

CONCEPTION, ANALYSE ET COMMANDE D'AUV À PROPULSION RECONFIGURABLE ET VECTORIELLE

Olivier Chocron

MCF HDR 60^e

École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB)



Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRD L)



Journée du GdR-GT2 Robotique Marine/Sous-marine

Laboratoire SCAI, Campus Jussieu, Sorbonne Université (Paris), 15 décembre 2023

Propulsion vectorielle et reconfigurable

- Efforts nominaux (dûs à l'inertie) :

$$\{\mathbb{F}_N\}_C = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_N \\ \vec{M}_N \end{array} \right\}_C = \left\{ \begin{array}{c} m \dot{\vec{V}}_C \\ \mathcal{J} \dot{\vec{\Omega}} + \vec{\Omega} \times \mathcal{J} \vec{\Omega} \end{array} \right\}$$

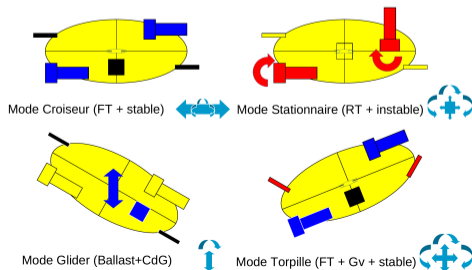
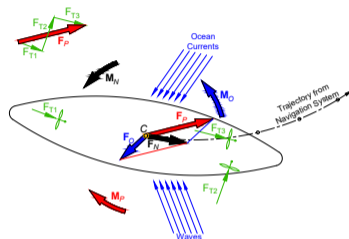
- Efforts océaniques (contrainte) : $\{\mathbb{F}_O\}_C = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_O \\ \vec{M}_O \end{array} \right\}_C$

- Efforts de propulsion (nécessaires) :

$$\{\mathbb{F}_P\}_C = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_P \\ \vec{M}_P \end{array} \right\}_C = \{\mathbb{F}_N\}_C - \{\mathbb{F}_O\}_C$$

- Efforts de propulsion (répartition) :

$$\{\mathbb{F}_P\}_C(t) = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_P(t) = \sum_{i=1}^n F_{T_i}(t) \vec{u}_i(t) \\ \vec{M}_P(t) = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i(t) \times F_{T_i}(t) \vec{u}_i(t) \end{array} \right\}_C$$



⇒ Propulsion reconfigurable par vectorisation de la poussée

Principes et technologie du PMCR

Avantage du propulseur magnéto-couplé

- Transmission du couple sans contact (étanchéité)
- Suppression des frottements/entretien de joints
- Limitation du couple (pics de charge et blocages)
- **Flexibilité magnétique** → **Propulseur Vectoriel**

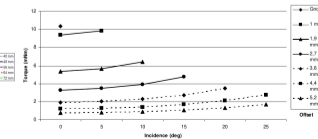
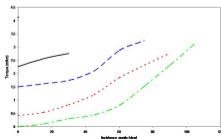
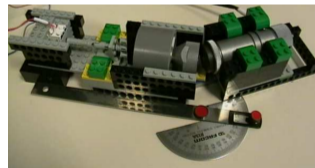
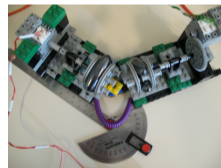
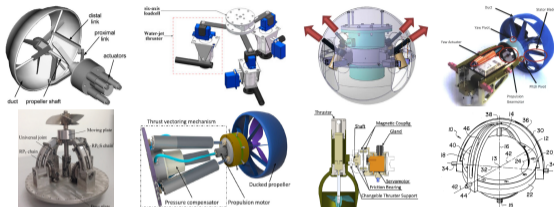
Principes fondamentaux du PMCR

- Aimants et pièces polaires répartis sur deux rotors
- Articulation entre rotors (angle de reconfiguration)
- Couples transmis selon la cinémato-magnétique

Propriétés et limitations du PMCR

- Accouplement maintenu pendant la reconfiguration
- Ressort magnétique (vibrations et désaccouplement)
- Pertes magnétiques par courants de Foucault et CEM
- Couple de redressement gênant la reconfiguration

⇒ Le PMCR nécessite une conception spécifique



Modélisation analytique des accouplements de PMCR

Interactions entre aimants et rotors

- Forces magnétiques entre aimants

$$\vec{F}_p = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} \oint_{S_2} \oint_{S_1} \frac{\vec{M}_1 \vec{M}_2}{\|\vec{M}_1 \vec{M}_2\|^3} dS_1 dS_2$$

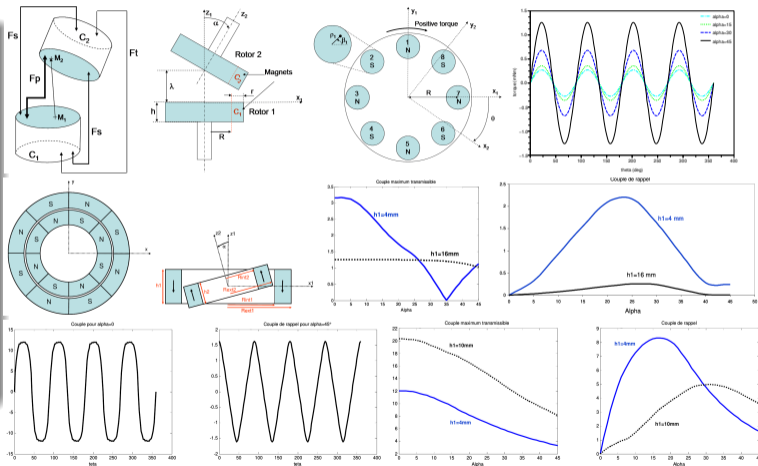
- Couple rotor moteur/ hélice

$$\Gamma = \sum_{k=1}^{k=8} \left(R \sum_{k=1}^{k=n} (F_{x_i} + F_{y_i}) \right)$$

- 3 différents accouplements :

- Axial à aimantation axiale
- Radial à aimantation axiale
- Radial à aimantation radiale

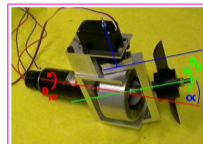
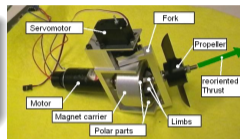
⇒ Ingénierie magnétique nécessaire



PMCR-1 : Accouplement sphérique

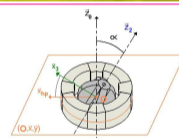
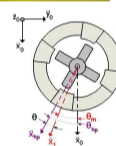
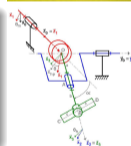
Conception de l'accouplement magnétique reconfigurable

- Accouplement en cloche cylindre/sphère
- Aimants Sm2Co17 (moteur) et inox Z8C17 (hélice)
- Reconfiguration $\pm 30^\circ$ par fourche et servomoteur



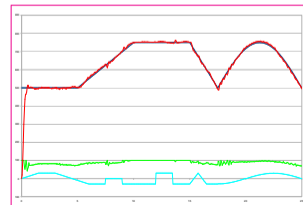
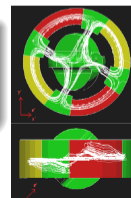
Modélisation magnéto-cinémato-statique

- Chaîne cinématique à 3 DDL fermée par l'accouplement
- Non homocinétisme (joint de cardan) \rightarrow vibrations moteur
- Angle magnétique $\theta = \theta_m - \arctan(\tan(\theta_h) \cos(\alpha))$
- Couple interpolé $\Gamma_{C0} = 0.115 \cos(\alpha)^{0.5} [\sin(4 \theta_-) + \sin(4 \theta_+)]$



Expérimentations numériques et réelles

- Couple magnétique par MEF (TE2M) de 180-230 mNm
- Validation expérimentale statique et dynamique (fréquence)
- Contrôle PID de la vitesse et de l'angle (donc du vecteur)



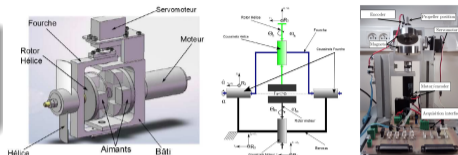
\Rightarrow Le PMCR-1 a un couple faible et est complexe à intégrer

Olivier CHOCRON, Urbain PRIEUR et Laurent PINO (2014). In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 19.2

PMCR-2 : Accouplement à plat

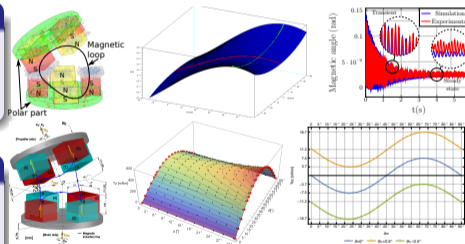
Conception de l'accouplement magnétique reconfigurable

- Accouplement par deux en disques face à face
- Aimants Sm2Co17 sur rotors moteur et hélice
- Reconfiguration $\pm 30^\circ$ par fourche et servomoteur



Modélisation magnéto-statique et cinémato-dynamique

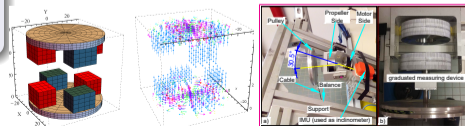
- Chaîne cinématique à 3 DDL fermée par l'accouplement
- Angle magnétique $\theta = \theta_m - \theta_h (\simeq \text{homocinétique})$
- Couple étudié en VF \rightarrow effet d'auto-entraînement (validé)



Expérimentations numériques et réelles

- Identification des paramètres inertiels et des frottements
- Couple magnéto-statique par FVM (ENIB) de 370-600 mNm
- Couple de rappel très important (100 % du couple)
- Contrôle PID de la vitesse et de l'angle (donc du vecteur)

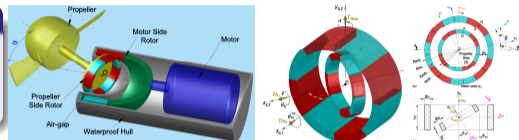
\Rightarrow Le PMCR-2 a un fort couple de rappel et n'est pas submersible



PMCR-3 : Accouplement radial

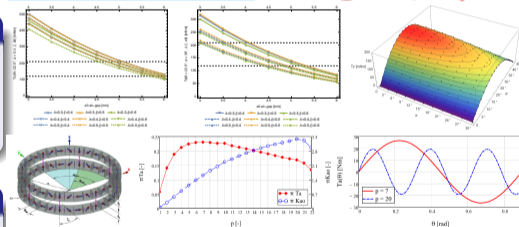
Conception du PMCR-3 submersible

- Accouplement NdFeB RAR pour la transmission hélice
- Accouplement NdFeB AAA pour la reconfiguration
- Conception orientée-tâche (AUV) de la chaîne de propulsion



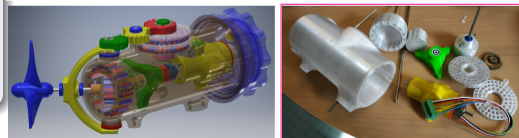
Modélisation, conception et optimisation du PMCR-3

- Modélisation cinémato-magnétique de PMCR 2D et 3D
- Contraintes de couple min/max, aimants et fabrication
- Optimisation génétique (angle max, densité intrinsèque de couple, inertie rotors et couple de redressement)



Résultat de conception réelle et validations

- Angle de reconfiguration nominal : $\pm 45^\circ$ (max 52°)
- Couple transmissible : 476-980 mNm (de rappel : 200 mNm)
- Masse de l'accouplement RAR : 106 g (4 pôles magnétique)
- Rayon extérieur : 33 mm ; Entrefer neutre : 10 mm



⇒ Le PMCR-3 doit être finalité (électronique et commande)

Modélisation générale de l'AUV

Modélisation cinématique du robot

Vecteurs de position et orientations dans $R_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

Vitesses absolues exprimées dans son repère $R_b(O_b, x_b, y_b, z_b)$:

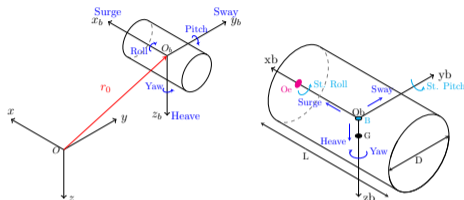
$$\nu = \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}, \quad \nu_1 = \begin{bmatrix} u = \text{cavement} \\ v = \text{embarquée} \\ w = \text{pilonnement} \end{bmatrix}, \quad \nu_2 = \begin{bmatrix} p = \text{roulis} \\ q = \text{tangage} \\ r = \text{lacet} \end{bmatrix}$$

Équations de transformation des vecteurs vitesses de R_0 à R_b :

$$\dot{\eta}_1 = \mathbf{J}_1(\eta_2) \nu_1, \quad \dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2) \nu_2, \quad \dot{\eta} = \left. \frac{d\eta}{dt} \right|_{R_0} = \mathbf{J}(\eta_2) \nu$$

$$\mathbf{J}_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}(\eta_2) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix}$$



Modélisation dynamique du robot

Efforts de propulsion appliqués au robot dans R_b :

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad \tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

Équation dynamique générale du robot dans R_b

$$\mathbf{M} \dot{\nu} + \mathbf{C}(\nu) \nu + \mathbf{D}(\nu) \nu + \mathbf{G}(\eta) = \tau$$

\mathbf{M} \mathbf{C} \mathbf{D} et \mathbf{G} les matrices de masse, de couplage, d'amortissement et de gravité/flottabilité de l'AUV.

Approximation par le méthode des masses ajoutées

Ajout des termes hydrodynamiques

Inertie de la masse d'eau déplacée :

$$\mathbf{M}_a = -diag\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\} \Rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{M}_b + \mathbf{M}_a$$

Couplages de la masse d'eau déplacée (AUV symétrique) :

$$\mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}w} & Y_{\dot{v}v} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}w} & 0 & -X_{\dot{u}u} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}v} & X_{\dot{u}u} & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}w} & Y_{\dot{v}v} & 0 & -N_{\dot{r}r} & M_{\dot{q}q} \\ Z_{\dot{w}w} & 0 & -X_{\dot{u}u} & N_{\dot{r}r} & 0 & -K_{\dot{p}p} \\ -Y_{\dot{v}v} & X_{\dot{u}u} & 0 & -M_{\dot{q}q} & K_{\dot{p}p} & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{C} = \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_a$$

Efforts dissipatifs ou traînée hydrodynamique (ici quadratiques) :

$$\mathbf{D} = -diag\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\}$$

$$\text{Efforts de potentiel : } \mathbf{G} = - \begin{bmatrix} b_{f_G}(\eta_2) + b_{f_B}(\eta_2) \\ b_{P_G} \times b_{f_G}(\eta_2) + b_{P_B} \times b_{f_B}(\eta_2) \end{bmatrix}$$

avec :

$$b_{f_G}(\eta_2) = \mathbf{J}_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 & 0 & W \end{bmatrix}^t \quad : \text{ poids du robot}$$

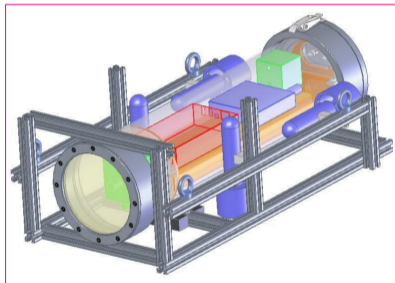
$$b_{f_B}(\eta_2) = -\mathbf{J}_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 & 0 & B \end{bmatrix}^t \quad : \text{ poussée d'Archimède}$$

Paramètres dynamiques de l'AUV RSM

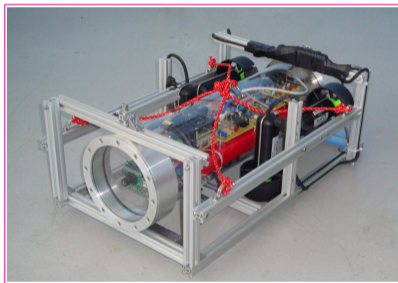
Nom [unité]	Valeur
Rayon [m]	0.1
Longueur [m]	0.6
Masse [kg]	18.71
Poids [N]	183.6
Flottabilité [N]	184.5
Centre de carène [m]	$[0 \ 0 \ 0]^T$
Centre de gravité [m]	$[0 \ 0 \ 0.0125]^T$
Matrice d'inertie [$kg \cdot m^2$]	$\begin{bmatrix} 0.097 & 0 & 0 \\ 0 & 0.611 & 0 \\ 0 & 0 & 0.608 \end{bmatrix}$

Nom	Symbole	Valeur
Masse ajoutée	$X_{\dot{u}}$	-1.872
	$Y_{\dot{v}}$	-1.881
	$Z_{\dot{w}}$	-1.881
	$K_{\dot{p}}$	0.0
	$M_{\dot{q}}$	-0.057
	$N_{\dot{r}}$	-0.057
Hydrodynamique (Amortissement)	$X_{u u }$	-12.541
	$Y_{v v }$	-71.856
	$Z_{w w }$	-71.856
	$K_{p p }$	0.38
	$M_{q q }$	-3.88
	$N_{r r }$	-3.88

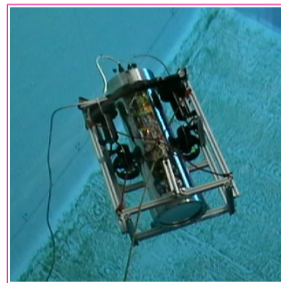
Simulation dynamique et expérimentation de l'AUV en mode ROV



Modélisation-CAO & Simulation EAUUVIVE¹



Fabrication & test ENIB



Essais à l'Ifrermer-Brest

1. Simulateur dynamique ENIB AUV In Virtuo Experiment (©IRDL-ENIB 2007-2022)

Modélisation de la propulsion fixe

Modélisation de la propulsion du robot RSM fixe à 4 DDL

Effort de propulsion τ en fonction de la matrice de configuration de propulsion \mathbf{B} et \mathbf{u} le vecteur des n_p forces de propulsion :

$$\tau = \begin{bmatrix} \sum \mathbf{u}_i \\ \sum \mathbf{P}_i \times \mathbf{u}_i \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad \text{avec} \quad \mathbf{u} = [u_1 \dots u_1 \dots u_{n_p}]^t$$

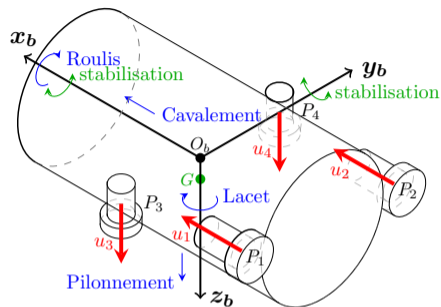
Positions dans R_b des 4 propulseurs fixes (sous-actionné) :

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \\ -R \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} P_{2x} \\ P_{2y} \\ P_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \\ R \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} P_{3x} \\ P_{3y} \\ P_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -R \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_4 = \begin{bmatrix} P_{4x} \\ P_{4y} \\ P_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{bmatrix}$$

Matrice de configuration de propulsion pour le robot RSM fixe :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & P_{3y} & P_{4y} \\ P_{1z} & P_{2z} & -P_{3x} & -P_{4x} \\ -P_{1y} & -P_{2y} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -R & R \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ R & -R & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Mobilité intrinsèque du robot RSM fixe

4 DDL actionnés :

- Cavement : translation sur l'axe x_b
- Pilonnement : translation sur l'axe z_b
- Roulis : rotation sur l'axe x_b , stabilisé
- Lacet : rotation sur l'axe z_b

2 DDL non actionnés :

- Tangage : rotation sur l'axe y_b , stabilisé
- Embardée : translation sur l'axe y_b → dérive

Modélisation de la propulsion vectorielle 1/2

Modélisation de la propulsion du robot RSM fixe à 4 DDL

Effort de propulsion τ du propulseur vectoriel en fonction des angles de reconfiguration (ψ , θ) et de la poussée u :

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & & & \\ c\theta s\psi & & & \\ -s\theta & & & \\ -s\theta P_y - c\theta s\psi P_z & & & \\ c\theta c\psi P_z + s\theta P_x & & & \\ c\theta s\psi P_x - c\theta c\psi P_y & & & \end{bmatrix}, \quad u = [u], \quad \tau = B_p u$$

Décomposition cartésiennes : $u_{vec} = \begin{bmatrix} u_x = u \cos \theta \cos \psi \\ u_y = u \cos \theta \sin \psi \\ u_z = -u \sin \theta \end{bmatrix}$

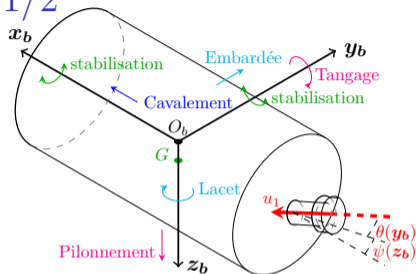
Calcul des paramètres de contrôle vectoriel :

$$u = ||u_{vec}|| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

$$\psi = \arctan2(u_y, u_x), \quad \theta \neq \pm \frac{\pi}{2}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{-u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}}\right), \quad \theta \in]-\frac{\pi}{2} \dots \frac{\pi}{2}[$$

Si $u_x = u_y = 0$, alors $u = |u_z|$, $\psi = 0$, $\theta = \text{sign}(u_z) \frac{\pi}{2}$



Mobilité intrinsèque du robot RSM vectoriel

- 3 DDL parmi les 5 suivants : cavement, embardée, pilonnement, tangage et lacet.
- 2 DDL restant non actionnés, mais perturbés par les 3 DDL choisis précédemment.
- 1 DDL (roulis) non actionné mais stabilisé et perturbé (couple contra-rotatif)
- Exemple 1 : Contrôle des 3 translations au sacrifice des rotations → instable
- Exemple 2 : Contrôle du cavement, tangage et lacet → contrôle *Line Of Sight*

Modélisation de la propulsion vectorielle 2/2

Décomposition-recomposition cartésienne du propulseur vectoriel

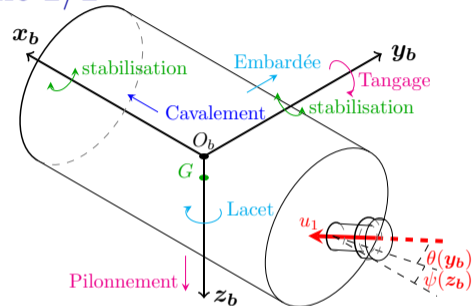
Décomposition de \mathbf{Bu} en 3 propulseurs fixes :

$$\begin{bmatrix} c\theta c\psi u \\ c\theta s\psi u \\ -s\theta u \\ -s\theta P_y u - c\theta s\psi P_z u \\ c\theta c\psi P_z u + s\theta P_x u \\ c\theta s\psi P_x u - c\theta c\psi P_y u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ P_z \\ -P_y \end{bmatrix} u_x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -P_z \\ P_x \end{bmatrix} u_y + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -P_x \\ 0 \end{bmatrix} u_z$$

Recomposition en système de propulsion fixe :

$$\mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi u \\ c\theta s\psi u \\ -s\theta u \\ -s\theta P_y u - c\theta s\psi P_z u \\ c\theta c\psi P_z u + s\theta P_x u \\ c\theta s\psi P_x u - c\theta c\psi P_y u \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ P_z & 0 & -P_x \\ -P_y & P_x & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{vec}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_{vec}}$$

⇒ L'étude du propulseur vectoriel se ramène aux cas fixes



Cas du propulseur vectoriel 2D (poussée + 1 angle)

$$\mathbf{u}_{vec} = \begin{bmatrix} u_x = u \cos \psi \\ u_y = u \sin \psi \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} c\psi u \\ s\psi u \\ 0 \\ -s\psi P_z u \\ c\psi P_z u \\ [s\psi P_x u - c\psi P_y u] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & -P_z \\ P_z & 0 \\ -P_y & P_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

Analyse des capacités du système de propulsion

Extraction des exigences propulsives en effort de la tâche

Commande nominale : le robot suis parfaitement la trajectoire (contraint cinématiquement)

$$\eta_e(t) = \eta_d(t) \Rightarrow \nu(t) = \nu_a(t) \Rightarrow \tau(t) = \tau_a(t)$$

Vitesse d'anticipation en O_b du robot :

$$\nu_e = \begin{bmatrix} \nu_{a1} + \nu_{a2} \times r_e \\ \nu_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \nu_a$$

$$\dot{\eta}_e = \dot{\eta}_d = \mathbf{J}(\eta_e) \nu_e = \mathbf{J}(\eta_d) \nu_a = \mathbf{J}(\eta_d) \mathbf{T} \nu_a$$

$$\nu_a = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{J}(\eta_d)^{-1} \dot{\eta}_d$$

Effort de propulsion nominal :

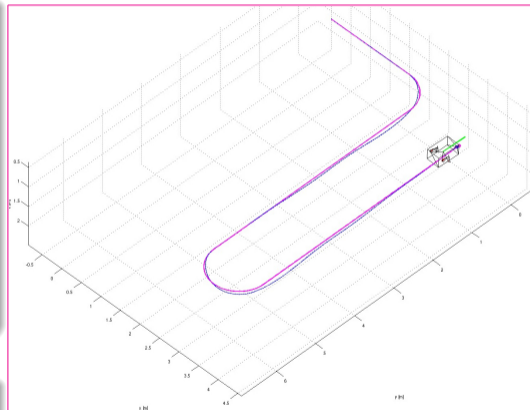
$$\tau_a = \mathbf{M} \dot{\nu}_a + (\mathbf{C}(\nu_a) + \mathbf{D}(\nu_a)) \nu_a + \mathbf{G}(\eta_d)$$

Espace vectoriel de propulsion demandé

$$\tau_a = [* * * 0 0 *]^t$$

$$\mathcal{I}m(\tau_a) = \text{span} \{ \tau_a(t) \mid t \in [t_i, t_f] \}$$

$$\mathcal{I}m(\tau_a) \subset \text{span} \{ \tau_1, \dots, \tau_K \} \text{ et } \mathcal{I}m(\tau_a) \not\subset \text{span} \{ \tau_1, \dots, \tau_{K-1} \}$$



Calcul des efforts nominaux (ou d'anticipation) :

La trajectoire est suivie cinématiquement et les efforts sont déduits dynamiquement

Analyse des capacités du système de propulsion

Extraction des exigences propulsives en effort de la tâche

Commande nominale : le robot suis parfaitement la trajectoire (contraint cinématiquement)

$$\eta_e(t) = \eta_d(t) \Rightarrow \nu(t) = \nu_a(t) \Rightarrow \tau(t) = \tau_a(t)$$

Vitesse d'anticipation en O_b du robot :

$$\nu_e = \begin{bmatrix} \nu_{a1} + \nu_{a2} \times r_e \\ \nu_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \nu_a$$

$$\dot{\eta}_e = \dot{\eta}_d = \mathbf{J}(\eta_e = \eta_d) \nu_e = \mathbf{J}(\eta_d) \mathbf{T} \nu_a$$

$$\nu_a = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{J}(\eta_d)^{-1} \dot{\eta}_d$$

Effort de propulsion nominal :

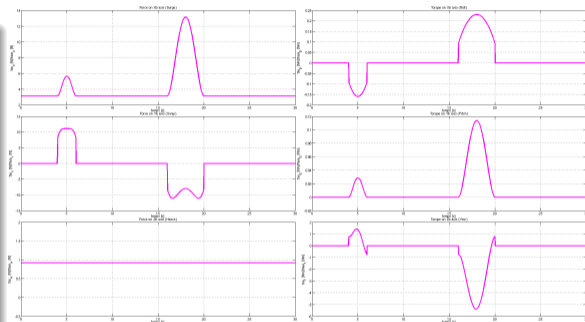
$$\tau_a = \mathbf{M} \dot{\nu}_a + (\mathbf{C}(\nu_a) + \mathbf{D}(\nu_a)) \nu_a + \mathbf{G}(\eta_d)$$

Espace vectoriel de propulsion demandé

$$\tau_a = [* * * 0 0 *]^t$$

$$\mathcal{I}m(\tau_a) = \text{span} \{ \tau_a(t) \mid t \in [t_i, t_f] \}$$

$$\mathcal{I}m(\tau_a) \subset \text{span} \{ \tau_1, \dots, \tau_K \} \text{ et } \mathcal{I}m(\tau_a) \not\subset \text{span} \{ \tau_1, \dots, \tau_{K-1} \}$$



Analyse des efforts nominaux (ou d'anticipation) :

les forces de cavement, embardée et pilonnement sont nécessaires

les couples de roulis et tangage sont assez faibles et stabilisés
 le couple de lacet est significatif et non stabilisé (nécessaire)

Synthèse d'une propulsion fixe pour une tâche

Famille de propulseurs génériques et leurs efforts associés

Nom de la configuration	T_x	T_y	T_z	T_{yx}	T_{zx}	T_{xy}	T_{zy}	T_{xz}	T_{yz}
Position du propulseur	P_x 0	0 P_y	0 P_z	0 P_y P_z	0 P_y P_z	P_x 0	P_x 0	P_x P_y 0	P_x P_y 0
Direction de la fore	1 0 0	0 1 0	0 0 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0	0 0 1	0 0 0	0 1 0
Couple produit	0 0 0	0 0 0	0 0 0	$-P_z$ 0 0	$+P_y$ 0 0	0 0 $+P_z$	0 0 $-P_x$	0 0 0	0 0 $+P_x$

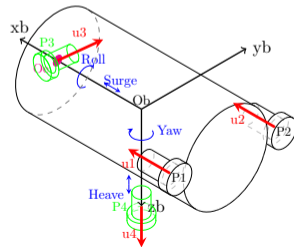
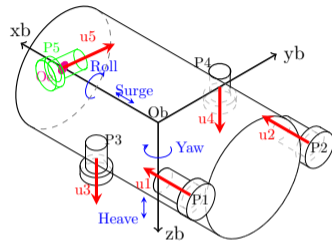
Algorithme de synthèse pour les propulseurs fixes

- **Étape 1** : Choisir des $T_{\bullet\bullet}$ → toutes les rotations requises,
- **Étape 2** : Choisir d'autres $T_{\bullet\bullet}$ → translations non couvertes,
- **Étape 3** : Compléter avec des T_{\bullet} → translations restantes.

Application à la tâche de suivi de rail $\tau_a = [* * * 0 0 *]^t$

- **Étape 1** : Lacet → $T_{yz}(L00) = [01000L]$ → embardée (P3)
- **Étape 2** : Cavalement → $T_{xz}(0 \pm R0) = [10000 \mp R]$ → lacet (P1&P2)
- **Étape 3** : Pilonnement → $T_z(00R) = [001000]$ (P4)

⇒ une solutions pour la tâche de suivi de rail : RSM-fix3



Synthèse d'une propulsion vectorielle pour la tâche de suivi de rails

Analyse du robot RSM-fix $\tau_{fix} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^t \neq \tau_a$

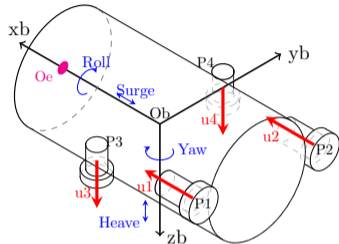
$$B_r = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -R & R \\ R & -R & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ avec } \begin{cases} \det(B_r) = -4R^2 \\ u_c = B_r^{-1} \tau_a \end{cases}$$

Analyse du robot RSM-vec $\tau_{vec} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^t \equiv \tau_a$

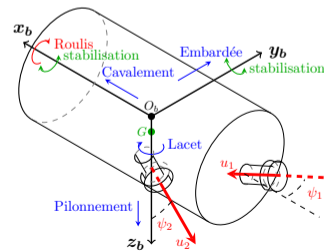
$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \begin{bmatrix} \cos \psi_1 & 0 \\ \sin \psi_1 & \sin \psi_2 \\ 0 & \cos \psi_2 \\ 0 & -P_{2z} \sin \psi_2 \\ 0 & 0 \\ \sin \psi_1 P_{1x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B_{vec}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{y2} \\ u_{z2} \end{bmatrix}}_{u_{vec}}$$

$$B_{vec_r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & P_{1x} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -L & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ avec } \begin{cases} \det(B_{vec_r}) = -L \\ u_c = B_{vec_r}^{-1} \tau_a \end{cases}$$

⇒ Solution RSM-vec pour la tâche de suivi de rail à 2x2DDL



RSM-fix



RSM-vec

Contrôle-Commande par bouclage dynamique linéarisant (FBLN)

Lois de commande cinématique et dynamique

$$\begin{aligned} \nu_c &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{J}(\eta)^{-1} (\dot{\eta}_d + \Lambda \mathbf{e}_{cin}) \\ \tau_c &= \mathbf{M} (\dot{\nu}_c + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_{dyn}) + (\mathbf{C}(\nu) + \mathbf{D}(\nu)) \nu + \mathbf{G}(\eta) \end{aligned}$$

avec :

- $\mathbf{e}_{cin} = \eta_d - \eta$: erreur de la boucle cinématique
- $\mathbf{e}_{dyn} = \nu_c - \nu$: erreur de la boucle dynamique
- Λ : gain proportionnel cinématique
- \mathbf{K}_p : gain proportionnel dynamique

Allocation de la poussée par répartition sur les propulseurs

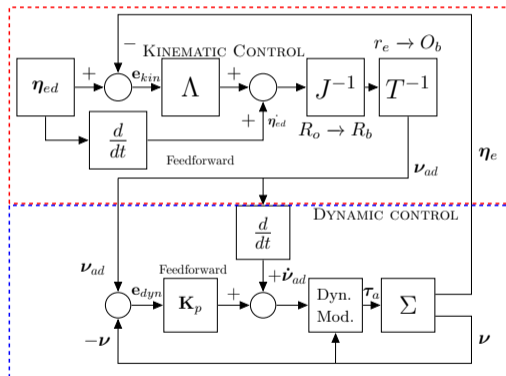
$$u_c = \mathbf{B}^{-1} \tau_a$$

Pseudo-inverse pour les AUV sous-actionnés ou redondants :

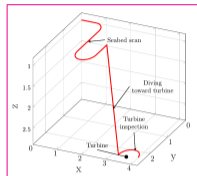
$$u_c = (\mathbf{B}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^t \tau_a \text{ pour } m > n \text{ (robot sous-actionné)}$$

$$u_c = \mathbf{B}^t (\mathbf{B} \mathbf{B}^t)^{-1} \tau_a \text{ pour } m < n \text{ (robot redondant)}$$

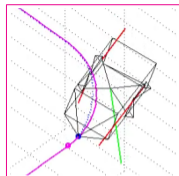
⇒ Réduction d'espace appliquée au modèle dynamique



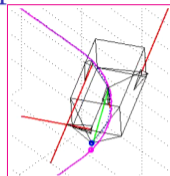
Résultats de simulation comparés des différents systèmes de propulsion



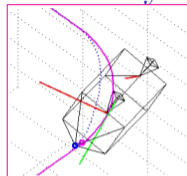
AUV Holonome



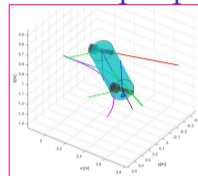
RSM-fix



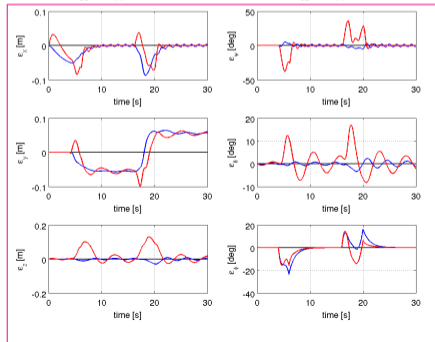
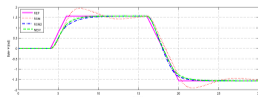
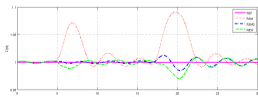
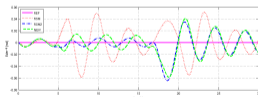
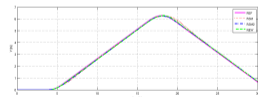
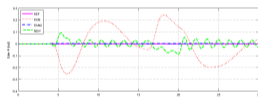
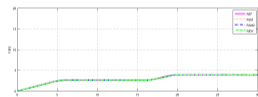
RSM-fix3



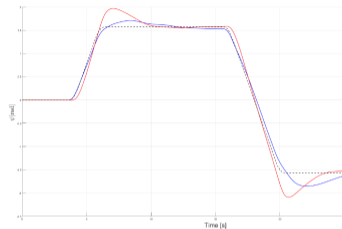
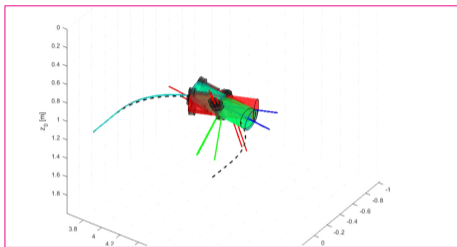
RSM-vec



RSM-vec2



Deux approches complémentaires du sous-actionnement des AUV



(a) Configuration pilonnement



(b) Configuration embarquée

