Concours Centrale-Supélec, France

Session 2011, filière MP

Option sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 3 heures

Ce que traite le sujet

- Parties I à III : présentation du drone et architecture
- Parties IV et V : mise à l'eau et comportement du drone
- Partie VI : maîtriser le mouvement de suivi
- Partie VII : réussir la mission d'inspection en autonomie

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/mp/2011/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

S2I

MP

2011

3 heures Calculatrices autorisées

ALISTAR Engin sous-marin autonome d'inspection

Les installations d'exploitation (plate-forme, tête de puits, pipeline, ...) des champs pétrolifères Offshore situées en haute mer font l'objet d'une constante surveillance. Bien que cruciale pour des raisons de sécurité, elle est difficilement réalisable à cause de l'hostilité du milieu marin et des grandes profondeurs rendant l'intervention humaine irréaliste. Le recours à un drone sous-marin s'impose naturellement. La conception d'un tel engin repose essentiellement sur le type de mission à réaliser. Dans le cas particulier d'une inspection de pipeline, il doit être capable, en toute autonomie, de localiser puis de suivre le tracé de ce dernier sur plusieurs dizaines de kilomètres afin de contrôler son état général en focalisant l'attention principalement sur les risques de recouvrement par des sédiments et sur les zones où le pipeline ne repose plus sur les supports. Il doit également être capable de vérifier les points d'ancrage du pipeline.

I Présentation du drone

Le sous-marin autonome d'inspection, objet de cette étude, est développé par la société ECA, localisée à Toulon (Var), spécialisée dans la robotique terrestre et sous-marine pour les environnements hostiles où l'homme ne peut pas intervenir directement. Elle propose une large gamme de produits en particulier dans les domaines de la défense, du nucléaire et de l'offshore pétrolier.

L'ALISTAR 3000 (**figure 1**) est un engin sous-marin autonome qui entre dans la catégorie des « AUV » (Autonomus Underwater Vehicle) capable d'effectuer une grande variété de tâches d'inspection sur les champs pétrolifères Offshore jusqu'à une profondeur de 3 000 m. Une fois la mission d'inspection établie et programmée, il offre la possibilité de recueillir des données vidéo (caméra) et sonars (latéral et à balayage) des installations sous-marines visitées (pipeline, tête de puits, ...). Il stocke ces informations pour un dépouillement ultérieur à terre. Pour cette étude, le profil d'une mission type (**figure 2**) de ce sous-marin se décompose par l'enchainement temporel de cinq phases distinctes :



Figure 1 Le sous-marin autonome d'inspection ALISTAR

1. une phase de pesée et de préparation du sous-marin, mise à l'eau ;
2. une phase de descente afin de rejoindre le point de départ de son travail d'inspection ;
3. une phase d'inspection (contrôle de l'état général du pipeline) ;
4. une phase de remontée à la surface ;
5. une phase de récupération du sous-marin.

Dans l'ensemble du sujet, on supposera que l'AUV n'évolue que dans le plan $(O, \vec{X}_0, \vec{Z}_0)$.

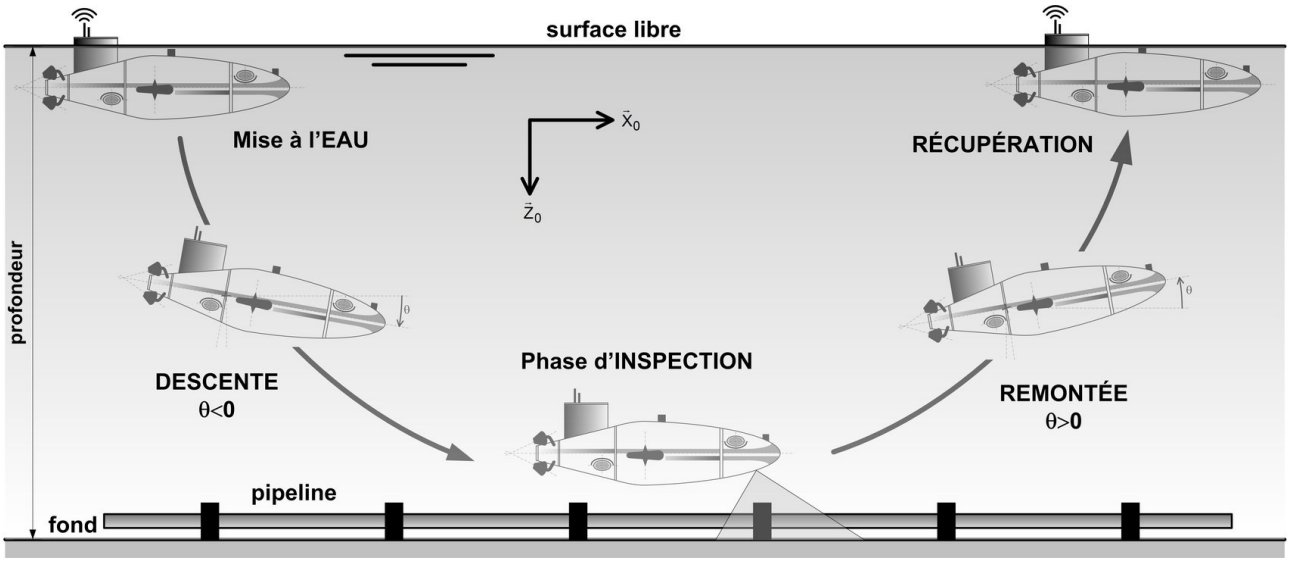


Figure 2 Profil d'une mission type de l'AUV

BY-NC-SA

II Analyse fonctionnelle externe partielle du système étudié

L'environnement de l'AUV est décrit par le diagramme des inter-acteurs proposé sous la forme partielle **figure 3**. Les énoncés des fonctions de service identifiées sont les suivantes :

FSi	Énoncé de la fonction de service
FS1	Réaliser une inspection sous-marine d'un pipeline
FS2	Permettre le transport sur un navire et sa mise à l'eau
FS3	Maitriser la compatibilité de l'AUV avec le milieu marin

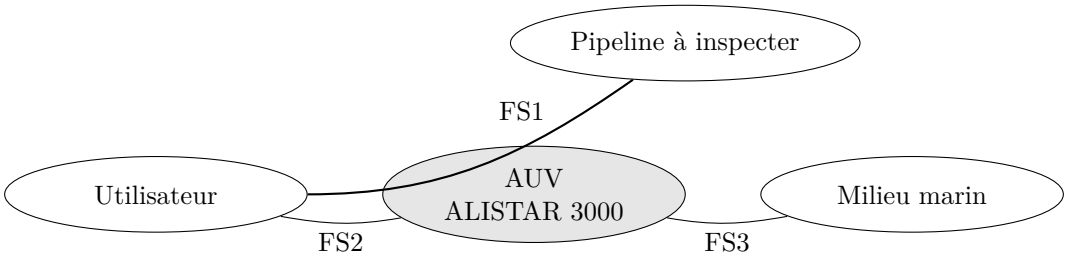


Figure 3 Diagramme partiel des inter-acteurs de l'AUV

L'AUV étant autonome, une des problématiques principales est l'utilisation optimale de l'énergie embarquée. Afin d'atteindre cet objectif, on étudie, on analyse et on valide quelques unes des performances associées aux fonctions de service FSi de l'extrait du cahier des charges ci-dessous :

FSi		Description	Critère	Niveau
FS1	**FS1.1**	Gérer le comportement lors de la mise à l'eau	flottabilité positive	10 ± 2 kg
			angle d'assiette statique	0°
	FS1.2	Maîtriser le comportement de l'AUV lors de la phase de plongée sans propulseur	profondeur	3 000 m
			temps de descente	4 h (3 000 m)
			dérive horizontale	6 000 m
			oscillations assiette (hors transitoire)	±2°
	FS1.3	Assurer un déplacement longitudinal même en environnement perturbé	vitesse maximale	4 nœuds
			accélération maximale	$0{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
	FS1.4	Gérer la répartition de poussée	poussée / propulseur	500 N
			puissance / propulseur	1,2 kW
	FS1.5	Maîtriser la vitesse de suivi du pipeline par l'AUV	erreur en régime stationnaire pour une entrée en échelon de vitesse	1 %
			rapidité	$t_{5\%} < 5$ s
			amortissement (1er dépassement de la réponse indicielle)	$D_1 = 0$
	FS1.6	Acquérir une image du pipeline	caméra faible luminosité	–
			résolution sonar	1 cm
			angle de balayage	50°
	FS1.7	Gérer la phase de remontée hors énergie	temps de remontée	4 h (3 000 m)
			dérive horizontale	6 000 m
	FS1.8	Avoir une autonomie suffisante	durée de la mission (à 2 nœuds)	24 h
			puissance embarquée	20 kWh
FS2		Permettre le transport sur un navire et sa mise à l'eau avec les moyens du bord	masse	2 tonnes
			longueur	5 m
FS3		Maitriser la compatibilité de l'AUV avec le milieu marin	étanchéité à 3 000 m	
			résistance à l'écrasement à 3 000 m	
			résistance à la corrosion	

III Architecture générale de l'AUV

Pour se déplacer, l'ALISTAR est pourvu de 8 propulseurs : 4 propulseurs principaux arrière, 2 propulseurs latéraux et 2 propulseurs verticaux (architecture et localisation **figure 4**). Cette structure assure une excellente

BY-NC-SA

manœuvrabilité dans l'espace sans avoir recours à des gouvernes orientables, consommatrices d'énergie et peu efficaces lors de certaines manœuvres ou pour contrecarrer les effets des courants marins.

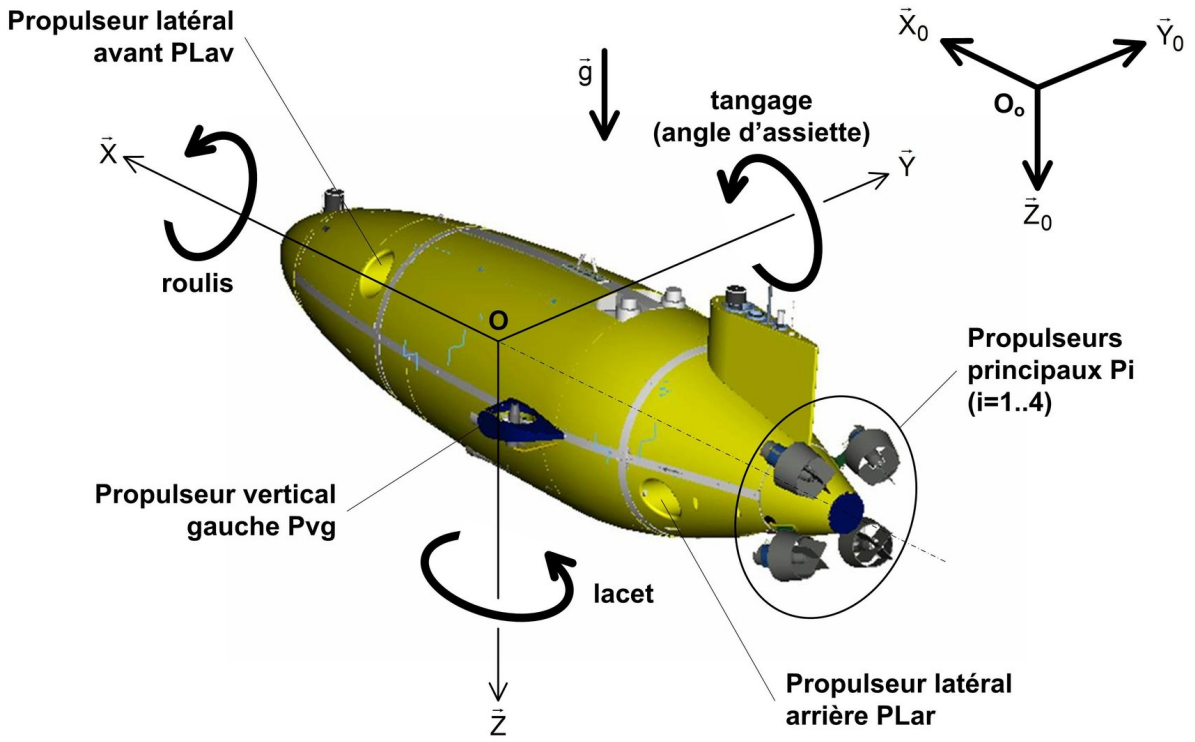


Figure 4 Positionnement des propulseurs et paramétrage angulaire de l'AUV

Comme le montre la **figure 5**, la fonction FS1.4 « Gérer la répartition de poussée » de l'AUV peut être commandée soit par un agent de type guidage (pilotage automatique dans le cas général) ou bien encore, si cela est possible, par une commande de type manuel (joystick). Dans le cas autonome, des consignes de pilotage préalablement définies sont fournies au système de commande ainsi que des informations de retour provenant des différents capteurs présents sur l'AUV (**figure 5**). Les traitements de ces données vont générer des sorties de type consignes de poussée permettant d'obtenir les 6 degrés de liberté du véhicule nécessaires à son évolution en trois dimensions. Le système de commande active, en fonction des consignes de pilotage qu'il reçoit, les algorithmes d'asservissement adaptés au besoin et assurant le respect des contraintes imposées par le cahier des charges. Les consignes de poussée sont prises en compte par le répartiteur de poussée afin de définir la commande unitaire associée à chaque propulseur.

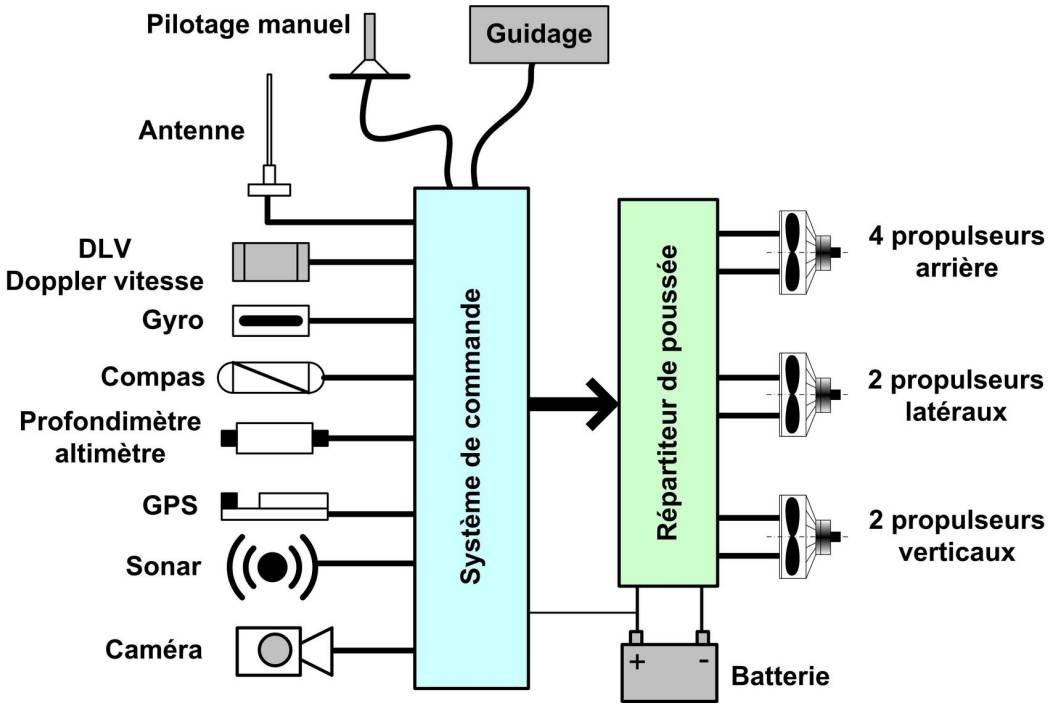


Figure 5 Architecture générale de la commande de l'AUV

BY-NC-SA

IV Étude de la fonction FS1.1 « Gérer la mise à l'eau » »

Objectif

Déterminer, en fonction des conditions de plongée, la valeur du lest à ajouter au sous-marin afin d'obtenir une flottabilité nulle à 3 000 m.

Afin de maîtriser le comportement d'un véhicule sous-marin en phase de plongée, on doit être capable de faire varier sa flottabilité. La flottabilité d'un corps en immersion représente la différence entre la poussée d'Archimède et l'action de pesanteur. La flottabilité (notée Φ) dépend donc de la masse du corps (notée m), de son volume (noté V) et de la masse volumique de l'eau (notée ρ). On définit donc : $\Phi = \rho V - m$.

On rappelle que lors de la phase de pesée et de mise à l'eau, on doit avoir :

- une flottabilité nulle à 3 000 m de profondeur ;
- une flottabilité de 10 kg en surface de manière à ce que les antennes et le système de communication demeurent émergés.

L'ALISTAR a été conçu afin de posséder une flottabilité nulle en surface en eau douce. Ses caractéristiques sont donc (dans l'air) : un volume $V = 1{,}9772$ m^3 et une masse $m = 1977{,}2$ kg. Lors d'une plongé à 3 000 m, sous l'effet de la pression, la masse volumique de l'eau de mer varie comme le montre la **figure 6** (courbe de gauche). On remarque que la graduation de l'axe « profondeur » est croissante vers le bas. Dans les mêmes conditions, sous l'effet de la pression de l'eau, le volume de l'AUV se modifie également comme le montre la **figure 6** (courbe de droite) ; en effet, le sous-marin est constitué de deux parties : un squelette tubulaire supposé indéformable (cf. **figure 7**) dont la fonction est de supporter les différents éléments et sous-ensembles constituants l'AUV et une carène compressible formée en mousse haute densité qui sert à compléter le volume et à donner au sous-marin un profil hydrodynamique.

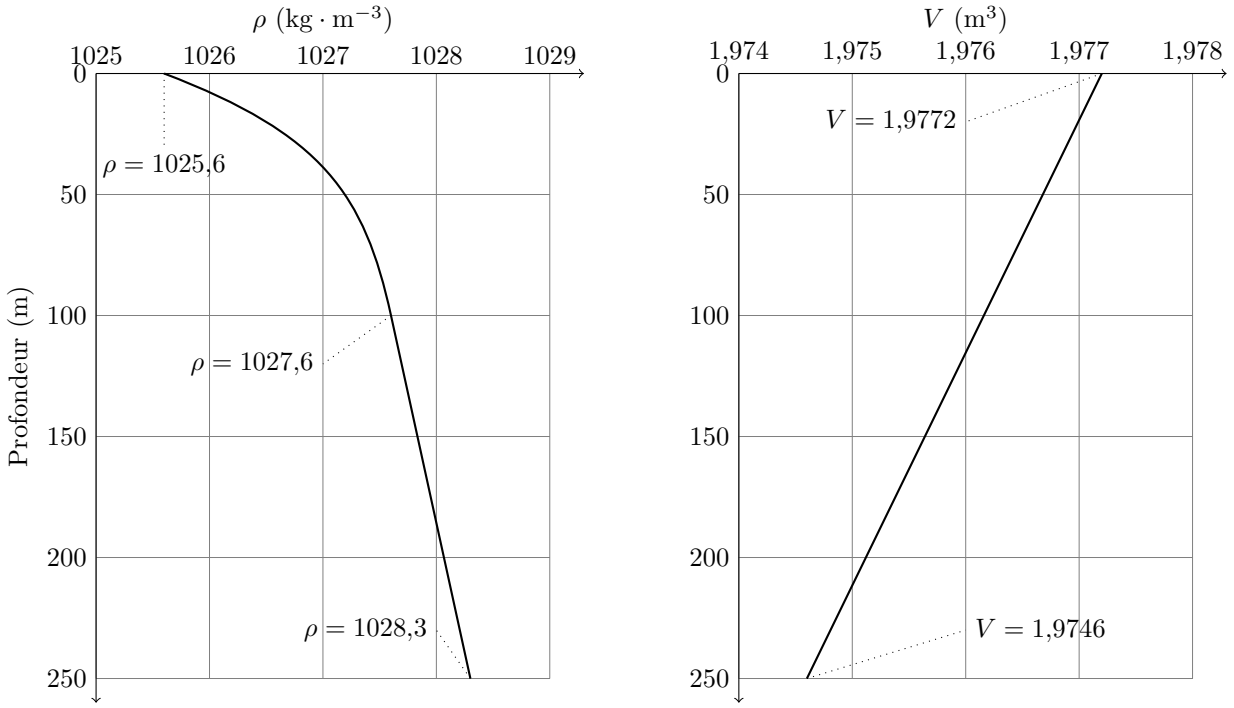


Figure 6 Évolution de la masse volumique de l'eau de mer ρ et du volume V de l'AUV en fonction de la profondeur de plongée

Q 1. Déterminer la réduction de volume (ΔV en dm^3) de l'AUV à 3 000 m de profondeur. Préciser les hypothèses.

Q 2. Déterminer la masse du lest (en kg) à rajouter au sous-marin afin d'obtenir une flottabilité nulle à 3 000 m. Préciser les hypothèses.

Q 3. En utilisant la valeur du lest déterminée précédemment, estimer la flottabilité en surface. Le niveau du critère de la fonction FS1.1 est il vérifié ? Sachant que, lors de la mission, l'AUV ne prend ou ne rejette rien, sur quel paramètre structurel de l'AUV peut-on agir afin d'obtenir la flottabilité désirée ?

V Étude de la fonction FS1.2 « Maîtriser le comportement »

Objectif

Déterminer et valider les niveaux des critères du cahier des charges associées à la fonction FS1.2, en particulier le temps de descente de l'AUV sans utilisation du système de propulsion.

BY-NC-SA

Les phases de descente et de remontée ne sont pas des phases « utiles » ; elles sont transitoires. Le sous-marin doit donc les effectuer le plus rapidement possible en consommant le minimum d'énergie afin de conserver une autonomie suffisante pour la phase d'inspection. Le développement d'un Système Actif de Réglage de la Flottabilité et de l'Assiette (SARFA) entre dans cette perspective. Son objectif est de réduire (voire idéalement de supprimer) l'utilisation des différents propulseurs lors de ces phases transitoires.

V.A – Description du SARFA

Ce système se compose d'un groupe hydraulique (moteur électrique entraînant une pompe hydraulique assurant la circulation en circuit fermé et sous pression d'un fluide incompressible), de deux réservoirs rigides placés dans le plan médian (un vers l'avant et un vers l'arrière de l'AUV) remplis d'un gaz et dans lesquels on place une vessie de volume variable et enfin d'une vessie externe à l'AUV. Comme le montre la **figure 7**, le fluide sous pression peut circuler dans les 3 vessies via un module de distribution (non représenté). Ainsi conçu, ce système permet de réaliser les deux fonctions du SARFA :

- le réglage de la flottabilité ; ce réglage s'effectue grâce à la variation du volume global du sous-marin. Le transfert du fluide hydraulique sous pression vers la vessie externe permet de gonfler cette dernière, affectant le volume de l'AUV et entraînant par voie de conséquence une modification de la poussée d'Archimède appliquée à l'engin ;
- le réglage de l'angle d'assiette $\theta(t)$ (encore nommé angle de tangage) ; ce réglage s'effectue en déséquilibrant les masses de fluide hydraulique placé à l'intérieur des deux vessies avant et arrière. En transférant le fluide d'une vessie vers l'autre, il devient possible de modifier l'angle d'assiette indépendamment du réglage de la flottabilité. Schématiquement, par cette opération, on déplace le centre de gravité G de l'engin.

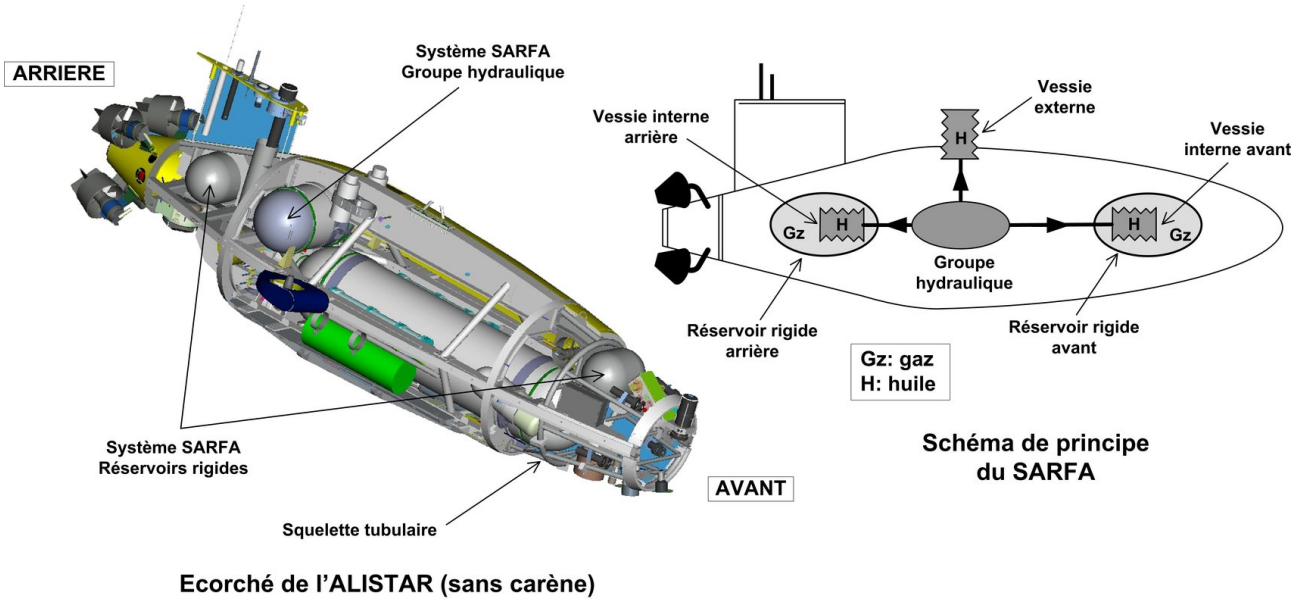


Figure 7

Q 4. On suppose que le critère de flottabilité de la fonction FS1.1 est vérifié. Expliquer le fonctionnement du SARFA pour permettre une plongée sans utiliser les propulseurs.

Le paramétrage de l'AUV est défini sur la **figure 8** :

- $R_0(O_0, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$: repère lié à la terre et supposé galiléen ;
- $R_1(O, \vec{X}_1, \vec{Y}_0, \vec{Z}_1)$: repère lié à l'AUV et centré en O, foyer hydrodynamique. On note $\theta(t) = (\vec{X}_0, \vec{X}_1)$, l'angle de tangage (ou d'assiette).

On précise ici les caractéristiques principales et utiles de l'AUV :

- masse notée m, volume noté V ;
- centre de gravité G : $\overrightarrow{OG} = X_G\vec{X}_1 + Z_G\vec{Z}_1$; on suppose que les variations temporelles de X_G et Z_G sont suffisamment faibles pour être négligées car le SARFA fonctionne lentement ;
- centre de poussée d'Archimède : $\overrightarrow{OC} = X_C\vec{X}_1 + Z_C\vec{Z}_1$;
- plan de symétrie de l'AUV : $(O, \vec{X}_0, \vec{Z}_0)$;
- moment d'inertie en G suivant l'axe $(G, \vec{Y}_0)$: B.

V.B – Comportement statique à la mise à l'eau

À la mise à l'eau, on suppose que l'AUV n'est soumis qu'aux actions de gravité et de poussée d'Archimède. L'action correctrice du SARFA ne doit en aucun cas provoquer le retournement de l'AUV.

Q 5. Déterminer l'expression de l'angle d'assiette statique θ_0 en fonction de X_G, Z_G, X_C et Z_C. Comment doit-on régler le SARFA pour vérifier la fonction FS1.1 et être en équilibre stable ?

BY-NC-SA

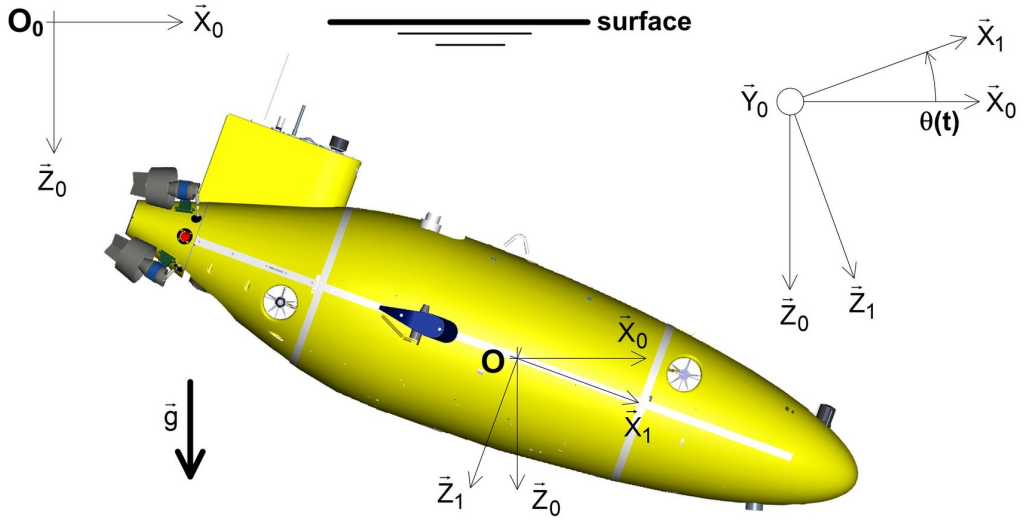


Figure 8 Paramétrage plan de l'AUV (en inclinaison pour la phase de plongée)

Afin de respecter au mieux le critère d'autonomie de la fonction FS1.8, on cherche à maîtriser la phase de descente sans recours aux propulseurs uniquement grâce au système SARFA. Comme le précise les critères de la fonction FS1.2, durant cette phase, le sous-marin doit conserver une assiette stable tout en limitant sa fréquence de tangage, ceci afin d'éviter un effet de trajectoire dite en « feuille morte » source d'instabilité et de dérive. Le comportement recherché s'apparente en tout point à celui d'un planeur maitrisé.

V.C – Comportement dynamique en phase de plongée

Objectif

Construire un modèle représentatif du comportement dynamique de l'AUV qui, après simulation numérique, permettra de valider l'apport du SARFA en phase de plongée et d'affiner les valeurs de réglage.

On rappelle que le sous-marin est censé évoluer dans le plan $(O, \vec{X}_0, \vec{Z}_0)$. Dans ces conditions, le torseur cinématique de l'AUV par rapport à (R_0) s'exprime sous la forme simplifiée (cf. **figure 8**) :

$$\{V_{1/0}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}_{1/0} = \dot{\theta}(t)\vec{Y}_0 \\ \vec{V}(O,1/0) = u(t)\vec{X}_1 + w(t)\vec{Z}_1 \end{array} \right\}_O$$

Les éléments de réduction en O du torseur des actions mécaniques hydrodynamiques s'exerçant sur l'AUV prennent la forme :

$$\{T_{\text{hydro}\to\text{AUV}}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_h = Rx_h\vec{X}_1 + Rz_h\vec{Z}_1 \\ \vec{M}_O(h \to \text{AUV}) = M_h\vec{Y}_0 \end{array} \right\}_O$$

De la même manière, les éléments de réduction en O du torseur de propulsion sont de la forme :

$$\{T_{P\to\text{AUV}}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_P = Rx_P\vec{X}_1 + Rz_P\vec{Z}_1 \\ \vec{M}_O(P \to \text{AUV}) = M_P\vec{Y}_0 \end{array} \right\}_O$$

Enfin le torseur des actions de gravité et de poussée d'Archimède prend la forme :

$$\{T_{ga\to\text{AUV}}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{ga} = Rx_{ga}\vec{X}_1 + Rz_{ga}\vec{Z}_1 \\ \vec{M}_O(ga \to \text{AUV}) = M_{ga}\vec{Y}_0 \end{array} \right\}_O$$

Q 6. Déterminer l'expression de la résultante dynamique de l'AUV par rapport à (R_0) notée $\vec{R}_d(\text{AUV}/0)$. Le résultat sera mis sous la forme $\vec{R}_d(\text{AUV}/0) = A_1\vec{X}_1 + A_2\vec{Y}_0 + A_3\vec{Z}_1$ où les termes A_i seront exprimés en fonction notamment de $u(t)$, $w(t)$, $\theta(t)$ et/ou de leurs dérivées.

Q 7. Déterminer l'expression en O de la projection suivant $\vec{Y}_0$ du moment dynamique de l'AUV par rapport à (R_0) noté $\vec{\delta}_O(\text{AUV}/0)\cdot\vec{Y}_0$. Le résultat sera mis sous la forme $\vec{\delta}_O(\text{AUV}/0)\cdot\vec{Y}_0 = \delta_1\ddot{\theta} + \delta_2\dot{\theta} + \delta_3\dot{u} + \delta_4\dot{w}$ où les termes δ_i seront exprimés en fonction de B, m, u, w, X_G et Z_G.

L'application du théorème de la résultante dynamique à l'AUV isolé en projection suivant $\vec{X}_1$, permet d'établir la première relation scalaire suivante :

$$m\left(\dot{u}(t) + w(t)\dot{\theta}(t) - X_G\dot{\theta}^2(t) + Z_G\ddot{\theta}(t)\right) = Rx_{ga} + Rx_P + Rx_h$$

BY-NC-SA

Q 8. En procédant d'une manière analogue et en reprenant une présentation similaire, établir les deux autres relations scalaires définissant complètement le comportement dynamique de l'AUV.

Le système proposé est « ouvert » : c'est-à-dire que l'on retrouve plus d'inconnues que d'équations. Pour le « fermer », on adopte donc les modèles suivants en particulier pour les actions hydrodynamiques en fonction des inconnues principales du problème :

$$Rx_h = -\rho a_{11}\dot{u}(t) - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_x$$

$$Rz_h = -\rho a_{33}\dot{w}(t) - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_z$$

$$M_h = -\rho a_{55}\ddot{\theta}(t) - \frac{1}{2}\rho S V^2 C_M$$

avec $V = \sqrt{(u(t) - U_{ct})^2 + (w(t) - W_{ct})^2}$ et S : surface (en m^2). La vitesse du courant (dans le plan de l'étude) s'exprime $\vec{V}_{ct/0} = U_{ct}\vec{X}_0 + W_{ct}\vec{Z}_0$. Les valeurs des coefficients a_{11}, a_{33}, a_{55}, C_x, C_z et C_M sont issues de campagnes de mesures en bassin. Elles ont été optimisées et ajustées par simulation numérique de l'écoulement autour de la carène.

Le système d'équations ainsi formé est fortement couplé et non-linéaire. Après sa discrétisation, une simulation numérique temporelle a permis d'obtenir les courbes caractéristiques de la **figure 9** que l'on présente lors d'une phase contraignante de plongée pour laquelle les propulseurs ne sont pas utilisés et le SARFA réglé en conséquence. On prendra garde à l'orientation de l'ordonnée des courbes $Z(X)$ et $w(t)$ en accord avec le paramétrage donné sur la **figure 8** et la phase de descente étudiée.

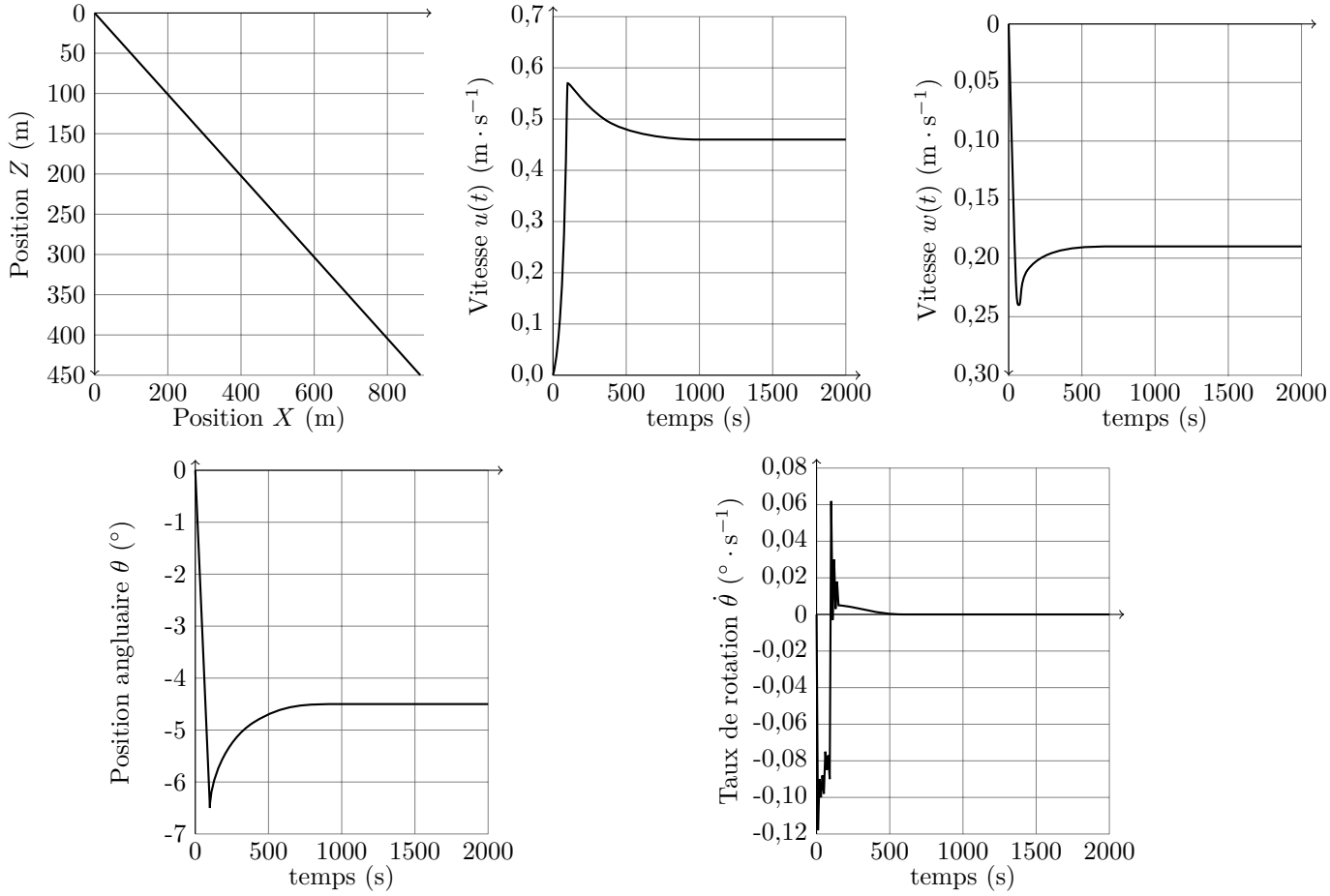


Figure 9 Résultats de la simulation numérique du comportement dynamique de l'AUV

Q 9. Lors de cette phase de plongée simulée sans propulseur et maîtrisée grâce au SARFA, le comportement global de l'AUV est-il conforme aux niveaux des critères de la fonction FS1.2 ? Argumenter clairement et avec rigueur les différents points de votre réponse.

BY-NC-SA

VI Étude de la fonction FS1.5 « Maîtriser le mouvement de suivi »

Objectif

Établir le modèle global de la commande asservie en vitesse lors de la phase d'inspection et valider les niveaux des critères du cahier des charges associées à la fonction FS1.5.

Faisant suite à la phase de descente sur zone d'inspection à la profondeur souhaitée, le système SARFA règle une flottabilité nulle de l'AUV ainsi qu'une assiette statique nulle. L'AUV étant supposé initialement immobile, la phase d'inspection proprement dite peut débuter. Pour cela, l'AUV doit évoluer parallèlement au pipeline à inspecter que l'on suppose, dans un souci de simplification, rectiligne et posé horizontalement au fond de la mer. On rappelle qu'afin d'acquérir correctement une image du pipeline, le déplacement de l'AUV doit s'effectuer à une vitesse constante et demeurer à une distance maitrisée de ce dernier. Il est donc nécessaire de posséder une modélisation performante du comportement global de l'engin durant toute la phase d'inspection, condition indispensable à son contrôle.

Q 10. À partir des relations précédemment établies, donner l'équation modélisant le comportement dynamique de l'AUV lors de cette phase de déplacement horizontal si W_{ct} est nul.

Q 11. Compléter alors le cadre A du schéma-bloc du document réponse.

Q 12. Justifier du caractère non linéaire de ce modèle dynamique.

VI.A – Contrôler la trajectoire de l'AUV grâce aux propulseurs

Objectif

Déterminer la fonction de répartition de la poussée exercée par la propulsion sur l'AUV, connaissant les éléments de réduction du torseur global.

En l'absence de gouverne orientable, la maîtrise de la trajectoire de l'AUV repose uniquement sur les poussées délivrées par les huit propulseurs. C'est la fonction du répartiteur de poussée (cf. **figure 5**). Le modèle géométrique inverse que l'on cherche à établir représente le système d'équations reliant les poussées par propulseur avec les éléments du torseur global des actions mécaniques de propulsion sur l'AUV noté $\{T_{P\to \text{AUV}}\}$.

La **figure 10** présente le paramétrage géométrique des propulseurs latéraux et verticaux. La **figure 11** présente uniquement le paramétrage géométrique des 4 propulseurs arrière. Pour plus de clarté, le **tableau 1** regroupe les différents torseurs de propulsion ainsi que la localisation des différents points de réduction.

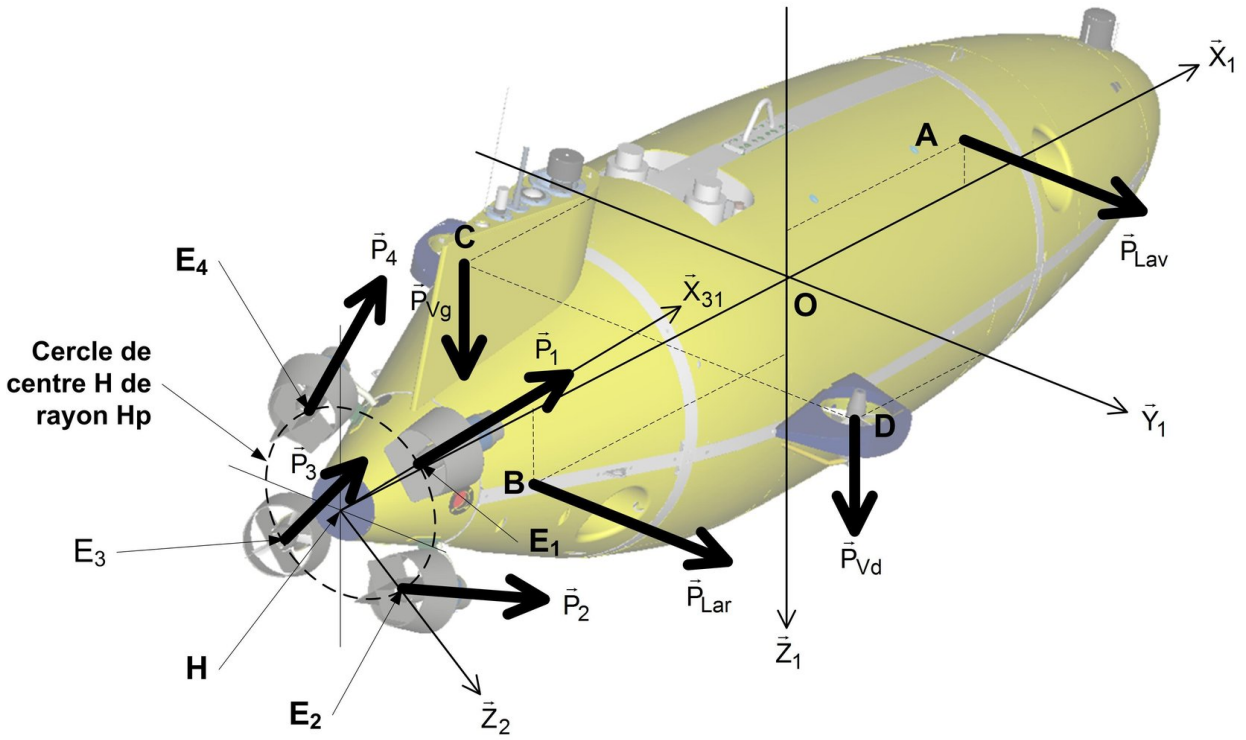


Figure 10 Paramétrage géométrique des propulseurs latéraux et verticaux

BY-NC-SA

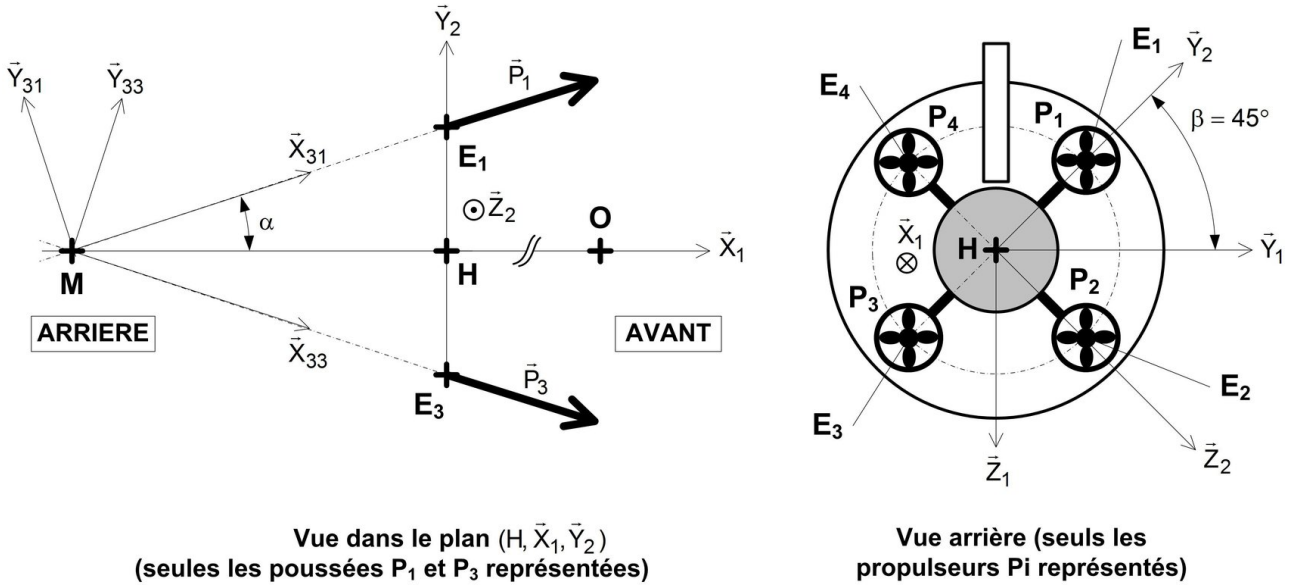


Figure 11 Paramétrage géométrique spécifique des quatre propulseurs arrière

Type de propulseur	Torseur de propulsion associé	Coordonnées du point de réduction
Un propulseur latéral avant repéré $\mathbf{P}_{\text{Lav}}$	$\{T_{\text{PLav}}\} = \left\{ \begin{matrix} P_{\text{Lav}}\vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_A$	$\overrightarrow{OA} = X_{\text{Lav}}\vec{X}_1 - Z_{\text{Lav}}\vec{Z}_1$
Un propulseur latéral arrière repéré $\mathbf{P}_{\text{Lar}}$	$\{T_{\text{PLar}}\} = \left\{ \begin{matrix} P_{\text{Lar}}\vec{Y}_1 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_B$	$\overrightarrow{OB} = -X_{\text{Lar}}\vec{X}_1 + Z_{\text{Lar}}\vec{Z}_1$
Un propulseur vertical gauche repéré $\mathbf{P}_{\text{Vg}}$	$\{T_{\text{PVg}}\} = \left\{ \begin{matrix} P_{\text{Vg}}\vec{Z}_1 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_C$	$\overrightarrow{OC} = -X_{\text{V}}\vec{X}_1 - Y_{\text{V}}\vec{Y}_1$
Un propulseur vertical droit repéré $\mathbf{P}_{\text{Vd}}$	$\{T_{\text{PVd}}\} = \left\{ \begin{matrix} P_{\text{Vd}}\vec{Z}_1 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_D$	$\overrightarrow{OD} = -X_{\text{V}}\vec{X}_1 + Y_{\text{V}}\vec{Y}_1$
Quatre propulseurs arrière repérés $\mathbf{P}_i$ $(i = 1 \dots 4)$	$\{T_{\text{P}i}\} = \left\{ \begin{matrix} P_i\vec{X}_{3i} \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_{E_i}$	$\overrightarrow{OE_1} = -X_P\vec{X}_1 + H_P\vec{Y}_2$ $\overrightarrow{OE_2} = -X_P\vec{X}_1 + H_P\vec{Z}_2$ $\overrightarrow{OE_3} = -X_P\vec{X}_1 - H_P\vec{Y}_2$ $\overrightarrow{OE_4} = -X_P\vec{X}_1 - H_P\vec{Z}_2$ $\overrightarrow{OM} = -X_M\vec{X}_1$

Tableau 1 Synthèse du paramétrage général des différents propulseurs

Q 13. Exprimer, dans la base liée au repère (R_1), les éléments de réduction en M du torseur de poussée du seul propulseur arrière $\mathbf{P}_1$ en fonction de P_1 et α.

Afin d'assurer la manœuvrabilité en plongée et en suivi de pipeline de l'AUV malgré l'absence totale d'ailerons orientables, on utilise une répartition différentielle de poussée des propulseurs arrière. Pour simplifier et diriger l'engin dans le plan de la mission, les propulseurs $\mathbf{P}_1$ et $\mathbf{P}_4$ sont couplés de même que les propulseurs $\mathbf{P}_2$ et $\mathbf{P}_3$. Dans ces conditions, et afin de garantir une poussée P, on pose : $P_1 = P_4 = P + dP$ et $P_2 = P_3 = P - dP$ avec P : poussée (en N) et dP : différentiel de poussée (en N).

Q 14. Dans ces conditions, déterminer, dans la base liée à (R_1), les éléments de réduction en O du torseur de poussée résultant des quatre propulseurs arrière noté $\{T_{\text{Par}\to\text{AUV}}\}$.

On donne, dans la base liée au repère (R_1), les éléments de réduction en O du torseur de poussée résultant des 2 propulseurs verticaux et latéraux :

$$\{T_{\text{PL}\to\text{AUV}}\} = \left\{ \begin{matrix} (P_{\text{Lav}} + P_{\text{Lar}})\vec{Y}_1 \\ (Z_{\text{Lar}}P_{\text{Lar}} - Z_{\text{Lav}}P_{\text{Lav}})\vec{X}_1 + (X_{\text{Lav}}P_{\text{Lav}} - X_{\text{Lar}}P_{\text{Lar}})\vec{Z}_1 \end{matrix} \right\}_O$$

$$\{T_{\text{PV}\to\text{AUV}}\} = \left\{ \begin{matrix} (P_{\text{Vd}} + P_{\text{Vg}})\vec{Z}_1 \\ Y_{\text{V}}(P_{\text{Vd}} - P_{\text{Vg}})\vec{X}_1 + X_{\text{V}}(P_{\text{Vd}} + P_{\text{Vg}})\vec{Y}_1 \end{matrix} \right\}_O$$

BY-NC-SA

On suppose que la forme générale du torseur résultant des actions de poussée des 8 propulseurs s'exprime en O comme :

$$\{T_{P\to \text{AUV}}\} = \left\{ \begin{array}{l} Rx_P\vec{X}_1 + Ry_P\vec{Y}_1 + Rz_P\vec{Z}_1 \\ L_P\vec{X}_1 + M_P\vec{Y}_1 + N_P\vec{Z}_1 \end{array} \right\}_O$$

On établit alors l'expression de la matrice de transformation (6×6) notée T définie par :

$$\begin{pmatrix} Rx_P \\ Ry_P \\ Rz_P \\ L_P \\ M_P \\ N_P \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} P \\ dP \\ P_{\text{Vg}} \\ P_{\text{Vd}} \\ P_{\text{Lav}} \\ P_{\text{Lar}} \end{pmatrix}$$

Afin d'établir le modèle du répartiteur de poussée (cf. **figure 5**), il est nécessaire d'inverser la matrice géométrique T. Cette opération est effectuée grâce à un logiciel de calcul et on donne le résultat sous la forme numérique suivante :

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} 0{,}2628 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}1326 & 0 & -0{,}4081 & 0 \\ 0 & -0{,}0165 & 0{,}5579 & -0{,}6944 & -0{,}1783 & -0{,}1204 \\ 0 & 0{,}0165 & 0{,}5579 & 0{,}6944 & -0{,}1783 & 0{,}1204 \\ 0 & 0{,}4737 & 0 & 0 & 0 & 0{,}4032 \\ 0 & 0{,}5262 & 0 & 0 & 0 & -0{,}4032 \end{pmatrix}$$

Q 15. Déterminer le gain K du répartiteur de poussée (cf. schéma-bloc du document réponse) à partir de la matrice T^{-1} du modèle inverse.

Poursuivant toujours l'objectif de commander judicieusement et avec parcimonie les différents propulseurs, on cherche à identifier ceux dont l'activation permet d'obtenir les actions de poussées souhaitées. Le tableau du document réponse synthétise cette activité. Un exemple est donné : pour obtenir la composante de poussée axiale Rx_P, on commande les 4 propulseurs arrière $\mathbf{P}_i$.

Q 16. À partir de la matrice T^{-1}, compléter le tableau du document réponse.

Q 17. En vous aidant du tableau que vous venez de compléter, discuter de la possibilité de plonger verticalement en utilisant les propulseurs. La manœuvrabilité vous semble-t-elle optimale ?

VI.B – Contrôler la vitesse de l'AUV

Objectif

Valider les performances du système de commande en vitesse de l'AUV assurant une qualité satisfaisante de l'image du pipeline en mode d'inspection.

On se place toujours durant la phase d'inspection d'un pipeline rectiligne et horizontal. Au cours de son évolution, l'AUV enregistre une image de la structure externe du pipeline et effectue un balayage sonar. Ces données seront transférées, dépouillées puis analysées dès la phase de récupération en mer effectuée. La qualité de ces enregistrements dépend fortement de la qualité du contrôle du déplacement de l'AUV que ce soit en vitesse de déplacement ou en régulant la distance qui le sépare du pipeline. En ce qui concerne spécifiquement la vitesse de suivi, le schéma-bloc modélisant la commande asservie du sous-marin peut se mettre sous la forme suivante (**figure 12**).

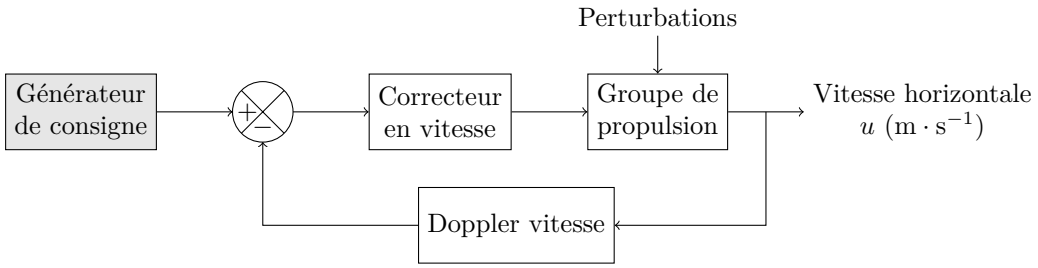


Figure 12 Modèle de commande asservie en vitesse

Lors de la phase d'inspection horizontale, seuls les propulseurs arrière $\mathbf{P}_i$ sont actifs et le répartiteur impose une poussée P identique sur les quatre. Ces entités de propulseurs sont constituées d'un moteur à courant continu piloté en tension par modulation de largeur d'impulsion MLI et accouplé à une hélice. La variation de la tension de commande du moteur entraîne une variation de la fréquence de rotation de l'hélice modulant alors la poussée. Afin de tenir compte des effets hydrodynamiques s'appliquant sur les pales de l'hélice, une

BY-NC-SA

série d'essais a permis de proposer et de caler un modèle de poussée par propulseur arrière en fonction de la fréquence de rotation de l'hélice et de la vitesse relative de déplacement de l'AUV dans l'eau, soit la relation :

$$P(t) = \rho\,(n(t))^2\,D^4\left(\delta_1 - \delta_2\frac{u(t) - U_{ct}(t)}{n(t)D}\right)$$

où P : poussée (en N) ; D : diamètre de l'hélice (en m) ; n : fréquence de rotation de l'hélice (en $\mathrm{tr}\cdot\mathrm{s}^{-1}$) ; u : vitesse de déplacement horizontal (en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$) ; U_{ct} : vitesse du courant horizontal (en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$) ; δ_1 et δ_2 : constantes de calage du modèle de l'hélice.

La **figure 13** présente l'évolution de la poussée P en fonction de la fréquence de rotation de l'hélice n pour différentes vitesses relatives $u - U_{ct}$ de déplacement de l'AUV comprise entre 0 et 2,5 $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (soit entre 0 et 5 nœuds).

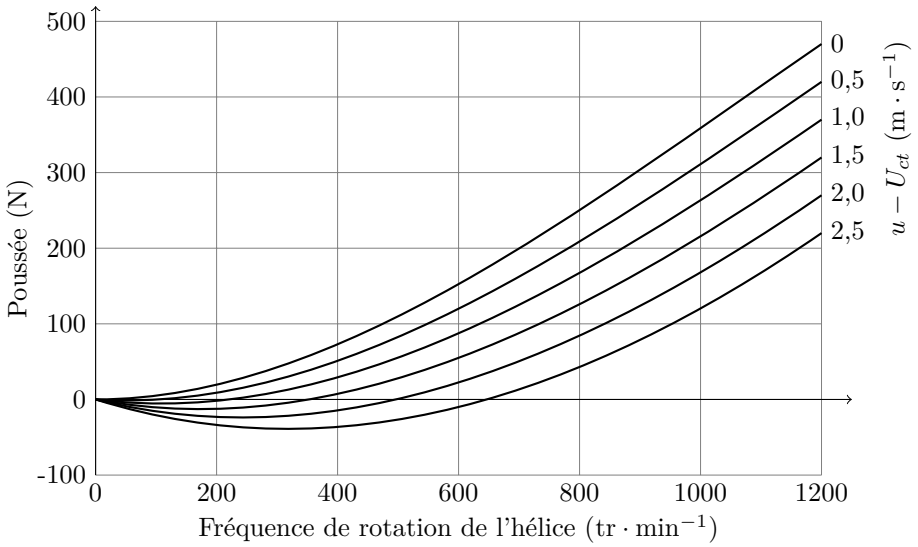


Figure 13 Courbes caractéristiques de l'hélice

Q 18. À partir du modèle de l'hélice proposé précédemment, compléter le schéma-bloc du modèle de la commande en poussée fourni dans le document réponse.

Le système obtenu est non linéaire. Un travail de linéarisation et d'identification numérique (non demandé dans le sujet) sur le modèle dynamique de l'AUV obtenu précédemment permet de proposer un modèle de commande asservie réaliste pour une vitesse de fonctionnement fixée. Compte-tenu des contraintes imposées notamment par les différents capteurs d'inspection, la vitesse nominale d'avancée est fixée à 2 nœuds (soit 1,028 $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$).

Concernant les opérations de linéarisation, on rappelle que, pour toute grandeur $x(t)$, on note généralement $\bar{x}$ sa valeur prise au point de fonctionnement et $\tilde{x}(t)$ sa variation (d'ordre 1) autour de ce point de fonctionnement conduisant à l'écriture suivante : $x(t) \approx \bar{x} + \tilde{x}(t)$. Ainsi, si le schéma-bloc de la **figure 14** modélise la commande en vitesse de l'AUV, en accord avec les remarques précédentes sur l'action de linéarisation, tous les signaux figurant dans ce schéma-bloc font référence à des variations autour du point de fonctionnement défini.

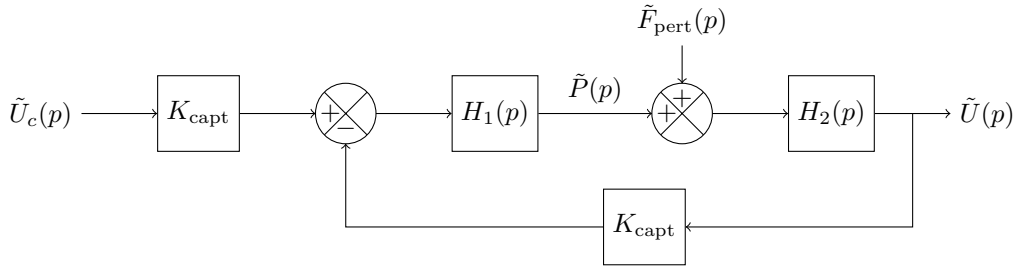


Figure 14 Modèle linéarisé de commande asservie en vitesse

$\tilde{u}_c(t)$ représente la consigne en vitesse (en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$), $\tilde{u}(t)$ la vitesse de déplacement de l'AUV (en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$), $\tilde{p}(t)$ la poussée totale (en N) et $\tilde{f}_{\mathrm{pert}}(t)$ l'effort de perturbation (en N) lié aux conditions changeantes de fonctionnement. On note p la variable de Laplace et $\tilde{U}_c(p)$, $\tilde{U}(p)$, $\tilde{P}(p)$ et $\tilde{F}_{\mathrm{pert}}(p)$ les transformées de Laplace des variables précédentes.

Pour la suite, on prendra $H_2(p) = \dfrac{5\times10^{-3}}{1+11p}$ et on impose que $H_1(p) = G\,C(p)$ avec $G = 94\ \mathrm{N}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ et $C(p)$ représentant la fonction de transfert du correcteur. Par souci de simplification, on impose $K_{\mathrm{capt}} = 1\ \mathrm{V}\cdot\mathrm{m}^{-1}$.

BY-NC-SA

Q 19. Montrer que, non corrigée et non perturbée, cette commande ne permet pas de satisfaire le niveau d'exigence du critère de précision de la fonction FS1.5. On définit l'erreur en régime stationnaire pour une entrée en échelon de vitesse par : $\lim_{t\to\infty} \dfrac{\tilde{u}_c - \tilde{u}}{\tilde{u}_c} \times 100$.

Dans un premier temps, on cherche à régler un correcteur proportionnel afin de satisfaire les niveaux de critère de la fonction FS1.5. On pose ainsi $C(p) = K_{\text{cor}}$, $K_{\text{cor}} \in \mathbb{R}$.

Q 20. Déterminer numériquement la valeur de K_{cor} permettant de satisfaire l'ensemble des niveaux de critère de la fonction FS1.5 toujours dans le cas d'un système non perturbé.

On fait l'hypothèse, forcément réductrice, que la perturbation est du type $\tilde{F}_{\text{pert}}(p) = F_0/p$.

Q 21. D'une manière générale, quelle devrait être l'action correctrice permettant d'annuler l'impact de la perturbation sur la vitesse de déplacement de l'AUV ?

On corrige à présent cette boucle d'asservissement grâce à l'emploi d'un correcteur de fonction de transfert $C(p) = K_{\text{cor}}\left(1 + \dfrac{1}{T_i\, p}\right)$, avec $(K_{\text{cor}}, T_i) \in \mathbb{R}^2$.

Q 22. Déterminer la valeur de T_i permettant de compenser le pôle de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée. Déterminer alors la valeur de K_{cor} permettant de satisfaire l'ensemble des niveaux de critère de la fonction FS1.5.

VII « Réussir la mission d'inspection en autonomie »

Objectif

Valider les critères de performance associés à la fonction FS1.8 « avoir une autonomie suffisante ».

Nous avons montré que le sous-marin était capable de plonger sans utiliser ses propulseurs tout en maîtrisant sa trajectoire à la manière d'un planeur grâce au SARFA. Le temps de descente à 1 800 m est estimé à 2 h. Le temps de remontée à la surface est de l'ordre de 1 h 30. La puissance nécessaire aux différents systèmes d'acquisition de données (vidéo, sonar et scanner) est de l'ordre de 150 W. Ces systèmes fonctionnent naturellement pendant toute la phase d'inspection qui s'effectue majoritairement à vitesse constante.

La gestion de la batterie est la suivante :
- 10% de la puissance est réservée pour la communication avec la surface et de secours en cas d'avarie ;
- 10% de la puissance est réservée pour le système SARFA (actif durant toute la mission) ;
- le reste de la puissance alimente les propulseurs et les systèmes d'acquisition de données.

VII.A – Estimation la puissance consommée par les propulseurs arrière

On se place en phase d'inspection où l'AUV évolue parallèlement à un pipeline rectiligne et posé horizontalement au fond à 1 800 m de profondeur. On néglige la vitesse du courant, soit $U_{ct} = 0$. Le torseur cinématique AUV en phase inspection est donc de la forme :

$$\{V_{\text{AUV}/0}\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ u\vec{X}_0 \end{array} \right\}_{\forall M}$$

Le modèle de la traînée hydrodynamique s'exprime par $Rx_h\vec{X}_0 = -\frac{1}{2}\rho S_{\text{ref}} u^2 C_x - \rho a_{11}\dot{u}$ avec $C_x = 0{,}32$, $S_{\text{ref}} = 1{,}114$ m^2, $\rho = 1036$ kg $\cdot$ m^{-3} (à 1 800 m), $a_{11} = 0{,}155$ m^3, $m = (1977 + 40)$ kg (masse AUV avec lest).

Pour la certification et le respect du niveau du critère de la fonction FS1.3, il est indispensable que l'AUV puisse atteindre la vitesse maximale de 4 nœuds grâce à l'action de poussée des quatre propulseurs arrière. En conséquence, on suppose que le profil de vitesse est celui de la **figure 15**.

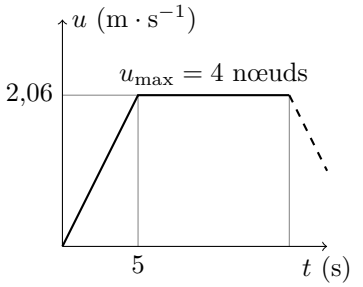


Figure 15 Profil de vitesse maximale

Q 23. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'AUV, déterminer la puissance nécessaire à fournir par les 4 propulseurs arrière. Préciser la part de la puissance maximale nécessaire à la mise en mouvement de l'AUV et celle nécessaire au maintien à la vitesse maximale. Faire l'application numérique. Vérifier si la puissance donnée dans le cahier des charges est suffisante.

Q 24. En négligeant la phase d'accélération, estimer la puissance consommée par la propulsion lors d'une phase d'inspection à vitesse constante de 2 nœuds (1,028 m $\cdot$ s^{-1}). Faire l'application numérique.

VII.B – Valider le critère de la FS1.8 « Avoir une autonomie suffisante »

Q 25. Vérifier que la puissance de la batterie est suffisante pour une mission en autonomie de 24h.

Au terme de cette étude, nous avons montré qu'il était possible, grâce au SARFA, de maîtriser la descente et la remontée de l'AUV sans propulseur et de contrôler la vitesse durant la phase d'inspection du pipeline. Ces conditions réunies assurent la faisabilité de la mission en utilisant la puissance disponible et l'énergie embarquée.

• • • FIN • • •

BY-NC-SA

Ne rien écrire

dans la partie barrée

Concours Centrale-Supélec 2011

NOM : _____ PRÉNOMS : _____

Signature :

Composition de **S2I** Filière **MP**

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement cet en-tête

NUMÉRO DE PLACE

Document réponse

Question 16

	Rx_P	Ry_P	Rz_P	L_P	M_P	N_P
$\mathbf{P}_1$	$\surd$					
$\mathbf{P}_2$	$\surd$					
$\mathbf{P}_3$	$\surd$					
$\mathbf{P}_4$	$\surd$					
$\mathbf{P}_{Vg}$						
$\mathbf{P}_{Vd}$						
$\mathbf{P}_{Lav}$						
$\mathbf{P}_{Lar}$						

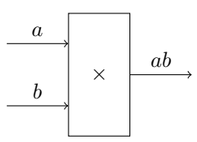
Ne rien écrire dans la partie barrée

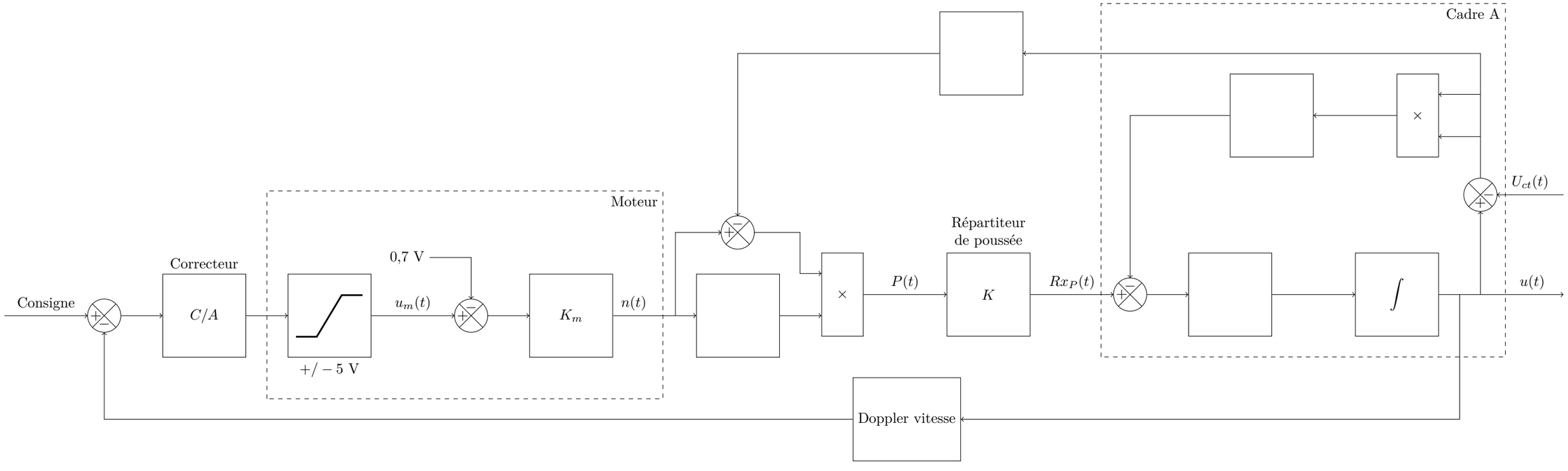
Ne rien écrire dans la partie barrée

Questions 11 et 18

Notations

- $u_m(t)$ et $n(t)$ représentent respectivement la tension aux bornes du moteur et la fréquence de rotation de l'hélice.
- $P(t)$, $Rx_P(t)$ représentent respectivement la poussée de l'hélice et la résultante des actions mécaniques de propulsion.
- $u(t)$ et $U_{ct}(t)$ représentent respectivement la vitesse de déplacement horizontal de l'AUV et la vitesse du courant horizontal.
-





Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de MP chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Statique des solides : principe fondamental et stratégie d'isolement
- Simplification d'un modèle : linéarisation, non-linéarités, pôles dominants, validité
- Modélisation des actions mécaniques : modèles local et global, frottement, torseurs des liaisons
- Correction des systèmes asservis : correcteurs P, PI et à avance de phase

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/mp