
Commande d'un robot Anguille

Maher El Rafei

Dirigé par

Mazen Alamir et Nicolas Marchand

GIPSA-Lab, Département Automatique

Equipe SYSCO

Soutenance de thèse
(9 Décembre 2008, Grenoble)



Plan



- ♣ Contexte général
- ♣ Modèle utilisé
- ♣ Problème de commande
- ♣ Commande découplée
- ♣ Commande multivariable
- ♣ Conclusion & perspectives

Contexte général

Robotique biomimétique sous-marine

Contexte général

Robotique biomimétique sous-marine

Programme ROBEA CNRS - projet Anguille (2003-2006)

Objectif : Concevoir et réaliser un robot Anguille télé-opéré en 3D



Contexte général

Robotique biomimétique sous-marine

Programme ROBEA CNRS - projet Anguille (2003-2006)

Objectif : Concevoir et réaliser un robot Anguille télé-opéré en 3D



Laboratoire d'Automatique de Grenoble

Conception et implémentation des lois de commande



Contexte général

Robotique biomimétique sous-marine

Financement ANR- projet RAAMO (2007-2010)

Robot Anguille Autonome pour milieux opaques



Laboratoire
Sols
Solides
Structures
Risques



Dépt. Automatique - GIPSA lab

Equipe : Systèmes non linéaires et Complexité



Contexte général

REEL 2 Robot- Univ. of Pennsylvania

- K.A. Mclsaac et J.P. Ostrowski.
- Nage 2D.
- 5 corps en série (servos-moteurs).
- 1999.



Lamprey Robot- Northeastern Univ.

- Ayers et al. 2000.
- Nage 2D.
- Colonne vertébrale réalisée en matériaux à mémoire de forme.



Contexte général

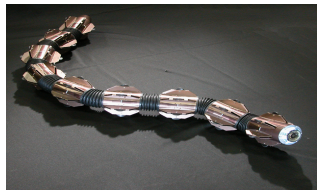
Amphibot II- EPFL

- Ijspeert et Crespi 2007.
- Nage 2D.
- Ramper sur le sol et nager dans l'eau.



ACM-R5 Robot - Hirose Lab. Japan

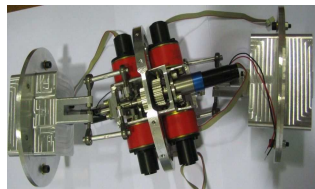
- Yamada et al. 2005.
- Nage 3D (seul concurrent).
- 9 segments cylindriques (2 ddl).



Contexte général

Robot Anguille

- 12 vertèbres (36 ddl).
- 3 ddl chacune.
- Tête rigide et queue passive.
- Nageoires pectorales au niveau de la tête.



Projet Anguille - Principaux axes de recherche

Modélisation
macroscopique

IRCCYN - LMF

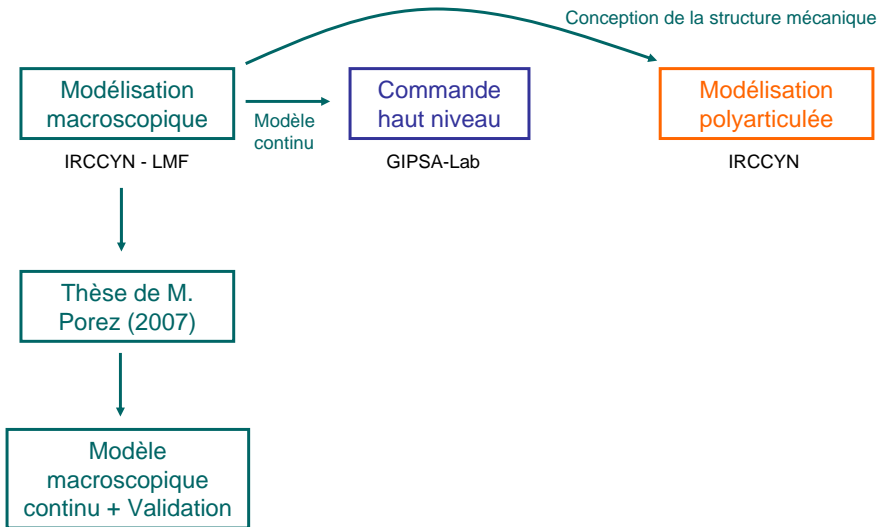
Commande
haut niveau

GIPSA-Lab

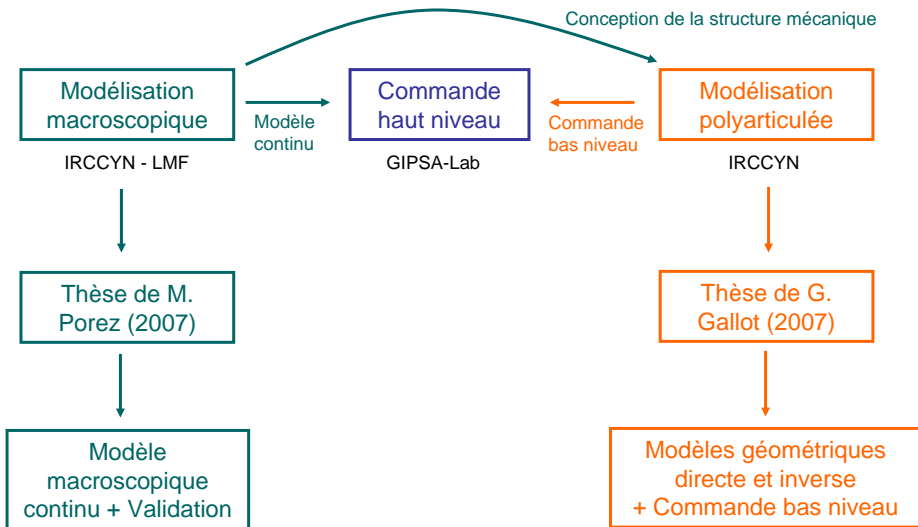
Modélisation
polyarticulée

IRCCYN

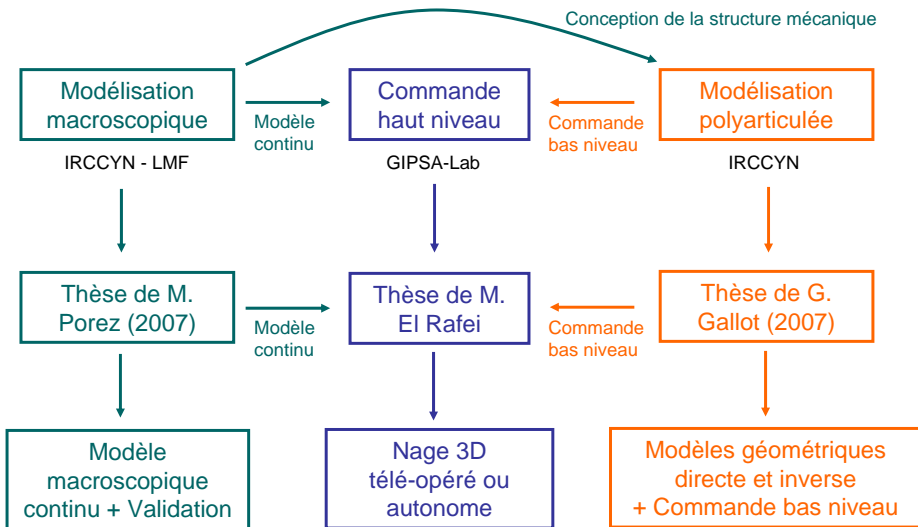
Projet Anguille - Principaux axes de recherche



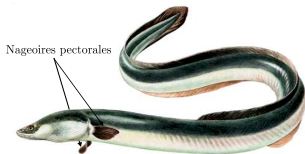
Projet Anguille - Principaux axes de recherche



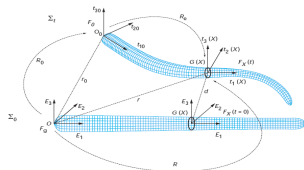
Projet Anguille - Principaux axes de recherche



Axe commande - Informations disponibles



Modèle macro-continu



Anguille de la nature

- Ondulation en lacet uniquement
- Nageoires pectorales pour la nage 3D

Prototypen en construction



Axe commande - Piste ajoutée

Nage 3D sans utilisation des nageoires pectorales

Utilisation des trois degrés de liberté des vertèbres (Torsion, tangage et lacet)

Axe commande - Synthèse générale

Commande

Commande découplée

Commande multivariable

Axe commande - Synthèse générale

Commande

Commande découplée



Contrôle de l'orientation

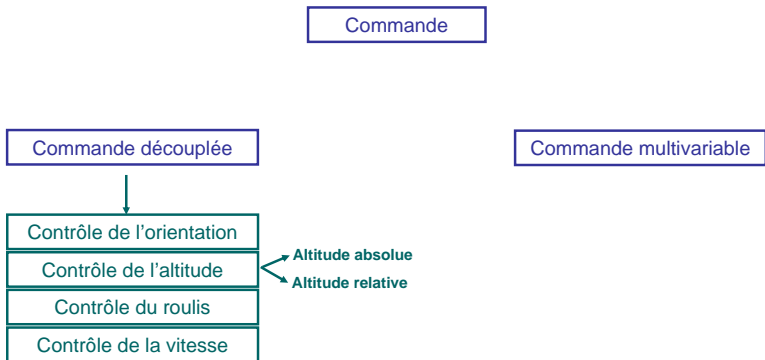
Contrôle de l'altitude

Contrôle du roulis

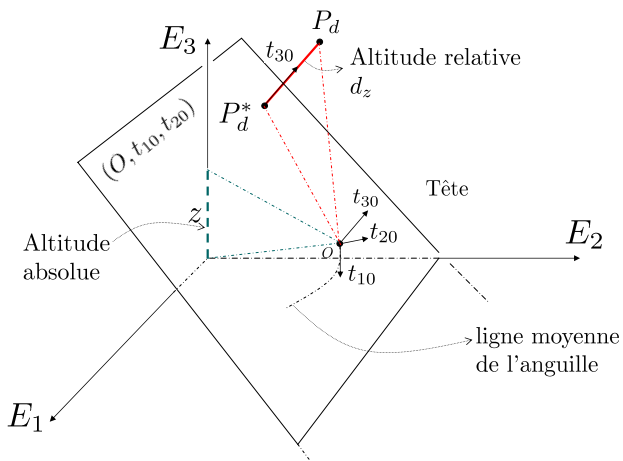
Contrôle de la vitesse

Commande multivariable

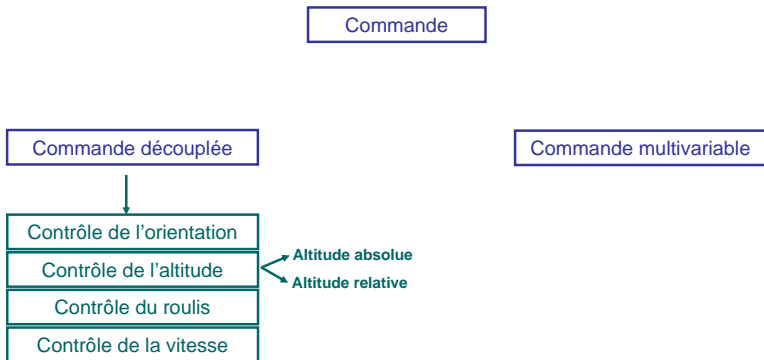
Axe commande - Synthèse générale



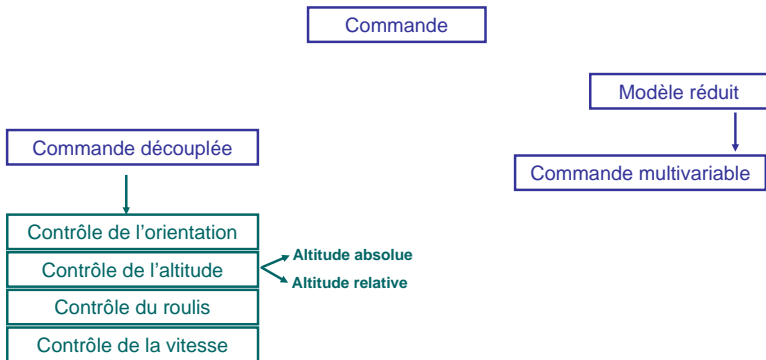
Axe commande - Synthèse générale



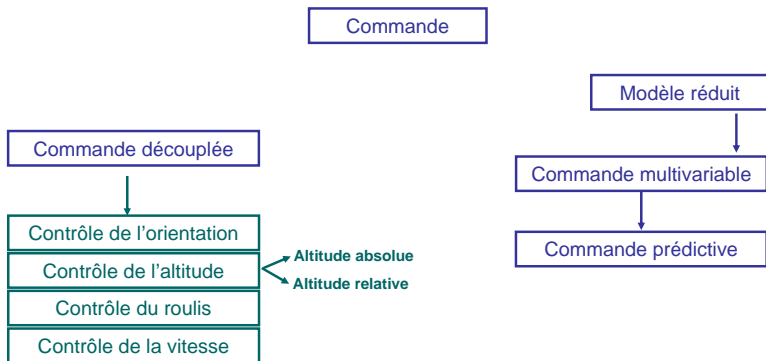
Axe commande - Synthèse générale



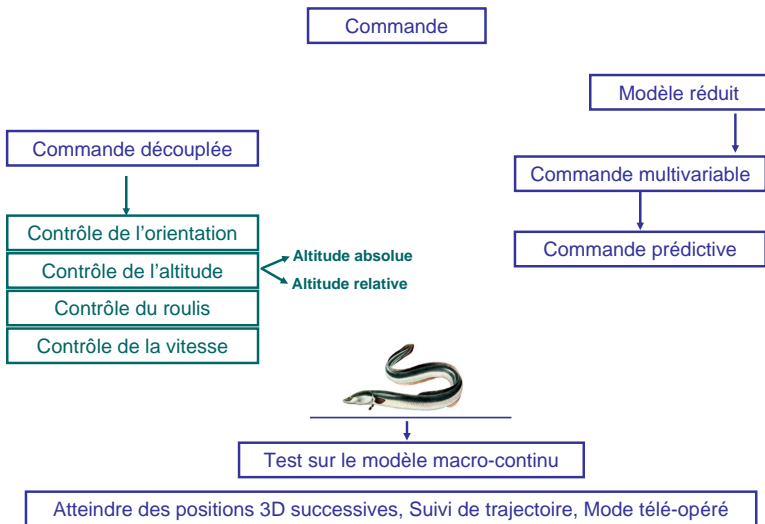
Axe commande - Synthèse générale



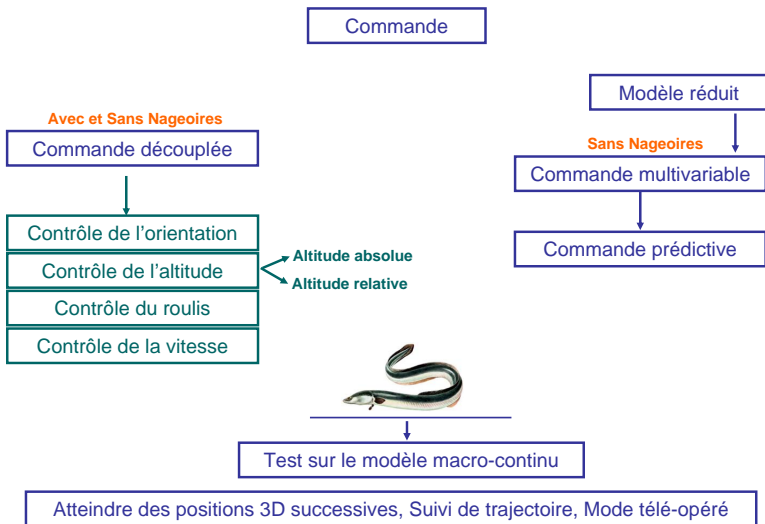
Axe commande - Synthèse générale



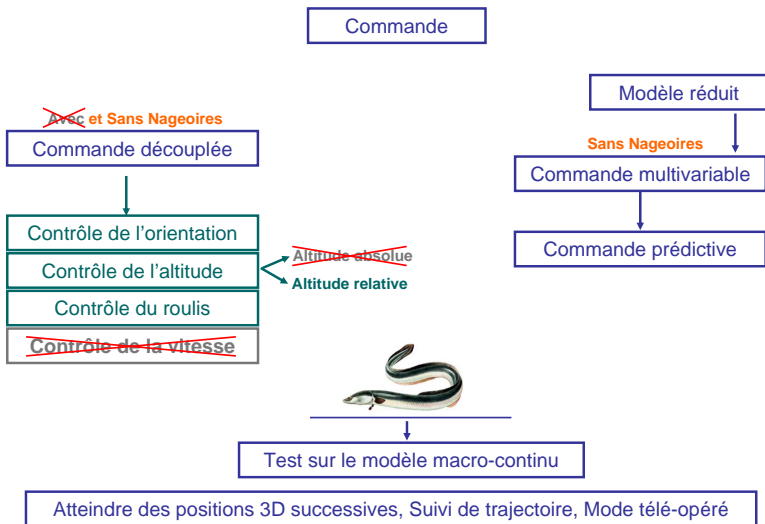
Axe commande - Synthèse générale



Axe commande - Synthèse générale



Axe commande - Synthèse générale

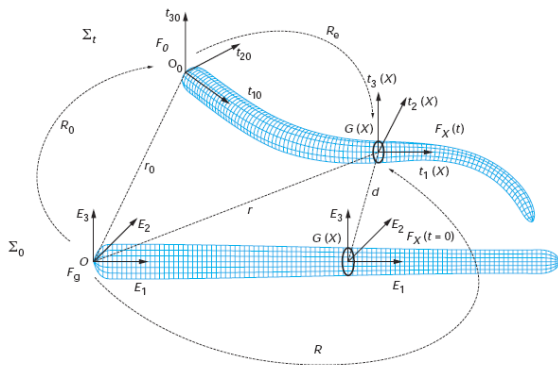


Plan



- ✓ Contexte général
- ♣ Modèle utilisé
- ♣ Problème de commande
- ♣ Commande découplée
- ♣ Commande multivariable
- ♣ Conclusion & perspectives

Le modèle continu 3D de l'IRCCyN



- Σ_0 : configuration de référence (non déformée)
- Σ_t : configuration courante (déformée)
- $F_G = (O, E_1, E_2, E_3)$: repère fixe galiléen
- $F_0 = (O_0, t_{10}, t_{20}, t_{30})$: repère mobile lié à la tête
- $G(X)$: centre de masse de la section X
- $F_X(t) = (G(X), t_1(X), t_2(X), t_3(X))$: repère mobile à l'instant t attaché à la section X
- R_0 : rotation appliquant F_G sur F_0
- R : rotation appliquant F_G sur $F_X(t)$
- R_e : rotation appliquant F_0 sur $F_X(t)$
- r_0 : position de O_0 par rapport à F_G
- r : position de $G(X)$ par rapport à F_G
- r_e : position de $G(X)$ par rapport à O_0
- d : déplacement de $G(X)$ entre $t = 0$ et t

Macro-Continuous Computed Torque Algorithm for a Three-dimensional Eel-Like Robot

Boyer F., M. Porez and W. Khalil, IEEE Transaction on Robotics and Automation, VOL. 22, NO. 4, August 2006.

Le modèle continu 3D de l'IRCCyN

- ♣ Permet de calculer les accélérations linéaires et angulaires de la tête ainsi que les couples intervertébraux en fonction de l'état courant (position et vitesse) et de :

(d.d.l de la commande)

- Lois de courbures (torsion, tangage et lacet)

$$K(t, X) = [K_1(t, X) \quad K_2(t, X) \quad K_3(t, X)]$$

- Angles des nageoires pectorales

$$[\alpha_r(t) \quad \alpha_l(t)]$$

Le problème de commande

- ✓ Contrôler le mouvement 3D du robot :
 - La poursuite d'une position 3D désirée
 - La régulation de la vitesse
 - Le contrôle de l'angle de roulis de la tête

Contraintes de conception

- Complexité réduite (calculs embarqués)
- Bonne robustesse vis à vis du modèle

Stratégies de commande

- Commande découplée avec et sans utilisation des nageoires pectorales
- Commande multivariable

Plan



- ✓ Contexte général
- ✓ Modèle utilisé
- ✓ Problème de commande
- ♣ Commande découplée
- ♣ Commande multivariable
- ♣ Conclusion & perspectives

Commande découplée

♣ La tâche de commande est divisée en plusieurs sous-tâches.

- Contrôle de l'orientation
- Contrôle de l'altitude
- Contrôle du roulis
- Contrôle de la vitesse

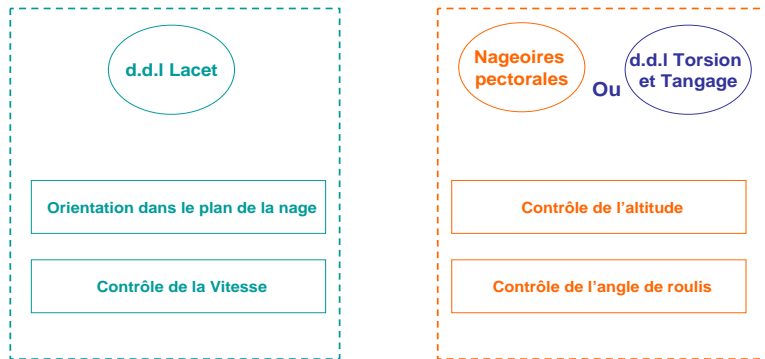
Chaque sous-tâche est associée à un degré de liberté. Chaque degré de liberté s'occupant d'une tâche suppose que les autres réussissent leur mission.

Commande découplée

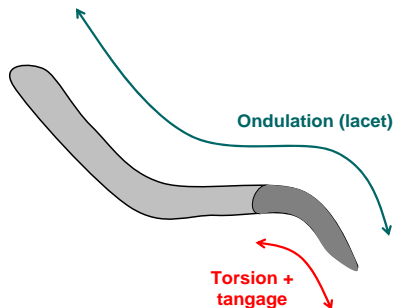
Rappel : les d.d.I sont

$$K(t, X) = [k_1(t, X) \quad k_2(t, X) \quad k_3(t, X)] , \alpha_r(t) , \alpha_l(t)$$

$k_1(\textit{torsion}) , k_2(\textit{tangage}) , k_3(\textit{lacet})$



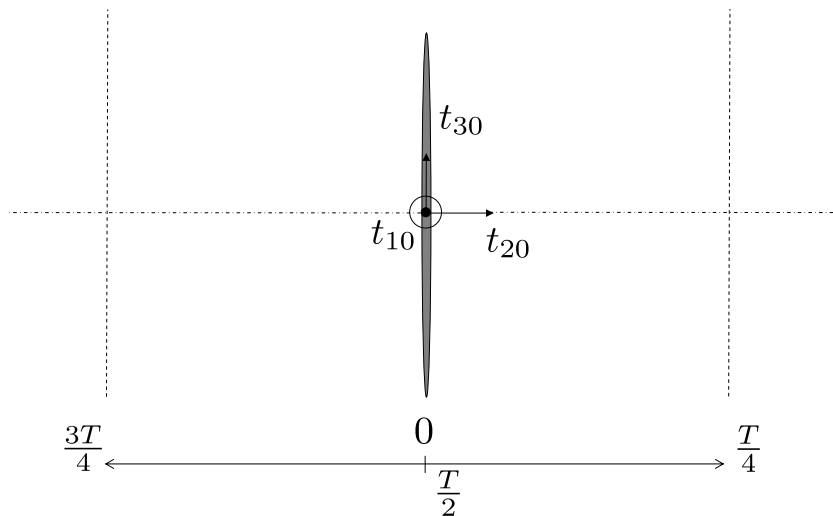
Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales



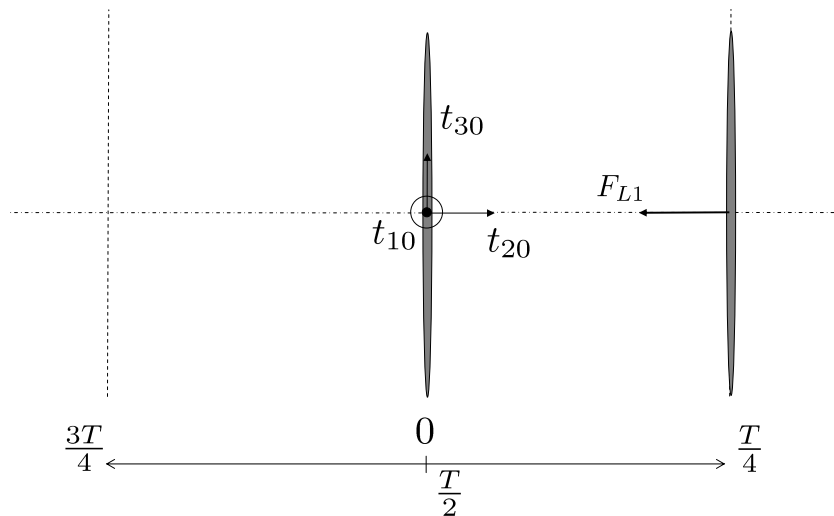
Idée générale de la nage sans nageoires pectorales

Une partie (arrière) du corps de l'anguille réalise le rôle des nageoires pectorales en utilisant les degrés de liberté de tangage et de torsion

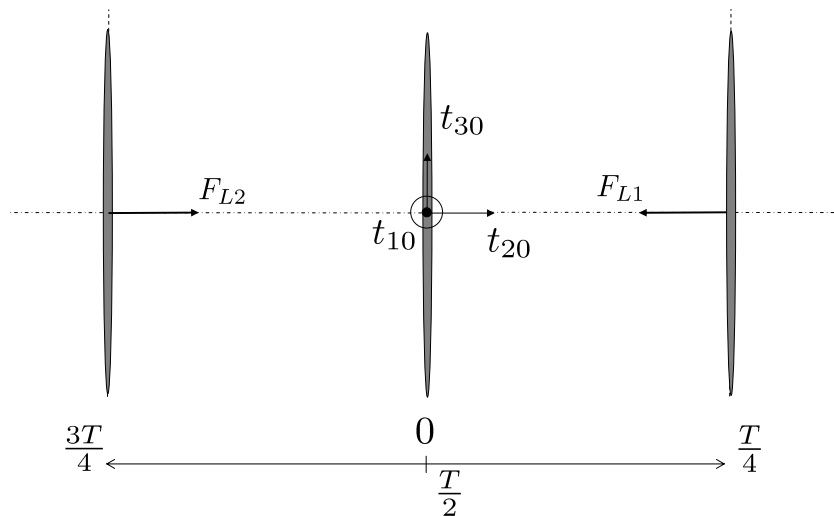
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



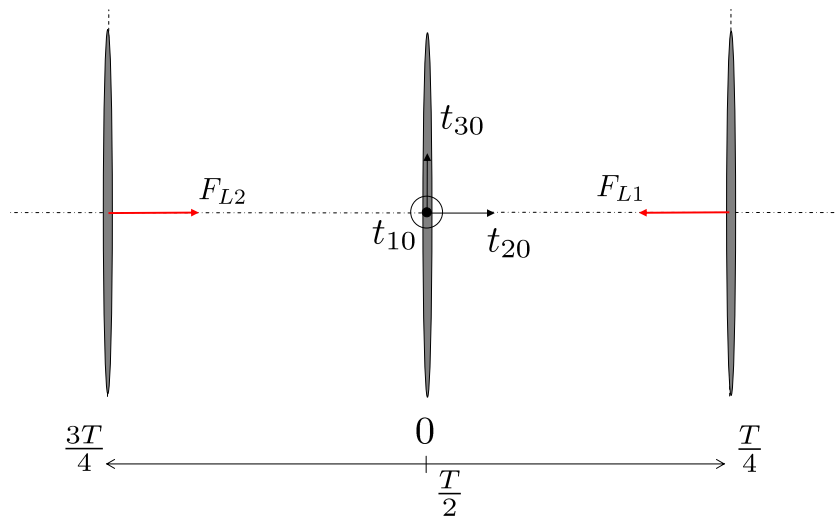
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



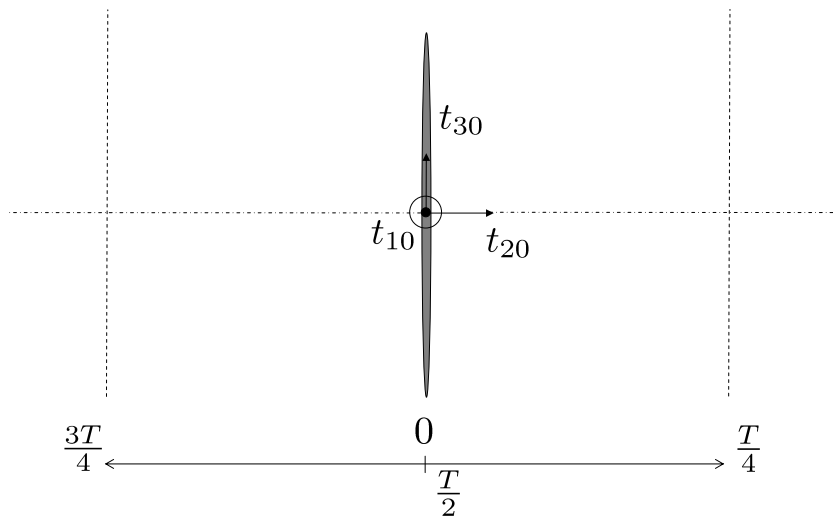
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



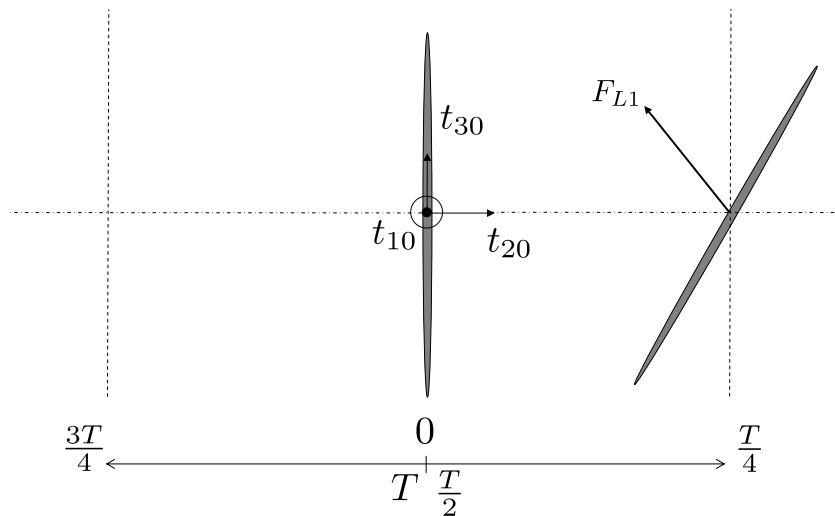
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



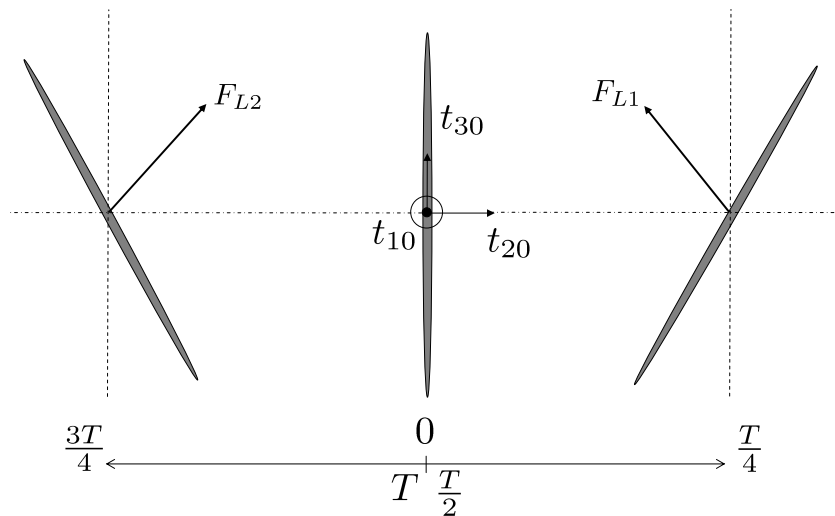
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



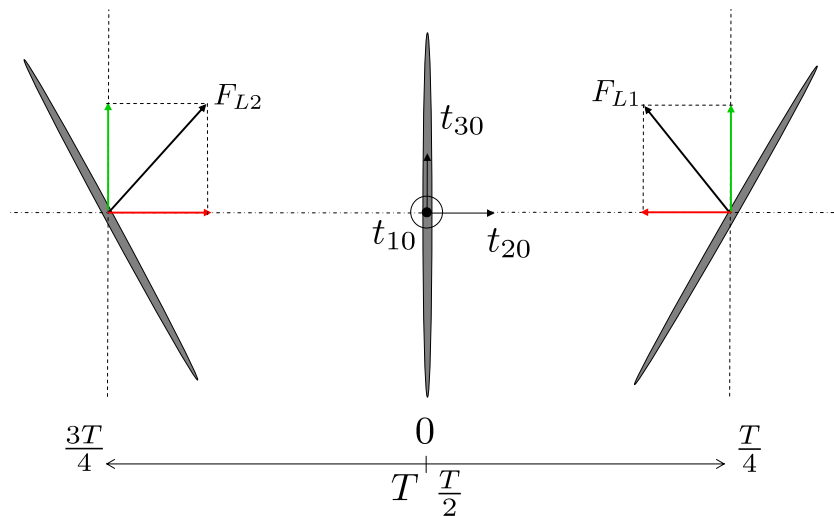
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



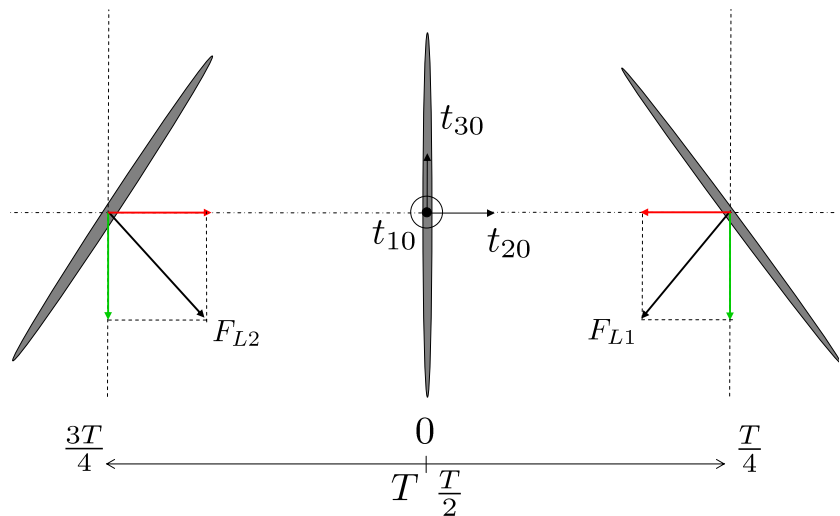
Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



Exemple : Mouvement de torsion sinusöidale de la partie arrière du corps



Nage sans utilisation des nageoires pectorales

Principe

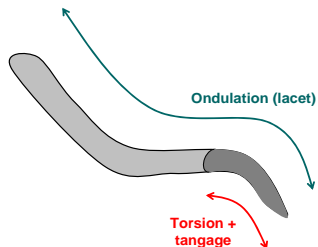
- Torsion sinusoïdale (même période que l'ondulation en lacet) → Tangage
- Tangage sinusoïdale (même période que l'ondulation en lacet) → Roulis

Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

Rappel : les d.d.l sont $K (k_1 \quad k_2 \quad k_3)$ $k_1(\text{torsion})$, $k_2(\text{tangage})$, $k_3(\text{lacet})$

Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

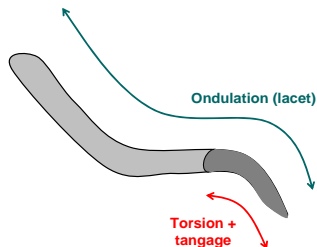
Rappel : les d.d.l sont $K \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{pmatrix} k_1(\text{torsion})$, $k_2(\text{tangage})$, $k_3(\text{lacet})$

Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière" du corps de l'anguille

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$; $K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

Rappel : les d.d.l sont $K \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{pmatrix} k_1(\text{torsion}) , k_2(\text{tangage}) , k_3(\text{lacet})$

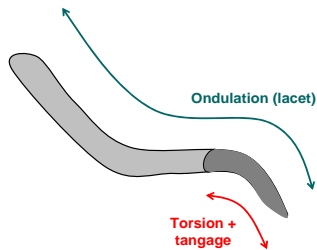
Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière" du corps de l'anguille

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) ; K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

- u_1 : contrôle de l'orientation dans le plan de la nage
- u_2, u_3 : commande de la vitesse
- α : contrôle de l'altitude
- β : contrôle du roulis



Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

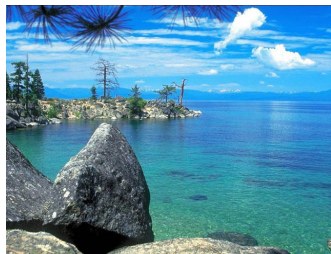
Rappel : les d.d.l sont $K (k_1 \quad k_2 \quad k_3)$ $k_1(\text{torsion})$, $k_2(\text{tangage})$, $k_3(\text{lacet})$

Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière" du corps de l'anguille

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$; $K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



- u_1 : contrôle de l'orientation dans le plan de la nage
- u_2, u_3 : commande de la vitesse
- α : contrôle de l'altitude
- β : contrôle du roulis

Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

Rappel : les d.d.l sont $K (k_1 \quad k_2 \quad k_3)$ k_1 (torsion) , k_2 (tangage) , k_3 (lacet)

Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière" du corps de l'anguille

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$; $K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



- u_1 : contrôle de l'orientation dans le plan de la nage
- u_2, u_3 : commande de la vitesse
- α : contrôle de l'altitude
- β : contrôle du roulis

Commande découplée Sans utilisation de nageoires pectorales

Rappel : les d.d.l sont $K \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{pmatrix} k_1(\text{torsion}) , k_2(\text{tangage}) , k_3(\text{lacet})$

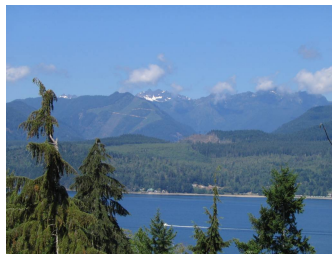
Partie "Avant" du corps de l'anguille

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

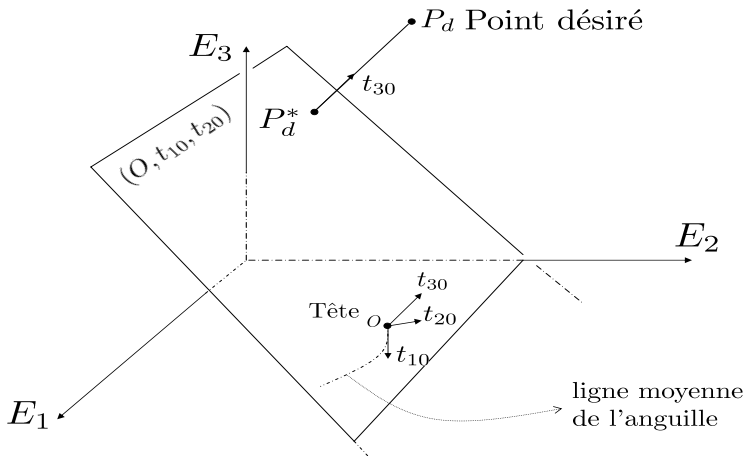
Partie "Arrière" du corps de l'anguille

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) ; K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

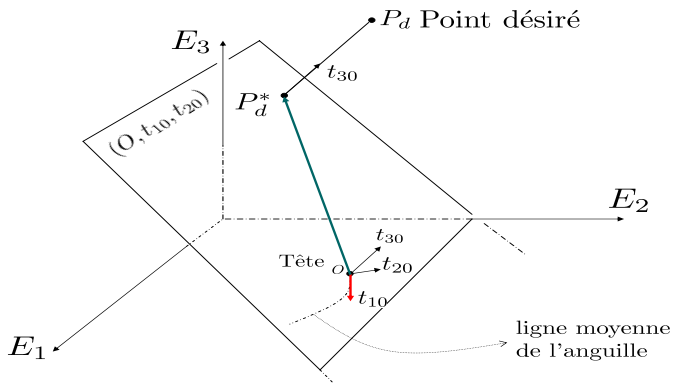
- u_1 : contrôle de l'orientation dans le plan de la nage
- u_2, u_3 : commande de la vitesse
- α : contrôle de l'altitude
- β : contrôle du roulis



Quelques définitions pour la commande



Orientation dans le plan de la nage



- Proposition d'une loi de commande de type **Proportionnel / PID**.
- Application de la courbure maximale admissible si le robot nage en opposition avec l'objectif désiré.

Orientation dans le plan de la nage $(0, t_{10}, t_{20})$

- Soient :

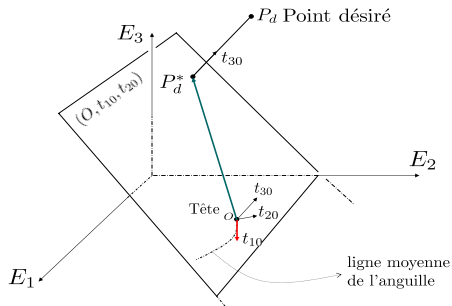
$$p_{ext} := -\pi_3(OP_d^* \times t_{10})$$

$$p_{sc} := -OP_d^* \cdot t_{10}$$

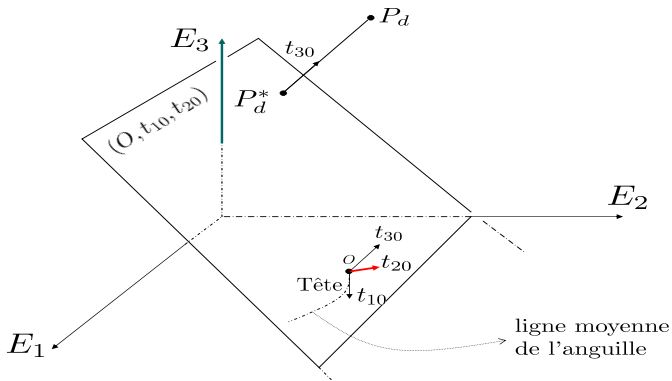
d'où :

$$u_1(t) = \begin{cases} -\beta_c \cdot \bar{p}_{ext}(t) & \text{si } \bar{p}_{sc}(t) > 0 \\ u_1^{max} & \text{si non} \end{cases}$$

(Rappel : $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}) + u_1$)



Contrôle du roulis



- Régulation de la variable $p_{rol} = t_{20} \cdot E_3$
- Approche par placement de pôles avec saturation.

Contrôle du roulis

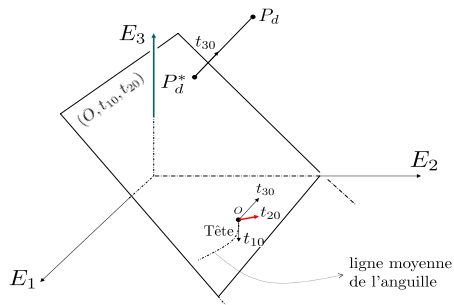
Soit $p_{rol} := t_{20} \cdot E_3$

Nous avons "grossièrement" :

$$\ddot{p}_{rol} \sim k_{rol} \cdot \beta$$

d'où la loi de commande :

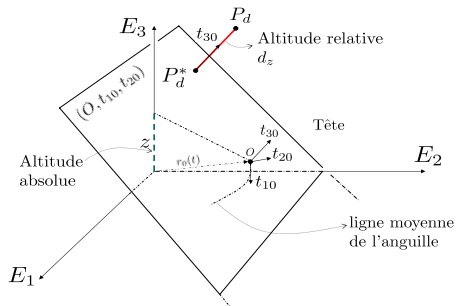
$$\hat{\beta} := \beta_{max} \cdot \tanh\left(-\kappa_{1r} p_{rol} - \kappa_{2r} \dot{p}_{rol}\right)$$



Contrôle de l'altitude

VARIANTE 1

- Contrôler $z = \pi_3(r_0)$
(altitude absolue de la tête)



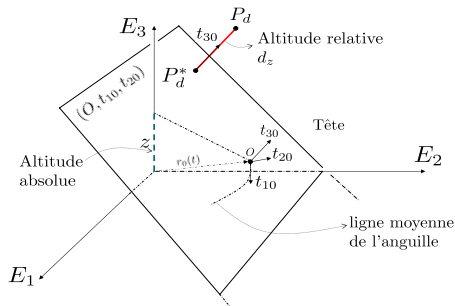
Contrôle de l'altitude

VARIANTE 1

- Contrôler $z = \pi_3(r_0)$
(altitude absolue de la tête)

VARIANTE 2

- Contrôler $z_d := \overrightarrow{OP_d} \cdot t_{30}$
(altitude relative de la tête)



Contrôle de l'altitude relative

Soit $d_z = OP_d \cdot t_{30}$

Dans ce cas, on a "grossièrement" :

$$\ddot{d}_z \sim k_z \alpha$$

d'où la loi de commande :

$$\hat{\alpha} := \alpha_{max} \cdot \tanh\left(-\kappa_{1a} d_z - \kappa_{2a} \dot{d}_z\right)$$

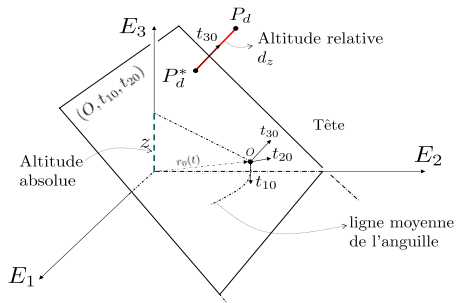


Schéma bloc de la commande découplée

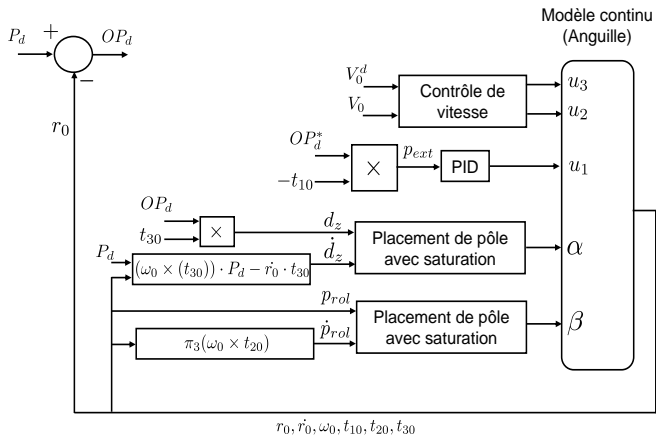
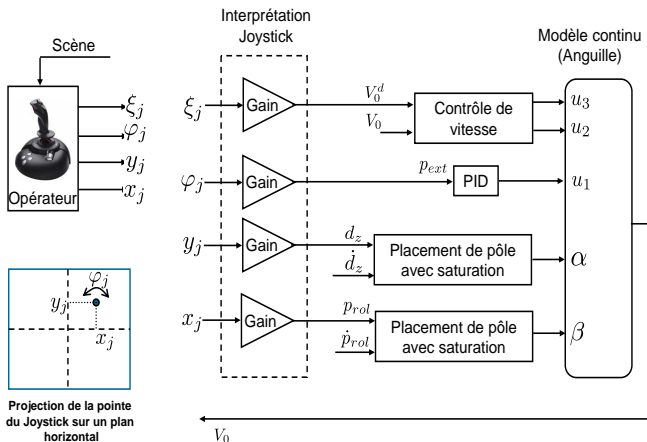


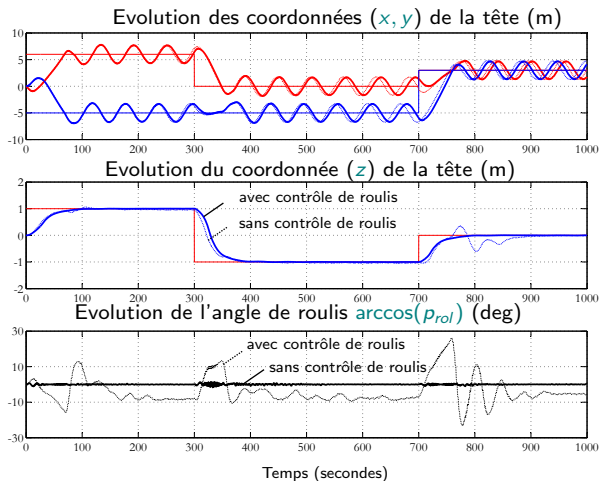
Schéma bloc de la commande découplée en mode télé-opéré



Simulations

Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D

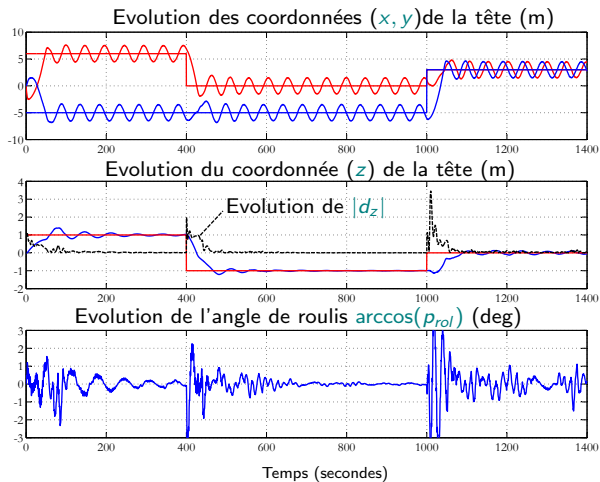
Scénario 3D avec utilisation des nageoires pectorales



Simulations

Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D

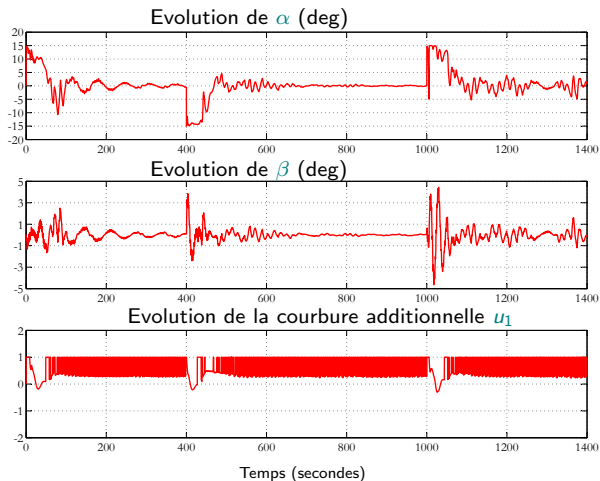
Scénario 3D sans nageoires pectorales



Simulations

Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D

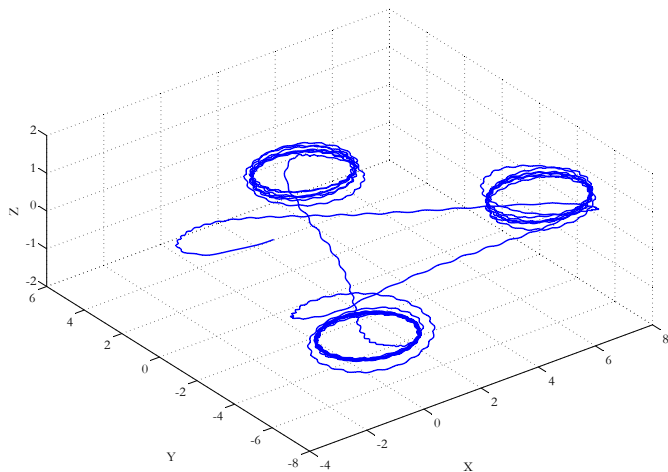
Scénario 3D sans utilisation des nageoires pectorales



Simulations

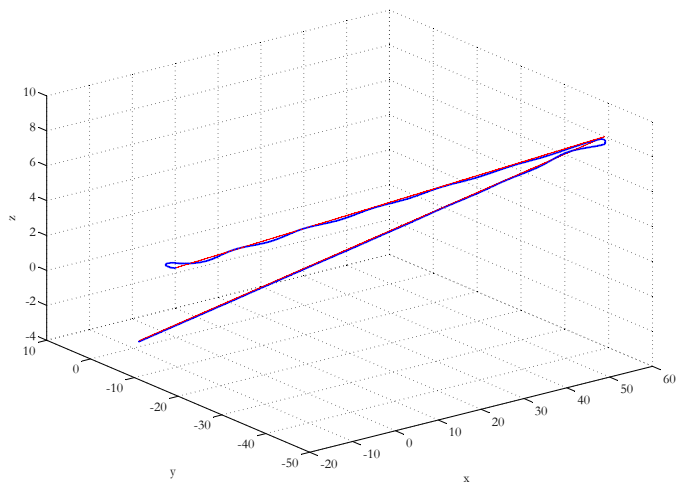
Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D

Trajectoire 3D de la tête sans contrôle de vitesse

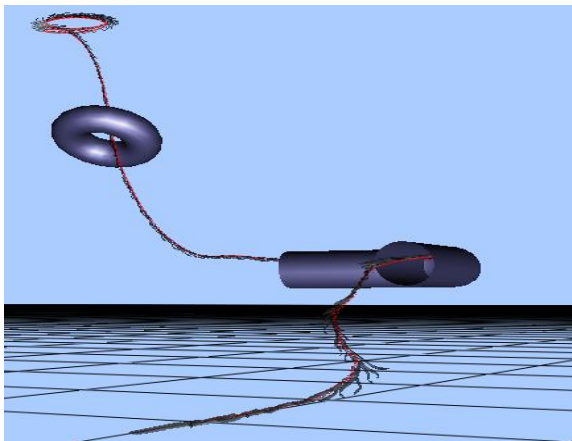


Simulations

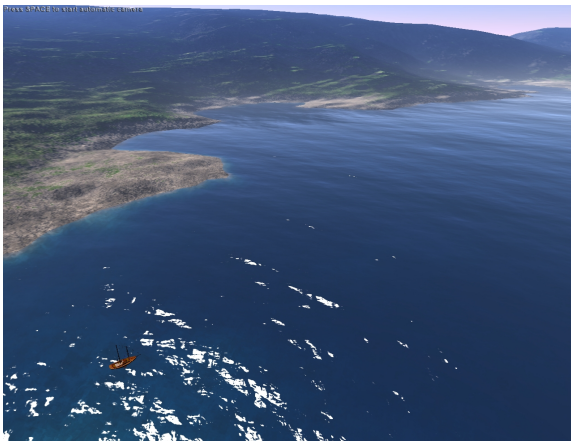
Suivi de trajectoire 3D (avec et sans Nageoires)



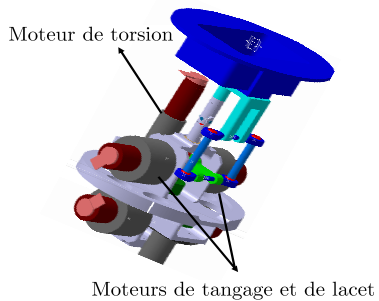
Commande à partir d'un joystick



Nouveau simulateur



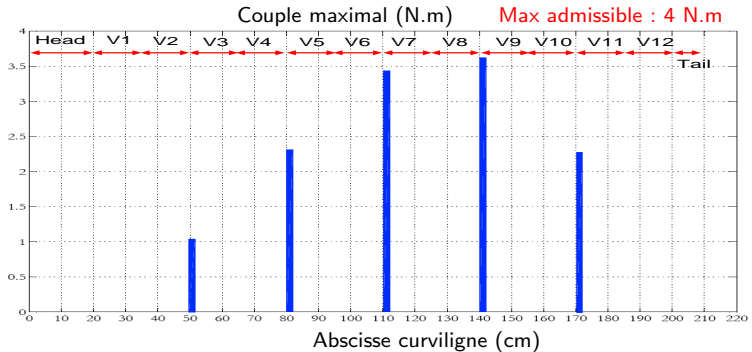
Couple maximal exercé



L'architecture mécanique du prototype



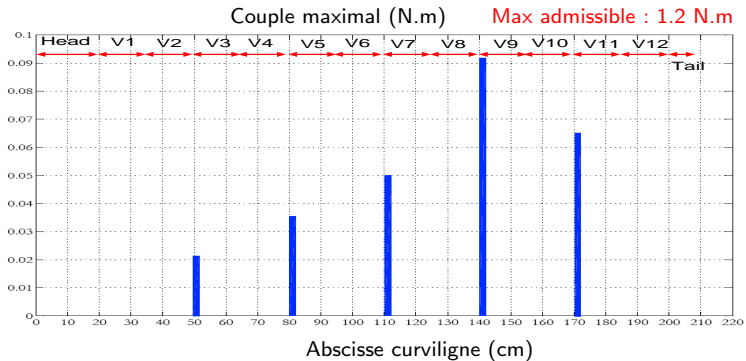
Distribution du couple maximal exercé le long du corps (lacet et tangage)



L'architecture mécanique du prototype



Distribution du couple maximal exercé le long du corps (torsion)



Commande découplée : Avantages & Inconvénients

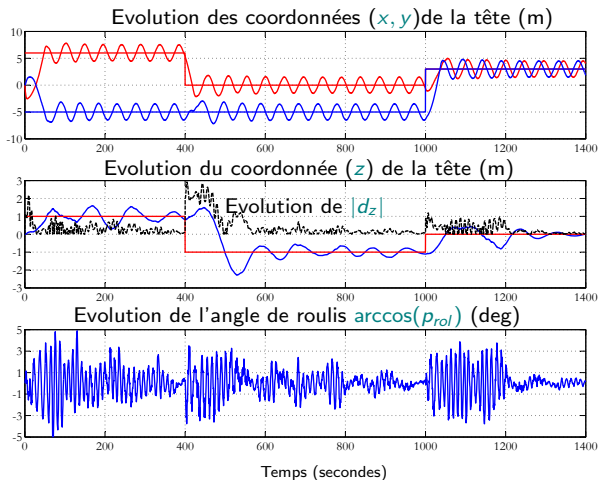
Avantages

- + Simple
- + Indépendance vis-à-vis du modèle

Inconvénients

- Sensibilité au réglage
- Performance limitée

Scénario 3D réalisé en multipliant un des paramètres du contrôleur par 2

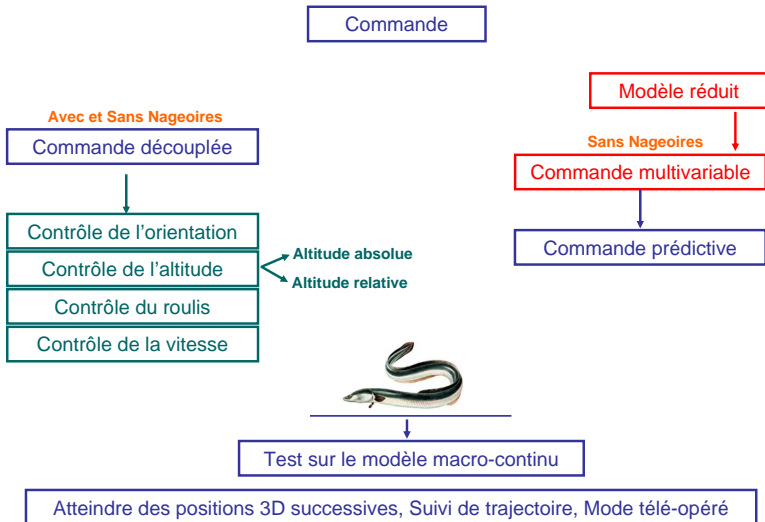


Plan



- ✓ Contexte général
- ✓ Modèle utilisé
- ✓ Problème de commande
- ✓ Commande découplée
- ♣ Commande multivariable
- ♣ Conclusion & perspectives

Axe commande - Synthèse générale



Commande multivariable couplée

♣ Méthodologie

- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu

Commande multivariable couplée

♣ Méthodologie

- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu
- Utilisation de ce modèle pour construire une approche de commande avancée permettant :
 - La poursuite d'un point cible 3D
 - Le contrôle du roulis
 - Tout en respectant les contraintes

Commande multivariable couplée

♣ Méthodologie

- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu
- Utilisation de ce modèle pour construire une approche de commande avancée permettant :
 - La poursuite d'un point cible 3D
 - Le contrôle du roulis
 - Tout en respectant les contraintes
- Validation sur le modèle macro-continu complet

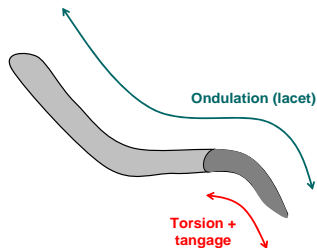
Choix de degrés de liberté : Commande sans nageoires pectorales

Partie "Avant"

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière"

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) ; K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



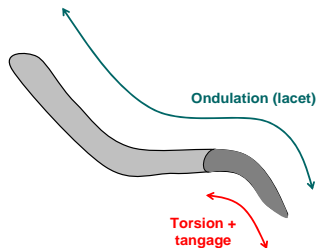
Choix de degrés de liberté : Commande sans nageoires pectorales

Partie "Avant"

- Ondulation en lacet uniquement
 $K_1 \equiv 0 \equiv K_2$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$

Partie "Arrière"

- $K_1 = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$; $K_2 = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$
- $K_3(t, X) := u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$



Degrés de liberté : $u = (u_1, u_2, u_3, \alpha, \beta)$

- u_1 : courbure additionnelle en lacet
- u_2, u_3 : sens et amplitude de l'ondulation en lacet
- α : amplitude de l'ondulation en torsion
- β : amplitude de l'ondulation en tangage

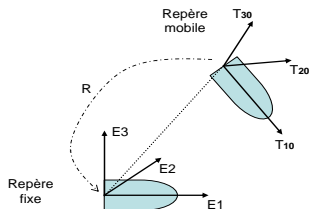
Commande multivariable couplée

♣ Méthodologie

- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu
- Utilisation de ce modèle pour construire une approche de commande avancée permettant :
 - La poursuite d'un point cible 3D
 - Le contrôle du roulis
 - Tout en respectant les contraintes
- Validation sur le modèle macro-continu complet

Modèle réduit

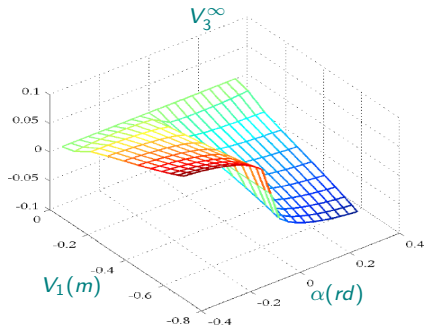
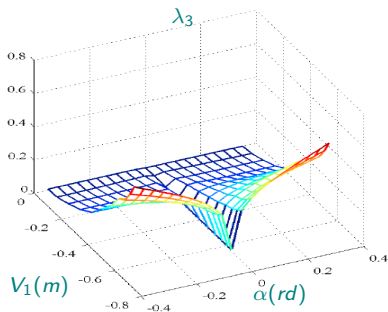
- $\dot{V}_1 = -\lambda_1(u_3, u_2)[V_1 - V_1^\infty(u_3, u_2)]$
- $\dot{V}_2 = 0$
- $\dot{V}_3 = -\lambda_3(\alpha, V_1)[V_3 - V_3^\infty(\alpha, V_1)]$
- $\dot{w}_\rho = -\lambda_\rho(\beta, V_1)[w_\rho - w_\rho^\infty(\beta, V_1)]$
- $\dot{q}_1 = -\lambda_{1q}q_1 + \lambda_{2q}\alpha$
- $\dot{w}_q = (1 - 2\mu_q(\alpha, V_1)|q_1|)\dot{q}_1$
- $\dot{w}_r = \rho\dot{V}_1 - \lambda_r V_1(\rho - u_1)$
- $\dot{\rho} = -\lambda_r(\rho - u_1)$
- $\vec{Q} = \frac{1}{2}M(\vec{w})\vec{Q}$
- $\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$



$$u = (u_1, u_2, u_3, \alpha, \beta)$$

Modèle réduit - Identification des paramètres

λ_3 and V_3^∞ look-up tables

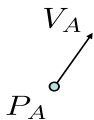


Commande multivariable couplée

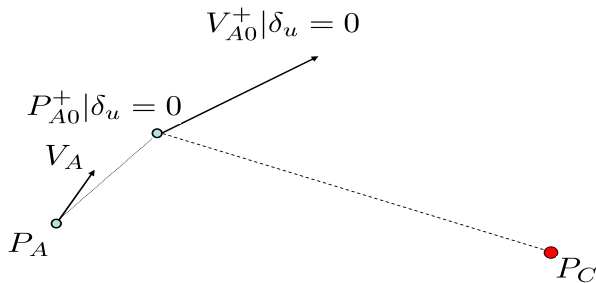
♣ Méthodologie

- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu
- Utilisation de ce modèle pour construire une approche de commande avancée permettant :
 - La poursuite d'un point cible 3D
 - Le contrôle du roulis
 - Tout en respectant les contraintes
- Validation sur le modèle macro-continu complet

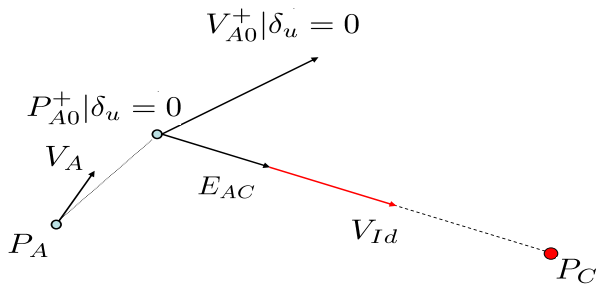
Stratégie



Stratégie

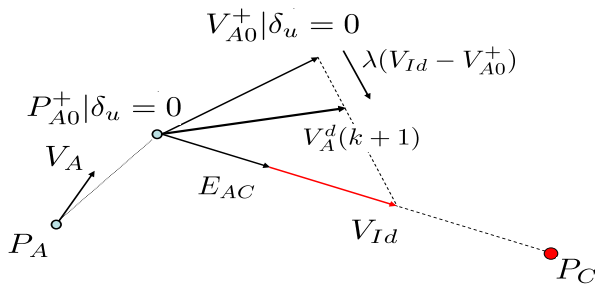


Stratégie



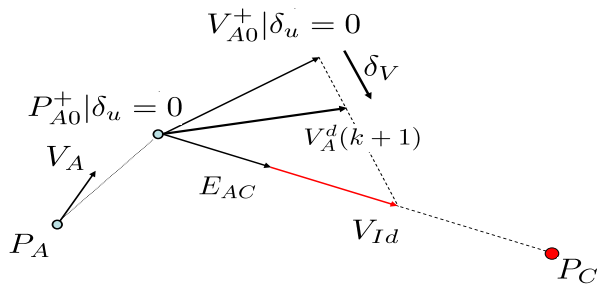
$$\vec{V}_{Id} = \min \left(V_{max}, \frac{\|\vec{P}_{A0}^+ P_C\|}{\tau_s}, \sqrt{2|\vec{P}_{A0}^+ P_C| \gamma_{dmax}} \right) \vec{E}_{AC}$$

Stratégie



$$\vec{V}_d(k+1) = \vec{V}_{A0}^+(k) + \lambda(\vec{V}_{Id} - \vec{V}_{A0}^+(k))$$

Stratégie



Commande multivariable

Système

- $\dot{V}_1 = -\lambda_1(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)[V_1 - V_1^\infty(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)]$
- $\dot{V}_3 = -\lambda_3(\alpha, V_1)[V_3 - V_3^\infty(\alpha, V_1)]$
- $\dot{w}_\rho = -\lambda_\rho(\beta, V_1)[w_\rho - w_\rho^\infty(\beta, V_1)]$
- $\dot{w}_q = (1 - 2\mu_q(\alpha, V_1)|q_1|)\dot{q}_1$
- $\dot{w}_r = \rho\dot{V}_1 - \lambda_r V_1(\rho - \mathbf{u}_1)$

Prédiction à un pas

- $\delta V_1 = \dot{V}_1 \tau_s$
- $\delta V_3 = \dot{V}_3 \tau_s$
- $\delta w_\rho = \dot{w}_\rho \tau_s$
- $\delta w_q = \dot{w}_q \tau_s$
- $\delta w_r = \dot{w}_r \tau_s$

Commande multivariable

Système

- $\dot{V}_1 = -\lambda_1(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)[V_1 - V_1^\infty(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)]$
- $\dot{V}_3 = -\lambda_3(\alpha, V_1)[V_3 - V_3^\infty(\alpha, V_1)]$
- $\dot{w}_\rho = -\lambda_\rho(\beta, V_1)[w_\rho - w_\rho^\infty(\beta, V_1)]$
- $\dot{w}_q = (1 - 2\mu_q(\alpha, V_1)|q_1|)\dot{q}_1$
- $\dot{w}_r = \rho\dot{V}_1 - \lambda_r V_1(\rho - \mathbf{u}_1)$

Prédiction à un pas

- $\delta V_1 = \dot{V}_1 \tau_s$
- $\delta V_3 = \dot{V}_3 \tau_s$
- $\delta w_\rho = \dot{w}_\rho \tau_s$
- $\delta w_q = \dot{w}_q \tau_s$
- $\delta w_r = \dot{w}_r \tau_s$

Nouveau Variable δ

$$\delta = (\delta V_1 \quad \delta V_3 \quad \delta w_\rho \quad \delta w_q \quad \delta w_r)^T \quad \delta \in \mathcal{D}(\tau_s, \mathbf{u}, \mathbf{X})$$

Commande multivariable

Systeme

- $\dot{V}_1 = -\lambda_1(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)[V_1 - V_1^\infty(\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_2)]$
- $\dot{V}_3 = -\lambda_3(\alpha, V_1)[V_3 - V_3^\infty(\alpha, V_1)]$
- $\dot{w}_p = -\lambda_p(\beta, V_1)[w_p - w_p^\infty(\beta, V_1)]$
- $\dot{w}_q = (1 - 2\mu_q(\alpha, V_1)|q_1|)\dot{q}_1$
- $\dot{w}_r = \rho\dot{V}_1 - \lambda_r V_1(\rho - \mathbf{u}_1)$

Prédiction à un pas

- $\delta V_1 = \dot{V}_1 \tau_s$
- $\delta V_3 = \dot{V}_3 \tau_s$
- $\delta w_p = \dot{w}_p \tau_s$
- $\delta w_q = \dot{w}_q \tau_s$
- $\delta w_r = \dot{w}_r \tau_s$

→ Résoudre un problème d'optimisation quadratique avec contraintes

$$\min_{\delta \in \Delta} \left(\underbrace{\eta \cdot \delta^T \delta}_{\text{régularisation}} + \underbrace{\|A\delta - B\|^2}_{\text{poursuite vitesse}} + \underbrace{\alpha \|A'\delta - B'\|^2}_{\text{commande de roulis}} \right)$$

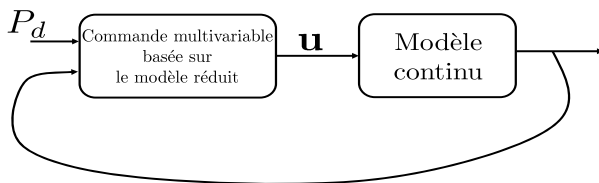
$$\delta_{min}(\tau_s, \mathbf{u}, \mathbf{X}) \leq \delta \leq \delta_{max}(\tau_s, \mathbf{u}, \mathbf{X})$$

Commande multivariable couplée

♣ Méthodologie

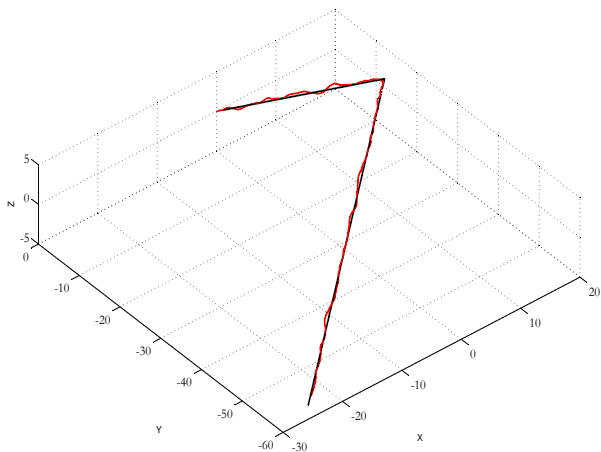
- Choix des degrés de liberté
- Identification d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix à partir du modèle complet macro-continu
- Utilisation de ce modèle pour construire une approche de commande avancée permettant :
 - La poursuite d'un point cible 3D
 - Le contrôle du roulis
 - Tout en respectant les contraintes
- Validation sur le modèle macro-continu complet

Validation en boucle fermée du modèle réduit

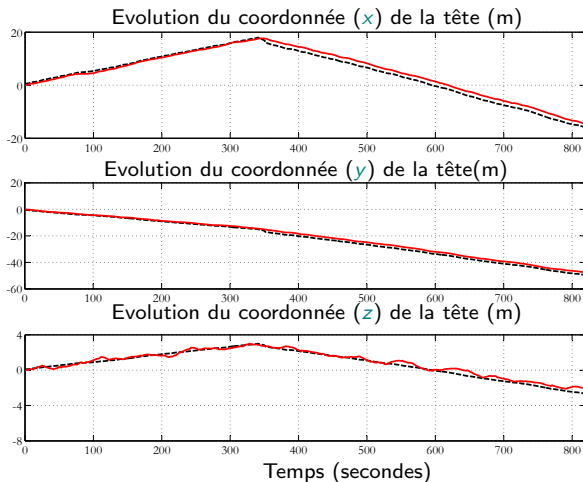


✓ Les résultats étant basés sur un robot sans nageoires, représentent une version pessimiste de ce que nous aurions pu avoir avec nageoires.

Validation en boucle fermée du modèle réduit

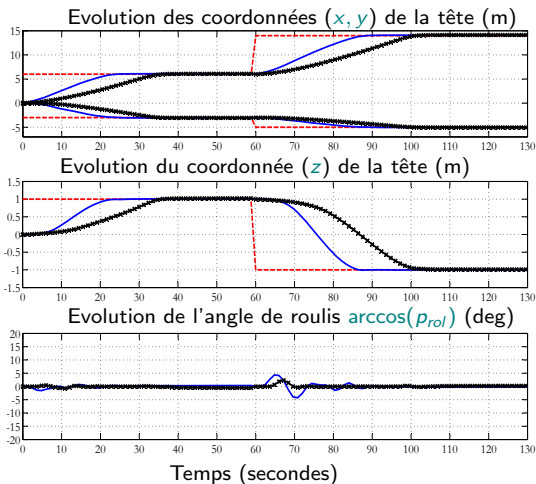


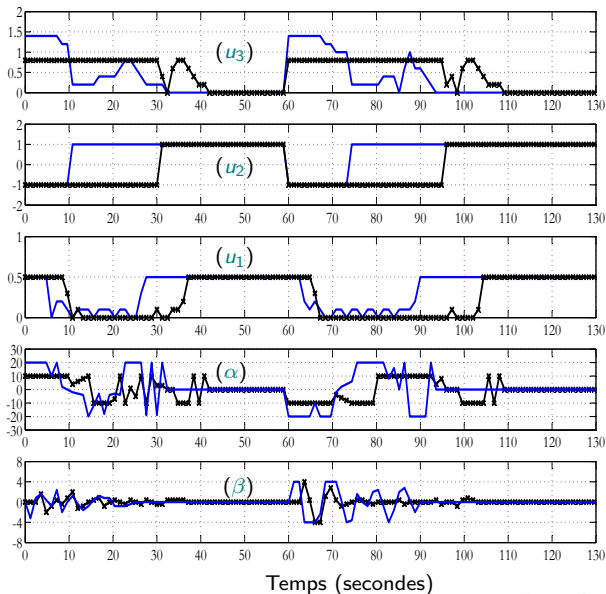
Validation en boucle fermée du modèle réduit



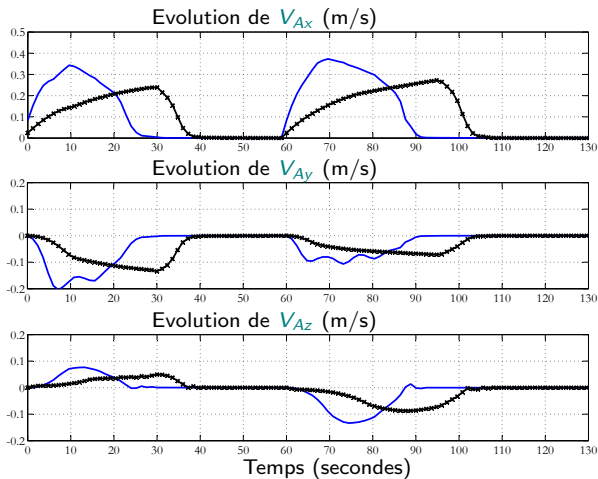
Validation en boucle fermée de la commande

Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D (modèle réduit)

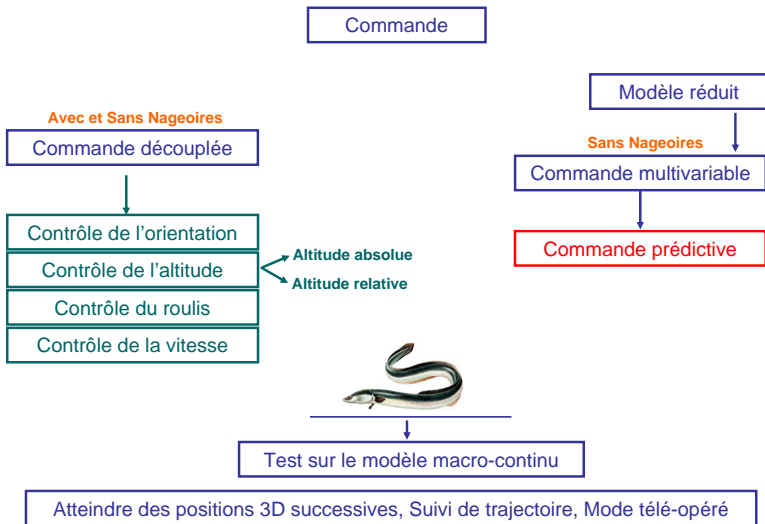




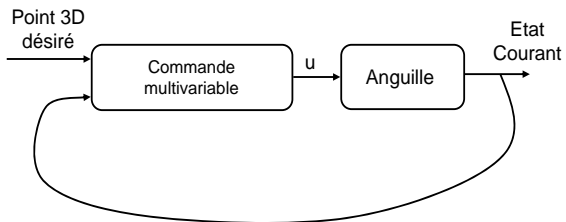
Atteindre des positions désirées dans l'espace 3D (modèle réduit)



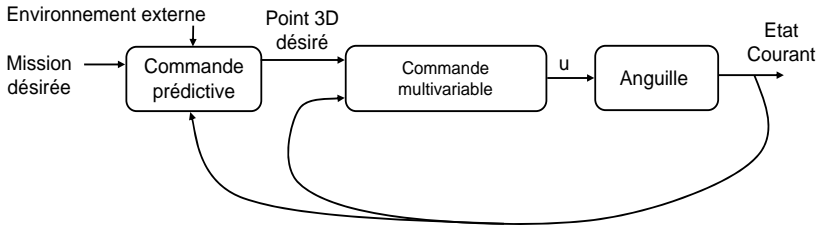
Axe commande - Synthèse générale



Application : navigation autonome par commande prédictive



Application : navigation autonome par commande prédictive



- Degrés de liberté : Point désiré
- Modèle réduit : Calcul rapide

Navigation dans un environnement avec obstacles - Commande prédictive

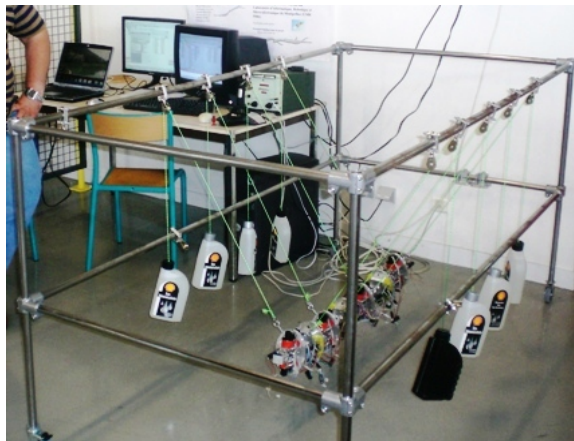


- Critère de choix = temps de parcours minimal

Navigation dans un environnement avec obstacles - Commande prédictive



Début de l'expérimentation



Plan



- ✓ Contexte général
- ✓ Modèle utilisé
- ✓ Problème de commande
- ✓ Commande découplée
- ✓ Commande multivariable
- ♣ Conclusion & perspectives

Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Proposition des schémas de commande en boucle fermée avec et sans utilisation de nageoires pectorales (découplée et multivariable)

Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Proposition des schémas de commande en boucle fermée avec et sans utilisation de nageoires pectorales (découplée et multivariable)
- Réalisation d'un environnement de simulation en mode télé-opéré

Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Proposition des schémas de commande en boucle fermée avec et sans utilisation de nageoires pectorales (découplée et multivariable)
- Réalisation d'un environnement de simulation en mode télé-opéré
- Développement d'un modèle réduit permettant l'optimisation en ligne du comportement de la boucle fermée en présence d'obstacles

Conclusion et Perspectives

Conclusion

- Proposition des schémas de commande en boucle fermée avec et sans utilisation de nageoires pectorales (découplée et multivariable)
- Réalisation d'un environnement de simulation en mode télé-opéré
- Développement d'un modèle réduit permettant l'optimisation en ligne du comportement de la boucle fermée en présence d'obstacles
- Réalisation d'une vitrine de démonstration permettant la visualisation du robot en nage libre ou télécommandé dans un environnement virtuel -
Financement ANR et collaboration avec Pascal Bellemain

Conclusion et Perspectives

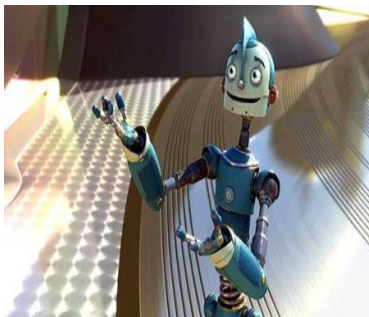
Pincipales Perspectives

- Mise en oeuvre des lois de commande sur le prototype (Août 2009)

Conclusion et Perspectives

Pincipales Perspectives

- Mise en oeuvre des lois de commande sur le prototype (Août 2009)
- Commande multivariable avec des contraintes en terme de couples exercés



Merci de votre attention