

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2016

—

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice est autorisé***Consignes aux candidats**

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours

C	G	L
---	---	---

Section/Option

S	C	I	E	N
---	---	---	---	---

Epreuve

0	0	1	0	1
---	---	---	---	---

Matière

S	C	I	N
---	---	---	---

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

Session 2016

Sciences de l'ingénieur

Durée 5 heures

Aucun document autorisé.

Le matériel autorisé comprend toutes les calculatrices de poche, y compris les calculatrices programmables alphanumériques ou à écran graphique, à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante, conformément à la circulaire n° 99-181 du 16 novembre 1999.



Exploration des océans à 2 000 m de profondeur

Constitution du sujet

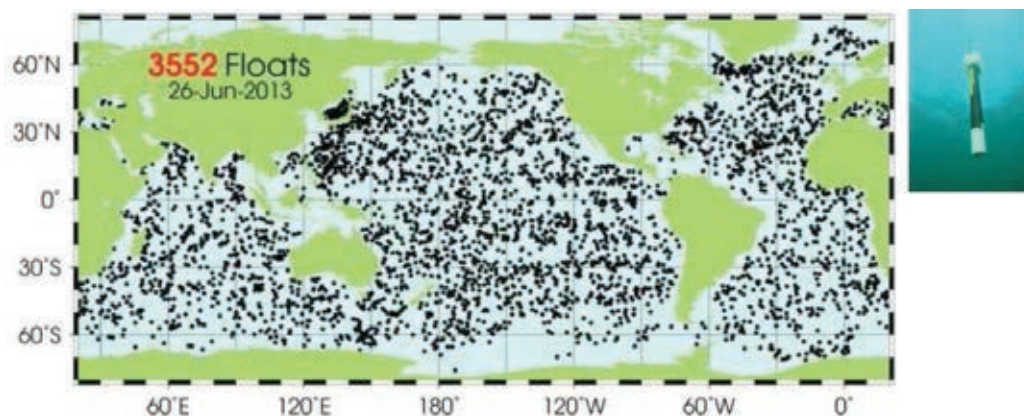
- **texte** pages 2 à 28
(mise en situation et questions à traiter par le candidat)
- **dossier technique**..... pages 29 à 33
- **documents réponses** pages 34 à 36

Les documents réponses DR1 et DR2 (pages 35 et 36) seront à rendre agrafés avec les copies.

PRÉSENTATION DU CONTEXTE DE L'ÉTUDE

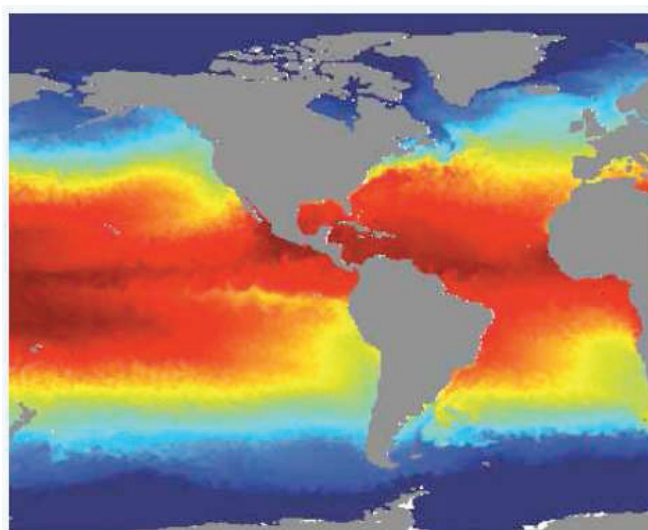
1. Présentation du programme Argo

Arvor est un flotteur profileur développé par Ifremer. Le flotteur Arvor étudié dans ce sujet a été développé pour le programme Argo. Dans le cadre de ce projet, plus de 3 000 flotteurs profileurs ont été déployés. Ces flotteurs mesurent la température et la salinité des océans jusqu'à 2 000 m de profondeur, permettant ainsi une surveillance constante du climat des océans. Leurs mesures sont transmises par liaison satellite.



Déploiement des flotteurs Arvor dans le monde

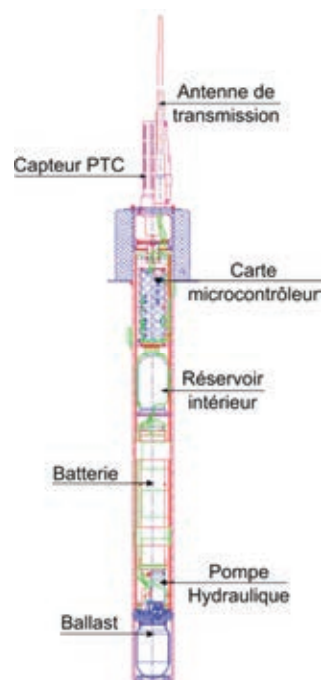
Toutes les mesures Argo sont relayées et publiées dans les heures qui suivent leur réception. Les données recueillies permettent de décrire quantitativement l'évolution de la partie supérieure des océans et de construire des modèles de variabilité du climat des océans incluant chaleur, transport et stockage d'eau douce. Ces données d'Argo sont utilisées pour l'initialisation des modèles couplés d'océanographie et de prévision, ainsi que pour l'essai de modèles dynamiques. Un des objectifs principaux d'Argo est l'étude de la variabilité et de la prévisibilité du climat à l'échelle saisonnière ou décadaire (10 jours).



Cartographie des températures (source : Mercator Océan)

2. Présentation du flotteur Arvor

Le flotteur Arvor est un instrument sous-marin autonome qui mesure la température et la salinité au cœur des océans.



Description du flotteur Arvor

Il est programmé à l'avance et ensuite déployé par des navires océanographiques. Il réalise des cycles de mesures décennales pendant de nombreuses années, jusqu'à épuisement de ses batteries.

Chaque cycle comporte une descente de quelques heures vers une immersion de 1500 m, où le flotteur dérive pendant environ 9 jours, mesurant régulièrement la température et la salinité. Puis, il plonge jusqu'à 2000 m, immersion à laquelle il démarre un profil de remontée en effectuant des mesures tous les mètres jusqu'à la surface. Dès son arrivée en surface (émersion), il transmet ses données aux satellites puis entame le cycle suivant. La description du cycle du flotteur est illustrée dans le document technique DT1.

Le schéma de principe du flotteur Arvor du document technique DT2 illustre le fonctionnement du flotteur, les actions qu'il doit réaliser et ses organes associés.

Le bloc métrologie présente les équipements du flotteur permettant de réaliser les mesures de température et de salinité. Trois capteurs (température, pression et conductivité) sont connectés à une carte d'acquisition, elle-même connectée à un microcontrôleur qui mémorise les mesures réalisées pendant le cycle du flotteur.

Le bloc émission permet de transmettre les données mesurées aux satellites.

Le bloc hydraulique permet le déplacement du flotteur lors d'une descente et d'une remontée. Le flotteur est équipé d'un ballast rempli d'huile en contact avec l'eau. Le remplissage ou le vidage du ballast permet de faire varier le volume du flotteur et donc sa masse volumique. Le principe d'Archimède est rappelé ci-dessous :

- si la masse volumique globale du flotteur¹ totalement immergé est supérieure à celle de l'eau de mer, le flotteur coule ;
- si la masse volumique globale du flotteur totalement immergé est inférieure à celle de l'eau de mer, le flotteur remonte ;
- si la masse volumique globale du flotteur totalement immergé est égale à celle de l'eau de mer, le flotteur est en équilibre.

Dès lors, pour faire descendre le flotteur, il faut augmenter sa masse volumique donc diminuer le volume du ballast. Une électrovanne, commandée par un transistor de puissance, permet la circulation de l'huile du ballast vers un réservoir intérieur. Pour faire remonter le flotteur, il faut remplir le ballast pour diminuer la masse volumique du flotteur. Une pompe, entraînée en rotation par un moteur à courant continu et un multiplicateur, permet la circulation de l'huile du réservoir intérieur vers le ballast.

3. Problématique générale du sujet

Cette étude porte sur la validation des étapes d'ingénierie de conception d'un flotteur Arvor pour répondre aux exigences d'autonomie fixées par le programme international Argo. Elle vise à déterminer la consommation énergétique des différents organes du flotteur lors :

- de l'acquisition des mesures ;
- de la transmission des données ;
- du déplacement du flotteur.

D'autres organes sont également consommateurs d'énergie comme l'électrovanne permettant la descente du flotteur ou des capteurs internes au flotteur. Ces consommations étant minimales, elles sont négligées dans cette étude.

L'objectif final est de valider le dimensionnement de la batterie actuellement utilisée pour ce flotteur.

¹ $\rho_{\text{flotteur}} = \frac{m_{\text{flotteur}}}{V_{\text{flotteur}}}$, avec m_{flotteur} , masse du flotteur et V_{flotteur} , volume du flotteur.

PARTIE 1 – ANALYSES FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE DU FLOTTEUR

Objectif : analyser le fonctionnement du flotteur lors de la remontée.

Le flotteur Arvor a pour principal objectif de réaliser des mesures de température et de salinité lors d'un cycle de fonctionnement.

La majorité des mesures est réalisée pendant la phase de remontée du flotteur.

Le schéma de principe du flotteur Arvor du document technique DT2 illustre le fonctionnement du flotteur, notamment lors de sa remontée.

Question 1. Compléter le document réponse DR1 décrivant la chaîne d'information et la chaîne d'énergie du flotteur lors de sa remontée à la surface.

Question 2. Dans la chaîne d'énergie, **préciser**, sur le document réponse DR1, les formes d'énergie mises en jeu (mécanique, hydraulique ou électrique).

PARTIE 2 – ÉTUDE DES CAPTEURS EMBARQUÉS DANS LE FLOTTEUR

Objectif : valider le choix des capteurs et calculer leur consommation énergétique durant la phase d'acquisition.

Le flotteur doit mesurer durant son cycle la température et la salinité de l'eau de mer entre la surface et 2 000 m de profondeur. La salinité est la masse en gramme de résidu solide contenu dans un kilogramme d'eau de mer. Elle se mesure en $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ou en psu (practical salinity unit) sachant que $1 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{psu}$. C'est une fonction de la conductivité, de la pression et de la température.

Ainsi, le flotteur est équipé d'un capteur PTC (pression, température, conductivité) afin de réaliser ces mesures.



Ces trois capteurs sont situés sur le haut du flotteur.

Afin d'assurer une circulation à vitesse constante de l'échantillon d'eau de mer lors des mesures, une micro pompe à entraînement magnétique est activée.

Les trois capteurs sont interfacés sur une même carte électronique qui communique par liaison série RS232 avec le microcontrôleur du flotteur.



Les technologies utilisées pour les capteurs sont les suivantes :

- capteur de pression à jauges d'extensométrie ;
- capteur de température à thermistance ;
- capteur de conductivité à électrodes.

Le cahier des charges impose les performances suivantes pour les trois capteurs :

	Pression	Température	Salinité
Gamme	0 à 210 bar	-2 à +35 °C	0 à 42 psu
Précision	$\pm 0,24$ bar	$\pm 0,0020$ °C	$\pm 0,010$ psu
Résolution	0,1 bar	0,0010 °C	0,0010 psu

2-1 Validation de la précision des mesures

Objectif : vérifier que la précision des mesures est conforme avec les exigences du cahier des charges.

Des essais en laboratoire ont été réalisés pour vérifier la précision des mesures compte tenu des exigences du cahier des charges. Le protocole expérimental ainsi que les résultats des mesures sont décrits dans le document technique DT3.

Question 3. Calculer la précision des mesures réalisées en laboratoire. **Conclure** sur le respect de l'exigence de précision du cahier des charges, pour la température et la salinité.

2-2 Mise en forme de la mesure de température

Objectif : valider le circuit d'adaptation du capteur de température.

La mesure de température est réalisée par un capteur à thermistance. La résistance de la thermistance varie à l'inverse de la température suivant la loi :

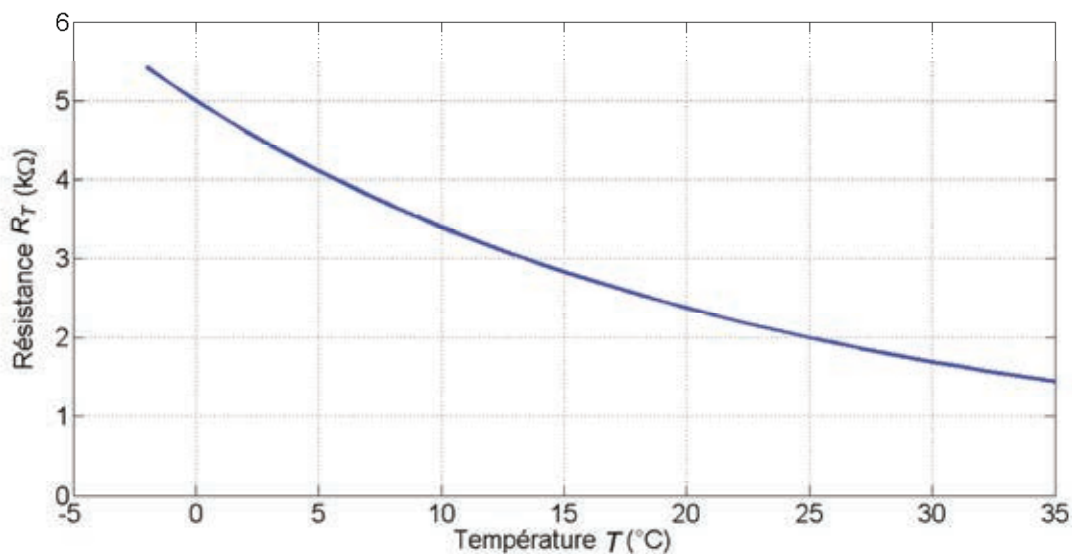
$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

avec

- R_T , résistance à la température T ;
- R_0 , résistance à la température $T_0 = 273,16$ K ;
- T , température à laquelle R_T est mesurée, exprimée en K ;
- T_0 , température à laquelle R_0 a été mesurée, $T_0 = 273,16$ K ;
- B , indice de sensibilité thermique, caractéristique du matériau constituant la thermistance, exprimé en K.

Il est rappelé qu'une température de 0 degré celsius (°C) correspond à une température de 273,16 kelvins (K).

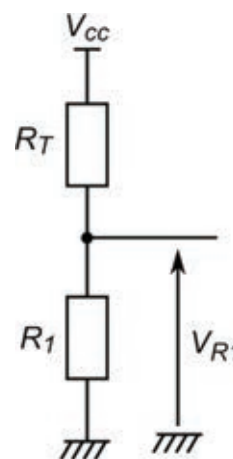
La loi de variation de la résistance R_T en fonction de la température T de la thermistance du flotteur est la suivante :



Question 4. Calculer la constante B de la loi d'évolution de la thermistance du flotteur.

Afin d'obtenir une tension de sortie variant quasi linéairement avec la température T , le montage d'adaptation ci-contre est réalisé.

La tension d'alimentation du montage est de $V_{CC} = 5 \text{ V}$.



La tension aux bornes de R_1 n'est pas une fonction linéaire de la température. Néanmoins, en réglant judicieusement R_1 , il est possible d'obtenir une tension variant quasi linéairement avec la température. Dans ce cas, la valeur optimale de R_1 s'exprime par :

$$R_1 = R_m \frac{B - 2T_m}{B + 2T_m}$$

avec

- R_m , résistance à la température T_m ;
- T_m , température au milieu de la plage de mesure (-2°C , $+35^\circ\text{C}$), exprimée en kelvins.

Question 5. Calculer la valeur de la température T_m . **En déduire** la valeur de la résistance R_m puis celle de R_1 .

Question 6. Exprimer la tension V_{R1} en fonction de R_1 , R_T et V_{CC} . **Tracer** sur le document réponse DR2 la variation de la tension V_{R1} en fonction de la température T lorsque T varie entre -2 °C et 35 °C . **Vérifier** la linéarité de la tension pour cette plage de température et **conclure** sur l'intérêt du montage.

2-3 Consommation de la carte d'acquisition

Objectif : *calculer la consommation de la carte d'acquisition durant les mesures réalisées par le flotteur.*

Le document technique DT1 présente les différentes phases du cycle du flotteur. Le flotteur n'effectue pas de mesures durant tout son cycle mais seulement pendant certaines phases. Les phases de mesures du flotteur sont les suivantes :

- en dérive, une mesure toutes les 12 h ;
- en remontée, une mesure toutes les 10 s.

La phase de dérive dure 9 jours. De plus, lors de la phase de remontée, le flotteur remonte de $-2\,000\text{ m}$ à la surface à la vitesse de $V = 10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Question 7. Déterminer le nombre de mesures réalisées par le flotteur lors d'un cycle complet.

Pendant le cycle du flotteur, la carte d'acquisition est en veille la plupart du temps. Le microcontrôleur réactive la carte d'acquisition lors des mesures.

Pendant une mesure, la carte d'acquisition est activée durant 10 s. Elle consomme instantanément une puissance constante de $P_c = 300\text{ mW}$. Cette puissance correspond à l'alimentation des trois capteurs et de la micro pompe.

La carte d'acquisition est alimentée par le bloc batterie dont la tension est $V_{bat} = 10,5\text{ V}$.

La consommation est une grandeur notée C exprimée en $\text{A}\cdot\text{h}$. Elle correspond à la consommation d'un courant pendant un certain temps.

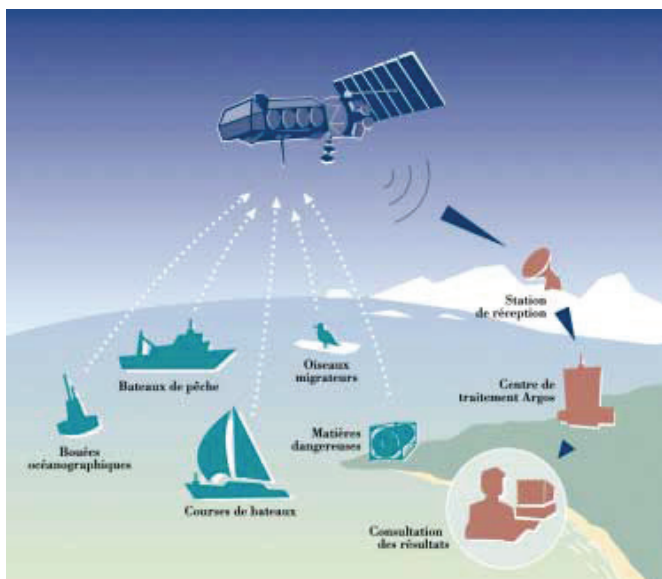
Question 8. Calculer la consommation C_{acq} , exprimée en $\text{A}\cdot\text{h}$, de la carte d'acquisition de mesures.

Ce résultat entrera dans le bilan global évalué dans la partie 5.

PARTIE 3 – ÉMISSION DU FLOTTEUR

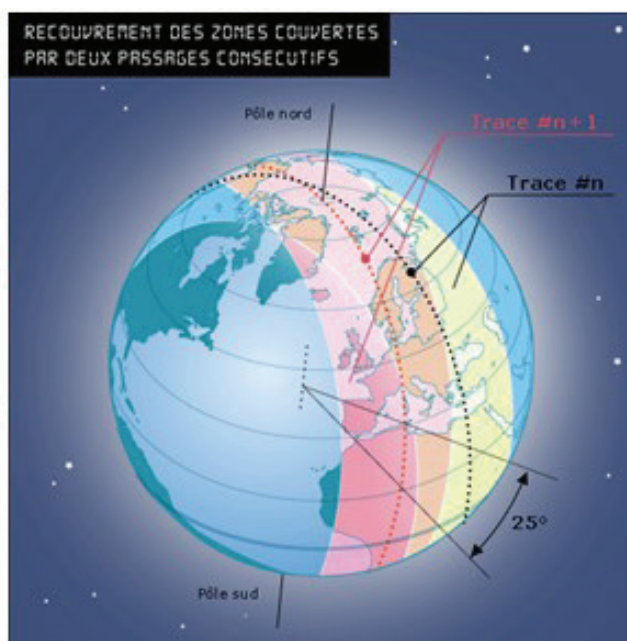
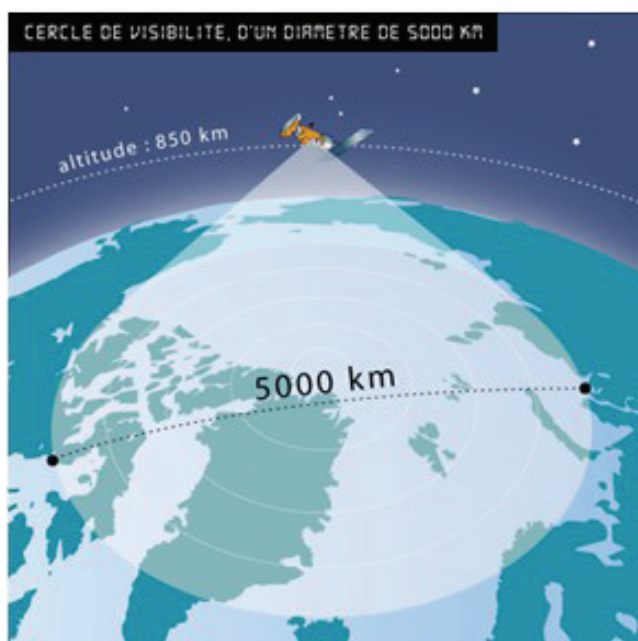
Objectif : étudier la consommation énergétique de la transmission des données.

Pour transmettre les informations collectées, le flotteur Arvor utilise le système de localisation et de collecte de données par satellites nommé Argos. Ce système permet de localiser et d'échanger des informations avec des émetteurs compatibles n'importe où sur la surface de la Terre avec une précision d'environ 150 mètres.



Les stations de réception reçoivent en direct, par l'intermédiaire des satellites, les messages provenant des balises qui sont à proximité. Les centres de traitement reçoivent les données brutes Argos (messages codés). Des calculateurs procèdent alors au traitement des valeurs collectées et au calcul des localisations. Tous ces résultats sont archivés et mis à la disposition des utilisateurs du monde entier. Ces derniers peuvent alors récupérer les informations et les intégrer à leurs recherches.

Les satellites utilisés, au nombre de six, décrivent une orbite polaire à 850 km d'altitude, et passent au-dessus des pôles nord et sud à chaque tour effectué autour de la Terre. Chaque satellite effectue un tour complet autour de la Terre en 100 minutes. Entre chaque passage, la rotation de la Terre provoque un décalage angulaire de 25°.



Les flotteurs situés à proximité des pôles sont donc survolés plus régulièrement que ceux qui sont situés au niveau de l'équateur.

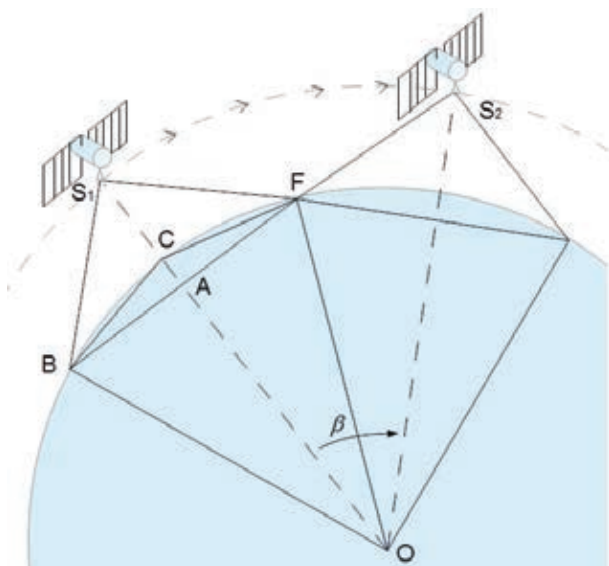
Le traitement de la transmission des données prend en compte les limitations du système de récupération de données d'Argos incluant :

- la fréquence de passage des satellites au-dessus des zones d'expérimentation ;
- l'incertitude qu'aurait l'antenne du flotteur d'émerger dans des mers fortes ;
- les incertitudes de propagation dues aux conditions météorologiques ;
- l'état opérationnel des satellites.

3-1 Durée de survol d'un satellite

Objectif : déterminer la durée pendant laquelle le flotteur peut transmettre des informations au satellite ainsi que le temps d'attente entre deux passages de satellite.

Pour la suite du sujet, le cas le plus défavorable sera étudié, à savoir un flotteur positionné au niveau de l'équateur. Il est représenté au point F sur la figure ci-dessous.



Hypothèses

- le problème est traité dans un plan (voir figure de gauche) ;
- le point A est situé au milieu du segment BF ;
- les distances OB , OC et OF représentent le rayon de la Terre ;
- l'arc de cercle $\widehat{S_1S_2}$ correspond à la zone de visibilité du flotteur par le satellite.

$$BF = 5000 \text{ km}$$

$$OB = OC = OF = 6371,5 \text{ km}$$

$$CS_1 = 850 \text{ km}$$

Question 9. Calculer la vitesse V_{sat} du satellite par rapport à la Terre. Exprimer le résultat en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 10. Calculer, à partir de la figure ci-dessus, la valeur de l'angle β en radian, et en déduire la longueur de l'arc $\widehat{S_1S_2}$ que parcourt le satellite avant de perdre le contact avec le flotteur. Exprimer ce résultat en mètre.

Question 11. Calculer la durée T_{com} durant laquelle le flotteur peut communiquer avec le satellite lors d'un passage.

Question 12. Sachant qu'à chaque tour, en prenant en compte la rotation de la Terre, le satellite se décale de 25° , **montrer** qu'il faut 7 tours à ce satellite pour repasser au-dessus du flotteur en tenant compte du cercle de visibilité. **En déduire** la durée écoulée entre 2 passages du même satellite au-dessus de ce flotteur.

Question 13. En prenant en compte le nombre de satellites Argos, **calculer** la durée totale de visibilité du flotteur par un satellite sur une journée. En considérant ces satellites comme étant uniformément répartis autour de la Terre, **conclure sur** la durée d'attente T_{att} entre deux passages de satellites.

3-2 Consommation durant l'émission des données

Objectif : calculer la consommation lors de la phase de transmission des données.

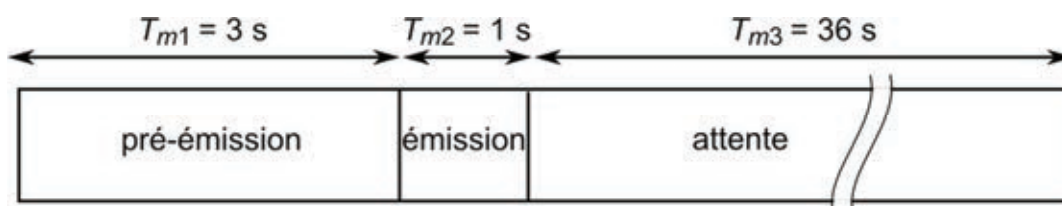
Afin d'assurer la transmission des données entre le flotteur et les satellites Argos, le flotteur émet en continu ses données pendant une durée de $T_{em} = 6$ h. Cette durée a été déterminée en tenant compte des durées calculées précédemment (durée T_{com} durant laquelle le flotteur peut communiquer avec le satellite et durée d'attente T_{att} entre deux passages de satellites).

La transmission des données du flotteur est réalisée par une antenne d'émission 401 MHz quart d'onde avec un circuit d'adaptation d'impédance.

Les données à transmettre correspondent aux mesures effectuées par les capteurs lors du cycle du flotteur, pendant la phase de dérive et la phase de remontée. La majorité des mesures est réalisée lors de la remontée du flotteur, les données à transmettre sont donc plus nombreuses pendant cette phase.

Un message est composé de 32 octets, ce qui limite l'information contenue dans ce dernier. Plusieurs messages sont donc créés par le flotteur puis envoyés pour transmettre la totalité des mesures mémorisées pendant un cycle. Le nombre de messages à transmettre pour recueillir l'intégralité des données est estimé à 18.

La transmission d'un message se déroule en trois phases.



La première phase est la phase de pré-émission. Cette phase consiste à alimenter et initialiser l'émetteur avant le début de la transmission des données. La durée est de $T_{m1} = 3$ s, et le courant consommé pendant cette phase de $I_{m1} = 60$ mA.

La deuxième phase est la phase d'émission. Le message est transmis en $T_{m2} = 1$ s, et le courant consommé pendant cette phase de $I_{m2} = 760$ mA.

La troisième phase est la phase d'attente. Afin d'éviter les collisions à la réception du satellite, la phase d'attente dure $T_{m3} = 36$ s. Pour limiter la consommation du flotteur pendant cette phase, le circuit de l'antenne n'est plus alimenté, aucun courant n'est donc consommé.

Question 14. Calculer le taux de répétition de l'intégralité des données pendant la phase de transmission des données.

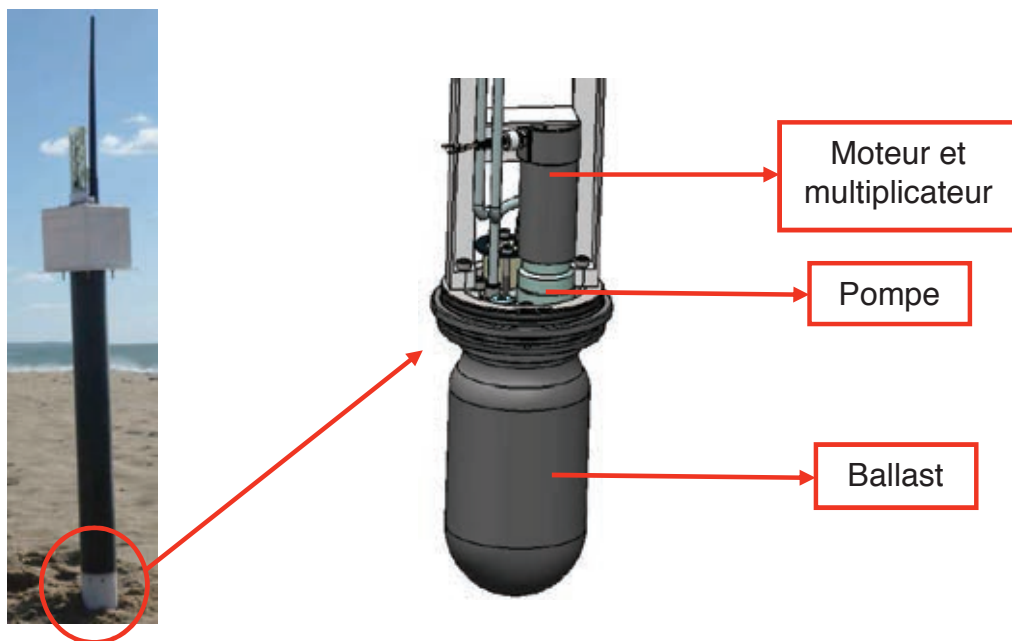
Question 15. Calculer la consommation de l'émission d'un message C_{mess} en A·h. En **déduire** la consommation totale C_{em} en A·h lors de la phase de transmission.

Ce résultat entrera dans le bilan global évalué dans la partie 5.

PARTIE 4 – DÉPLACEMENT DU FLOTTEUR

Objectif : valider les choix de constituants du bloc hydraulique.

Pour assurer les plongées et les remontées, le flotteur Arvor est équipé d'un ballast, en contact avec l'eau de mer, alimenté par une pompe à pistons axiaux. La pompe est entraînée en rotation par un moteur à courant continu associé à un multiplicateur.



Le ballast est une poche souple située dans la partie basse du flotteur. Il permet de faire varier sa flottabilité. La flottabilité, notée φ , dépend de la masse m du corps, de son volume V_{flotteur} et de la masse volumique ρ_{eau} de l'eau. Elle est définie par $\varphi = \rho_{\text{eau}} V_{\text{flotteur}} - m$. Si $\varphi < 0$, alors le flotteur coule. Si $\varphi > 0$, le flotteur remonte. Pour une flottabilité nulle, le flotteur est en équilibre.

Le ballast est dimensionné pour que, une fois rempli, la flottabilité soit positive. De cette manière, sous l'effet de la poussée d'Archimède, le flotteur remonte à la surface. Lorsque le ballast est vide, les dimensions du flotteur sont prévues pour que $\varphi = 0$ à une profondeur de 2 000 m (le flotteur se maintient entre deux eaux à cette profondeur).

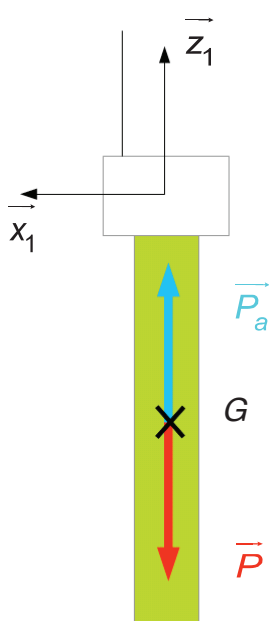
Données techniques constructeur du flotteur Arvor :

Volume du flotteur (ballast vide)	$V_{\text{flotteur}} = 0,025 \text{ m}^3$
Masse du flotteur	$m = 26 \text{ kg}$
Vitesse de remontée du flotteur	$0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq V \leq 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

4-1 Dimensionnement du ballast

Objectif : valider les dimensions du ballast du flotteur.

À la profondeur de 2 000 m, le ballast du flotteur est vide. Le flotteur est conçu pour avoir une flottabilité lui permettant de se maintenir à cette profondeur. Lorsqu'il est immergé, le flotteur est soumis aux actions mécaniques suivantes :



– poids propre $\mathcal{T}_{pes \rightarrow \text{flotteur}} = \begin{Bmatrix} \bar{P} = -mg\bar{z}_1 \\ \bar{0} \end{Bmatrix}$;

– poussée d'Archimède

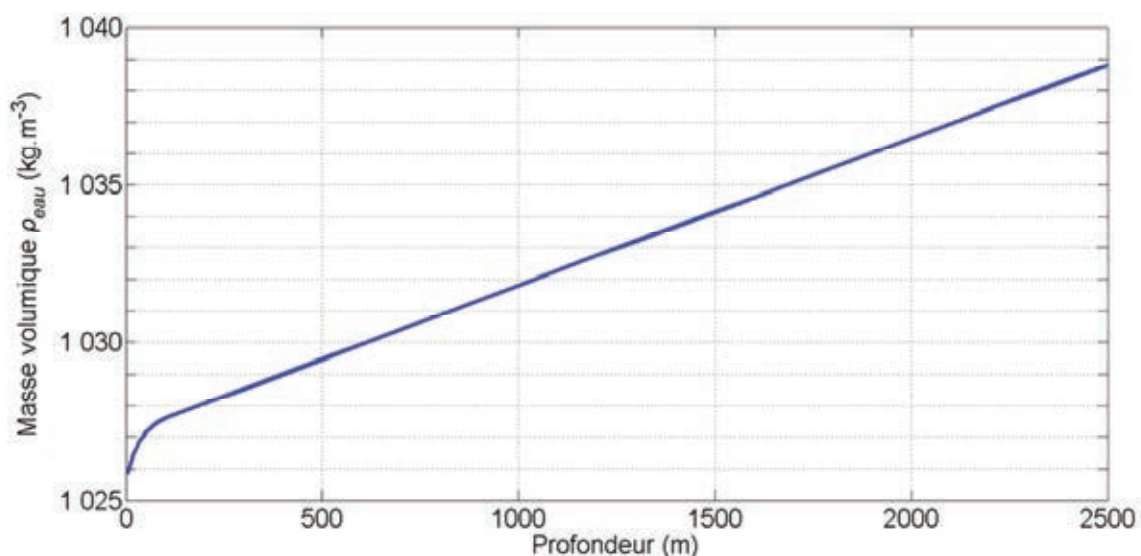
$\mathcal{T}_{pouss_arch \rightarrow \text{flotteur}} = \begin{Bmatrix} \bar{P}_a = \rho_{eau} V_{flotteur} g \bar{z}_1 \\ \bar{0} \end{Bmatrix}$.

avec

- m , masse du flotteur ;
- ρ_{eau} , masse volumique de l'eau de mer ;
- $V_{flotteur}$, volume du flotteur.

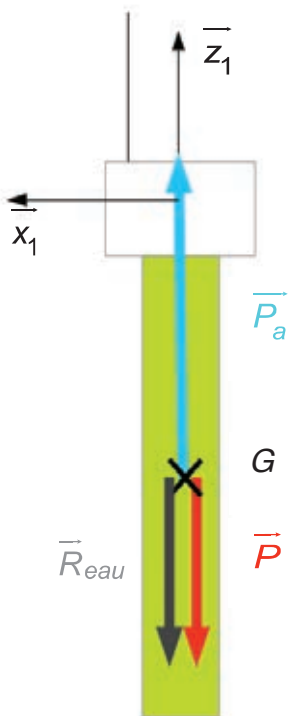
On suppose, pour simplifier cette étude, que le centre de poussée (point d'application du glisseur représentant la poussée d'Archimède) est confondu avec le centre d'inertie G du flotteur et que $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

La courbe d'évolution de la masse volumique ρ_{eau} de l'eau de mer en fonction de la profondeur est la suivante :



Question 16. En étudiant la courbe ci-dessus, **déterminer** la masse volumique de l'eau de mer à 2 000 m de profondeur. En appliquant le théorème de la résultante statique au flotteur à cette même profondeur, **déterminer** le volume que doit avoir le flotteur pour se maintenir à cette profondeur. **Conclure** sur la capacité du flotteur à se maintenir à 2 000 m avec son ballast vide.

Lors de la phase de remontée, le flotteur est soumis aux actions mécaniques suivantes :



– poids propre $\mathcal{T}_{pes \rightarrow \text{flotteur}} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{P} = -mg\vec{z}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_G$;

– poussée d'Archimède

$\mathcal{T}_{pouss_arch \rightarrow \text{flotteur}} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{P}_a = \rho_{eau} V_{flotteur} g\vec{z}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_G$;

– action hydrodynamique

$\mathcal{T}_{eau \rightarrow \text{flotteur}} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_{eau} = -\frac{1}{2} \rho_{eau} S V^2 C\vec{z}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_G$.

avec

- S : surface du flotteur ;
- V : vitesse de remontée du flotteur ;
- C : coefficient de trainée.

Par simplification, la vitesse de remontée du flotteur V est considérée constante.

Question 17. En écrivant le théorème de la résultante dynamique appliqué au flotteur en phase de remontée en projection sur un axe de direction \vec{z}_1 , **déterminer** l'équation liant la vitesse V de remontée au volume du flotteur $V_{flotteur}$.

Au début de la phase de remontée, un ballast faiblement rempli suffit à faire remonter le flotteur. Au fur et à mesure de la remontée, le ballast est régulièrement alimenté pour compenser la baisse de pression et assurer ainsi une vitesse de remontée constante.

Données complémentaires permettant de traiter la question 18 :

Données	Pour une profondeur de 1 000 m	À la surface
ρ_{eau}	$1\,031,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$1\,025,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$V_{flotteur}$	$0,0256 \text{ m}^3$	$0,0264 \text{ m}^3$ (ballast rempli)
S	$0,7 \text{ m}^2$	$0,7 \text{ m}^2$
C	1	1
m	26 kg	26 kg

Question 18. Calculer la vitesse V à la profondeur de 1 000 m et à la surface et justifier que le volume donné au flotteur par le ballast permet bien de respecter la contrainte de vitesse fixée par le cahier des charges.

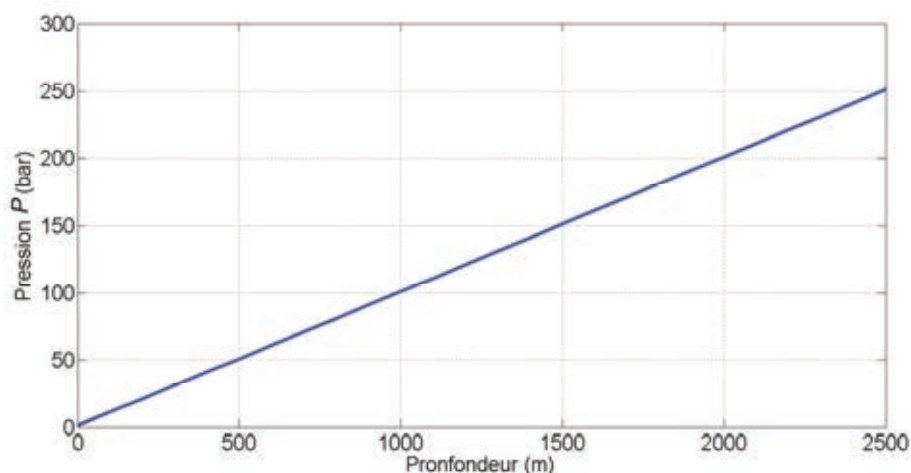
Le volume du ballast étant désormais validé, la pompe à pistons axiaux peut maintenant être étudiée.

4-2 Dimensionnement du moteur

Objectif : vérifier que le moteur choisi pour actionner la pompe a une puissance suffisante pour remplir le ballast à 2 000 m de profondeur.

À une profondeur de 2 000 m, le ballast subit une pression bien supérieure à celle qu'il subit en surface. Il est donc nécessaire de l'alimenter avec une pompe dont la puissance est suffisante pour vaincre cette pression.

La courbe ci-dessous représente l'évolution de la pression relative (par rapport à la pression atmosphérique) en fonction de la profondeur. La pression atmosphérique est supposée égale à 1 bar.



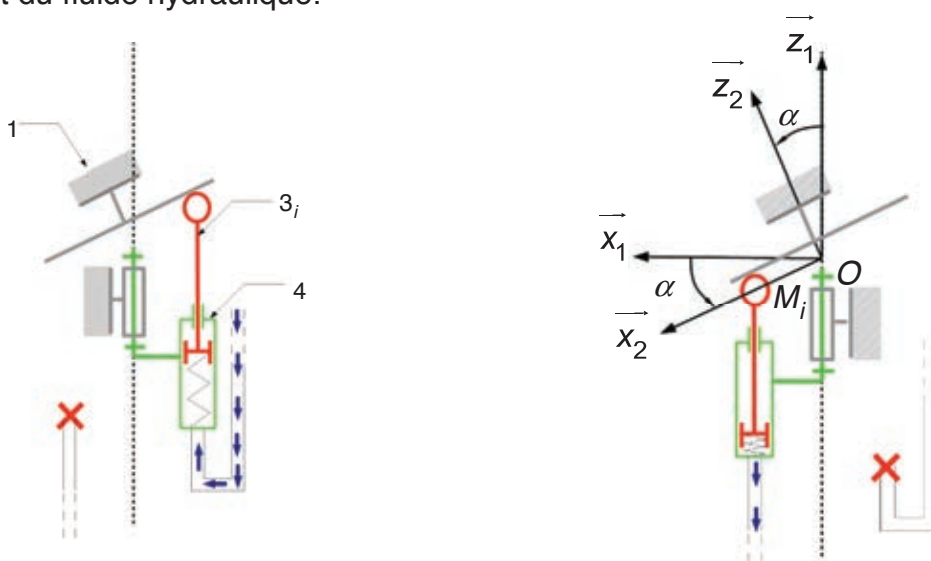
Question 19. À partir de la courbe fournie ci-dessus, déterminer la pression absolue (totale) qui s'applique sur le ballast à 2 000 m de profondeur.

Dans la suite du problème, le fluide du circuit d'alimentation du ballast est supposé incompressible. La pression exercée sur le ballast est alors identique à celle qui est exercée sur le piston de la pompe.

La pompe à pistons axiaux est principalement constituée des éléments suivants :

- un corps 1 ;
- un barillet 4 (entraîné par un moteur à courant continu via un multiplicateur) ;
- trois pistons 3_i ($i \in [1, 3]$) dont les axes sont répartis sur un cylindre de révolution d'axe (O, \vec{z}_1) et de diamètre D .

La rotation du barillet 4 entraîne le déplacement des pistons et l'admission ou le refoulement du fluide hydraulique.



Pompe en phase d'admission

Pompe en phase de refoulement

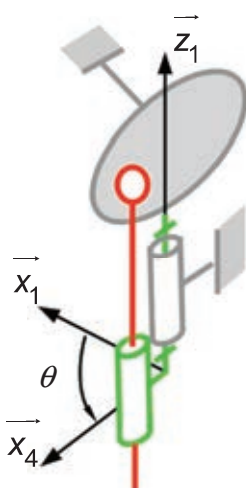


Schéma cinématique 3D simplifié

Le repère lié au corps 1 tel que (O, \bar{z}_1) soit l'axe de la liaison pivot corps 1 / barillet 4 est noté $R_1(O, \bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)$.

Le repère lié au plan incliné du corps 1 est noté $R_2(O, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ où \bar{z}_2 définit la normale au plan incliné. La position angulaire constante de R_2 par rapport à R_1 est notée $\alpha = (\bar{z}_1, \bar{z}_2) = (\bar{x}_1, \bar{x}_2)$.

Le repère lié au barillet 4 est noté $R_4(O, \bar{x}_4, \bar{y}_4, \bar{z}_4)$, avec $\theta(t) = \omega t = (\bar{x}_1, \bar{x}_4) = (\bar{y}_1, \bar{y}_4)$. ω est une constante positive.

La liaison entre chaque piston 3_i et le barillet 4 est une liaison pivot glissant d'axe (M_i, \bar{z}_1) .

Chaque piston est en liaison sphère-plan de contact M_i et de normale \bar{z}_2 avec le plan incliné de la pièce 2 qui est en liaison pivot d'axe (O, \bar{z}_2) avec le corps 1.

Action mécanique	Modélisation
Multiplicateur (exerçant un couple C_{multi}) sur le barillet 4	$\mathcal{T}_{multiplicateur \rightarrow 4} = \forall P \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ \bar{M}_{multi \rightarrow 4} \end{array} \right\} = \forall P \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ C_{multi} \bar{z}_1 \end{array} \right\}$
Fluide à la pression P_i sur chaque piston 3_i	$\mathcal{T}_{fluide \rightarrow 3i} = \forall P \in (M_i, \bar{z}_1) \left\{ \begin{array}{c} \bar{R}_{fluide \rightarrow 3i} \\ \vec{0} \end{array} \right\} = \forall P \in (M_i, \bar{z}_1) \left\{ \begin{array}{c} -P_i S_i \bar{z}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}$
Ressort de rappel sur le piston 3_i	$\mathcal{T}_{ressort \rightarrow 3i} = \forall P \in (M_i, \bar{z}_1) \left\{ \begin{array}{c} \bar{R}_{ressort \rightarrow 3i} \\ \vec{0} \end{array} \right\} = \forall P \in (M_i, \bar{z}_1) \left\{ \begin{array}{c} (F_0 - k \lambda_i) \bar{z}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}$ <p>avec</p> <p>k : raideur du ressort ;</p> <p>$\lambda_i = \overrightarrow{OM_i} \cdot \bar{z}_1$;</p> <p>F_0 : valeur de l'action du ressort pour $\theta = \frac{\pi}{2}$.</p>

Hypothèses de calcul :

- dans le cadre d'une étude en régime permanent ($\omega = \dot{\theta} = \text{cte}$), on peut montrer que le torseur dynamique de la pompe est nul. Par conséquent, on peut lui appliquer le principe fondamental de la statique ;
- les masses des différents solides devant les autres actions mécaniques mises en jeu sont négligées ;
- l'action du ressort maintient le contact du piston sur le plan incliné dans toutes les positions ;
- le repère R_1 lié au corps 1 est considéré comme galiléen.

L'objectif de cette partie est de définir le couple moteur nécessaire pour entraîner la pompe en fonction de la pression exercée sur le piston par le fluide. Pour cela, il faut tout d'abord isoler le piston 3_1 et faire l'inventaire des actions mécaniques extérieures qui s'exerce sur cette pièce. Il est ainsi obtenu :

- l'action mécanique de 1 sur 3_1 (sphère-plan de centre M_1 et de normale \vec{z}_2) ;
- l'action mécanique de 4 sur 3_1 (pivot glissant d'axe (M_1, \vec{z}_1)) ;
- l'action mécanique du ressort sur 3_1 ;
- l'action mécanique du fluide sur 3_1 .

Ces actions mécaniques sont modélisables par :

$\mathcal{T}_{1 \rightarrow 3_1} = \begin{matrix} \forall P \in (M_1, \vec{z}_2) \\ = \\ \forall P \in (M_1, \vec{z}_2) \end{matrix} \begin{Bmatrix} \vec{R}_{1 \rightarrow 3_1} \\ \vec{0} \\ \vec{z}_{1 \rightarrow 3_1} \vec{z}_2 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$	$\mathcal{T}_{4 \rightarrow 3_1} = \begin{matrix} \forall P \in (M_1, \vec{z}_1) \\ \text{avec} \end{matrix} \begin{Bmatrix} \vec{R}_{4 \rightarrow 3_1} \\ \vec{M}_{P,4 \rightarrow 3_1} \\ \vec{R}_{4 \rightarrow 3_1} \cdot \vec{z}_1 = 0 \\ \vec{M}_{P,4 \rightarrow 3_1} \cdot \vec{z}_1 = 0 \end{Bmatrix}$
$\mathcal{T}_{\text{ressort} \rightarrow 3_1} = \begin{matrix} \forall P \in (M_1, \vec{z}_1) \\ = \\ \forall P \in (M_1, \vec{z}_1) \end{matrix} \begin{Bmatrix} \vec{R}_{\text{ressort} \rightarrow 3_1} \\ \vec{0} \\ (F_0 - k\lambda_i) \vec{z}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$	$\mathcal{T}_{\text{fluide} \rightarrow 3_1} = \begin{matrix} \forall P \in (M_1, \vec{z}_1) \\ = \\ \forall P \in (M_1, \vec{z}_1) \end{matrix} \begin{Bmatrix} \vec{R}_{\text{fluide} \rightarrow 3_1} \\ \vec{0} \\ -P_1 S_1 \vec{z}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$

Question 20. En appliquant le théorème de la résultante statique au piston 3_1 en projection sur l'axe \vec{z}_1 , **exprimer** l'action mécanique $Z_{2 \rightarrow 3_1}$ de la pièce 2 sur le piston 3_1 en fonction de la pression P_1 (pression au niveau du piston 1) et des données du problème.

Il faut maintenant trouver la relation entre $Z_{2 \rightarrow 3_1}$ et le couple C_{multi} . Pour cela, il faut étudier l'ensemble $\Sigma\{\text{piston } 3_1, \text{ barillet } 4, \text{ ressort, fluide}\}$. Une étude géométrique a permis de déterminer : $\lambda_1 = -\frac{D}{2} \tan \alpha \cos \theta$ et $\overline{OM}_1 = \frac{D}{2} \overline{x}_4 + \lambda_1 \overline{z}_1$

Question 21. Exposer la méthode permettant de déterminer l'expression du couple C_{multi1} (couple minimal nécessaire à l'entraînement du piston 1) en fonction de $Z_{2 \rightarrow 3_1}$, puis en fonction de P_1 et θ . Pour cela, indiquer avec rigueur :

- les hypothèses nécessaires à ce calcul ;
- le ou les solides isolés, les inventaires des actions mécaniques extérieures ainsi que le ou les théorèmes utilisés pour la résolution.

Appliquer cette méthode et **montrer** que C_{multi1} peut s'écrire sous la forme :

$$C_{multi1} = \frac{D}{2} \left[P_1 S - \left(F_0 + k \frac{D}{2} \tan \alpha \cos \theta \right) \right] \sin \theta \tan \alpha$$

La relation suivante permet de calculer le couple moyen nécessaire pour entraîner un piston : $C_{multi1 moy} = \frac{P_{max} S_1 D \tan \alpha}{2\pi}$, avec P_{max} la pression maximale dans la chambre et S_1 la surface du piston 1.

Données complémentaires pour la question suivante :

Pression maximale	$P_{max} = 200 \times 10^5 \text{ Pa}$
Surface du piston 1	$S_1 = 7,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
Diamètre	$D = 14 \text{ mm}$
Angle	$\alpha = 3^\circ$

Question 22. À partir de la relation proposée, **calculer** le couple moyen $C_{multi moy}$ nécessaire à l'entraînement de 3 pistons.

Pour la suite du sujet, l'ondulation de couple à l'entrée de la pompe est négligée : le couple moyen $C_{multi moy}$ est considéré comme étant égal au couple maximal.

Le moteur utilisé pour l'entraînement de la pompe est un moteur Maxon à courant continu. Ses caractéristiques techniques sont fournies dans le tableau ci-après.

Tension nominale	18 V
Courant maximal	3,18 A
Couple maximal	81 mN·m
Résistance série	0,628 Ω
Constante de couple	25,5 mN·m·A ⁻¹
Constante de vitesse	375 tr·min ⁻¹ ·V ⁻¹

Les valeurs du courant et du couple maximaux du moteur sont celles qui conduiraient à l'échauffement maximal admissible si le moteur était alimenté en permanence. Or, le moteur du flotteur est alimenté par intermittence pour remplir le ballast. Le courant, donc le couple, peut être 1,5 fois supérieur aux valeurs fournies dans le tableau ci-dessus.

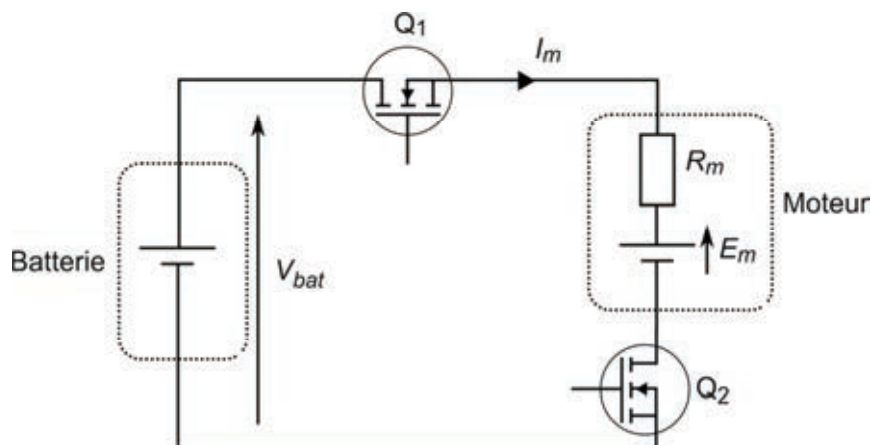
Un multiplicateur de vitesse, de rapport $K_m = 20$, est placé entre le moteur et la pompe. Son rendement est supposé égal à 1.

Question 23. Vérifier que les caractéristiques du moteur choisi répondent au besoin en terme de couple maximal.

4-3 Alimentation du moteur

Objectif : calculer le courant absorbé par le moteur lors de la remontée du flotteur.

Le moteur est donc alimenté par intermittence lors de la remontée du flotteur. Le schéma d'alimentation du moteur est le suivant. La tension de la batterie est de $V_{bat} = 10,5$ V.



Le transistor MOSFET de puissance Q_1 est un transistor de mise sous tension générale. Il est commandé à l'état passant dès la mise à l'eau du flotteur et pendant toute sa durée de vie.

Le transistor MOSFET de puissance Q_2 est un transistor de commande du moteur. Il est commandé à l'état passant lorsque le ballast doit se remplir pour faire remonter le flotteur.

Un transistor MOSFET à l'état passant est équivalent à une résistance notée R_{dson} . Les valeurs des résistances des transistors Q_1 et Q_2 sont respectivement de $R_{dson1} = 20 \text{ m}\Omega$ et de $R_{dson2} = 60 \text{ m}\Omega$.

Le moteur à courant continu est modélisé par une force électromotrice (fem) E_m en série avec une résistance R_m . L'inductance du moteur est négligée. Les équations électromécaniques du moteur sont les suivantes : $E_m = k_e \Omega_m$ et $C_m = k_c I_m$, avec

- k_e , constante de fem, exprimée en $\text{V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$;
- Ω_m , fréquence de rotation du moteur, exprimée en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- C_m , couple moteur, exprimée en $\text{N} \cdot \text{m}$;
- k_c , constante de couple, exprimée en $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$;
- I_m , courant absorbé par le moteur, exprimée en A .

Les caractéristiques techniques du moteur sont fournies dans le tableau de la partie 4-2.

À 2 000 m de profondeur, le couple moteur est maximal et vaut $C_m = 100 \text{ mN} \cdot \text{m}$.

Question 24. Calculer le courant absorbé I_m par le moteur. En **déduire** sa fréquence de rotation Ω_m , exprimée en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 25. Quantifier les pertes par effet Joule dans les transistors MOSFET par rapport à la puissance fournie par la batterie. **Conclure** sur l'intérêt du choix de la technologie MOSFET du point de vue de la consommation.

Un modèle de la chaîne d'énergie du système a été implanté dans un logiciel de simulation multiphysique. L'objectif d'un tel outil est ici d'étudier l'influence des paramètres du système sur sa consommation. La simulation a permis d'obtenir la vitesse angulaire Ω_m du moteur, le courant I_m absorbé par le moteur, ainsi que l'évolution du volume du ballast, à la profondeur de 2 000 m. Les résultats de simulation ainsi que le modèle multiphysique sont décrits dans le document technique DT4.

Question 26. Relever les valeurs du courant I_m et de la fréquence de rotation Ω_m en régime permanent et **vérifier** qu'elles sont conformes aux résultats théoriques obtenus par calcul à la question 24.

4-4 Consommation du moteur

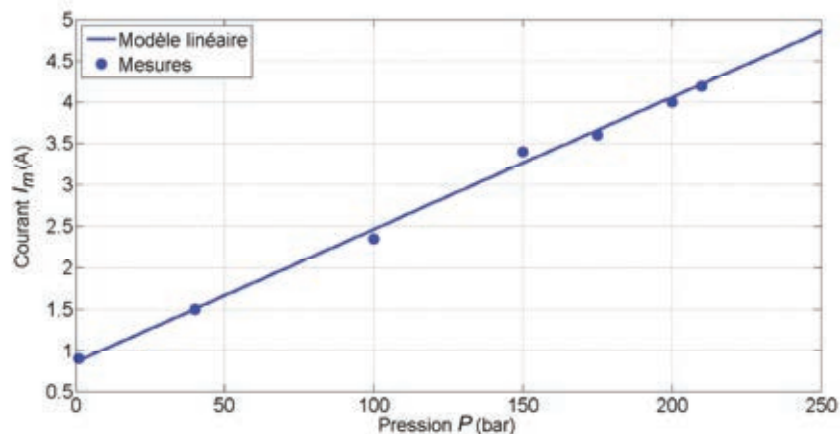
Objectif : calculer la consommation du moteur entraînant la pompe hydraulique lors de la phase de remontée et d'émersion du flotteur.

Lors de la phase de remontée, le moteur entraînant la pompe hydraulique est uniquement alimenté lorsque la flottabilité du flotteur n'est plus suffisante pour le faire monter. Le ballast est alors rempli par intermittence. De plus, au moment de l'émersion du flotteur, le moteur est alimenté pour que le ballast se remplisse suffisamment afin de permettre au flotteur de sortir de l'eau.

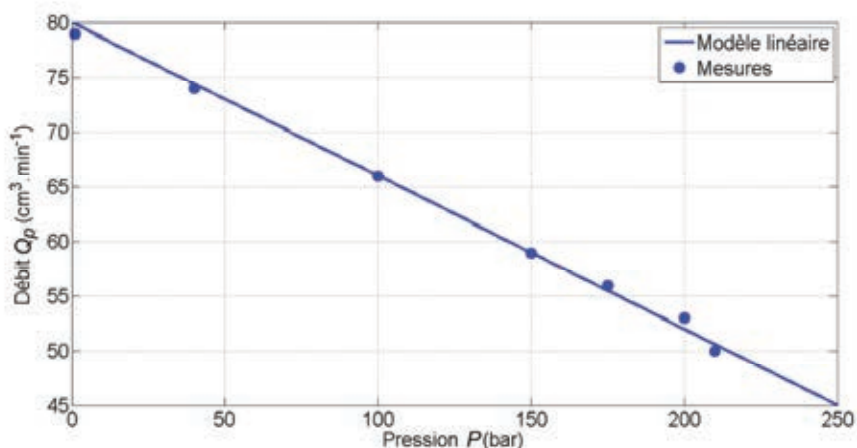
L'étude de la consommation du moteur se déroule donc en deux étapes :

- calcul de la consommation lors de la remontée du flotteur ;
- calcul de la consommation lors de l'émersion du flotteur.

Le courant I_m absorbé par le moteur n'est pas constant durant toute la remontée, il dépend de la pression P . Des mesures ont été réalisées montrant que le courant augmente linéairement avec la pression.



De même, le débit volumique Q_p de la pompe dépend aussi de la pression P à laquelle le flotteur se trouve. Le ballast met plus de temps à se remplir en profondeur. Des mesures ont montré que le débit diminue linéairement avec la pression.



Question 27. Établir les modèles linéaires (équations) du courant I_m et du débit volumique Q_p en fonction de la pression P . En **déduire** le débit à la pression de 200 bar (correspondant à une profondeur de 2 000 m).

Le modèle multiphysique, présenté dans le document technique DT4, a permis d'obtenir la courbe d'évolution du volume du ballast à la profondeur de 2 000 m.

Question 28. Déduire de cette courbe le débit à cette profondeur et le **comparer** aux mesures présentées précédemment ainsi qu'au résultat de la question 27. **Conclure** sur la pertinence du modèle linéaire, utile aux calculs de consommation qui vont suivre.

La remontée du flotteur peut se décomposer en 10 paliers de 200 m chacun. Lors d'un palier, le volume du ballast augmente de $V_p = 8,1 \text{ cm}^3$. La durée de remplissage T_p du ballast à chaque palier dépend donc de la profondeur du flotteur.

Question 29. Calculer la durée de remplissage T_p du ballast pour chaque palier compte tenu du débit Q_p et **compléter** la quatrième colonne du tableau fourni dans le document réponse DR2.

Question 30. Calculer la consommation du moteur C_p en mA · h pour chaque palier et **compléter** la cinquième colonne du tableau fourni dans le document réponse DR2. En **déduire** la consommation totale C_{pr} lors de la phase de remontée.

Lors de l'émersion du flotteur, le volume du ballast à remplir est de $V_{bem} = 360 \text{ cm}^3$. Il est rappelé que la pression atmosphérique est supposée égale à 1 bar.

Question 31. Calculer la durée nécessaire au remplissage du ballast lors de l'émersion du flotteur. En **déduire** la consommation C_{pe} lors de l'émersion du flotteur puis la consommation totale C_{dep} lors du déplacement du flotteur.

PARTIE 5 – BILAN ÉNERGÉTIQUE DU FLOTTEUR

Objectif : vérifier le dimensionnement de la batterie du flotteur compte tenu de l'exigence du nombre de cycles du cahier des charges.

Le flotteur Arvor est un instrument sous-marin autonome en énergie, qui effectue des cycles de mesures périodiquement pendant plusieurs années. Son dispositif de stockage d'énergie doit donc être correctement dimensionné pour qu'il puisse réaliser suffisamment de cycles.

Au cours de sa vie, le flotteur doit pouvoir effectuer 150 cycles de mesures.

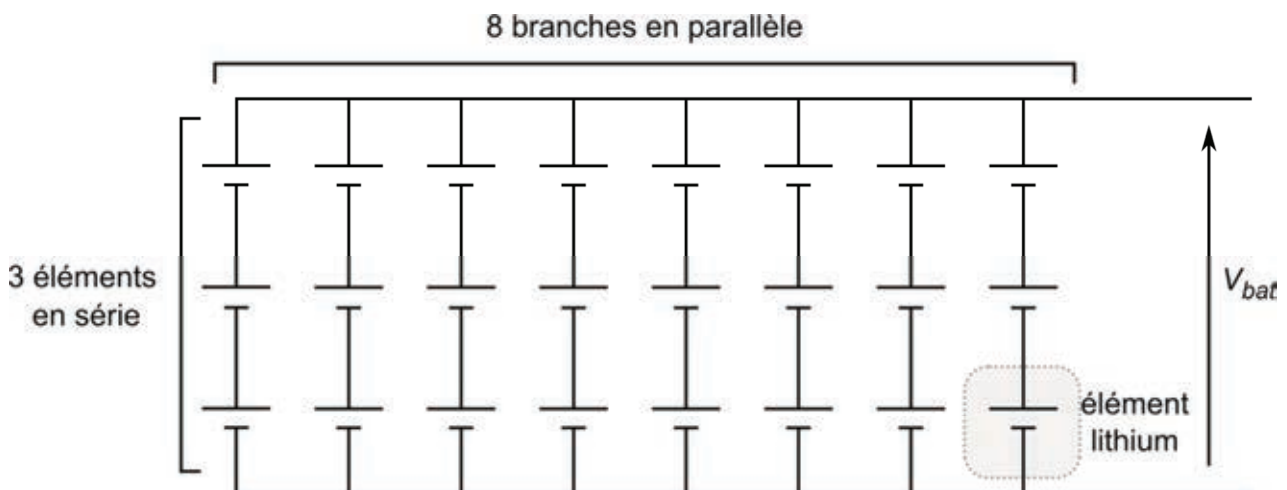
Le flotteur est alimenté par une batterie non rechargeable au lithium de la société SAFT. Les éléments lithium sont interconnectés de façon à fournir suffisamment de tension et de courant aux organes du flotteur.

Les caractéristiques d'un élément lithium sont les suivantes :

- tension nominale de 3,7 V ;
- capacité nominale de 13 A · h.



La batterie du flotteur est constituée de 24 éléments lithium. Ces éléments forment huit branches en parallèle de chacune trois éléments en série, comme l'illustre la figure ci-dessous.



Question 32. Calculer la tension nominale V_{bat} et la capacité nominale C_{bat} de la batterie.

La batterie permet d'alimenter en continu les éléments consommateurs d'énergie du flotteur. Les consommations d'énergie des différents éléments du flotteur, pendant un cycle, ont été évaluées, pour la plupart, dans les parties précédentes de ce sujet.

Elles sont données dans le tableau ci-dessous.

Acquisition des mesures	$C_{acq} = 160 \text{ mA} \cdot \text{h}$
Transmission des données	$C_{em} = 140 \text{ mA} \cdot \text{h}$
Déplacement du flotteur	$C_{dep} = 130 \text{ mA} \cdot \text{h}$
Fonctionnement du microcontrôleur	$C_{micro} = 30 \text{ mA} \cdot \text{h}$

D'autres organes sont également consommateurs d'énergie comme l'électrovanne permettant la descente du flotteur ou des capteurs internes au flotteur. Ces consommations sont minimales et sont donc négligées dans cette étude.

La durée de vie du flotteur est de plusieurs années, ce qui provoque un phénomène d'autodécharge de la batterie. Il faut prendre en compte un facteur d'autodécharge de la batterie de 0,8, ce qui signifie qu'au cours de sa vie, la batterie perd 20 % de sa capacité nominale.

Question 33. Calculer le nombre de cycles N_{cycle} que peut réaliser le flotteur compte tenu des consommations, de la capacité de sa batterie et du phénomène d'autodécharge. **Conclure** sur le respect du cahier des charges.

PARTIE 6 – OPTIMISATION DU FLOTTEUR

Objectif : proposer une évolution du flotteur pour améliorer son comportement et limiter sa consommation d'énergie.

Le matériau utilisé dans la première version du flotteur pour réaliser le tube de protection est de l'aluminium anodisé. Dans le but d'optimiser le comportement mécanique, mais aussi de diminuer les coûts de fabrication, Ifremer a décidé de réaliser les tubes en carbone époxy. Les caractéristiques des deux matériaux sont présentées dans le tableau suivant :

	Prix	Masse volumique	Résistance à la compression
Aluminium anodisé	40 €·kg ⁻¹	2 900 kg·m ⁻³	69 MPa
Carbone époxy	32 €·kg ⁻¹	1 600 kg·m ⁻³	80 MPa

Pour que le comportement mécanique soit adapté aux conditions en grande profondeur, les dimensions du tube ont évolué avec le changement de matériau. Les dimensions sont données dans le tableau suivant :

	Hauteur	Diamètre extérieur	Épaisseur
Aluminium anodisé	2 m	113 mm	7 mm
Carbone époxy	2 m	140 mm	13 mm

La flottabilité du tube, notée φ , est définie par $\varphi_{tube} = \rho_{eau}V_{tube} - m_{tube}$ avec :

- $\rho_{eau} = 1025,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, masse volumique de l'eau de mer à la surface ;
- V_{tube} , volume du tube ;
- m_{tube} , masse du tube.

Pour le calcul de la flottabilité, il faut considérer que les tubes sont bouchés à chaque extrémité et prendre en compte le volume de l'enveloppe latérale uniquement.

Question 34. Calculer le volume et la masse de chaque tube et **en déduire** la flottabilité φ_{tube} à la surface.

Question 35. Justifier le choix de matériau réalisé par Ifremer d'un point de vue économique et mécanique.

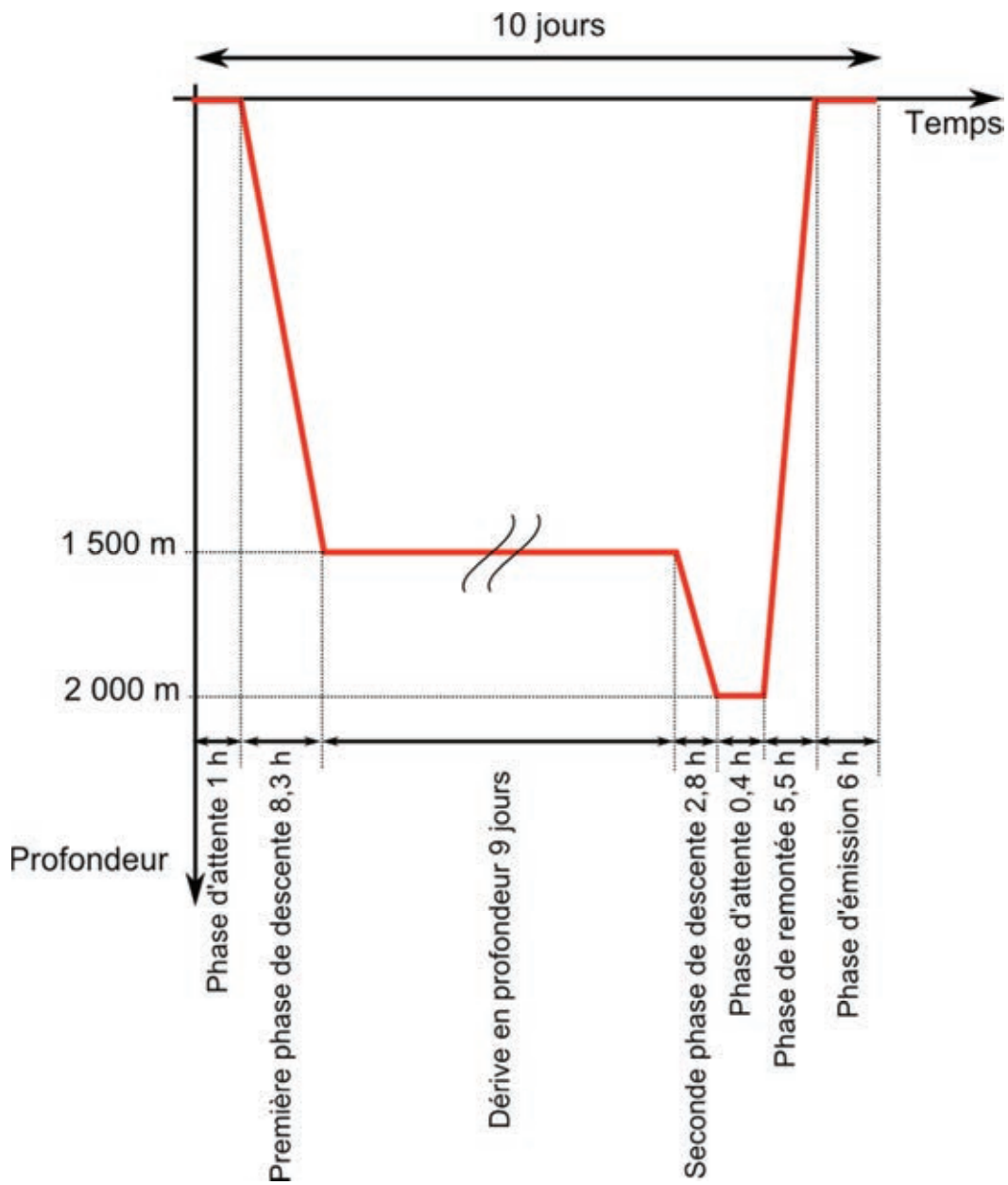
Question 36. Conclure en commentant l'impact que va avoir ce changement de matériau sur le comportement du flotteur et sur sa consommation énergétique.

DOSSIER TECHNIQUE

DOCUMENT TECHNIQUE DT1

Description du cycle du flotteur

Le cycle du flotteur dure 10 jours. Les différentes phases de ce cycle sont décrites ci-dessous :

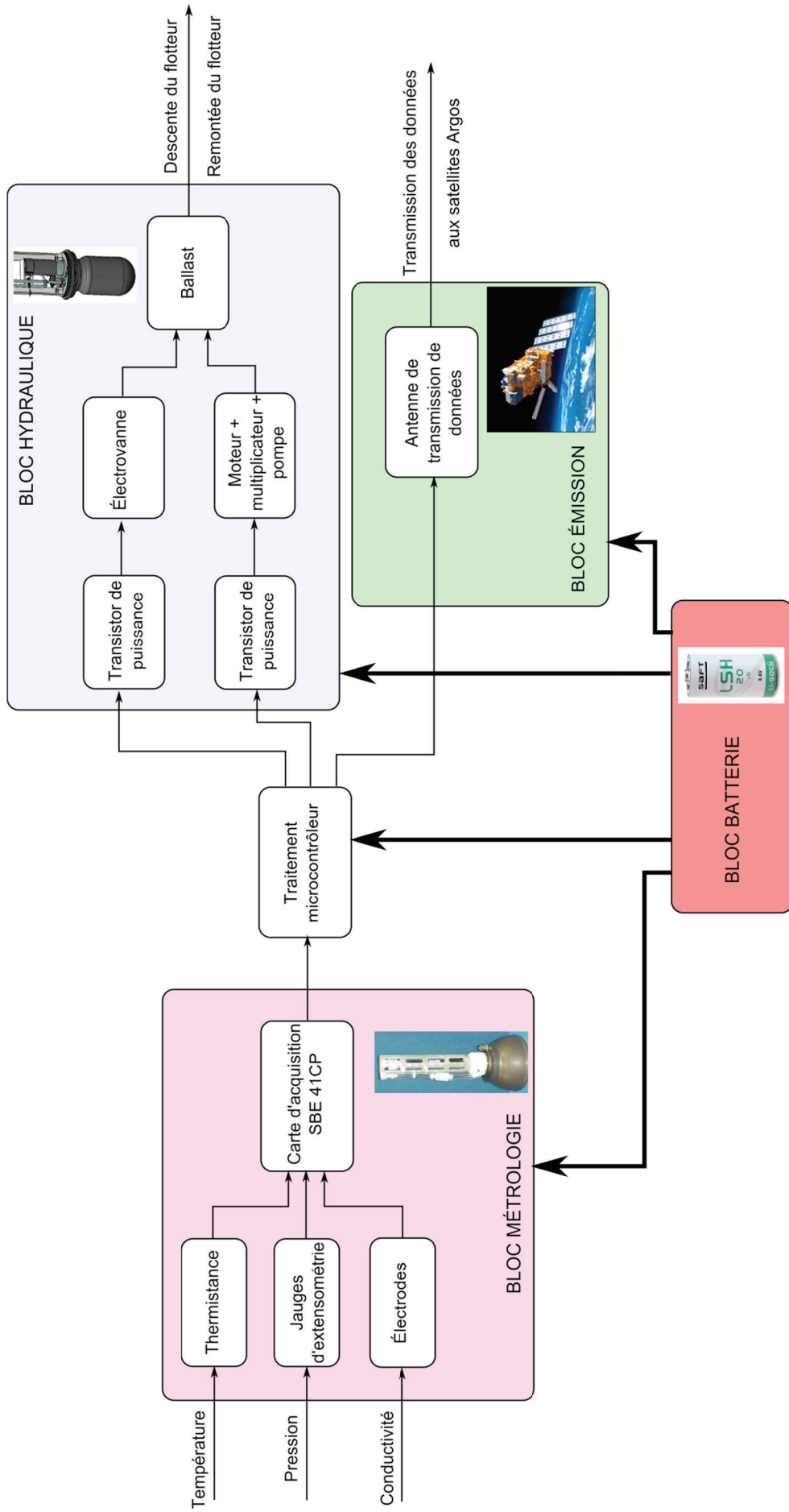


Lors des deux phases de descente, la vitesse du flotteur est de $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Lors de la phase de remontée, la vitesse du flotteur est de $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

DOCUMENT TECHNIQUE DT2

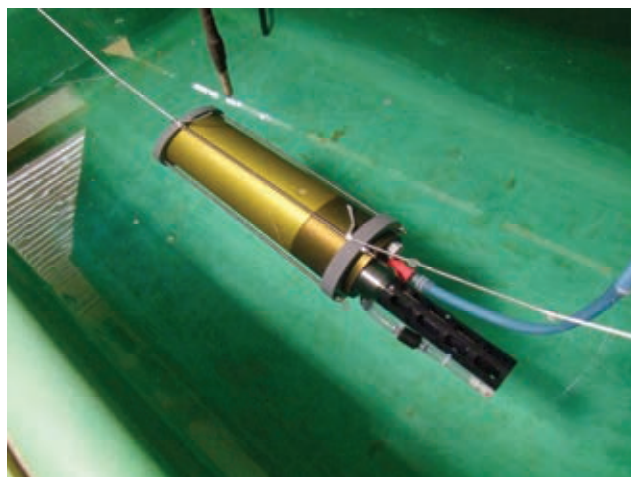
Schéma de principe du flotteur



DOCUMENT TECHNIQUE DT3

Protocole expérimental – capteur PTC

La tête du flotteur instrumentée est complètement immergée dans un bain régulé en température dans lequel l'eau circule en permanence pour homogénéiser la température.



Les mesures réalisées sont les suivantes :

- salinité 37 psu pour 3 °C et 15 °C ;
- salinité 27 psu pour 3 °C et 15 °C ;
- salinité 13 psu pour 3 °C.

Une mesure de température de référence est réalisée par un thermomètre à résistance de platine. Une mesure de salinité de référence est réalisée par un salinomètre de laboratoire. Ces deux appareils de mesure ont été correctement étalonnés.

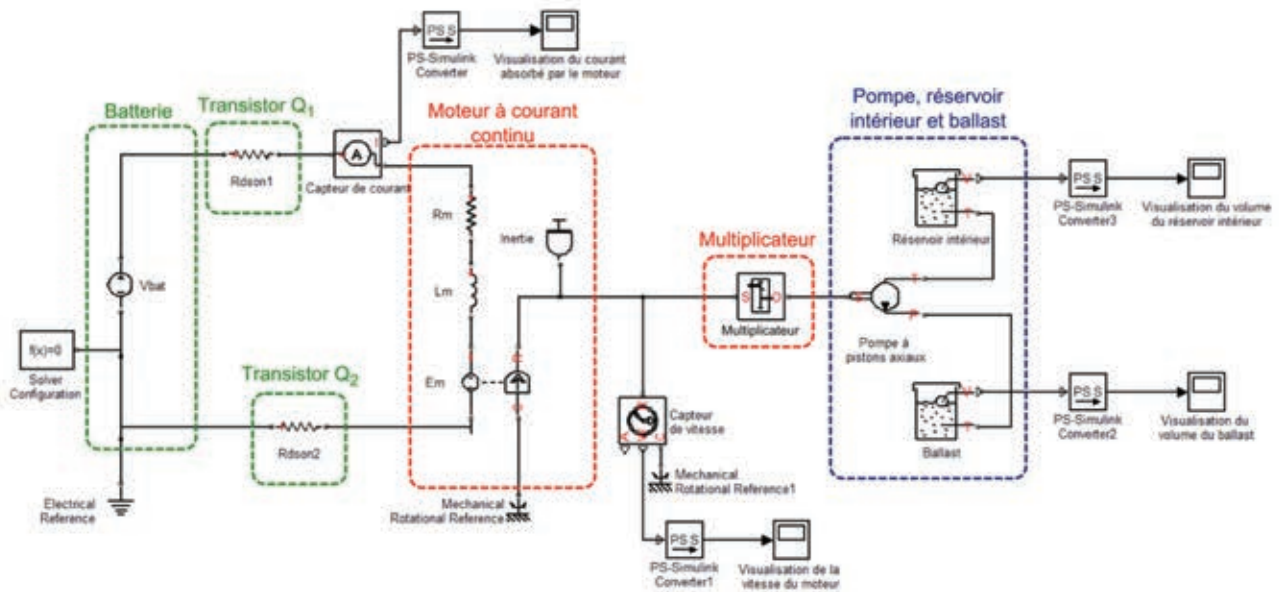
Les essais se déroulent à la pression atmosphérique à laquelle on ajoute la pression provenant de l'immersion des capteurs.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

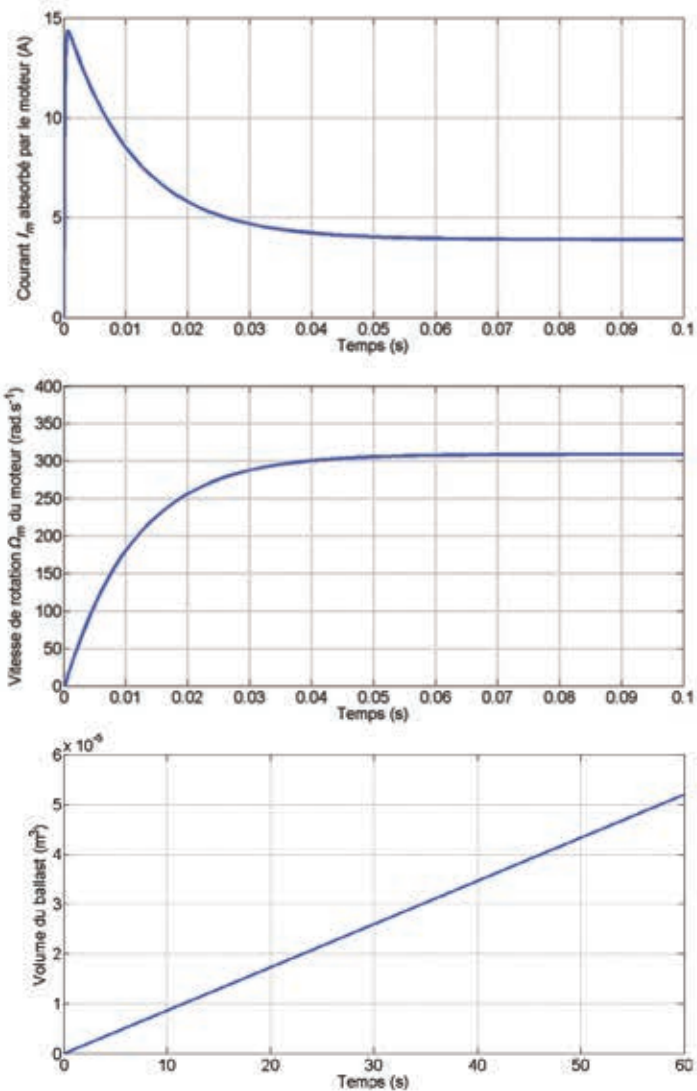
Température (°C)		Salinité (psu)	
Référence	Capteur	Référence	Capteur
3,3512	3,3519	37,853	37,846
15,3705	15,3704	37,855	37,848
15,3006	15,3001	27,623	27,615
3,3216	3,3220	27,623	27,620
3,3825	3,3827	13,261	13,270

DOCUMENT TECHNIQUE DT4

Modélisation multiphysique

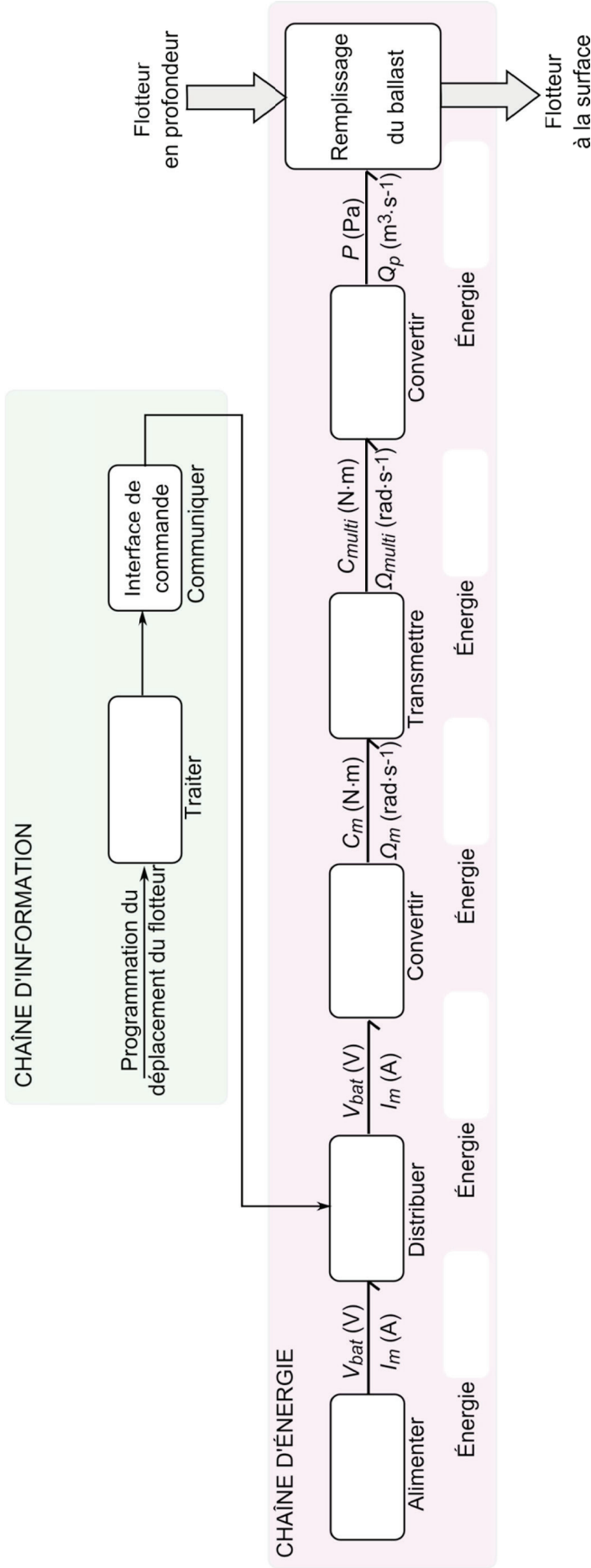


Résultats de la simulation



DOCUMENT RÉPONSE DR1

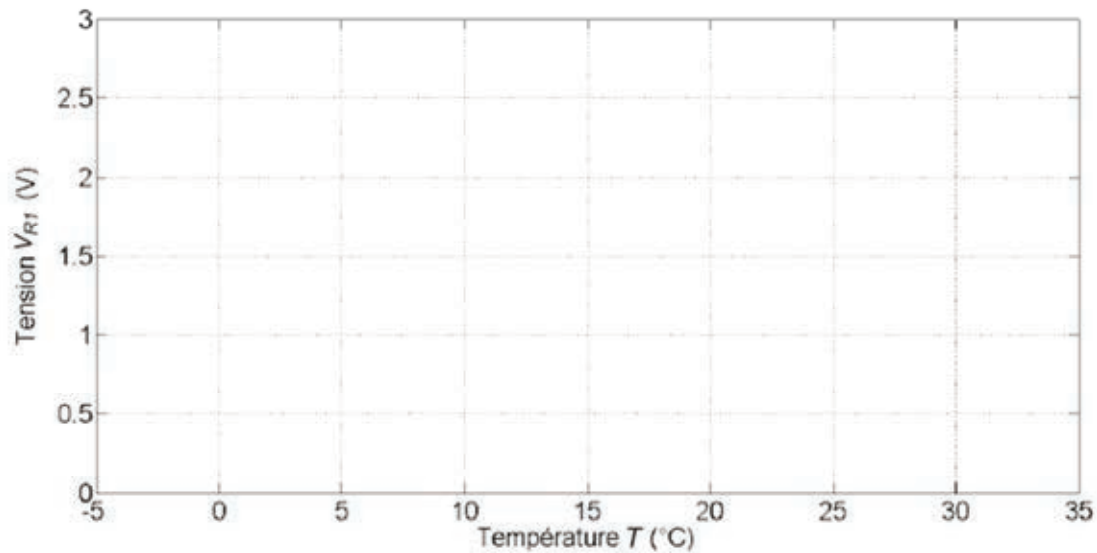
Partie 1 – Analyse du fonctionnement du flotteur



DOCUMENT RÉPONSE DR2

Partie 2 – Acquisition des capteurs du flotteur

Question 6



Partie n°4 – Déplacement du flotteur

Questions 29 et 30

Pression P (bar)	Courant I_m (A)	Débit Q_p ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	Durée T_p (min)	Consommation C_p (mA · h)
201	4,12	52		
181	3,80	55		
161	3,48	58		
141	3,16	60		
121	2,84	63		
101	2,52	66		
81	2,20	69		
61	1,88	72		
41	1,56	74		
21	1,24	77		

