

SESSION 2021

**CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

Section : GÉNIE MÉCANIQUE

Option : CONSTRUCTION

ANALYSE D'UN PROBLÈME TECHNIQUE

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il est demandé au candidat d'utiliser des feuilles de copie distinctes pour chacune des parties traitées et d'insérer les documents réponses, complétés ou non, dans les copies relatives à la partie considérée. Le candidat pourra apporter tous les compléments qu'il souhaite sur ces mêmes copies. L'ensemble sera alors placé dans une copie servant de « chemise » pour toute la composition.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► Concours externe du CAPLP de l'enseignement public :

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EFE	4100J	101	7397

► Concours externe du CAFEP/CAPLP de l'enseignement privé :

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EFF	4100J	101	7397

Le sujet comporte 37 pages

- l'énoncé du sujet commençant par la mise en situation et comportant 48 questions (pages 2 à 25) ;
- le dossier réponse comportant 6 documents réponse : DR1 à DR5-2 (pages 26 à 31) ;
- le dossier technique comportant 6 documents techniques : DT1 à DT6 (pages 32 à 37) ;

RECOMMANDATIONS

L'étude est composée de 5 parties indépendantes.

Il est proposé au candidat de répartir son temps de travail sur les différentes parties de l'étude de la façon suivante :

Partie I	Mise en situation	10 min
Partie II	Modélisation et validation du comportement du planeur	1 h 10 min
Partie III	Chaînes de puissance de tangage et de roulis	50 min
Partie IV	Validation du dimensionnement de la structure du planeur	1 h 30 min
Partie V	Conclusion vis-à-vis de la problématique	20 min

Planeur sous-marin autonome

I. MISE EN SITUATION

I.1 Contexte de l'étude

Les hydroplaneurs sont développés et utilisés par des équipes de scientifiques, comme celles de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) pour mesurer certaines caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer, en surface et en profondeur (pression, température, salinité, ...).

Pour capter et enregistrer ces caractéristiques, on peut utiliser différents systèmes, comme les bouées, les stations sous-marines fixes ou les bateaux. Les hydroplaneurs complètent ces systèmes classiques. Ils sont conçus pour naviguer en plongée la majeure partie du temps.

Comme les planeurs aériens, ces engins ne sont pas équipés de système de propulsion et utilisent la portance de leurs ailes et les courants marins pour naviguer sous la mer.

Pour transmettre l'ensemble des informations acquises durant la phase de plongée, il remonte régulièrement à la surface pour communiquer avec des satellites et des bases terrestres spécialisées dans l'acquisition et le traitement de ces données.

L'hydroplaneur support du sujet a été développé par la société Bluefin Robotics (U.S.A.). Il embarque son énergie dans un nombre limité de batteries sans qu'il soit prévu de les recharger pendant la mission.

La Figure 1 donne le diagramme de contexte de l'hydroplaneur.

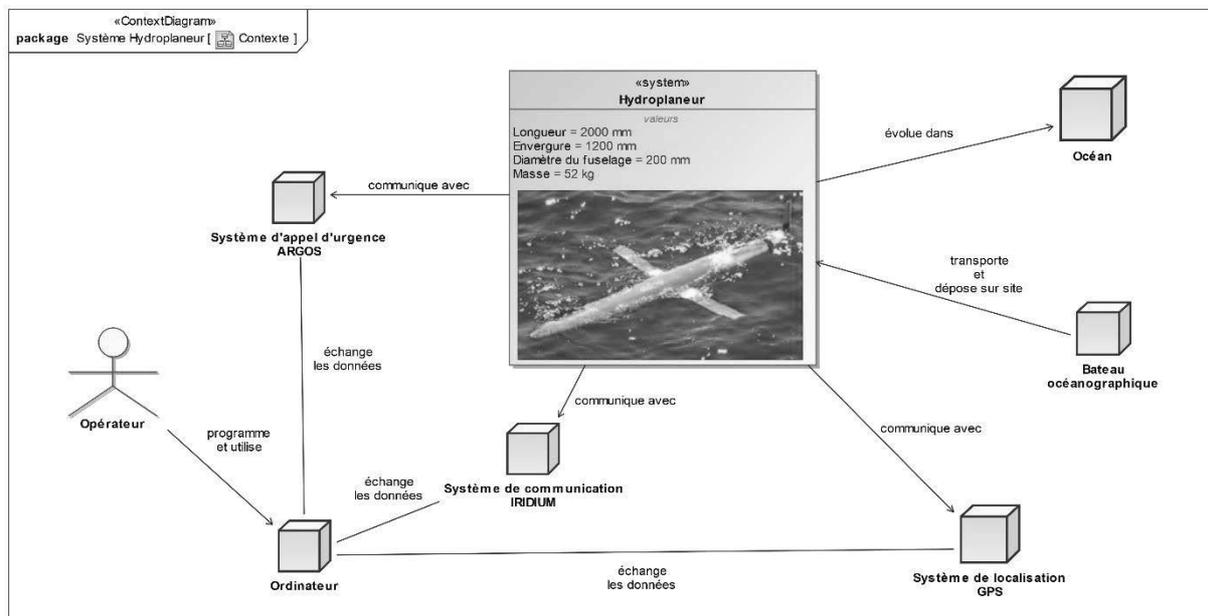


Figure 1 – Diagramme de contexte de l'hydroplaneur

I.2 Présentation du système

Les concepteurs de l'hydroplaneur ont donc été soumis à de fortes contraintes notamment celles liées à la consommation énergétique. Ils ont cherché les solutions

techniques les plus économiques pour permettre à l'appareil de passer plusieurs mois en mer avant d'être repêché.

La Figure 2 rassemble les exigences du système dans un diagramme.

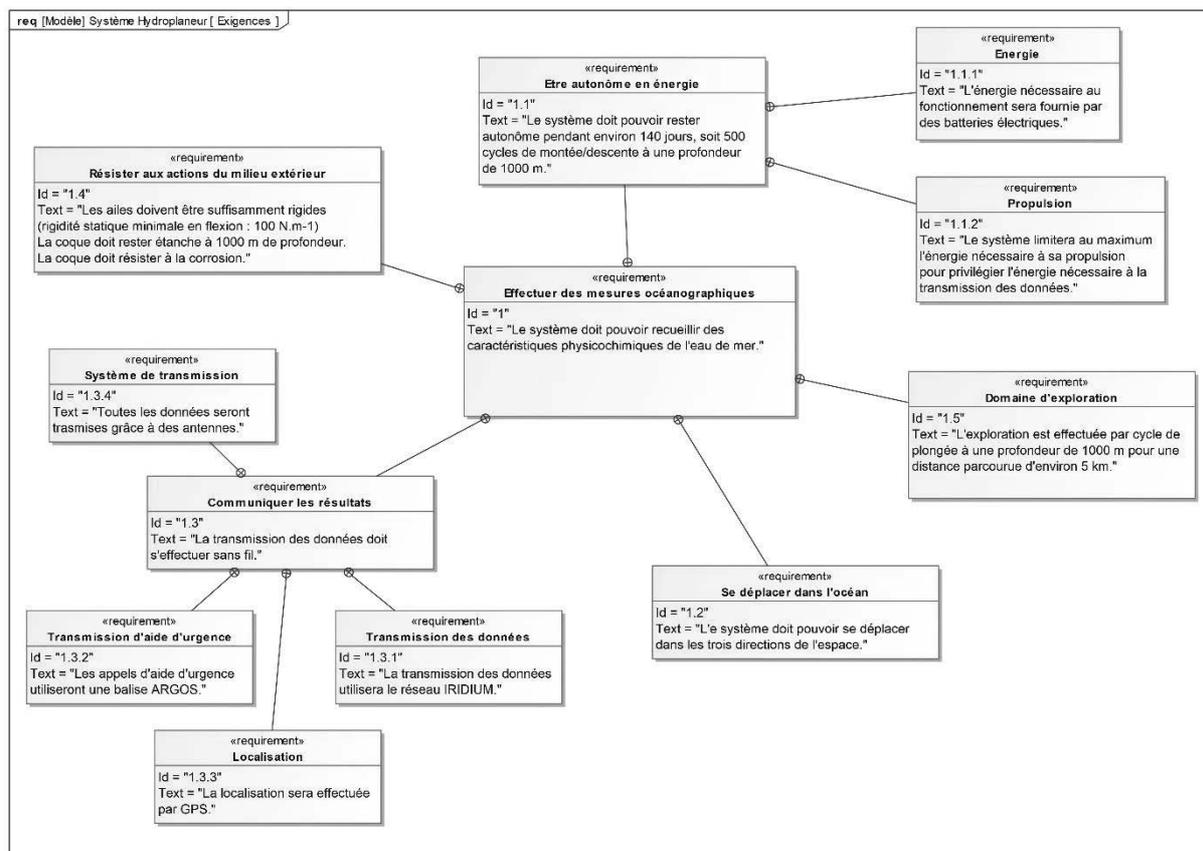


Figure 2 – Diagramme d'exigences de l'hydroplaneur

L'hydroplaneur est principalement constitué d'une enveloppe étanche assurant la flottabilité et la protection des organes internes, d'un système de puissance gérant le tangage et le roulis, d'un système hydraulique gérant la montée et la descente et enfin d'un système électronique permettant la mesure des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer et la transmission des données.

L'ensemble des données relatives à ces systèmes sont regroupées dans le diagramme de définition de blocs du document **DT6**.

I.3 Problématique et objectifs de l'étude

Les missions d'observation sont réalisées en autonomie, c'est-à-dire sans apport ou récupération d'énergie. Une des problématiques principales est donc l'optimisation de la consommation énergétique du sous-marin. Lors d'une mission d'observation, les principales sources de consommation énergétique se situent aux niveaux suivants :

- la consommation des moteurs déplaçant les masses mobiles du planeur « roll pack » et « pitch pack » (voir document **DT2**);
- la consommation des cartes électroniques d'acquisition, de traitement et de stockage ;
- la consommation due à la communication avec les satellites ;
- la consommation de la pompe hydraulique gérant les cycles de plongée et de remontée.

La synthèse des différentes consommations d'énergie sur un cycle pour la configuration étudiée est proposée dans le cahier des charges défini Table 1.

Objectif : Valider l'architecture du système vis-à-vis des performances attendues puis analyser les différentes possibilités d'optimisation du planeur vis-à-vis des performances énergétiques et de l'architecture du système. Les principales études menées se limiteront ici à la validation des composants et des choix réalisés par le constructeur à l'égard du cahier des charges

I.4 Cahier des charges

Fonction	Critère	Niveau	Limite
Contrôler le comportement du planeur en surface	Flottabilité en surface	6 kg	± 1 kg
	Angle d'assiette statique	0°	± 1 °
Maîtriser le comportement lors des phases de plongée et de remontée	Profondeur de travail	1000 m	Max.
	Temps de descente ou de remontée	4h	Max.
	Flottabilité à 1000 m de profondeur	0 kg	-
	Angle d'assiette dynamique nominal	± 20 °	± 1 °
Minimiser la consommation énergétique sur un cycle de fonctionnement	Durée d'un cycle	8h	Max.
	Consommation de la carte électronique	7000 J	Max.
	Consommation de transmission des données	8900 J	Max.
	Déplacement des packs de batteries	600 J	Max.
	Consommation de la pompe hydraulique	8800 J	Max.
Avoir une autonomie suffisante	Énergie totale embarquée	6 kWh	Min.
	Durée d'un cycle	10 h	-
	Nombre de cycles en autonomie	800	Min.
Résister aux sollicitations mécaniques extérieures	Raideur statique en flexion des ailles	100 N·m ⁻¹	Min.
	Contrainte maximale de Von Mises sur la coque	310 MPa	Max.
	Étanchéité de la coque à 1000 m de profondeur (absence de fissure)	Absolue	-

Table 1 – Extrait du cahier des charges

II. MODELISATION ET VALIDATION DU COMPORTEMENT DU PLANEUR

Objectif : analyser et valider le système utilisé pour maîtriser le comportement du planeur en surface et lors des phases de plongée.

II.1 Description du système de contrôle des déplacements

Le système est constitué de deux sous-systèmes contrôlant séparément la flottabilité et l'angle d'assiette (ou de tangage) du planeur (voir documents **DT2** et **DT3**) :

- Le système de réglage de la flottabilité est composé d'un groupe motopompe haute pression, de réservoirs internes et de ballasts souples situés dans la zone humide de la coque. Le groupe hydraulique assure le transfert du fluide sous pression des réservoirs internes vers les ballasts ou inversement. Ce transfert affecte alors directement le volume global du planeur sous-marin et engendre par conséquent une modification de la poussée d'Archimède appliquée au planeur.
- L'angle d'assiette du planeur est contrôlé par l'intermédiaire d'un système constitué d'un moteur électrique entraînant, à l'aide d'un système pignon-crémaillère, le déplacement en translation d'une masse mobile (« pitch pack »). Le centre de gravité du planeur (G) est alors déplacé le long de l'axe longitudinal par rapport au centre de carène (C), ce qui provoque le changement d'assiette du planeur. L'inclinaison du planeur est stabilisée lorsqu'il atteint sa position d'équilibre quasi-statique.

Les déplacements du planeur dans le plan vertical, lors des phases de montée et de descente, sont alors obtenus par l'utilisation combinée du système de variation du volume et du système de contrôle de l'inclinaison autour de l'axe de tangage.

II.2 Réglage de la flottabilité du planeur sous-marin

La profondeur de plongée du planeur sous-marin est contrôlée en faisant varier sa flottabilité. Lorsque le planeur est en surface, sa flottabilité doit être suffisante pour que les antennes demeurent émergées pendant les phases de communication. La conception du sous-marin limite sa profondeur de travail à 1000 m. À cette profondeur, la flottabilité doit donc être nulle pour stopper la plongée du planeur.

Q1. Sachant que la masse du planeur reste inchangée au cours d'une mission d'observation, sur quel paramètre structurel doit-on agir pour modifier la flottabilité ?

Q2. Expliquer succinctement le principe utilisé pour modifier la flottabilité. Quels sont les différents éléments qui permettent de régler ce paramètre ?

Pour les zones d'observations océaniques envisagées, les données numériques suivantes sont retenues pour les échantillons d'eau analysés :

- masse volumique de l'eau salée en surface : $\rho_0 = 1022 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- masse volumique de l'eau salée à 1000 m de profondeur $\rho_{1000} = 1028 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

La coque rigide du planeur étant réalisée en alliage d'aluminium, sa variation de volume avec la profondeur reste faible. Le volume de la section étanche initiale est donc supposé constant.

Q3. À partir des informations fournies dans la documentation technique (documents **DT1 à DT3**), déterminer la flottabilité du planeur en surface (Φ_0) lorsque l'intégralité de l'huile hydraulique est transférée dans les ballasts.

Q4. Quel est le volume d'huile à transférer dans les réservoirs internes pour assurer une flottabilité nulle à 1000 m de profondeur ?

Le moteur électrique entraînant la pompe hydraulique qui alimente les ballasts consomme 70 W sur 2 minutes environ pour un cycle de plongée et de remontée.

Q5. En déduire l'énergie consommée par la pompe hydraulique sur un cycle de fonctionnement.

Q6. Le système de réglage de la flottabilité permet-il de répondre au cahier des charges ? Justifier votre réponse.

II.3 Comportement du planeur en surface

Objectif : déterminer les conditions d'équilibre stable de l'hydroplaneur en surface.

Lors des phases statiques de mise à l'eau et de communication, afin d'empêcher le retournement du planeur, il est nécessaire de contrôler la position de son centre de gravité par rapport à celle du centre de carène. La modélisation du planeur est présentée sur la

Figure 3. Dans cette phase d'étude, le chargement et la géométrie du planeur sont symétriques par rapport au plan $(O, \vec{x}_0, \vec{z}_0)$.

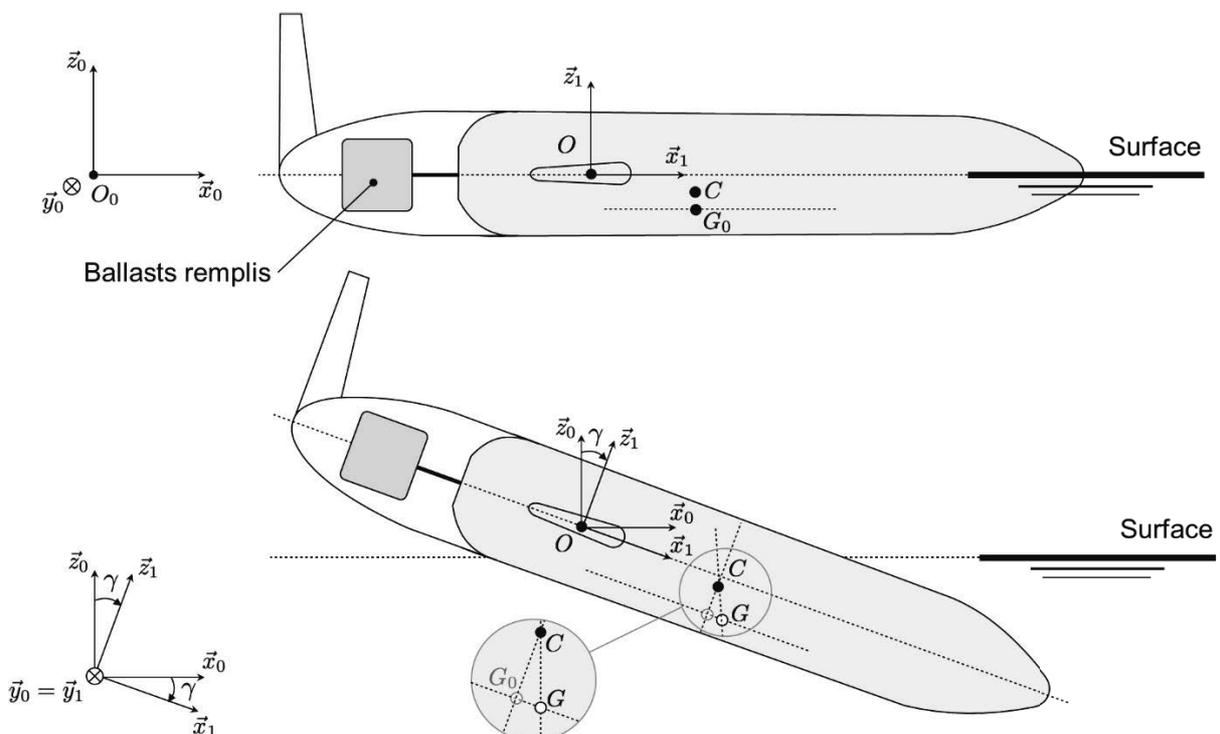


Figure 3 – Modélisation plane du planeur à l'état d'équilibre en surface et après perturbation de l'assiette (l'angle d'assiette est volontairement exagéré)

Paramétrage et caractéristiques géométriques :

- $\mathcal{R}_0(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$: repère supposé galiléen lié à la terre ;
- $\mathcal{R}_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$: repère lié au planeur centré sur le centre de poussée des actions hydrodynamiques noté O ;
- $\gamma = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$: angle de tangage (ou d'assiette) du planeur ;
- masse totale du planeur notée M_T ; volume sec total noté V_s ; masse volumique de l'eau notée ρ ;
- position du centre de poussée d'Archimède (ou centre de carène) : $\vec{OC} = x_C \vec{x}_1 - z_C \vec{z}_1$;
- position du centre de gravité du planeur à l'état d'équilibre initial : $\vec{OG}_0 = x_{G_0} \vec{x}_1 - z_{G_0} \vec{z}_1$.
- position du centre de gravité du planeur à l'équilibre après perturbation : $\vec{OG} = x_G \vec{x}_1 - z_G \vec{z}_1$.

Lorsque l'hydroplaneur est en surface, il est soumis aux seules actions de pesanteur et de poussée d'Archimède. Les variations d'assiette dues aux perturbations sont supposées faibles. Les variations de position du centre de carène x_C sont donc supposées négligeables.

Q7. Donner la relation liant ρ, V_s et M_T lorsque le planeur est en équilibre stable.

Q8. Justifiez, à l'aide d'un croquis, que le centre de gravité G soit positionné en dessous du centre de carène C pour assurer la stabilité du planeur.

Pour maintenir l'équilibre du planeur en surface le système de contrôle d'assiette doit assurer l'alignement des centres de carène et de gravité avec \vec{z}_0 : $\vec{CG} \cdot \vec{x}_0 = 0$.

Q9. En déduire la relation géométrique à respecter entre l'angle d'assiette θ et les paramètres x_G, z_G, x_C et z_C . Comment doit-on régler le paramètre x_G pour satisfaire le critère d'angle d'assiette statique du cahier des charges ?

II.4 Comportement en phase de plongée

Objectif : déterminer la course utile de pitch pack permettant d'atteindre l'angle d'assiette imposé par le cahier des charges en phase de plongée et de remontée.

II.4.1 Modélisation des efforts de propulsion

Lorsque le planeur est en mouvement et incliné par rapport à l'axe horizontal \vec{x}_0 , l'écoulement de l'eau sur les ailes permet de générer une force hydrodynamique de propulsion. Pour la phase de plongée, la résultante des efforts de l'eau sur le planeur - somme des effets hydrodynamiques sur la coque et les ailes - appliquée au centre de poussée hydrodynamique O , est modélisée comme suit :

$$\{\mathcal{F}_{h \rightarrow p}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{h \rightarrow p} = F_z \vec{z}_1 - F_x \vec{x}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_O$$

où F_z correspond à la composante globale de portance et F_x à la composante globale de traînée.

La configuration étudiée correspond à la phase de plongée représentée sur la Figure 4 et sur le document **DT4**. Le planeur se déplace en translation rectiligne uniforme selon un angle de 20° par rapport à la direction horizontale (\vec{x}_0) (les effets

dynamiques sont supposés négligeables devant les efforts mis en jeu). Le planeur est donc supposé en équilibre quasi-statique dans le plan $(O, \vec{x}_0, \vec{z}_0)$. On rappelle que les ballasts sont supposés totalement purgés lors d'une plongée.

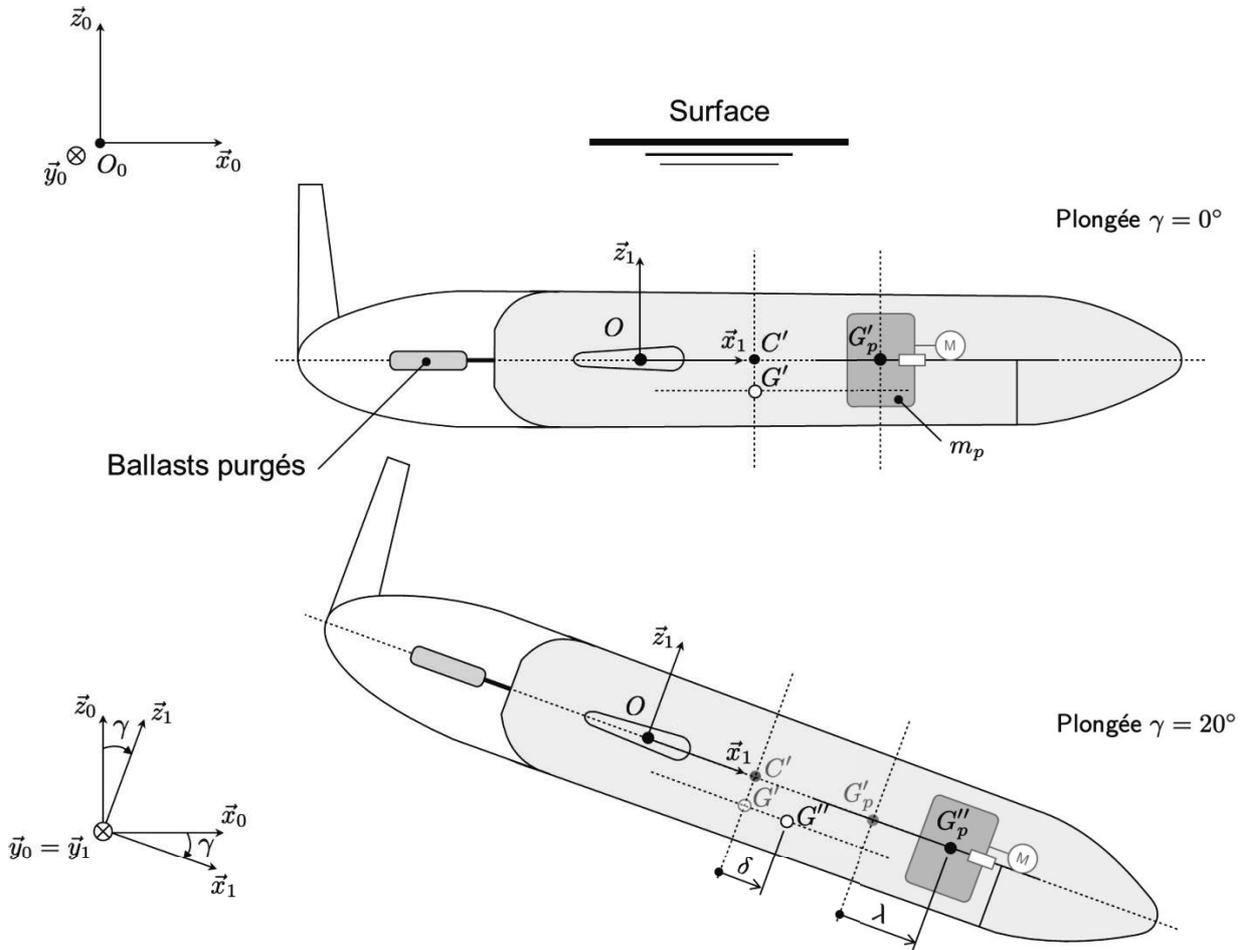


Figure 4 – Paramétrage du planeur en phase de plongée à vitesse constante (voir également document **DT4**)

Paramétrage et données numériques :

- masse totale du planeur notée $M_T = 52,15 \text{ kg}$;
- volume sec total noté $V_s = 0,05053 \text{ m}^3$;
- position du centre de poussée d'Archimède : $\overrightarrow{OC'} = x_C \vec{x}_1$;
- position du centre de gravité du planeur : $\overrightarrow{OG'} = x_G \vec{x}_1 - z_G \vec{z}_1$;
- position du centre de gravité du planeur retranché de la masse du pitch pack : $\overrightarrow{OG'_1} = x_{G'_1} \vec{x}_1 - z_G \vec{z}_1$;
- position du centre de gravité du « pitch pack » : $\overrightarrow{OG'_p} = x_{G'_p} \vec{x}_1$
- masse du « pitch pack » : $m_p = 7,14 \text{ kg}$;
- déplacement du centre de gravité du planeur : $\overrightarrow{G'G''} \cdot \vec{x}_1 = \overrightarrow{C'G''} \cdot \vec{x}_1 = \delta$;
- déplacement du centre de gravité du « pitch pack » : $\overrightarrow{G'_p G''} \cdot \vec{x}_1 = \lambda$.

Q10. Isoler le planeur puis effectuer le bilan des actions mécaniques extérieures. Expliciter le torseur d'actions mécaniques associé à chaque action extérieure.

Q11. Tracer qualitativement sur le document réponse **DR1** les différentes actions mécaniques recensées.

Q12. En déduire la direction et l'expression littérale de $\vec{R}_{h \rightarrow p}$ en fonction de ρ , V_s , M_T et de l'accélération de la pesanteur g .

Q13. Montrer en utilisant le théorème du moment statique que l'expression littérale du déplacement δ , représenté Figure 4 (et document **DR1**), s'écrit sous la forme :

$$\delta = x_{c'} \left(\frac{\rho V_s}{M_T} - 1 \right) + z_G \tan \gamma$$

II.4.2 Estimation de la course du « pitch-pack »

Pour estimer l'énergie consommée par le système de contrôle d'assiette, il est nécessaire de connaître la course utile du « pitch pack » permettant le réglage de l'angle d'assiette dynamique du planeur.

Au début de la phase de plongée, avant d'incliner le planeur, les ballasts sont complètement dégonflés et le planeur entame une descente verticale. La modification du volume sec du planeur engendre un déplacement δ_0 du centre de poussée vers l'avant (voir document **DT4**).

Lorsque la vitesse d'avance du planeur est nulle (aucun effort hydrodynamique), l'équilibre est obtenu quand le centre de gravité G' est à la verticale du centre de carène C' . La modification de l'angle d'assiette est ensuite obtenue en déplaçant le pitch pack vers l'avant ou l'arrière du planeur (voir document **DT4**).

Q14. Pour la configuration d'équilibre décrite ci-dessus, montrer que :

$$(M_T - m_p) \overrightarrow{C'G_1} \cdot \vec{x}_1 + m_p \overrightarrow{C'G'_p} \cdot \vec{x}_1 = 0$$

La modification de la position du centre de gravité est supposée uniquement engendrée par le déplacement de la masse du « pitch pack », soit :

$$M_T \overrightarrow{C'G''} \cdot \vec{x}_1 = (M_T - m_p) \overrightarrow{C'G_1} \cdot \vec{x}_1 + m_p \overrightarrow{C'G'_p} \cdot \vec{x}_1$$

Q15. En déduire l'expression du déplacement λ en fonction de δ , M_T et m_p .

La gestion des mouvements du planeur lors des différentes phases de fonctionnement implique : $\delta \in [-10 \text{ mm}, 18 \text{ mm}]$ pour $\theta \in [-20^\circ, 20^\circ]$.

Q16. En déduire une estimation de la course minimale $\Delta\lambda$ permettant de valider le critère d'angle d'assiette dynamique du cahier des charges.

III. CHAINES DE PUISSANCE DE TANGAGE ET DE ROULIS

III.1 Chaîne de puissance associée au contrôle du tangage

Objectif : Evaluer la consommation d'énergie pour redresser l'hydroplaneur après une phase de plongée.

L'hydroplaneur est en cours de plongée. Afin de le faire progresser à profondeur constante, il est nécessaire de déplacer le pitch-pack pour redresser l'hydroplaneur.

La Figure 5 présente l'hydroplaneur en phase de plongée.

Le référentiel lié à l'océan est supposé galiléen $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

L'hydroplaneur se déplace en ligne droite (angle de plongée γ constant) et à vitesse constante. Le référentiel $(O, \vec{x}_1, \vec{y}_0, \vec{z}_1)$ lié à l'hydroplaneur est donc supposé également galiléen.

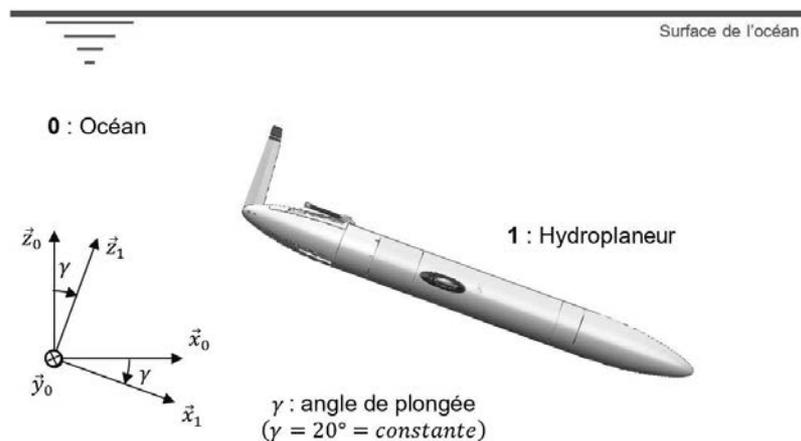


Figure 5 – Hydroplaneur en phase de plongée.

La Figure 6 propose une maquette 3D de la chaîne de puissance du contrôle du tangage.

Un tube à section carré est lié complètement à la coque de l'hydroplaneur. Une crémaillère est également liée à ce tube. Cet ensemble {coque hydroplaneur + tube + crémaillère} est numéroté **1**.

Le « pitch-pack » numéroté **2** est en liaison glissière avec frottement de direction (\vec{x}_1) avec **1**.

Un groupe motoréducteur est monté sur le pitch-pack **2**. Le pignon de sortie du motoréducteur de ce groupe est numéroté **3**. Il engrène avec un arbre bi-pignonné engrenant d'un côté avec **3** et de l'autre côté avec la crémaillère liée à **1**.

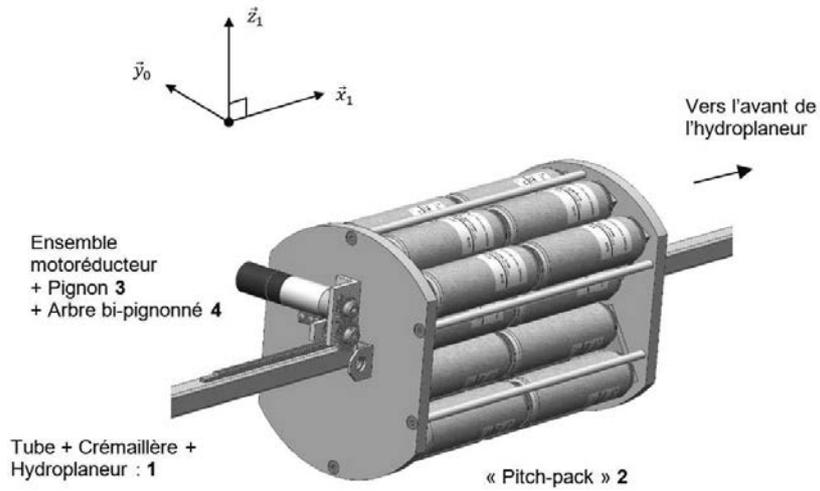


Figure 6 – Maquette 3D de la chaîne de puissance de contrôle de tangage.

La chaîne de puissance peut être modélisée cinématiquement comme présenté sur la Figure 7.

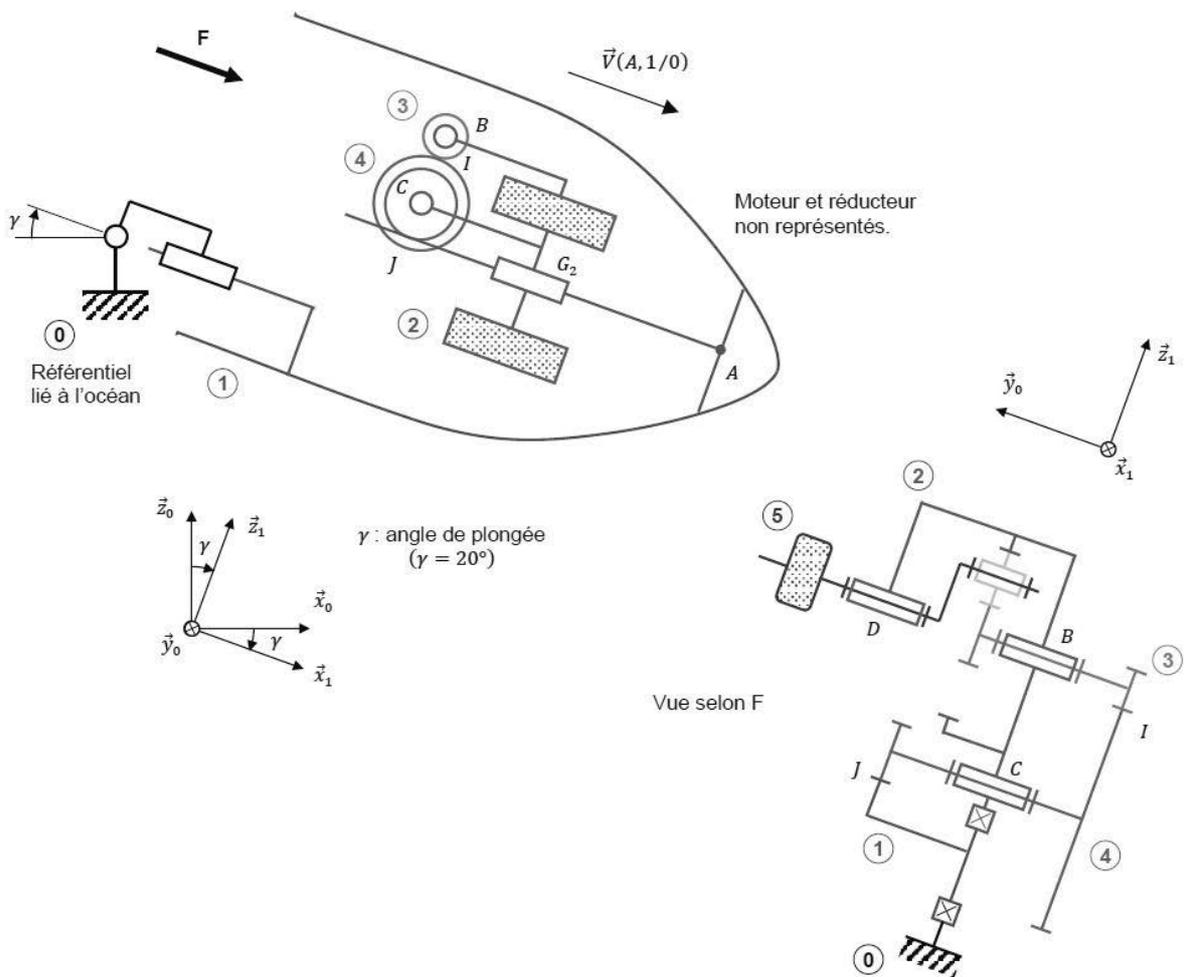


Figure 7 – Modèle cinématique de la chaîne de puissance de contrôle du tangage.

Les caractéristiques des différents éléments sont données ci-dessous :

Ensemble **1** (hydroplaneur + tube + crémaillère) :

- Repère supposé galiléen lié à **1** : $R_1 : (A, \vec{x}_1, \vec{y}_0, \vec{z}_1)$;
- Masse : m_1 ;
- Centre d'inertie : G_1 .

Pitch-pack **2** :

- Repère lié : $R_2 : (G_2, \vec{x}_1, \vec{y}_0, \vec{z}_1)$;
- Masse : $m_2 = 7,1 \text{ kg}$;
- Centre d'inertie : G_2 avec $\overrightarrow{AG_2} = -x_{2/1}(t) \cdot \vec{x}_1$;
- Liaison avec **1** : glissière de direction \vec{x}_1 ;
- Position par rapport à **1** selon \vec{x}_1 : $\overrightarrow{AG_2} = -x_{2/1}(t) \cdot \vec{x}_1$

Pignon **3** :

- Repère lié : $R_3 : (B, \vec{x}_3, \vec{y}_0, \vec{z}_3)$;
- Masse : $m_3 = 0$ (masse intégrée à celle de **2**) ;
- Moment d'inertie autour de (B, \vec{y}_0) : $I_3 = 0$ (inertie négligée) ;
- Position par rapport à **2** autour de (B, \vec{y}_0) : $\theta_{3/2} = (\vec{x}_1, \vec{x}_3) = (\vec{z}_1, \vec{z}_3)$;
- Nombre de dents : $Z_3 = 22$

Arbre bi-pignonné **4** :

- Repère lié : $R_4 : (C, \vec{x}_4, \vec{y}_0, \vec{z}_4)$;
- Masse : $m_4 = 0$ (masse intégrée à celle de **2**) ;
- Moment d'inertie autour de (C, \vec{y}_0) : $I_4 = 0$ (inertie négligée) ;
- Position par rapport à **2** autour de (C, \vec{y}_0) : $\theta_{4/2} = (\vec{x}_1, \vec{x}_4) = (\vec{z}_1, \vec{z}_4)$
- Nombre de dents (engrènement avec pignon **3**) : $Z_{43} = 26$;
- Nombre de dents (engrènement avec crémaillère **1**) : $Z_{41} = 18$;

Caractéristiques du groupe moto réducteur :

- Repère lié au rotor du moteur : $R_5 : (D, \vec{x}_5, \vec{y}_0, \vec{z}_5)$
- Rapport de transmission : $k_{mr} = \dot{\theta}_{3/2} / \dot{\theta}_{5/2} = 1/112$
- Masse totale du motoréducteur : $m_{mr} = 0$ (masse intégrée à celle de **2**)
- Moment d'inertie du rotor **5** autour de (D, \vec{y}_0) : $I_5 = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- Les pièces internes du réducteur sont sans masse (masses intégrées à celle de **2** et inerties intégrées à celle de **5**) ;
- Position de **5** par rapport à **2** autour de (D, \vec{y}_0) : $\theta_{5/2} = (\vec{x}_1, \vec{x}_5) = (\vec{z}_1, \vec{z}_5)$

Géométrie :

- $\overrightarrow{IB} = a \cdot \vec{y}_0 + r_3 \cdot \vec{z}_1$;
- $\overrightarrow{IC} = a \cdot \vec{y}_0 - r_{43} \cdot \vec{z}_1$;
- $\overrightarrow{JC} = -a \cdot \vec{y}_0 + r_{41} \cdot \vec{z}_1$.

Les actions mécaniques sont modélisées par les torseurs suivants :

- Action de la pesanteur sur **2** :

$$\{\mathcal{T}(Pes \rightarrow 2)\} = \left\{ \begin{array}{c} -m_2 \cdot g \cdot \vec{z}_0 \\ 0 \end{array} \right\}_{G_2}$$

- Action du stator lié à **2** sur le rotor **5** :

$$\{T(CEM: 2 \rightarrow 5)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ C_m \cdot \vec{y}_0 \end{array} \right\}_D$$

Hypothèses :

- Il y a roulement sans glissement en I de **3** sur **4** et en J de **4** sur **1**.
- Le pitch-pack **2** se déplace selon $-\vec{x}_1 : \vec{V}(G_2, 2/1) = -\dot{x}_{2/1} \cdot \vec{x}_1$ avec $\dot{x}_{2/1} > 0$
- La pesanteur n'a d'effet que sur la masse du pitch-pack **2**.
- La liaison glissière entre **2** et **1** est le siège d'un frottement sec modélisé par une action mécanique de **1** agissant sur **2** dont le torseur en G_2 est :

$$\{T(Frott: 1 \rightarrow 2)\} = \left\{ \begin{array}{c} F_{frott} \cdot \vec{x}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{G_2}$$

- Toutes les liaisons autres que la liaison glissière entre **1** et **2** sont parfaites.

Q17. A l'aide du paramétrage, exprimer la condition de roulement sans glissement au point I , du pignon **3** sur l'arbre bi-pignonné **4**. Développer la relation pour obtenir une équation liant $r_3, r_{43}, \dot{\theta}_{3/2}$ et $\dot{\theta}_{4/2}$.

Q18. A l'aide du paramétrage, exprimer la condition de roulement sans glissement au point J , du pignon **4** sur la crémaillère liée à **1**. Développer la relation pour obtenir une équation liant $r_{41}, \dot{\theta}_{4/2}$ et $\dot{x}_{2/1}$.

Q19. Utiliser le rapport de transmission k_{mr} pour obtenir une équation liant $r_3, r_{41}, r_{43}, k_{mr}, \dot{\theta}_{5/2}$ et $\dot{x}_{2/1}$.

Q20. Exprimer l'énergie cinétique de l'ensemble $\Sigma = \{2 + 3 + 4 + 5\}$ dans son mouvement par rapport à $R_1 : T(\Sigma/1)$.

Q21. Exprimer $T(\Sigma/1)$ uniquement en fonction de $\dot{x}_{2/1}$ et en déduire l'expression de la masse équivalente M_{eq} ramenée sur le pitch-pack **2**.

Q22. Exprimer les puissances développées par des actions mécaniques extérieures à l'ensemble $\Sigma = \{2 + 3 + 4 + 5\}$ puis les puissances développées par des actions mécaniques intérieures à l'ensemble $\Sigma = \{2 + 3 + 4 + 5\}$.

Remarque : les puissances seront exprimées à l'aide de la position $x_{2/1}$ et de ses éventuelles dérivées.

Q23. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique (ou théorème de l'énergie-puissance) à l'ensemble $\Sigma = \{2 + 3 + 4 + 5\}$ dans son mouvement par rapport à R_1 pour trouver l'équation de mouvement du pitch-pack **2**, c'est-à-dire l'équation donnant le couple moteur C_m en fonction des paramètres cinématiques et inertiels.

L'utilisation d'un logiciel de simulation multiphysique est maintenant envisagée pour déterminer l'énergie électrique consommée pour déplacer le pitch-pack **2** et redresser l'hydroplaneur.

La Figure 8 représente un modèle acausal de la chaîne de puissance du contrôle de tangage.

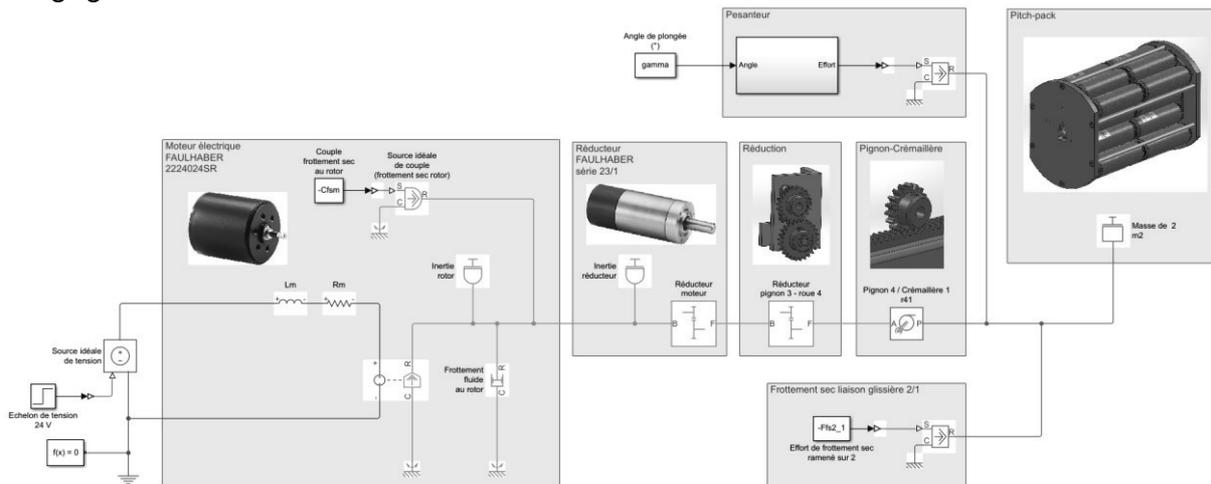


Figure 8 – Modèle multiphysique de la chaîne de puissance de contrôle de tangage.

La Figure 9 donne les résultats d'une simulation du modèle multiphysique sur une durée de 5 secondes pour un déplacement de 200 mm du pitch-pack. Elle fait apparaître le déplacement du pitch-pack et l'énergie électrique consommée par le moteur du pitch-pack.

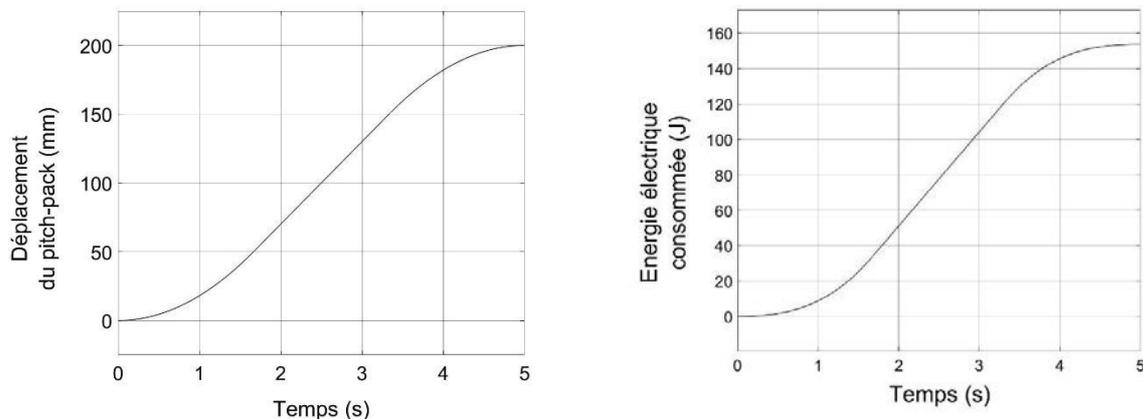


Figure 9 – Résultats de simulation.

Q24. A l'aide des résultats de simulation, donner la valeur de l'énergie consommée lors du redressement de l'hydroplaneur.

III.2 Chaîne de puissance associée au contrôle du roulis

Objectif : Evaluer l'énergie consommée pour placer l'hydroplaneur en position « transmission de données ».

Pour transmettre les données, l'hydroplaneur dispose d'antennes dissimulées dans ses ailes. La transmission des données s'effectue lorsque l'hydroplaneur est en surface. Pour obtenir une transmission de qualité, l'antenne doit être placée verticalement, ce qui nécessite de basculer l'hydroplaneur de 90° autour de son axe longitudinal (mouvement de roulis).

Pour ce faire, le « roll-pack » doit être déplacé angulairement autour de l'axe longitudinal.

La Figure 10 explique comment l'hydroplaneur bascule pour se placer en position « transmission ».

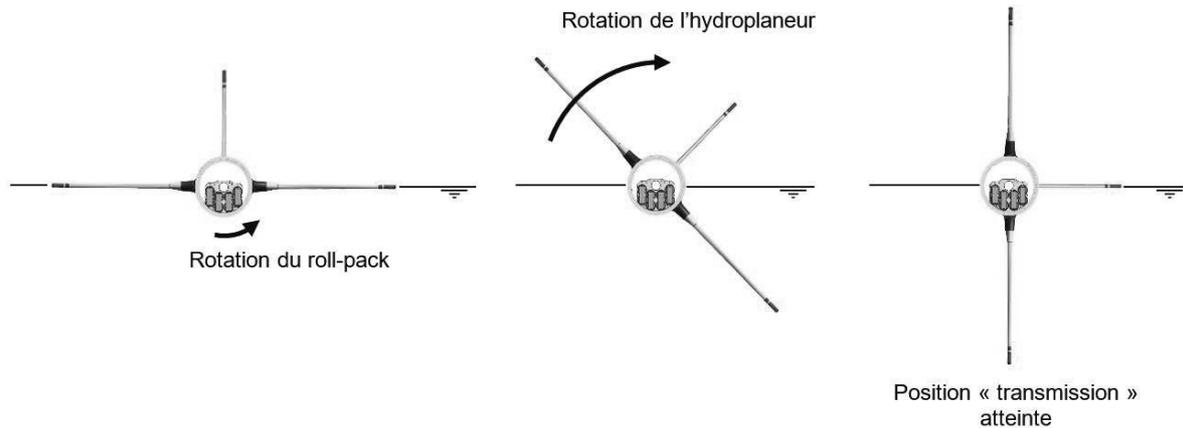


Figure 10 – Mise en position de l'hydroplaneur pour transmettre les données.

La Figure 11 propose une maquette 3D de la chaîne de puissance du contrôle du roulis.

Un tube à section carré est lié complètement à la coque de l'hydroplaneur. Une roue dentée est également liée à ce tube. Cet ensemble {coque hydroplaneur + tube + roue dentée} est numéroté **1**.

Le « roll-pack » numéroté **2** est en liaison pivot d'axe (O, \vec{x}_0) avec **1**.

Un groupe motoréducteur est monté sur le roll-pack **2**. Le pignon de sortie du réducteur de ce groupe est numéroté **3**. Il engrène avec la roue dentée liée à **1**.

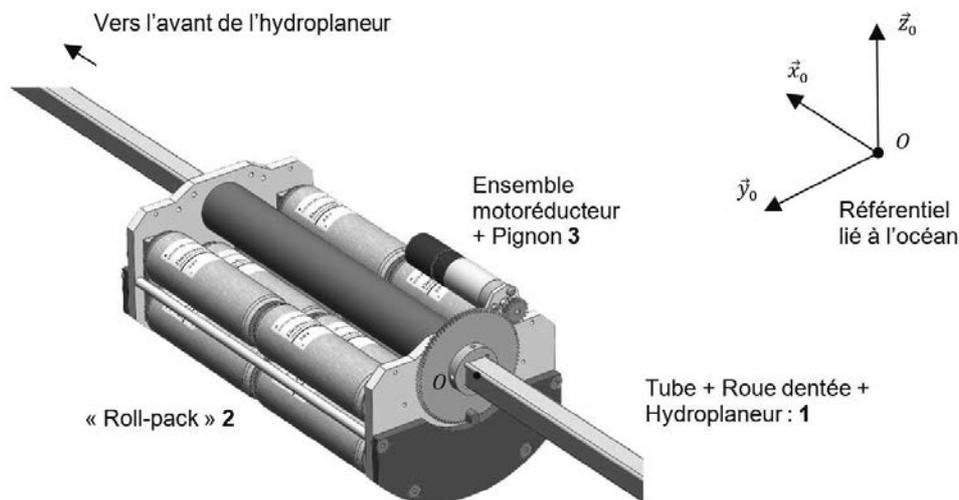


Figure 11 – Maquette 3D de la chaîne de puissance du contrôle du roulis.

La Figure 12 représente un modèle acausal de la chaîne de puissance du contrôle de roulis.

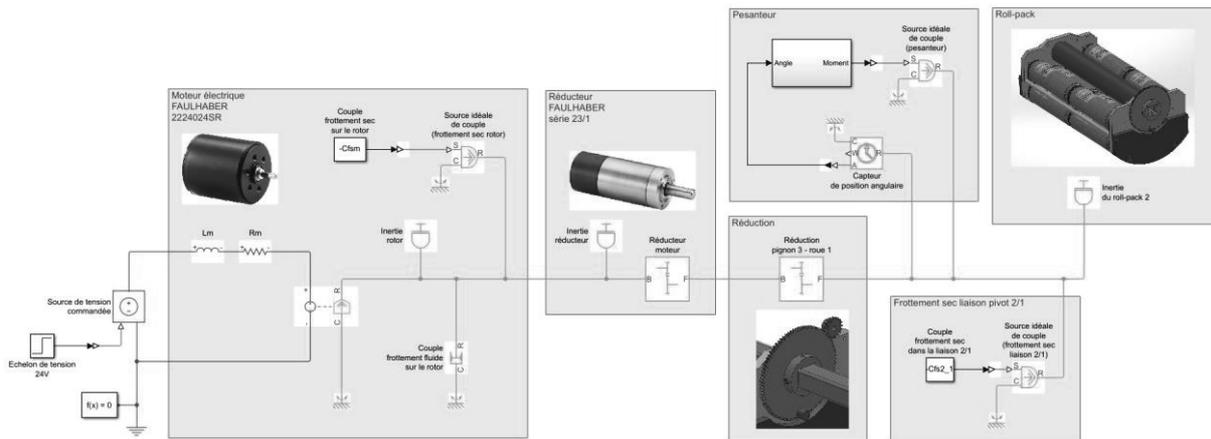


Figure 12 – Modèle multiphysique de la chaîne de puissance de contrôle de roulis.

La Figure 13 donne les résultats d'une simulation du modèle multiphysique sur une durée de 10 secondes pour un déplacement de 90° du roll-pack. Elle fait apparaître la position angulaire du roll-pack et l'énergie électrique consommée par le moteur du roll-pack.

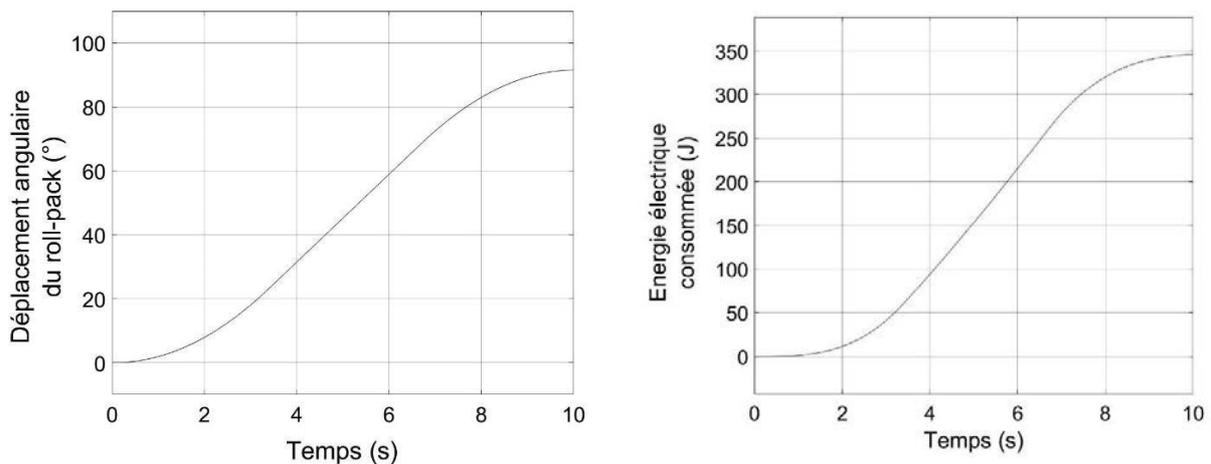


Figure 13 – Résultats de simulation.

Q25. A l'aide des résultats de simulation, donner la valeur de l'énergie consommée lors du pivotement de l'hydroplaneur.

IV. VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DU PLANEUR

Objectif : Valider le dimensionnement de la coque et des ailes du planeur vis-à-vis des critères du cahier des charges.

IV.1 Dimensionnement des ailes du planeur

Les ailes du planeur, contenant les antennes GPS, sont réalisées en mousse polyuréthane par surmoulage. La technique du surmoulage consiste à venir injecter le polyuréthane sur les antennes initialement positionnées dans le moule de fabrication.

L'étude proposée vise à pré-dimensionner la structure de l'aile enveloppant l'antenne GPS. Le cas de charge le plus défavorable pour la structure est la flexion due à l'effort de portance hydrodynamique. Compte tenu de la structure élancée de l'aile, une première modélisation simplifiée, de type poutre, est envisagée pour valider la géométrie et le choix du matériau.

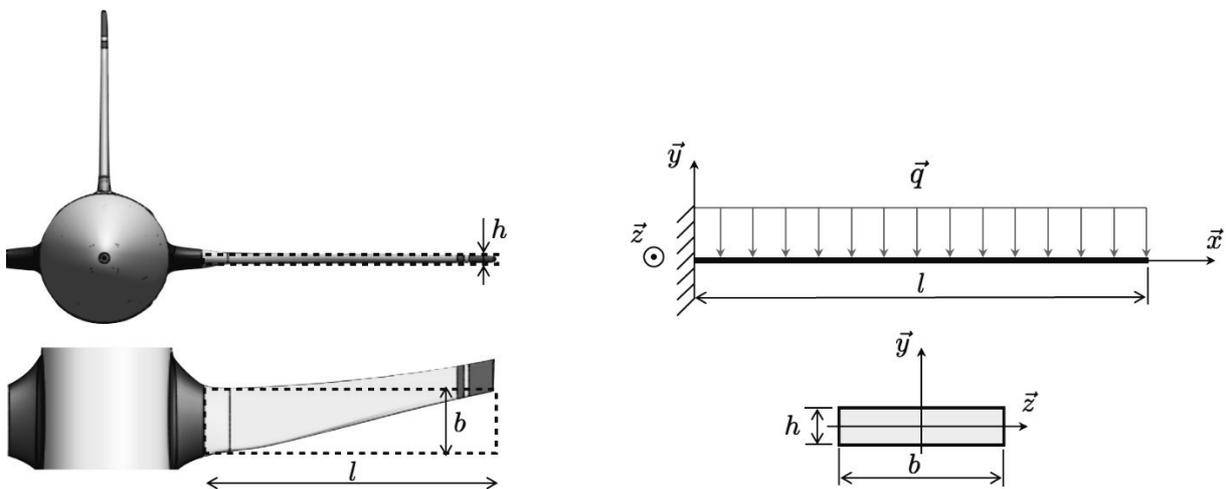


Figure 14 - Modélisation simplifiée de l'aile et modèle poutre associé

Paramètres de l'étude :

- effort linéique de portance hydrodynamique : $\vec{q} = -q \vec{y}$ avec $q = 12 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$;
- longueur d'une aile : $l = 450 \text{ mm}$;
- hauteur et largeur de la section droite : $h = 15 \text{ mm}$, $b = 112 \text{ mm}$;

Caractéristiques de la mousse polyuréthane :

- module d'Young : $E = 40 \text{ MPa}$;
- masse volumique : $\rho = 50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- limite d'élasticité : $R_e = 1,5 \text{ MPa}$

Q26. Déterminer le torseur de cohésion (ou torseur des efforts intérieurs) en tout point de la fibre neutre. Nommer l'état de sollicitations obtenu.

Q27. Rappeler l'expression littérale du moment quadratique $I_{G,z}$ pour la section considérée.

La contrainte normale en un point d'abscisse x et d'ordonnée y s'exprime :

$$\sigma(x, y) = -\frac{M_{fz}(x)}{I_{G,z}} y \quad \forall x \in [0, l] ; \forall y \in \left[-\frac{h}{2}, +\frac{h}{2}\right]$$

Q28. Donner l'expression littérale de la contrainte normale maximale puis vérifier la validité du dimensionnement de l'aile.

L'équation de la déformée pour une sollicitation de flexion autour de de l'axe (G, \vec{z}) est définie par la relation suivante :

$$EI_{G,z} \frac{d^2 u_y(x)}{dx^2} = M_{fz}(x) \quad \forall x \in [0, l]$$

Q29. Montrer que l'expression littérale du déplacement vertical en bout d'aile $u_y(l)$ s'écrit :

$$u_y(l) = -\frac{ql^4}{8EI_{G,z}}$$

Q30. En déduire l'expression littérale de la raideur de flexion $k_f = \left| \frac{ql}{u_y} \right|$. Effectuer l'application numérique ; le cahier des charges est-il respecté ?

Q31. Exprimer la largeur b de l'aile en fonction de m , ρ , l et h .

Q32. En réutilisant l'expression du déplacement $u_y(l)$, déterminer les fonctions f et g telles que la masse de la poutre s'exprime : $m = f(E, \rho) \cdot g(q, |u_y(l)|, l, h)$.

Le diagramme du document réponse **DR2** permet de choisir un matériau en fonction de l'indice de performance $I_p = \frac{E^n}{\rho}$.

Q33. En considérant l'expression de $f(E, \rho)$ obtenue à la question précédente, montrer que $n = 1$.

Q34. À l'aide du document réponse **DR2**, proposer un choix de matériaux permettant d'optimiser l'indice de performance I_p . Expliciter clairement votre démarche et discuter de la compatibilité de votre choix avec le milieu marin.

IV.2 Validation du dimensionnement de la coque du planeur

Pour vérifier la capacité de la coque du planeur à résister à la pression hydrostatique lorsque celui-ci atteint la profondeur maximale de 1000 m, une simulation numérique par éléments finis est envisagée à l'aide du module de simulation du logiciel SOLIDWORKS™.

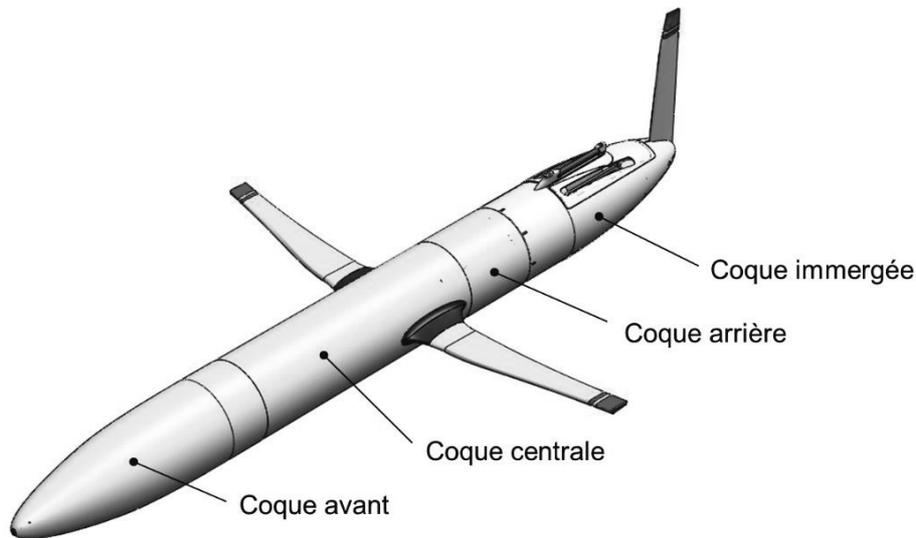


Figure 15 – Constitution de la carène du planeur sous-marin

La carène du planeur définissant le volume sec est constituée de trois tronçons indépendants encastrés par éléments filetés (voir Figure 15) : la coque avant, la coque centrale et la coque arrière. Ces trois éléments sont fabriqués en alliage d'aluminium (6061 T6), dont la limite d'élasticité élasticité (R_e) est égale à 270 MPa et la contrainte à rupture (R_m) égale à 310 MPa.

La Figure 16 présente une liste non exhaustive des types de simulation numérique possibles avec le module de SOLIDWORKS™.

Q35. Quel type de simulation numérique envisagez-vous pour étudier les contraintes et les déformations de la coque en situation de plongée ?

IV.2.1 Construction du modèle numérique

La construction du modèle de simulation consiste à définir pour la configuration étudiée (planeur en position horizontale à 1000 m de profondeur) :

- le cas de chargement,
- les contraintes entre les différentes pièces constituant la coque,
- les conditions aux limites en déplacement.

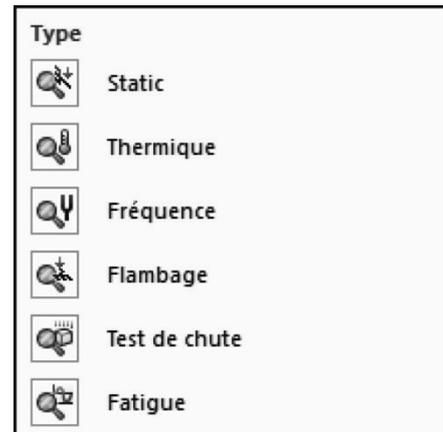


Figure 16 – Types de simulation numérique

La coque centrale est supposée soumise uniquement aux actions de pression exercées par l'eau salée. La masse volumique de l'eau salée sera supposée constante et égale à la masse volumique à 1000 m de profondeur :

$$\rho_{1000} = 1028 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Sous l'hypothèse d'une masse volumique constante, le principe fondamental de l'hydrostatique s'écrit :

$$p + \rho g z = \text{cste}$$

où p représente la pression du fluide à la profondeur z , ρ sa masse volumique et g l'accélération de la pesanteur.

Q36. Donner l'expression littérale de la variation de pression Δp en fonction de la variation de profondeur Δz . En déduire la valeur numérique de la pression exercée sur la coque centrale à 1000 m de profondeur.

Le logiciel de simulation propose plusieurs cas de chargement et de conditions aux limites en déplacement. Ces différentes possibilités sont présentées dans les tables Table 2 et Table 3 du document réponse **DR3**.

La géométrie du planeur étant symétrique, l'étude numérique est réalisée sur un quart de la structure afin d'optimiser le temps de calcul (voir Figure 17).

Q37. Définir le(s) type(s) de chargement ainsi que l'(les) entité(s) géométrique(s) sur laquelle(lesquelles) il(s) s'applique(nt) en complétant la Table 2 du document réponse **DR3**.

Q38. Définir également la(les) condition(s) limite(s) en déplacement ainsi que l'(les) entité(s) géométrique(s) sur laquelle(lesquelles) elle(s) s'applique(nt) en complétant la Table 3 du document réponse **DR3**.

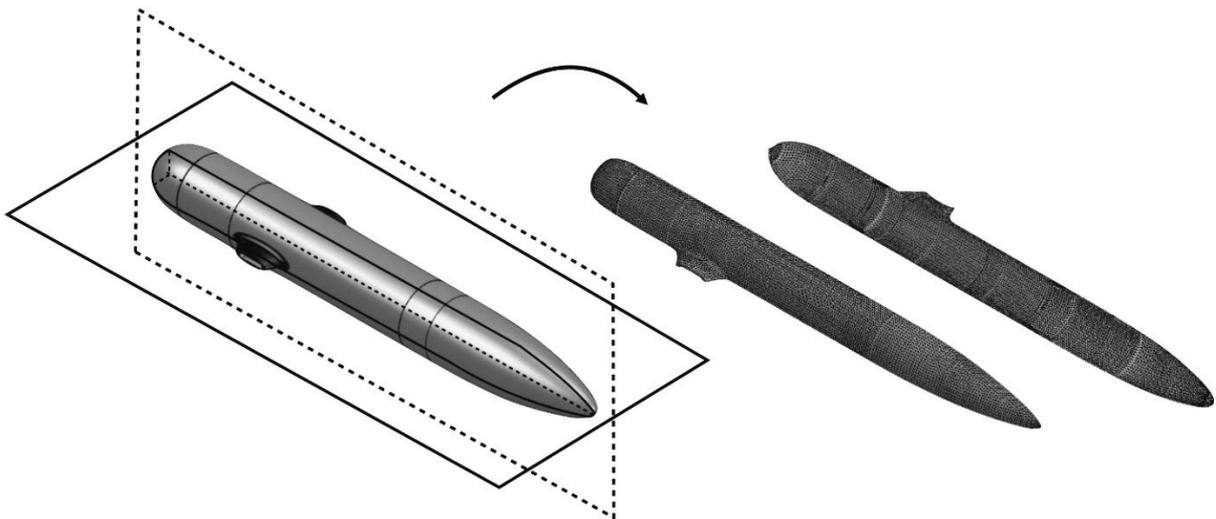


Figure 17 – Étude numérique d'un quart de la coque du planeur

La coque du planeur est constituée de trois pièces indépendantes encastrées entre-elles par éléments filetés (voir **Figure 18**). Il est donc également nécessaire de préciser les contraintes de contact entre ces éléments. Trois options sont proposées :

- contact sans pénétration : contact sans interférences entre les entités ;
- contact avec pénétration : contact avec interférences possibles ;
- contact solidaire : les deux entités sont solidaires

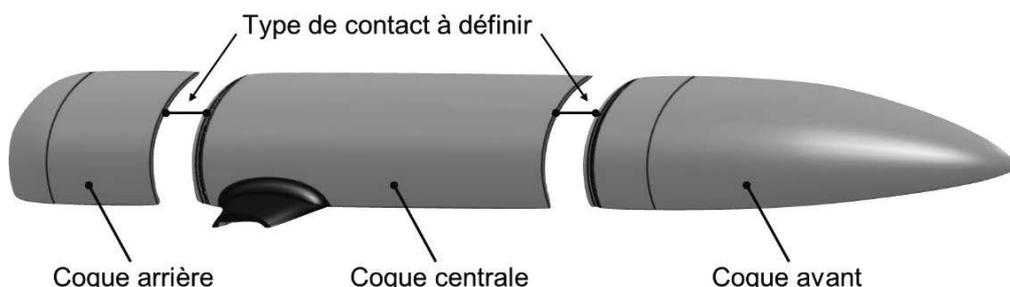


Figure 18 – Vue éclatée de la coque du planeur sous-marin

Q39. Quelle option semble la plus pertinente pour modéliser le comportement des contacts réels entre les différentes parties de la coque ?

IV.2.2 Analyse des résultats de simulation

Une première simulation est exécutée mais le calcul est stoppé en cours d'exécution. Le message d'erreur suivant est renvoyé :

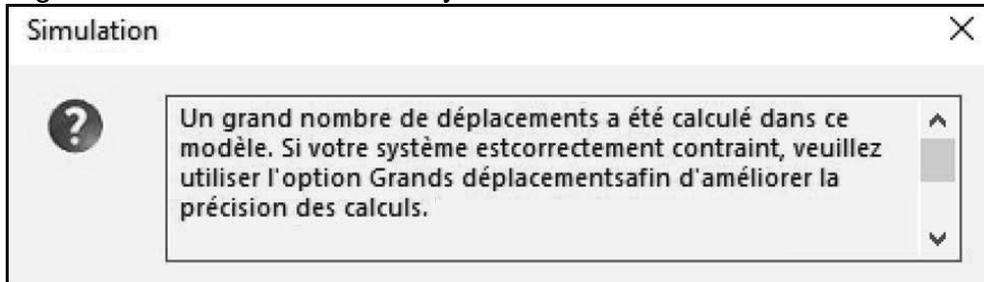


Figure 19 – Message d'erreur renvoyé en cours d'exécution du calcul

Q40. Expliquer précisément la(les) cause(s) possible(s) de ce message d'erreur.

Une fois la mise au point du modèle finalisée, une nouvelle simulation est exécutée. Les résultats sont présentés sur le document **DT5**.

Q41. Commenter les résultats obtenus. Justifier en particulier la localisation de la contrainte maximale.

Q42. Conclure sur la résistance et l'étanchéité de la coque. Le dépassement de la limite élastique est-il le risque prépondérant pour ce type d'application ?

IV.3 Conception de la liaison encastrement entre la coque centrale et les ailes

L'objectif de cette partie est de proposer une solution pour la réalisation de la liaison encastrement entre la coque centrale du planeur, réalisée en alliage d'aluminium, et les ailes, fabriquées en mousse polyuréthane (voir Figure 20).

Les ailes du planeur, contenant les antennes GPS, sont réalisées en mousse polyuréthane par surmoulage. La mousse polyuréthane est injectée directement sur les antennes initialement positionnées dans le moule de fabrication. Les ailes sont ensuite assemblées en liaison encastrement avec la coque en aluminium.

La conception de liaison encastrement entre les deux éléments doit permettre d'assurer l'étanchéité de la coque du planeur et la reprise des efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur les ailes. Pour permettre la maintenance des éléments de transmissions de données, cette liaison doit être démontable.

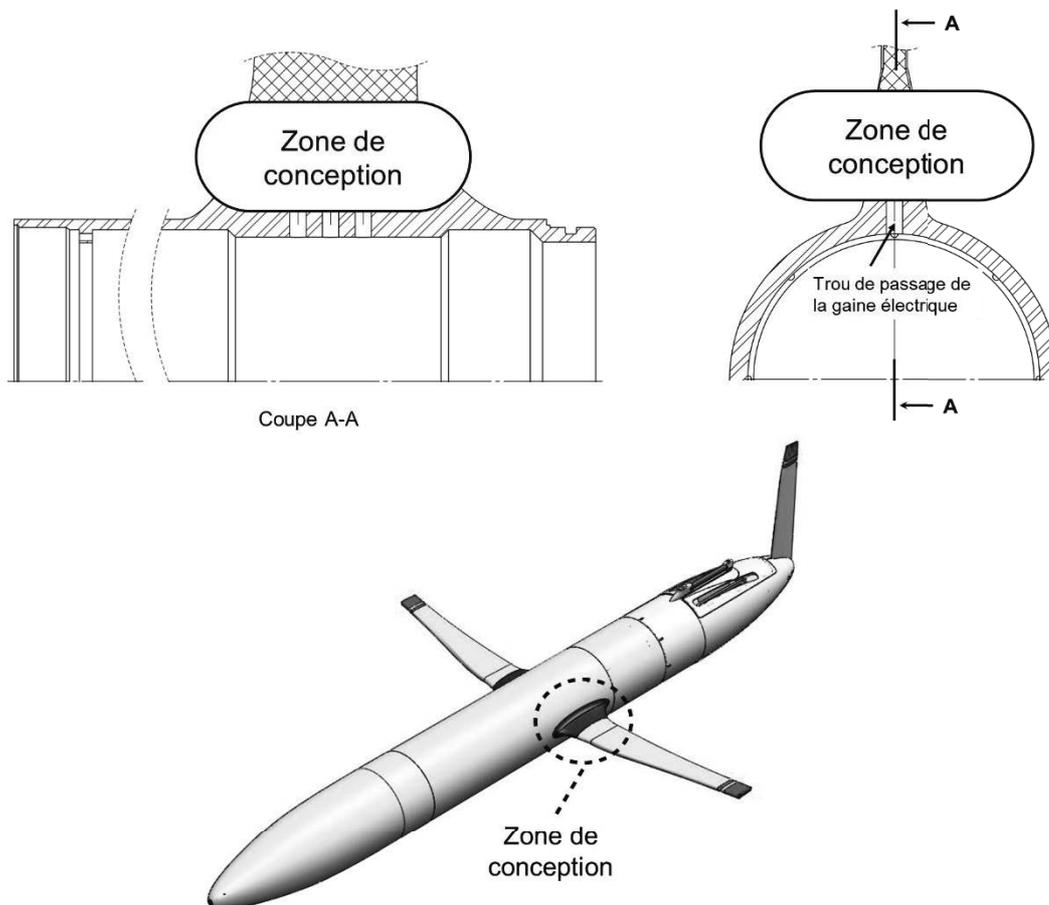


Figure 20 – Zone de conception de la liaison encastrement entre l'aile et la coque centrale

Q43. Sur le document réponse **DR4**, dessiner « à main levée » ou aux instruments, un croquis représentant votre proposition de solution. Celle-ci devra être compatible avec les contraintes de conception imposées, en particulier les contraintes liées aux procédés de fabrication et au matériau constituant chaque pièce.

IV.4 Cotation fonctionnelle liée à l'étanchéité

Objectif : Analyser des spécifications géométriques liées à l'étanchéité entre les différents éléments de la coque.

La coque de l'hydroplaneur est réalisée en trois parties. L'étanchéité entre chaque élément est assurée par des joints toriques comme le montre la Figure 21 pour la jonction entre la coque avant et la coque centrale.

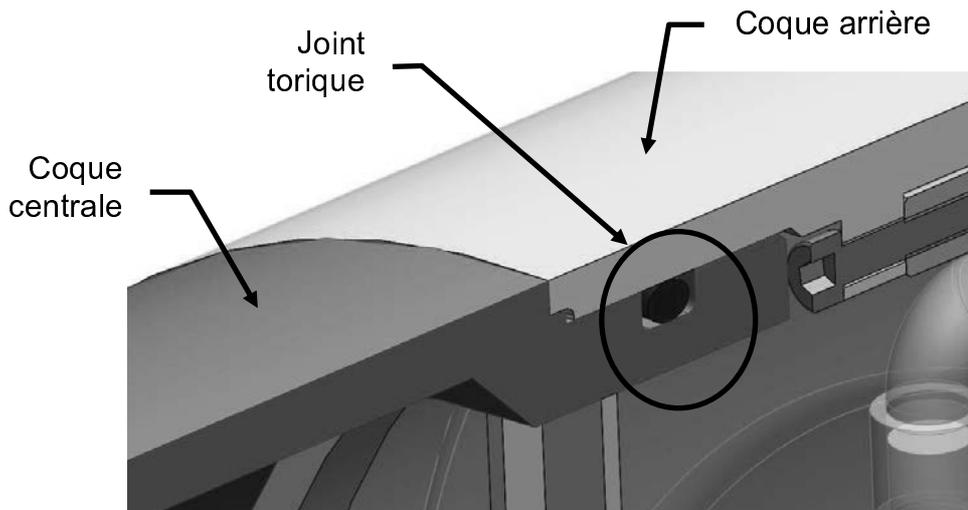


Figure 21 – Détail de la jonction entre la coque centrale et la coque arrière.

La condition fonctionnelle d'étanchéité se traduit sur le dessin de définition de la coque centrale de l'hydroplaneur par une cotation dont la Figure 22 donne une vue partielle.

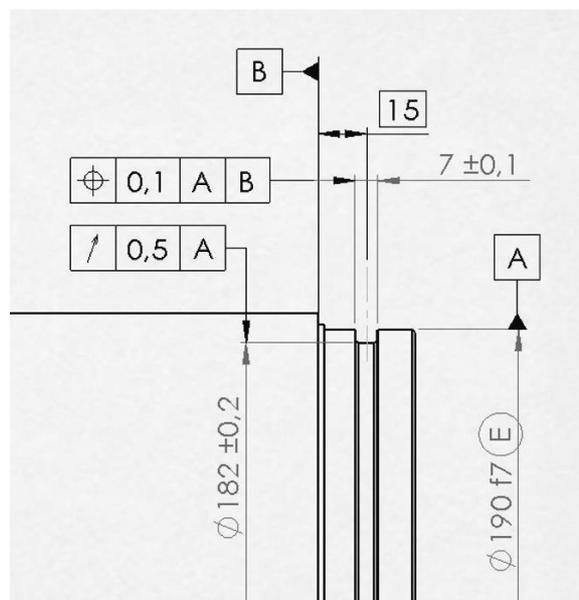


Figure 22 – Vue partielle de la cotation de la rainure du joint torique de la coque centrale de l'hydroplaneur

Q44. Donner la signification des deux spécifications géométriques indiquées sur l'extrait du dessin de définition (Figure 22) en utilisant les tableaux d'analyse fournis sur les documents réponses **DR5-1** et **DR5-2**.

V.CONCLUSION VIS-A-VIS DE LA PROBLEMATIQUE

Objectif : valider la quantité d'énergie embarquée et proposer des solutions technologiques permettant de réduire la consommation énergétique du planeur.

V.1 Validation de la quantité d'énergie embarquée

La table ci-dessous rappelle la répartition des énergies consommées par les différentes chaînes fonctionnelles du système lors d'un cycle de fonctionnement nominal.

Répartition des énergies consommées

Carte électronique	7000 J
Transmission des données	8900 J
Déplacement des packs de batteries	600 J
Consommation de la pompe hydraulique	8800 J

L'énergie stockée dans une batterie peut être calculée à partir de la relation : $E = C \times U$, où C désigne la capacité (en A·s) et U la tension nominale de la batterie à vide (en V).

Q45. À partir des informations fournies dans le document DT6, déterminer le nombre de cellules nécessaire pour satisfaire le cahier des charges. La quantité choisie par le constructeur est-elle suffisante ?

V.2 Analyse des axes d'optimisation énergétiques

Après la consommation énergétique liée à la transmission de données, l'alimentation en énergie hydraulique constitue un des postes les plus énergivores.

Q46. Donner deux paramètres influant sur la valeur du rendement d'une pompe hydraulique. Préciser les deux principaux phénomènes physiques qui sont à l'origine des pertes énergétiques dans la pompe. Justifier succinctement.

La **Figure 23** synthétise les résultats d'une campagne d'essais réalisée sur la pompe hydraulique.

Q47. À partir de l'analyse des courbes de la **Figure 23**, préconiser un réglage nominal permettant d'optimiser le rendement de la pompe hydraulique. Justifier.

Q48. Dans le cadre d'une démarche d'optimisation énergétique, proposer une ou plusieurs solutions techniques qui permettraient d'augmenter l'autonomie de l'hydroplaneur.

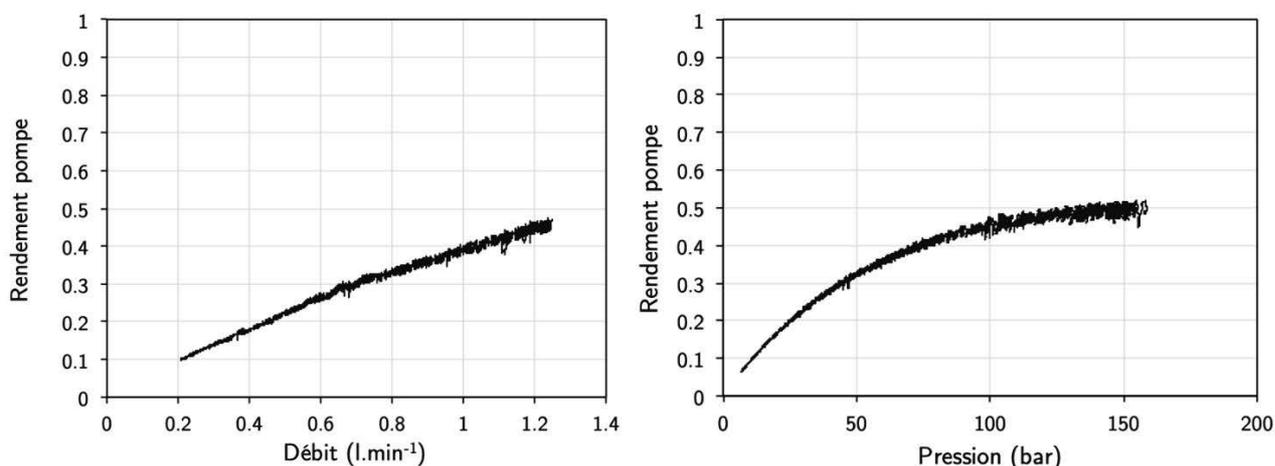
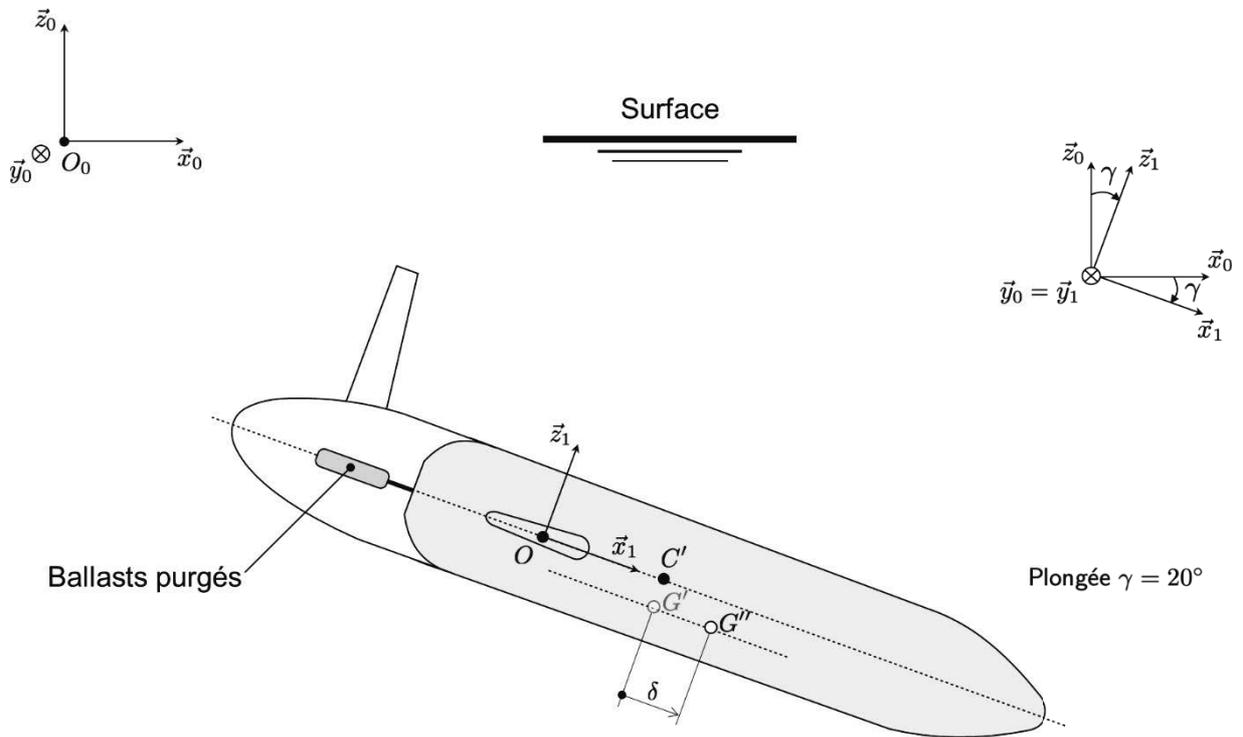


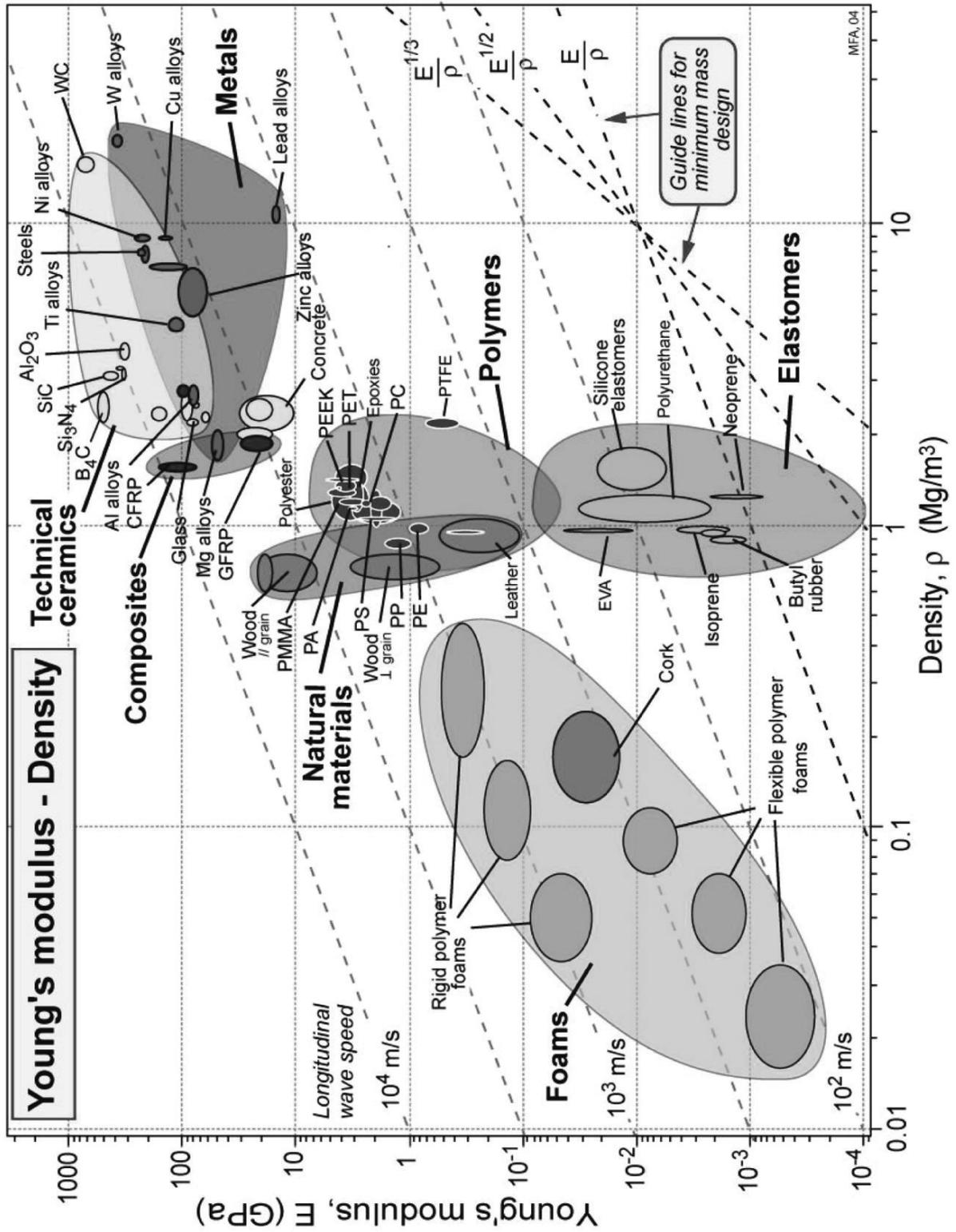
Figure 23 – Évolution du rendement de la pompe hydraulique en fonction du débit (pression de roulement constante de 100 bar) et de la pression de fonctionnement (débit fixe réglé à $1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$)

Fin de l'épreuve

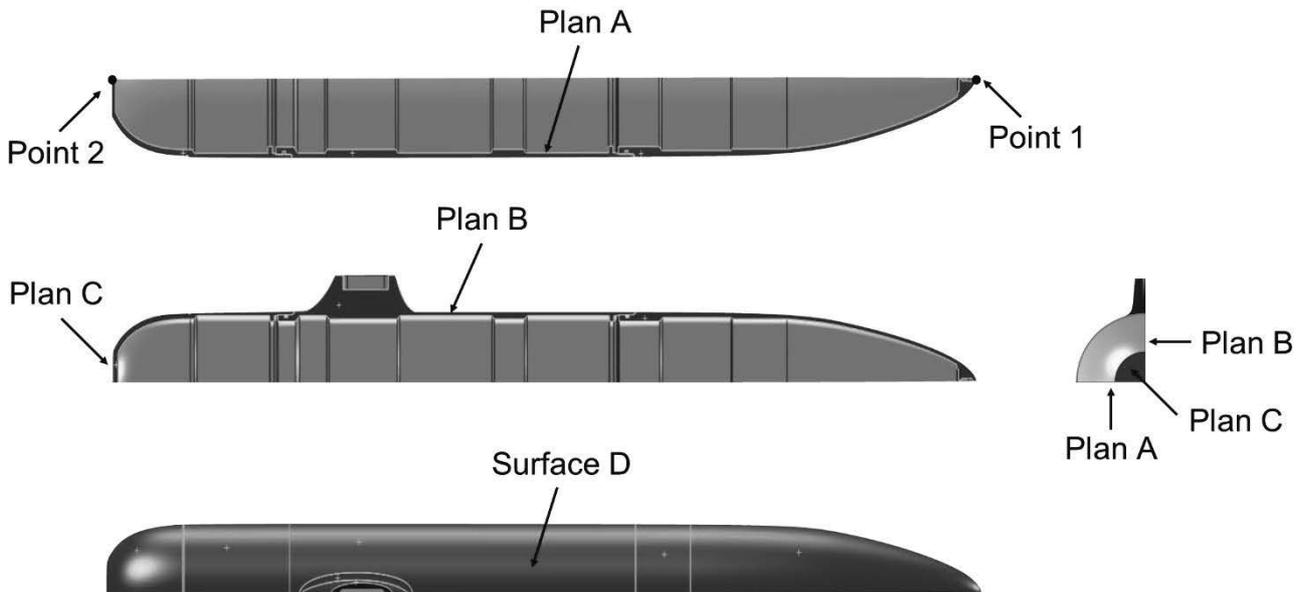
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR1





Document réponse DR3



Q37

	Plan A	Plan B	Plan C	Surface D
↓ Force				
⊗ Couple				
≡ Pression				
⊕ Gravité				
⊗ Force centrifuge				
⊕ Chargement de palier				

Table 2 – Définition du chargement

Q38

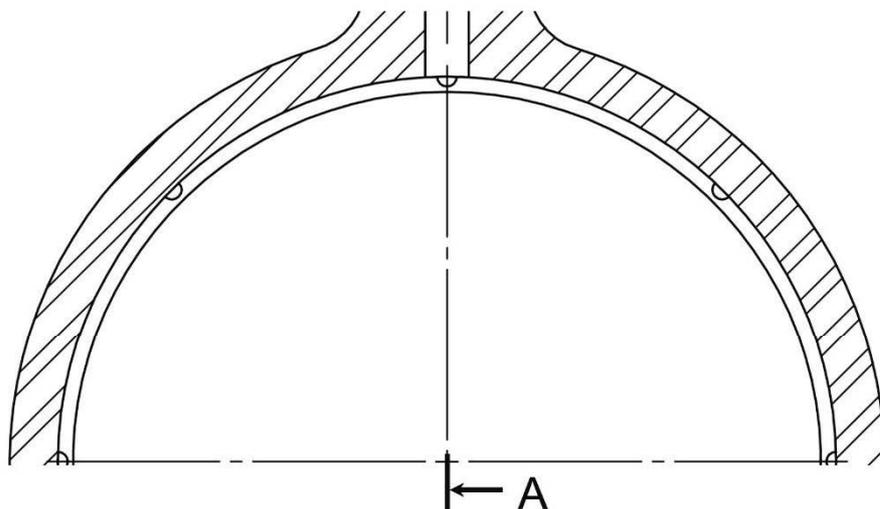
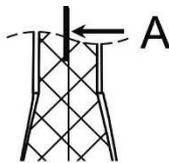
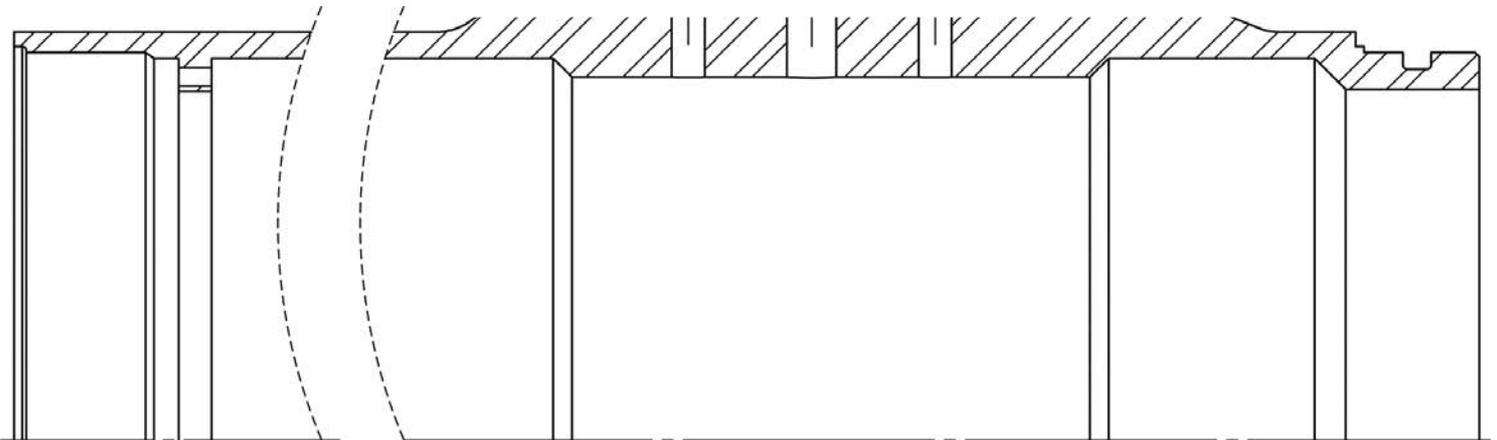
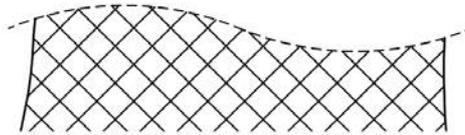
	Plan A	Plan B	Plan C	Surface D	Point 1	Point 2
⊗ Géométrie fixe						
△ Appui plan						
⊕ Pivot fixe						
⊕ Appui élastique						

Table 3 – Définitions des conditions limites en déplacements

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Document réponse DR4

A - A

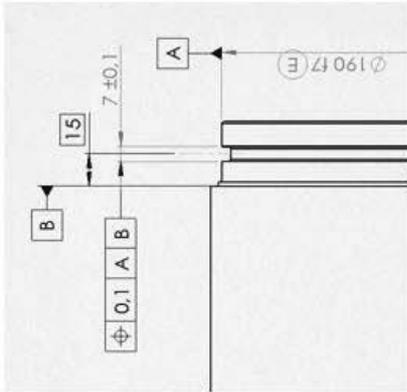


Echelle 1:2

29/37

Tournez la page S.V.P.

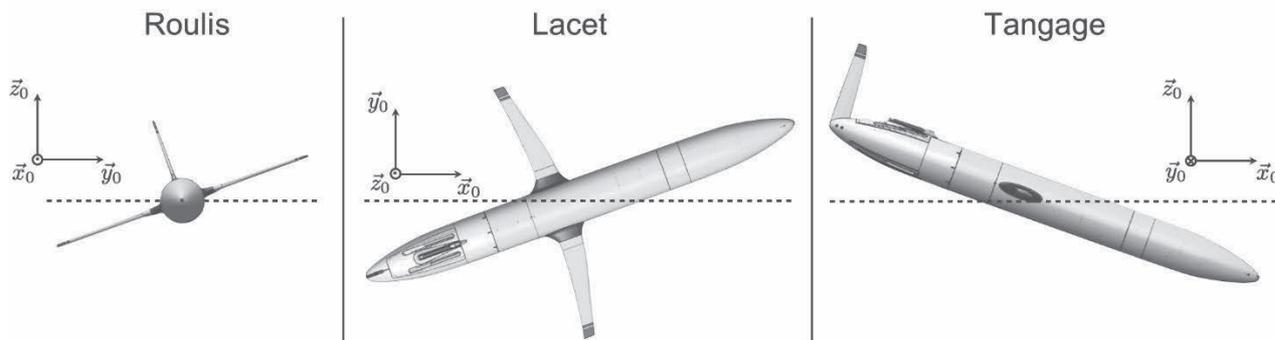
Document réponse DR5-1

Tolérancement Normalisé		Analyse d'une spécification par zone de tolérance			
		Eléments non idéaux		Eléments idéaux	
Symbole de la spécification					
Nom de la spécification :					
Type de spécification :	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Forme</i> <input type="checkbox"/> • <i>Orientation</i> <input type="checkbox"/> • <i>Position</i> <input type="checkbox"/> • <i>Batterment</i> <input type="checkbox"/> 	Elément(s) tolérancé(s)	Elément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance
Condition de conformité : l'élément tolérancé doit se situer tout entier dans la zone de tolérance		<ul style="list-style-type: none"> • unique <input type="checkbox"/> • groupe <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> • unique <input type="checkbox"/> • multiples <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> • simple <input type="checkbox"/> • commune <input type="checkbox"/> • système <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> • simple <input type="checkbox"/> • composée <input type="checkbox"/>
Schéma Extrait du dessin de définition					
					

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DT1 – Glossaire

Roulis / tangage / Lacet



Assiette

L'assiette est l'angle caractérisant l'inclinaison autour de l'axe de tangage, c'est-à-dire l'angle que fait l'axe longitudinal de l'appareil avec l'horizontale.

Carène

La carène d'un navire ou d'un sous-marin est définie comme la partie immergée de la coque.

Centre de carène

Le centre de carène, usuellement noté C, correspond au centre de gravité du volume de fluide déplacé par la carène du navire ou du sous-marin. C'est le point d'application de la poussée d'Archimède.

Poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est la force subie par un corps soumis à un champ de gravité et plongé en tout ou en partie dans un fluide. Elle résulte des forces de pression du fluide sur la carène. Elle est orientée verticalement du bas vers le haut et son intensité est égale au poids du liquide déplacé :

$$\vec{F}_{Arch} = -\rho V \vec{g}$$

où V désigne le volume de fluide déplacé.

Flottabilité

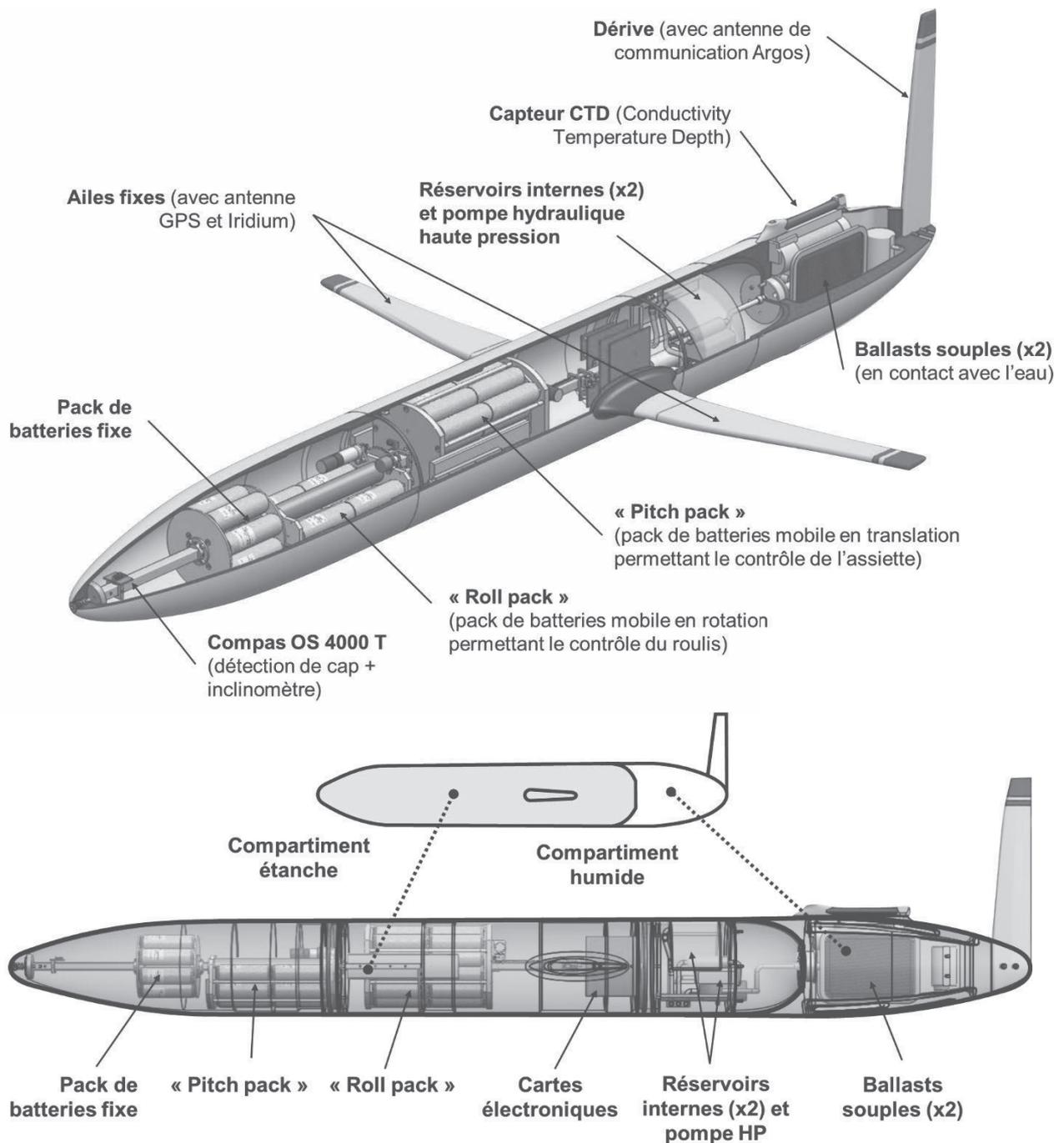
La flottabilité d'un corps en immersion dans un fluide, notée (Φ) et exprimée en kg, est définie comme la différence entre l'intensité de la poussée d'Archimède et celle de l'action de la pesanteur. Elle s'exprime donc en fonction de la masse du corps (m), de son volume immergé (V) et de la masse volumique de l'eau (ρ) :

$$\Phi = \rho V - m$$

Conversion nœud km/h

Le nœud est une unité de vitesse couramment utilisée en navigation maritime. 1 nœud correspond à 1 mille marin par heure, soit $1,852 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

DT2 – Architecture et caractéristiques générales



Caractéristiques générales	
Longueur : 2000 mm	Coque étanche : Aluminium 6061 T6
Diamètre : 200 mm	Coque arrière : Polypropylène
Envergure : 1200 mm	Ailes et dérive : Uréthane moulé
Masse totale : $M_T = 52,15$ kg	Volume de la partie « sèche » : $V_s = 0,05053$ m ³
Masse du « pitch pack » : $m_p = 7,14$ kg	Volume des ballasts : $V_b = 700$ cm ³
Masse du « Roll pack » : $m_r = 4,94$ kg	Profondeur de plongée : 1000 m

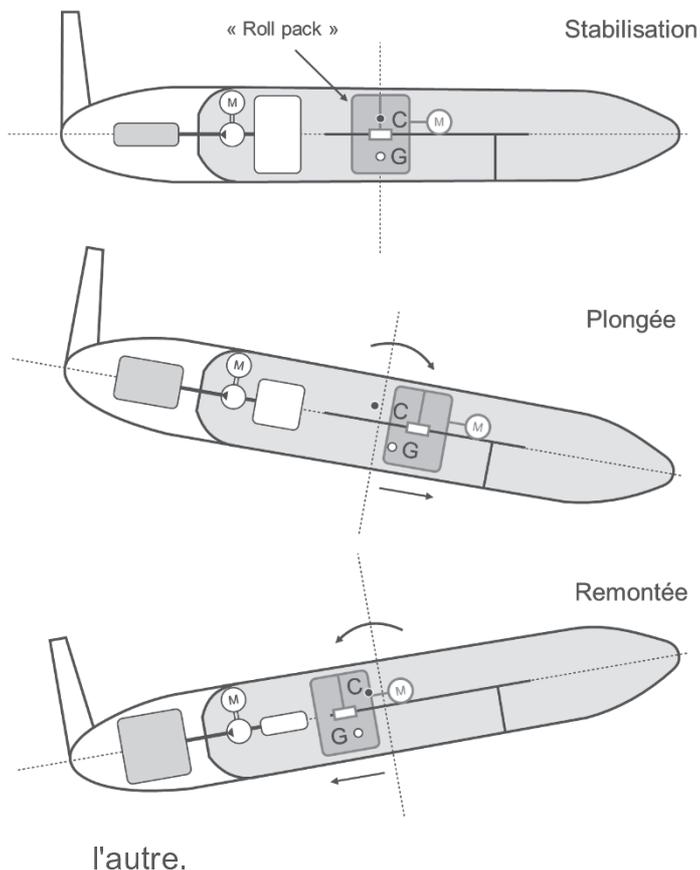
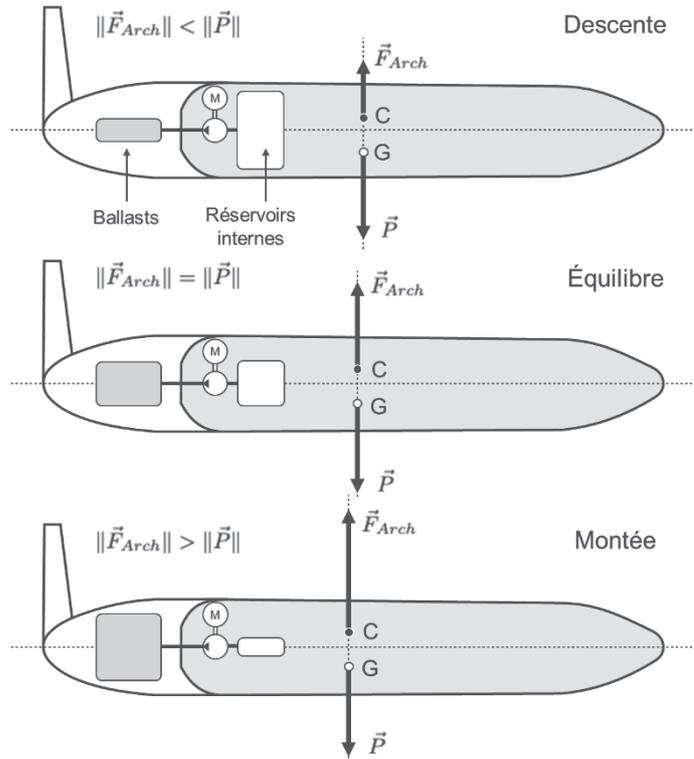
DT3 – Déplacements du planeur dans le plan vertical

Phase de montée ou de descente

Le contrôle de la montée ou de la descente du planeur est basé sur le principe de la poussée d'Archimède (voir **document DT1**).

Lorsque le volume total immergé du planeur diminue, la poussée d'Archimède diminue et, si celle-ci est inférieure au poids, l'engin descend. Lorsque le volume total immergé augmente jusqu'à ce que la poussée d'Archimède soit supérieure au poids, le planeur remonte.

La variation du volume immergé de l'appareil est obtenue par le transfert des 700 cm³ d'huile entre les réservoirs internes et les ballasts externes. La position du centre de carène C varie en fonction du transfert des 700 cm³ d'huile entre les réservoirs internes et les ballasts.



Phase d'inclinaison (tangage)

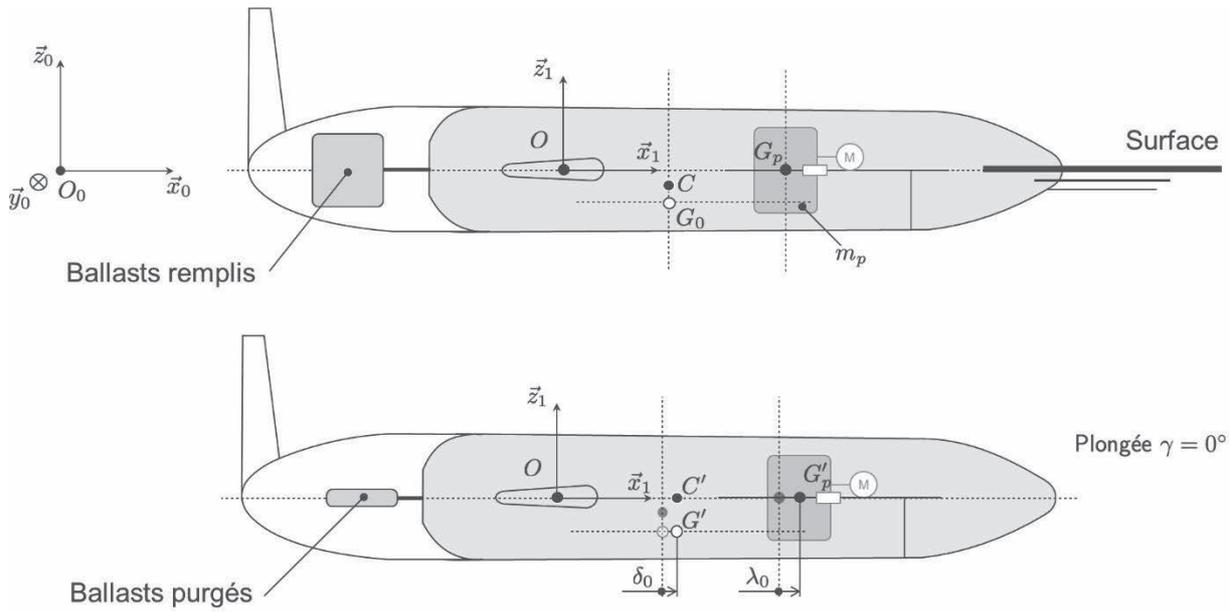
Le mouvement d'inclinaison du planeur est obtenu par modification de la position longitudinale du centre de gravité G par rapport à celle du centre de carène C.

La position du centre de gravité de l'appareil est modifiée par déplacement d'une masse à l'intérieur du planeur le long de l'axe longitudinal (ici un pack de batteries motorisé « Roll pack »).

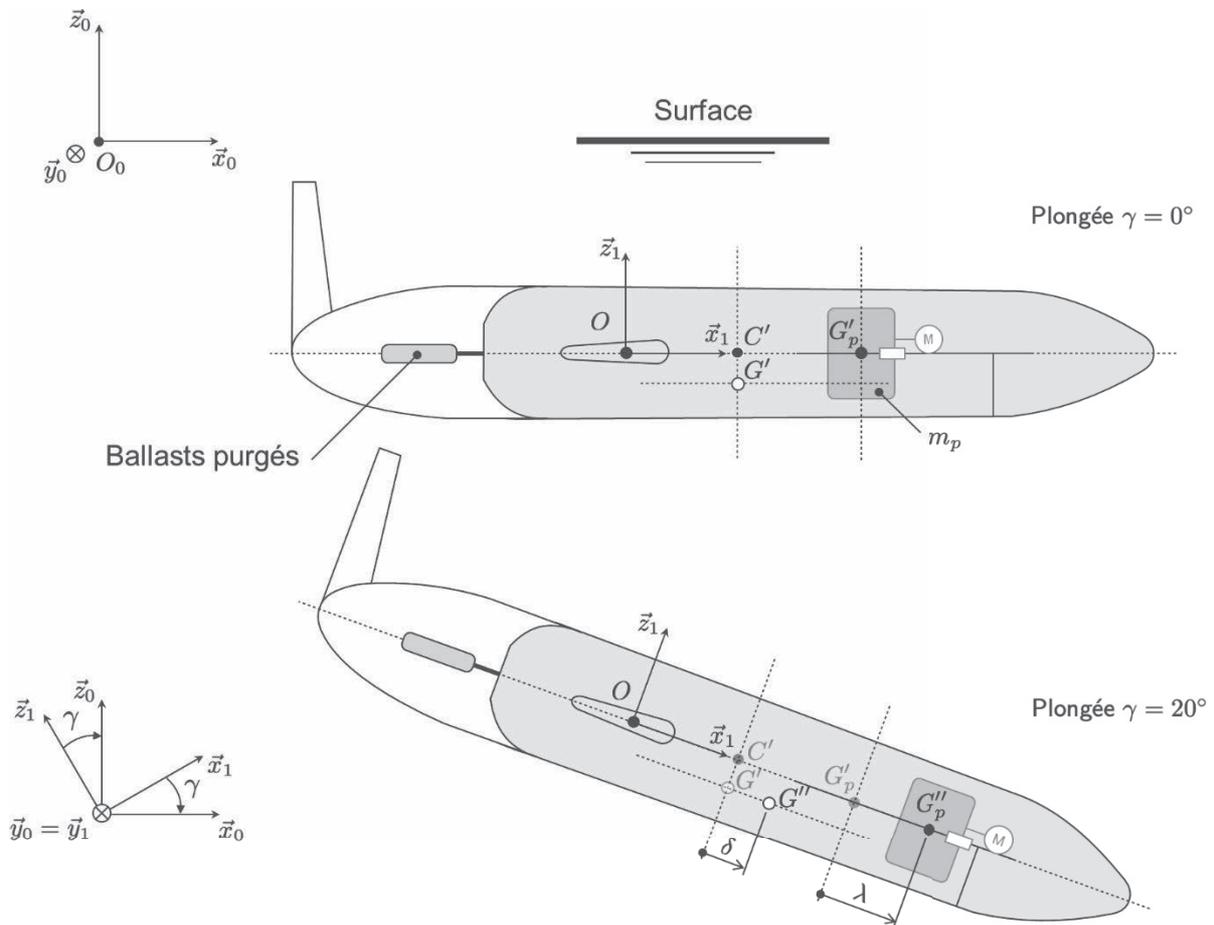
Un couple de basculement se crée et entraîne une modification de l'inclinaison du planeur. Soumis aux seules actions de la poussée d'Archimède et de la pesanteur, le planeur atteint une position d'équilibre lorsque les centres de gravité G et de carène C sont à la verticale l'un de l'autre.

DT4 – Modélisation du planeur en phase de plongée

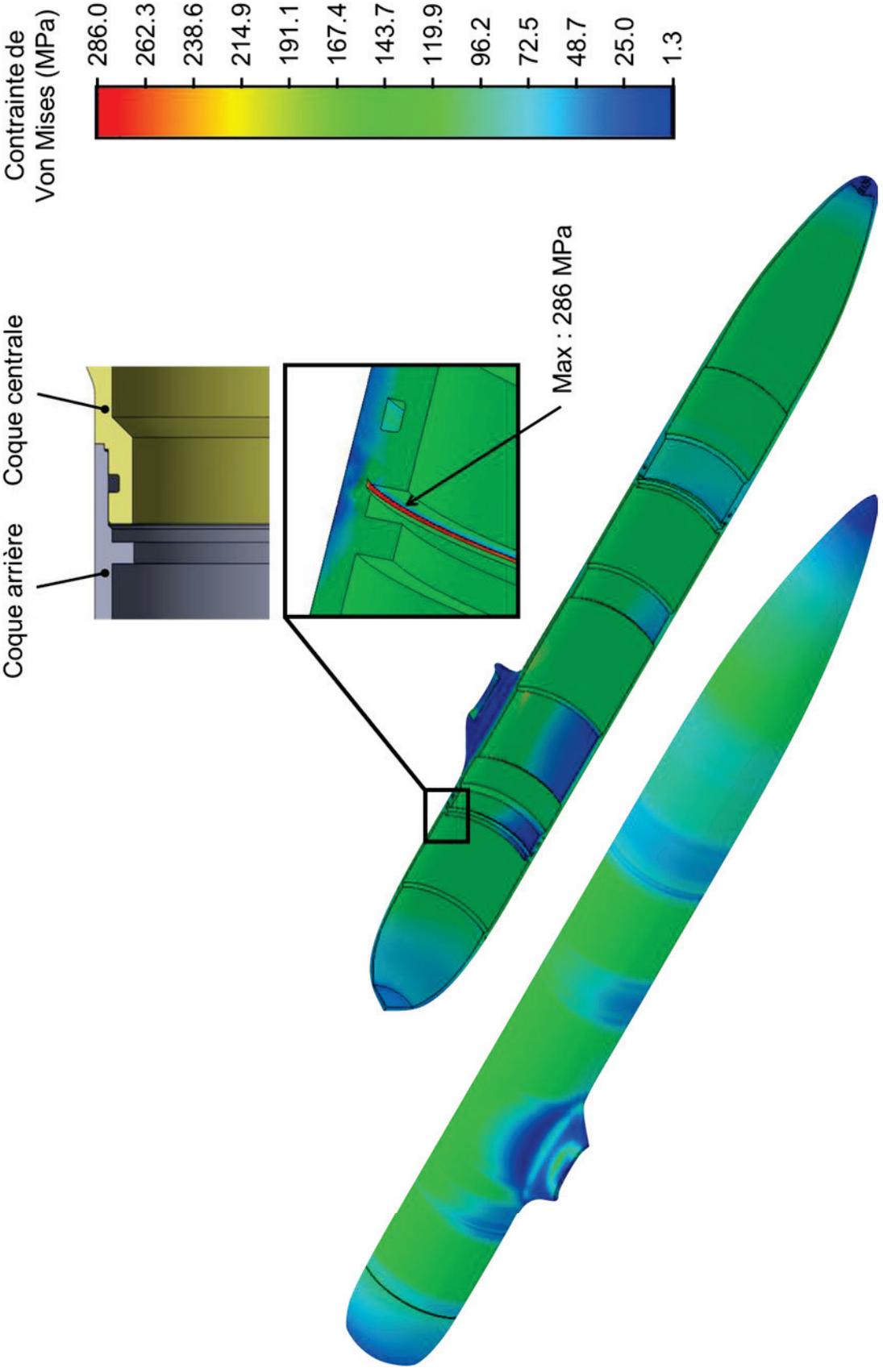
Début de la phase de plongée : purge des ballasts



Phase de plongée : le planeur est en descente à vitesse constante



DT5 – Champ des contraintes de Von Mises obtenu par Simulation numérique



DT6 – Diagramme de définition de blocs de l'hydroplaneur

