – Loïck DEGORE



27 avril 2023, Guerlédan



## Olivier CHOCRON, Enseignant-chercheur ENIB

- Formation
  - DEA-Doctorat de Paris VI en mécanique-robotique
  - Licence-Maîtrise de Mécanique (Paris VI)
- Expérience
  - Enseignant-Chercheur, en mécanique & robotique (Paris VI, ENIB depuis 1996)
  - Ingénieur d'études en robotique à EADS Defense & Launch Vehicles (Paris).
  - Stage postdoctoral en robotique spatiale au MIT, Cambridge (MA, USA)
- Compétences
  - Mécanique / Mécatronique :
    - Modélisation, conception, simulation et identification
    - Analyse et méthodes numériques, optimisation
    - Contrôle-Commande des systèmes
  - Robotique / IA
    - Modélisation, et analyse des systèmes robotiques
    - Conception orientée tâche des robots, optimisation
    - Optimisation par algorithmes génétiques, RNA



## Emmanuel DELALEAU, Enseignant-chercheur ENIB

### ■ Formation

- Ingénieur ISEN
- DEA / Doctorat / HdR Univ. Paris-sud

### ■ Expérience

- 10 ans EC à Paris-sud
- EC à l'ENIB depuis 2004
- Années sabbatique passée à Boston à Northeastern University en 2002-2003

### ■ Compétences

- Contrôle-commande (Commande par platitude, commande sans modèle...)
- Simulation des systèmes dynamiques commandés
- Électronique de puissance



## Loïck DEGORRE, Doctorant ENIB

### ■ Formation

- Diplôme d'ingénieur en Robotique Polytech Sorbonne
- Master de Recherche Systèmes avancées et Robotique à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers

### ■ Expérience

- Stage ingénieur National Oceanography Center, pilotage des propulseurs d'un AUV
- 2<sup>e</sup> année de Doctorat : synthèse et commande des robots sous-marins autonomes sous-actionnés

### ■ Compétences

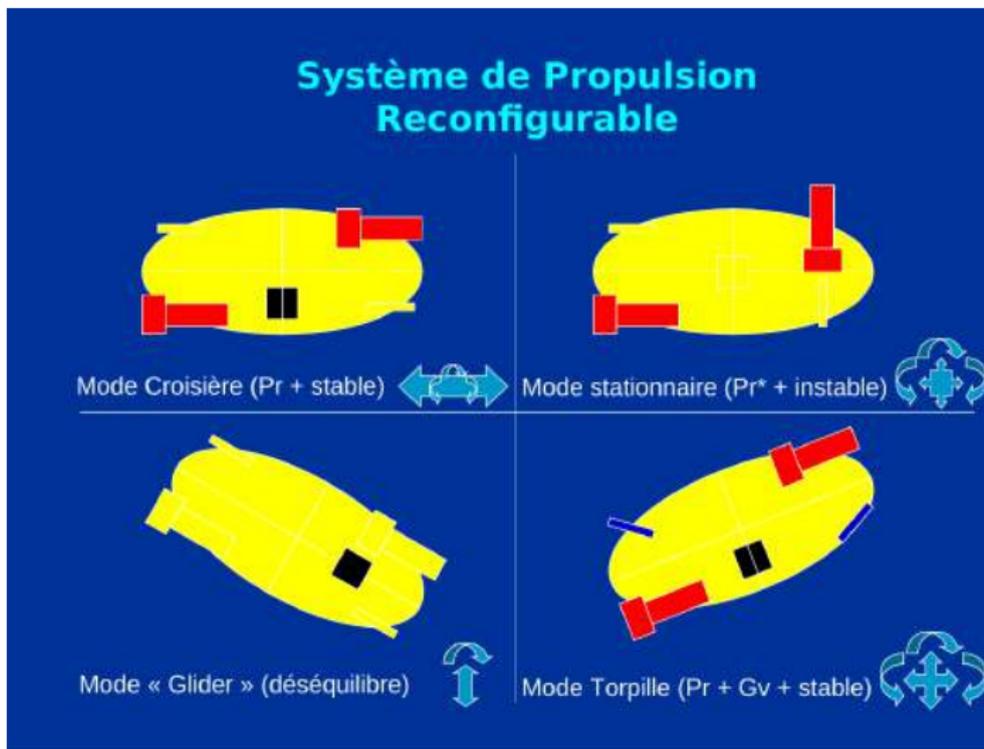
- Commande robotique et Automatisation
- Modélisation des systèmes mécaniques
- Simulation des systèmes robotiques
- ROS, électronique embarquée

## ■ Objectifs

- Manœuvrabilité avec les ROV
- Performance avec les AUV & SUV
- Missions d'inspection EMR exigent les deux

⇒ Innover avec la propulsion reconfigurable





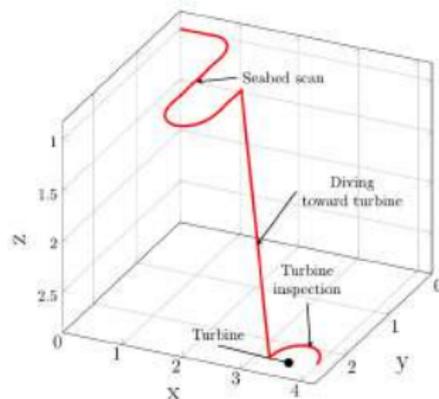
- Moyens mis en œuvre
  - Design d'une propulsion reconfigurable
  - Modélisation cinématique & dynamique + Analyse du système de propulsion
  - Commande non linéaire générique + Simulation numérique 3D
  - Optimisation de la configuration

⇒ Implémenter un suivi de trajectoire 3D (détection surface, plongée directionnelle, tomographie) avec la propulsion vectorielle

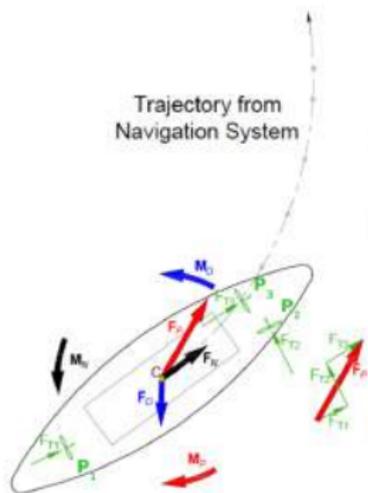


Modèle dyn. du robot (MDI) :  $M_i^0 \ddot{\varphi} + C_i^0 \dot{\varphi} + D_i^0 \varphi + G_i = \tau = B_i u$

Modèle électromécanique du propulseur: 
$$\begin{cases} I_a \dot{\omega} + \Gamma_f + \Gamma_l = \lambda I \\ V = R I + U + \kappa \omega \end{cases}$$



## Principe de la Propulsion Vectorielle



• **Trajectoire**  $\Rightarrow \{F_N, M_N\}$  en C

• **Océan**  $\Rightarrow \{F_O, M_O\}$  en C

• **Propulsion**  $\Rightarrow \{F_P, M_P\}$  en C

$$\Rightarrow F_P = F_N - F_O$$

$$\Rightarrow M_P = M_N - M_O$$

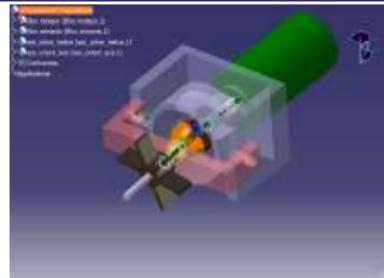
• **Poussée des propulseurs** ( $i=1..n_T$ )

$$\Rightarrow F_P = \sum F_{T_i}$$

$$\Rightarrow M_P = \sum CP_i \times F_{T_i}$$

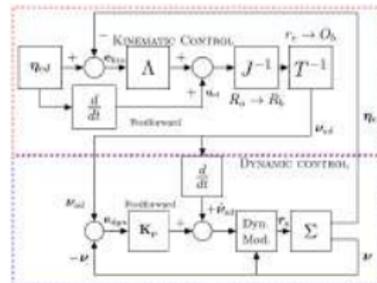
■ Verrous technologiques et solutions

- Technologie du propulseur magnéto-couplé reconfigurable PMCR (3 prototypes de démonstration et un submersible)

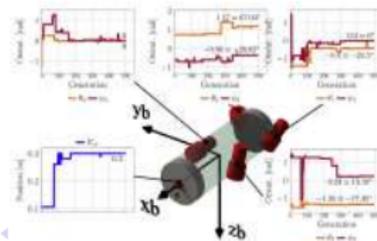


Vidéo PMCR-1

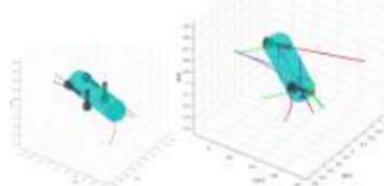
- Contrôle-Commande basé modèle dynamique, non linéaire & adaptatif (FBLN et plus)



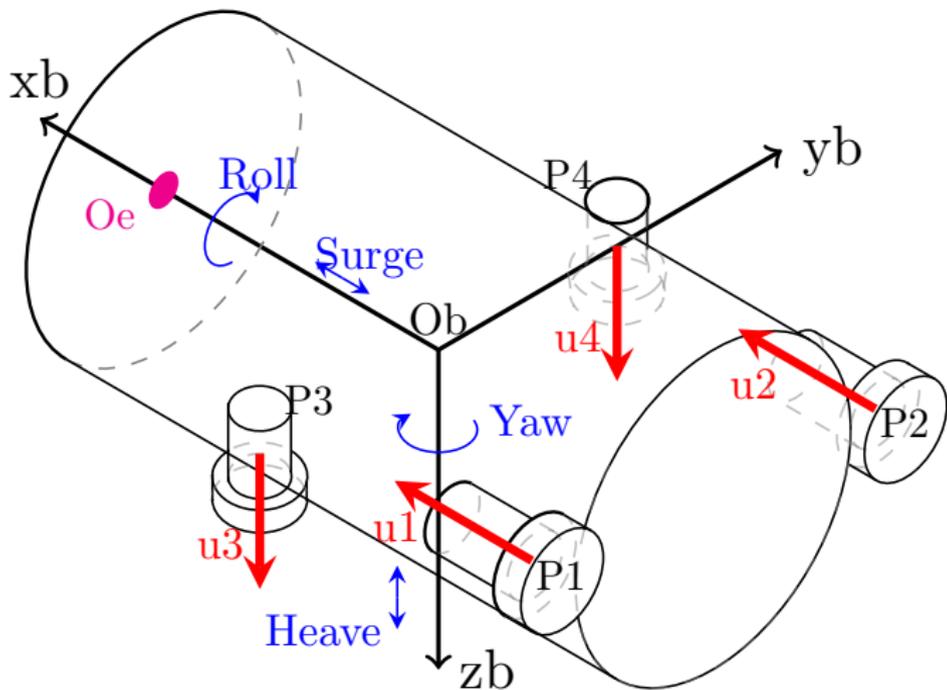
- Optimisation globale/multi-objective de la configuration du système de propulsion (algorithmes évolutionnaires)



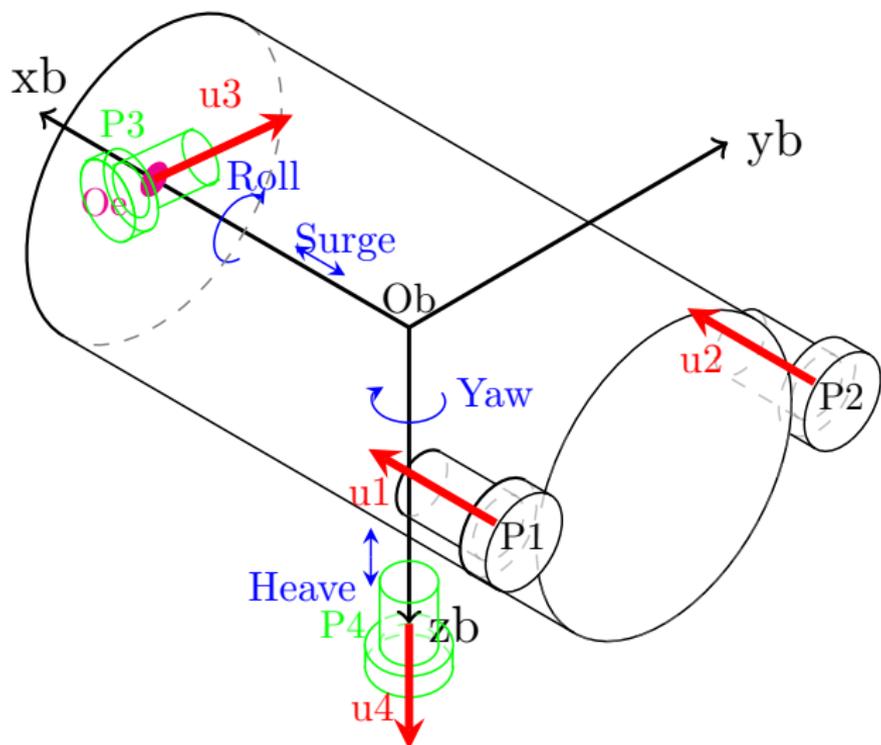
- AUV expérimental RSM
  - 1 Coque étanche cylindrique en PMMA
  - 4 propulseurs fixes (75W) + électronique
  - 1 IMU, caméra, profondimètre, pingers
  - 1 CPU +  $\mu$ P (modernisé RaspPI + Arduino)
- Enib AUV In Virtuo Experiment (EAUVIVE)
  - Simulateur numérique solide/hydrodynamique
  - Commande propulsion fixe ou vectorielle
  - Implémentaion sous Matlab + ROS (contrôle)
- Prop. Magnéto-Couplé Reconfigurable (PMCR)
  - Accouplement magnétique reconfigurable
  - 3 prototypes de PMCR (sphérique/plat/radial)
  - Capacité de poussée vectorielle @30N  $\pm$ 45°



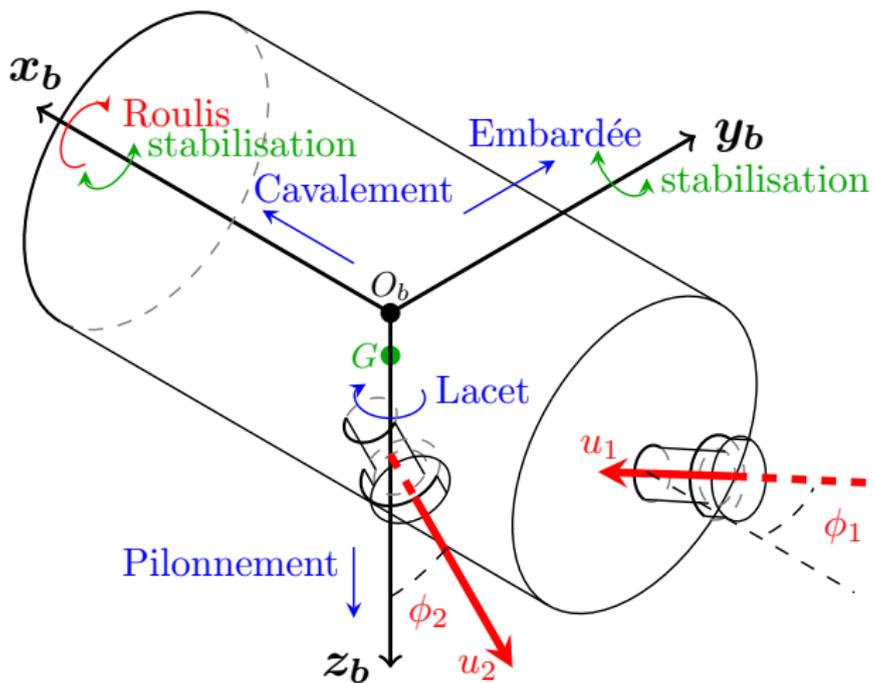
Vidéo PMCR-3



Vidéo 1 : 4D1 , Vidéo 2 : 6D1 , Vidéo 3 : 4D1 vs 6D1



Vidéo 4 : 5D1 , Vidéo 5 : 4D1+ , Vidéo 6 : 4D1+ vs 6D1



Vidéo 7 : 2D2 , Vidéo 8 : 1D3-1D2 , Vidéo 9 : 1D3-1D2 vs 6D1

# Synthèse et commande de systèmes de propulsion reconfigurable pour les robots sous-marins autonomes (Loïck Degorre, dir. E. Delaleau)

## 1 Travaux réalisés

- Modélisation et simulation du robot sous-marin
- Développement et analyse des systèmes de propulsion
- Développement de la commande des AUV par compensation des DDL

## 2 Travaux en cours

- Commande autres des AUV sous-actionnés (platitude & modes glissants)
- Implémentation d'un robot à 1 degré de reconfiguration (projet PlaSMAR-1)
- **Contrôle-commande, identification de validation du robot PlaSMAR**

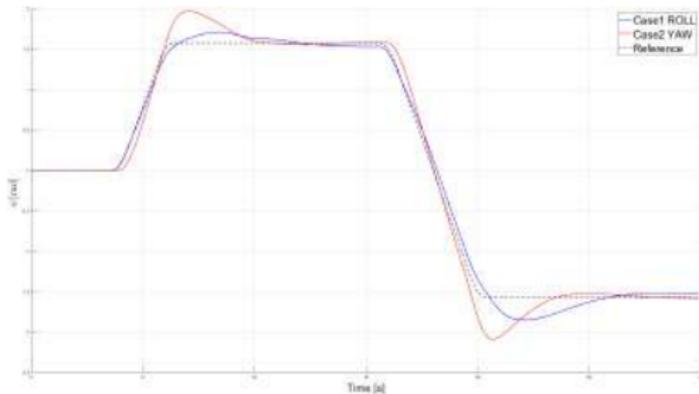
## 3 Travaux de thèse futurs

- Optimisation/apprentissage du système de propulsion (méthodes d'IA)
- Mobilité autonome pour les AUV sous-actionnés (propulsion fixe/vectorielle)
- Intégration *Hardware In The Loop* des robots à propulseurs magnéto-couplés reconfigurable

## Autre solution proposée : Compensation par couplages cinématiques

**Deux solutions possibles pour contrôler l'embarquée en exploitant les couplages cinématiques roulis-embarquée de E ou lacet-embarquée de E**

- ⇒ Compensation de l'embarquée non actionnée par le lacet (historique)
- ⇒ Compensation de l'embarquée non actionnée par le roulis (innovation)



**Vidéo : Comparaison des commandes/comportements du robot RSM-4D1**

- ⇒ Convergence asymptotique vers 0 des erreurs sur les DDL de la tâche

# Optimisation globale multi-critères et stochastique basée sur les lois de l'évolution : Sélection naturelle (Darwin) et Génétique (Mendel)

## 1 Champ d'utilisation

- Optimisation paramétrique (Thèses H. Gasparoto & D. Le Bideau)
- Optimisation topologique (Thèses O. Chocron, E.P. Vega & L. Degorre)
- A utiliser si les méthodes classiques ne sont pas applicables ou sans succès

## 2 Principes et paradigmes

- On code les solutions candidates sous forme d'un génotype (chromosomes)
- On applique les opérateurs génétiques au génotype conduisant à l'adaptation
- On arrête l'évolution quand le résultat est satisfaisant ou qu'on a convergé

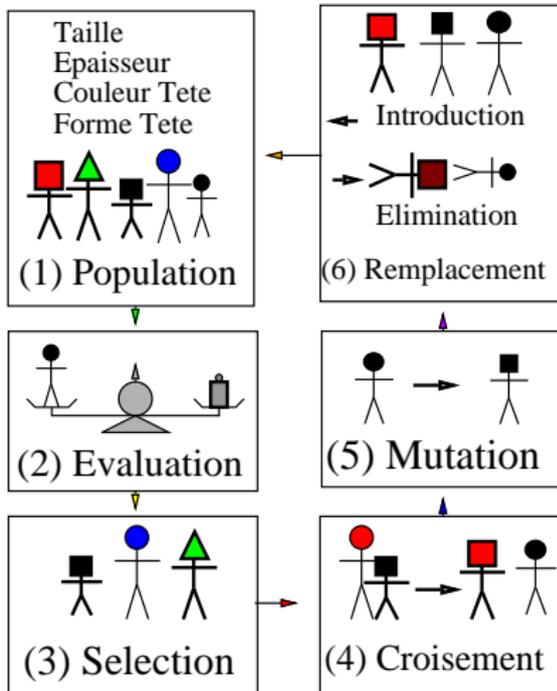
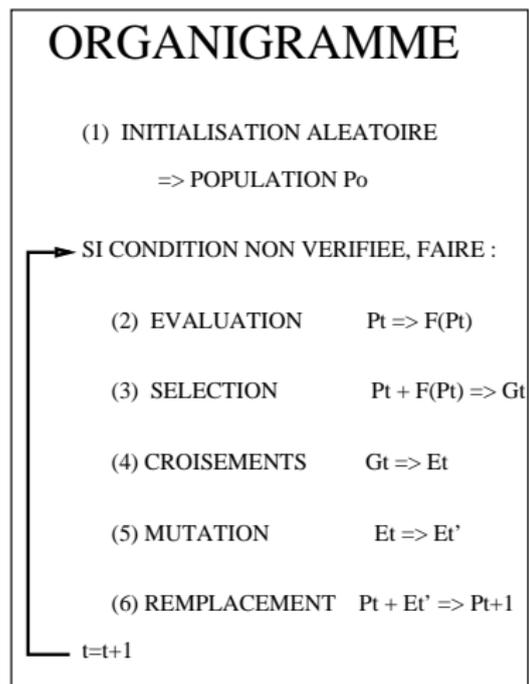
## 3 Avantages

- Grande efficacité dans la recherche de solutions dans un espace immense)
- Adaptable à toute optimisation (non paramétrique) et métrique (évaluation)
- Pas de modèle inverse, d'analyse exploratoire de données ou d'apprentissage
- Peut générer plusieurs solutions éloignées mais proches en performances

## 4 Inconvénients

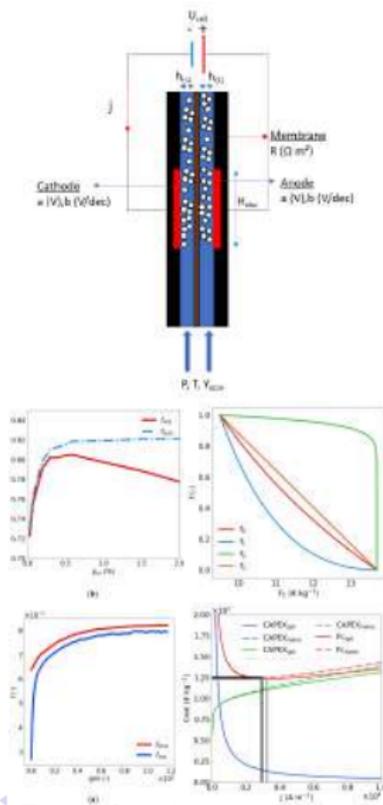
- Il n'y a pas de garantie de trouver l'optimum global en en temps fini
- Il faut du temps pour coder les solutions et pour évaluer les génotypes
- Il faut régler les paramètres des opérateurs pour obtenir une bonne évolution

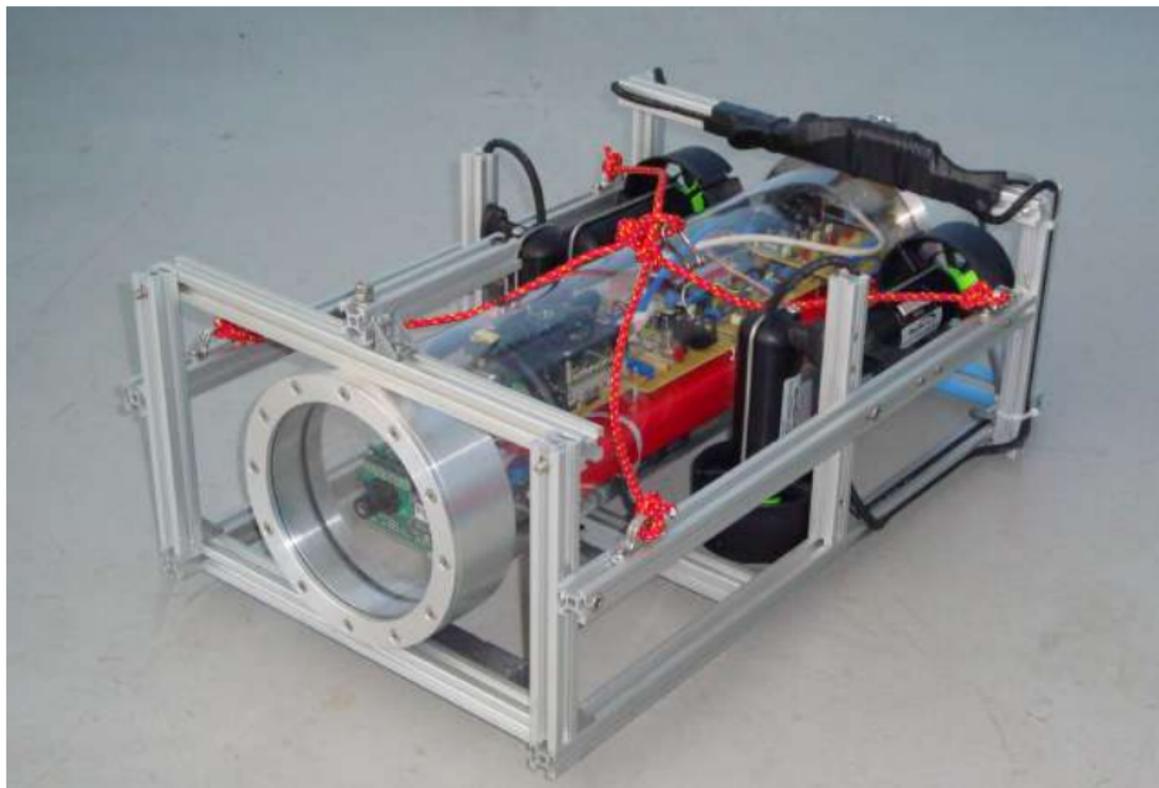
## Principes généraux d'un algorithme génétique simple (AGS)



# Optimisation paramétrique d'un électrolyseur

- Mise en place du problème d'optimisation
  - Paramètres de Conception et codage
  - Fonction d'adaptation (ou objectif)
  - Choix des opérateurs génétiques
- Réglage des paramètres d'évolution
  - Choix du nombre de générations/individus
  - Choix du taux de mutation et croisement
  - Choix du taux de sélectivité ou d'élitisme
- Résultats de l'optimisation
  - Bonne dynamique d'évolution
  - Convergence correcte de l'optimum
  - Comparaison avec une solution connue
- Bénéfice  $\Rightarrow$  -19.3% sur le coût de l'hydrogène





Merci pour votre attention !