



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE, DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE

EDE MEC 2

SESSION 2017

CAPET
CONCOURS EXTERNE
TROISIÈME CONCOURS
ET CAFEP CORRESPONDANTS

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE

**ETUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

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.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de 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 CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1414E	102	4715

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

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1414E	102	4715

► **Troisième concours du CAPET de l'enseignement public :**

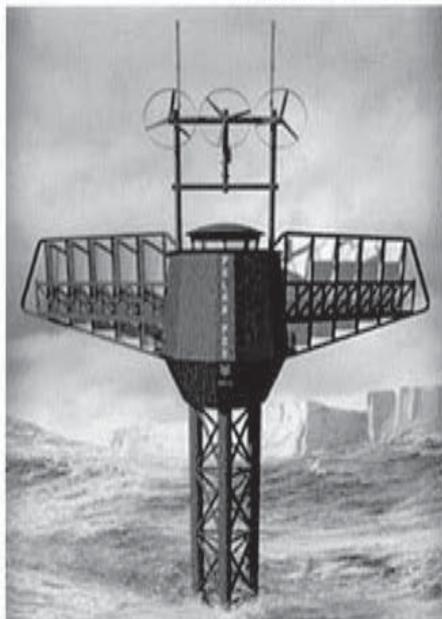
Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDV	1414E	102	4715

► **Troisième concours CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDW	1414E	102	4715

POLAR POD

Station Océanographique Internationale



Au-delà du désir d'aventure, toutes les expéditions que j'ai organisées ont été construites sur les mêmes bases : une interrogation scientifique, un défi technologique et une volonté pédagogique, le désir de transmettre. La science ouvre vers les savoirs, la technologie, et les charpente. La science est une exploration fascinante à la recherche des fonctionnements intimes de la nature, du vivant, de la matière. La technologie est la pensée qui structure, qui donne corps aux découvertes. Les deux sont liés et s'enrichissent d'une curiosité réciproque qui repose sur le dialogue. Ainsi, il est essentiel de trouver les mots simples et pertinents pour échanger sur des phénomènes complexes. Cet exercice pédagogique aide à comprendre et aussi à transmettre, à expliquer à l'humanité que face à la complexité du monde, la science et la technologie sont les piliers du progrès qui ouvrent des voies vers un développement durable.

Jean-Luc Stey

Ce sujet comporte 3 parties :

- présentation du projet et travail demandé pages 1 à 16 ;
- documents techniques pages 17 à 22 ;
- document réponse page 23.

1. Introduction

1.1. Présentation du projet Polar Pod

Le projet Polar Pod est un projet porté par le docteur Jean-Louis Étienne. Il s'agit d'une plateforme océanographique conçue pour dériver autour de l'Antarctique, poussée par le courant circumpolaire qui réunit les eaux de l'océan Atlantique, de l'océan Indien et de l'océan Pacifique. Acteur majeur du climat et de la circulation océanique mondiale, l'océan Austral est une immensité océanique encore méconnue. Le Polar Pod en est le futur observatoire permanent où sept personnes vivront ensemble. L'expédition Polar Pod est une aventure humaine doublée d'un défi technologique pour une exploration maritime jamais réalisée. Ce nouvel observatoire est plébiscité par la communauté scientifique internationale comme étant un navire océanographique du futur, en phase avec l'évolution économique et les progrès technologiques de la recherche océanique. Grâce à son profond pied dans l'eau qui le stabilise (75 m), il peut assurer une présence toute l'année dans cette zone de la planète que l'on surnomme « les cinquantièmes hurlants » (en référence à la latitude 50 degrés sud), alors que les navires de recherche ne viennent dans cette région que quelques semaines en été. Il s'agit d'une expédition écologique, avec un impact très limité sur l'environnement. Sans motorisation, le Polar Pod sera poussé par le courant. On peut parler de zéro émission en exploitation grâce à une bonne isolation thermique et aux énergies renouvelables.



1.2. Conception du Polar Pod

Ce sujet s'appuie (en partie) sur la démarche de conception du Polar Pod menée par Laurent Mermier, ingénieur et directeur de la société Ship-ST basée à Lorient.

Le Polar Pod doit :

- permettre d'assurer les missions scientifiques liées au projet ;
- permettre la vie à bord de 7 personnes, de manière totalement autonome et sécurisée, pendant 4 mois minimum ;
- être autonome tout en minimisant l'impact environnemental ;
- assurer une très bonne stabilité par mer agitée ;
- être transportable du lieu de fabrication à l'océan ;
- résister aux conditions extrêmes rencontrées dans l'océan Austral.

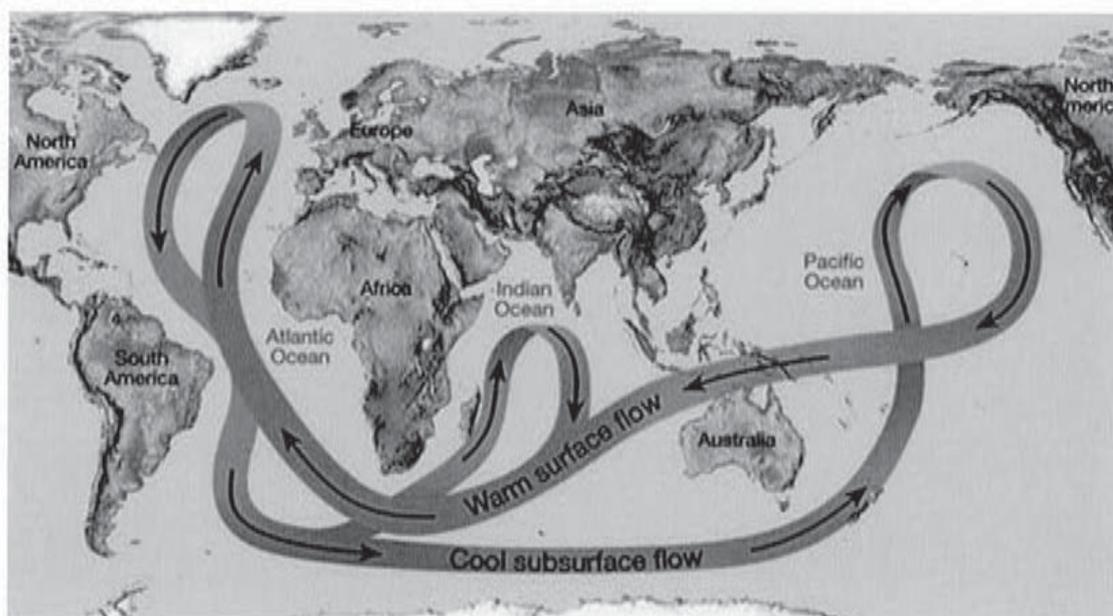
La construction du Polar Pod étant actuellement en cours, les essais et les mesures présentés dans ce sujet ont été effectués en bassin à partir d'une maquette à échelle réduite actuellement visible au centre de culture scientifique Océanopolis situé à Brest.

2. Enjeux de l'expédition

Objectif : comprendre les enjeux de l'expédition en ce qui concerne les données scientifiques collectées ainsi que la durée et les conditions extrêmes dans lesquelles elle a lieu.

Du fait de la capacité thermique de l'eau, l'océan constitue un énorme réservoir de chaleur. En effet, son inertie thermique est beaucoup plus importante que celle de l'air. Les océans tempèrent donc les changements thermiques saisonniers des masses d'air dans le monde.

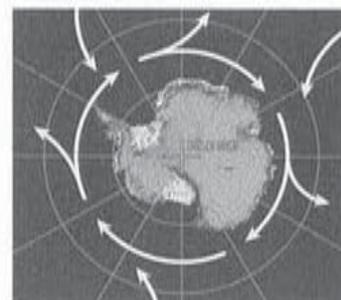
Les courants chauds des couches de surface peuvent réchauffer le climat d'une région. À l'inverse, les eaux froides qui remontent en surface modèrent la température des régions équatoriales. L'océan joue ainsi un rôle essentiel pour la régulation du climat de notre planète.



L'océan est le principal « puits » de carbone de la planète. Il se comporte effectivement comme un réservoir (naturel ou artificiel) qui absorbe le carbone présent dans notre atmosphère. Ainsi, il contribue à diminuer la quantité de CO₂ dans l'air et par conséquent, le réchauffement de la planète.

Le changement climatique et le trou dans la couche d'ozone ont eu progressivement raison de sa capacité à absorber les milliards de tonnes de CO₂ émises par les activités humaines. Les scientifiques ont constaté que les eaux arrivent à saturation. L'acidification de l'océan va devenir très préjudiciable pour le plancton et la vie marine. Ceci précède entre 20 et 40 ans la prévision des modèles climatiques.

Ce constat préoccupant impose une surveillance accrue des échanges carbone-océan. L'océan Austral joue un rôle primordial dans la régulation du climat de la terre. C'est aussi le seul océan dont les eaux effectuent un tour complet sans rencontrer de masses continentales. Il est le siège d'intenses échanges avec l'atmosphère qui engendrent des phénomènes physiques, chimiques et biologiques spécifiques.



La communauté scientifique est donc très intéressée par le Polar Pod qui a pour vocation d'effectuer un tour du monde dans les eaux du Courant Circumpolaire Antarctique, le plus puissant courant de tous les océans afin de pouvoir valider ou modifier les modèles actuellement en place.

Un courant marin est un déplacement d'eau de mer caractérisé par son sens, sa vitesse et son débit, mais également par sa température.

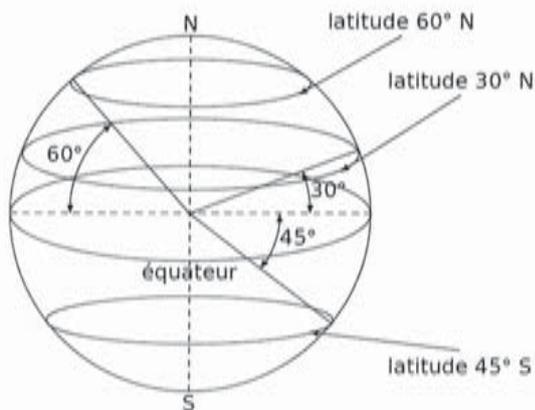


Figure 1 – Latitudes de la Terre

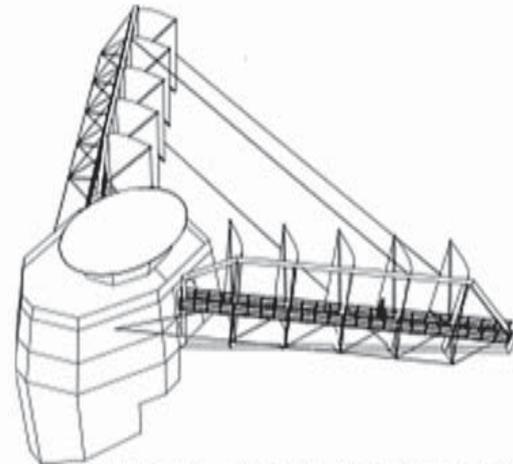


Figure 2 – Voiles montées sur la nacelle supérieure

Le Polar Pod va évoluer à environ 50° de latitude sud, dans une zone très ventée (cf. figure 1). On parle des 40° hurlants et des 50° rugissants.

Q1. Calculer pour une latitude moyenne de 50° sud, la distance D (en km) parcourue par le courant circumpolaire pour faire un tour complet de la Terre en faisant l'hypothèse que la Terre est une sphère de rayon 6 370 kilomètres. Sachant que la vitesse moyenne de ce courant est de 1 nœud soit $1,852 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, **calculer** le temps T_c (en jours) qu'il met pour faire le tour du continent Antarctique.

La durée prévue pour l'expédition est d'un an. Le Polar Pod dispose d'un ensemble de voiles qui lui permettent de s'orienter par rapport au vent et de se déplacer plus rapidement que la vitesse des courants marins (cf. figure 2).

Q2. Calculer la vitesse moyenne réelle du Polar Pod notée V_p (en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) et en **déduire** la vitesse relative moyenne V_v (en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) du Polar Pod par rapport aux courants marins.

Q3. Conclure, en 6 lignes maximum, sur l'intérêt de la structure du Polar Pod en rappelant les différents enjeux de l'expédition.

La suite du sujet a pour objectifs d'analyser la conception de la structure du Polar Pod et le dispositif retenu pour une évacuation sécurisée des passagers en cas d'incident.

3. Choix de la structure de navigation

Objectif : mettre en évidence la nécessité d'une structure de type SPAR¹ pour assurer une très bonne stabilité en mer.

Les navires d'expédition classiques sont très assujettis à la houle et rendent les mesures dans les profondeurs marines trop bruitées. Une structure de type SPAR est une structure très peu soumise à l'influence de la houle de par son architecture. Le document technique DT1 présente la structure SPAR retenue pour le Polar Pod. Elle est globalement constituée de 3 grandes parties : une nacelle à sa partie supérieure (lieu de vie de l'équipage), un flotteur central rempli d'air (à l'exception du ballast B2-3 qui peut être rempli d'eau) et un caisson à sa partie inférieure. L'ensemble est relié par une poutre centrale de type treillis

Le caisson inférieur est composé d'un lest et de deux ballasts repérés B4 et B5. Un lest est un corps lourd destiné à déplacer le centre de masse d'une structure. Un ballast est un réservoir de grande contenance destiné à être rempli ou vidangé d'eau de mer afin d'optimiser la navigation d'un navire ou le manoeuvrer. Deux autres ballasts sont également présents : dans le flotteur central (repéré B2-3) et dans la nacelle (repéré B1).

3.1. Étude de la stabilité par mer calme

Le document technique DT2 précise le principe d'une carène d'un navire et rappelle la notion de poussée d'Archimède. On se place dans une situation de mer calme où l'engin (le Polar Pod) est à l'équilibre et on note :

- V_0 , le volume d'eau déplacé par la carène du Polar Pod dans sa position verticale de fonctionnement ;
- $M = 1\,614,79$ tonnes, la masse totale de l'engin comprenant l'eau dans les ballasts ;
- $\rho_{eau} = 1\,035 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, la masse volumique de l'eau salée, supposée constante quelle que soit la profondeur pour simplifier les calculs ;
- G , le centre de masse global de l'engin ;
- C , le centre de carène de l'engin ;
- $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, l'accélération de la pesanteur.

Q4. Calculer la norme de l'action mécanique (en kN) qu'exerce la pesanteur sur l'engin, notée $\|\vec{F}_{pes \rightarrow engin}\|$ et la norme de l'action mécanique qu'exerce l'eau sur l'engin, notée $\|\vec{F}_{eau \rightarrow engin}\|$ (la poussée d'Archimède) s'appliquant globalement sur la structure puis **calculer** le volume d'eau V_0 (en m^3) déplacé par la carène de l'engin dans sa position d'équilibre stable verticale (fonctionnement normal).

Pour la question suivante, on suppose la masse M et le volume V_0 constants pour chaque situation.

Q5. Représenter, sur le document réponse DR1, les actions mécaniques de pesanteur (en noir) et d'Archimède (en bleu) appliquées dans les quatre situations proposées (échelle de représentation : $1 \text{ cm} = 10^7 \text{ N}$). **Identifier** la situation

¹ Acronyme de « Single Point Anchor Reservoir » : il s'agit d'un type de plateforme pétrolière.

d'équilibre stable et la situation d'équilibre instable. **Expliquer** comment positionner idéalement les points *C* et *G* pour assurer le maximum de stabilité de l'engin.

Le lest ajouté au niveau du caisson bas est de 58,5 tonnes. En architecture navale, le matériau classiquement utilisé pour réaliser un lest est le béton en raison de son faible coût massique. Avec une masse volumique de $2\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, il faut un volume de $26,6\text{ m}^3$ pour réaliser ce lest.

On envisage la réalisation de ce lest en acier ($\rho_{\text{acier}} = 7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). La fabrication d'un lest de 58,5 tonnes en acier conduit à un volume de $7,5\text{ m}^3$.

Pour comparer l'influence de ces deux matériaux, on se placera dans le cas où le centre de masse de l'engin est exactement à la même position.

Q6. Expliquer l'influence du choix de matériau sur la position du centre de carène du Polar Pod. **Discuter** plus particulièrement de ce choix d'un point de vue stabilité en mer de la structure.

3.2. Étude de la stabilité par mer agitée

Plusieurs simulations numériques ont permis d'appréhender le comportement dynamique du Polar Pod soumis à la houle. Dans le cadre de cette étude, nous nous limitons à l'analyse du mouvement de pilonnement de l'engin, c'est-à-dire le mouvement de translation alternatif du Polar Pod suivant un axe vertical.

La houle peut être modélisée par une fonction sinusoïdale, caractérisée par plusieurs critères :

- la hauteur ou l'amplitude, distance comprise entre le sommet de la vague et le niveau moyen de la mer (en mètre) ;
- la longueur d'onde, distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs (en mètre) ;
- la période, temps écoulé entre le passage de deux crêtes consécutives au même point (en seconde) ;
- la fréquence, nombre de trains de houle passant en un point fixe en une seconde (en hertz).

La période de houle dans l'océan Austral varie entre 4 et 25 secondes. Les mouvements de l'eau dont les périodes sont situées entre 1 et 4 secondes (le clapot) sont de très faibles amplitudes et n'ont donc qu'un impact très limité sur le Polar Pod.

La figure 3 présente les résultats des simulations de l'amplitude du pilonnement de l'engin en fonction de la période de la houle. En ordonnée est représenté le gain en décibels du rapport (noté *H*) entre l'amplitude du déplacement vertical du Polar Pod (en mètre) et la hauteur crête à creux des vagues (en mètre).

L'équation $H_{dB} = 20 \cdot \log(H)$ donne la relation entre ce rapport noté *H* et sa valeur exprimée en décibels (dB) notée H_{dB} .

La très grande majorité du temps (95 %), les houles ont des hauteurs de vagues allant de 2 à 7 mètres et des périodes allant de 8 à 13 secondes.

Q7. En se plaçant dans la configuration la plus défavorable (qui survient 95 % du temps), **calculer** l'amplitude du mouvement de pilonnement du Polar Pod.

Q8. Comparer ces résultats avec ceux que l'on obtiendrait pour un navire d'expédition classique puis **conclure** sur l'utilité d'utiliser une structure de type SPAR.

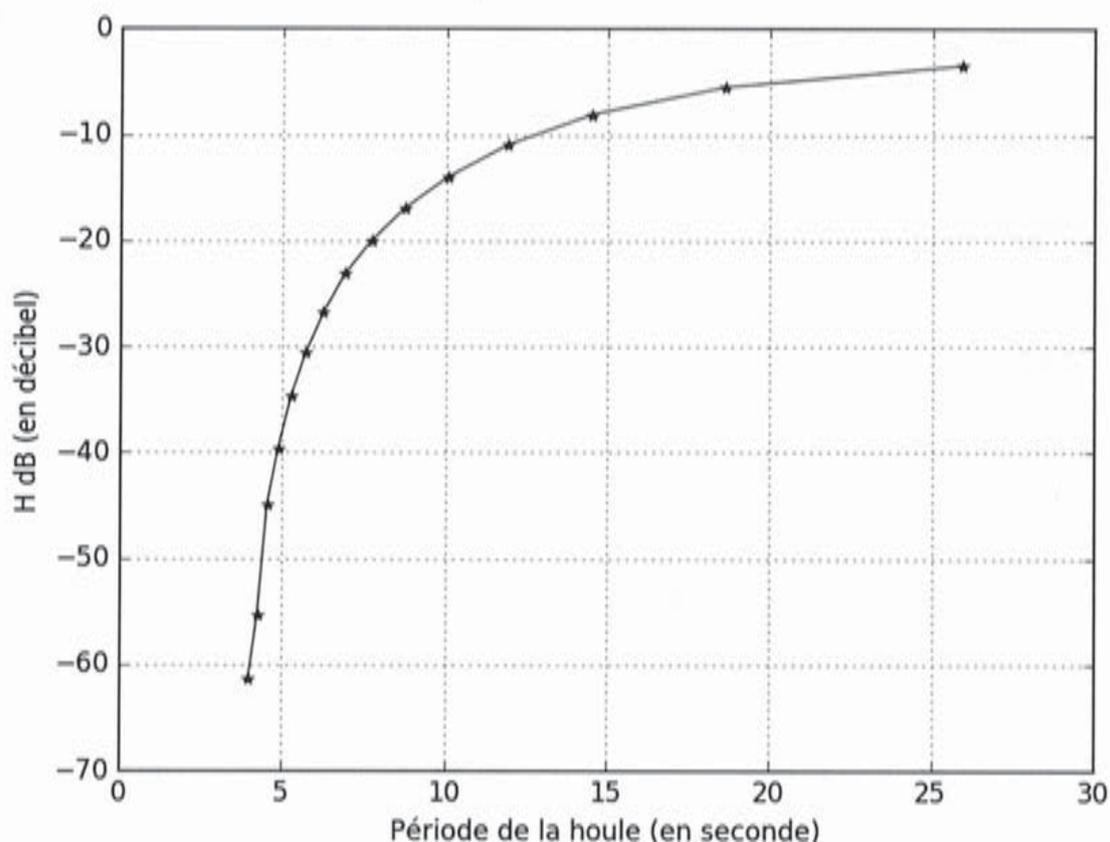


Figure 3 – Atténuation du mouvement de pilonnement du Polar Pod en fonction de la houle

4. Conception de la structure du Polar Pod

Objectif : valider la faisabilité technique de la structure du Polar Pod et dimensionner la structure centrale.

La partie précédente a permis de mettre en évidence la nécessité d'utiliser une structure de type SPAR, pour assurer une très bonne stabilité en mer. Dans cette partie, quelques aspects de la conception de la structure du Polar Pod seront abordés. La station océanographique est déplacée par un bateau d'expédition en position horizontale du port vers le lieu de départ de l'expédition, ce qui soulève plusieurs questions :

- comment passer de la position horizontale à la position verticale ?
- quelle structure de poutre centrale est la mieux adaptée pour assembler la nacelle supérieure, le flotteur central et le caisson bas ?
- quelle est l'influence de la géométrie de la poutre centrale sur la stabilité en mer ?

4.1. Manœuvrabilité en mer

Le passage de la position verticale à la position horizontale (et inversement) est une manœuvre délicate. Cette manœuvre est rendue possible grâce aux différents ballasts présents sur l'engin. Le tableau 1 décrit le remplissage des ballasts permettant de passer de la position de flottaison verticale à une position horizontale.

La surface de flottaison (sa définition est rappelée dans le document technique DT2) vaut $S_{treillis} = 2,939 \text{ m}^2$ lorsque le niveau de la mer est situé au niveau du treillis et vaut $S_{nacelle} = 29,08 \text{ m}^2$ (valeur moyenne supposée constante) lorsque le niveau de la mer atteint le bas de la nacelle supérieure. On rappelle que la masse totale de l'engin est $M = 1\,614,79$ tonnes (cette valeur prend en compte la masse d'eau comprise dans les ballasts telle que définie à l'étape 0 du tableau 1) et que la masse volumique de l'eau salée est $\rho_{eau} = 1\,035 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (supposée constante).

Étapes		Configuration des ballasts			
		Nacelle	Flotteurs centraux	Caisson bas	
		B1	B2-3	B4	B5 (grand)
0	Position verticale	0 %	3,4 %	97,5 %	97,5 %
1	Abaissement	0 %	100 %	97,5 %	97,5 %
2	Préparation basculement	50 %	100 %	50 %	97,5 %
2'	Situation avant basculement	78 %	100 %	22 %	97,5 %
2''	Situation intermédiaire	92 %	100 %	8 %	97,5 %
2'''	Fin de basculement	100 %	100 %	0 %	97,5 %
3	Mise en flottaison du caisson de pied	100 %	100 %	0 %	0 %
4	Allègement - position horizontale	0 %	0 %	0 %	0 %

Tableau 1 – Description temporelle du remplissage des ballasts

La première étape (abaissement) consiste à remplir complètement le ballast central B2-3 avec de l'eau de mer. On passe alors de 3,4 % à 100 % de taux de remplissage. Le volume total de ce ballast, noté V_{B23} , vaut 149 m^3 .

Q9. Exprimer le nouveau volume de carène, noté V_1 , suite au remplissage du ballast B2-3 (à la fin de l'étape 1) en fonction de V_0 (le volume de carène à l'étape 0 en position verticale tel que calculé question 4) et de V_{B23} en tenant compte des pourcentages de remplissage. **Calculer** sa valeur numérique.

La figure 4 montre la position du Polar Pod vis-à-vis de la mer en position verticale, c'est-à-dire à l'étape 0. Sur cette figure est également représenté le Polar Pod à la fin de l'étape d'abaissement.

Q10. Exprimer puis calculer l'abaissement total (en m), noté z_1 , du Polar Pod suivant son axe vertical à la fin de l'étape 1. Il est conseillé de vérifier la cohérence de la valeur numérique calculée à partir de la figure 4.

Le document technique DT3 montre plusieurs figures correspondant à différentes positions du Polar Pod.

Q11. Compléter le document réponse DR2 avec le numéro de la figure correspondant à la position atteinte à la fin de l'étape correspondante (cf. tableau 1). **Expliquer** comment a été choisie la position du ballast B2-3 et la raison pour laquelle il y a deux ballasts différents (B4 et B5) dans le caisson inférieur.

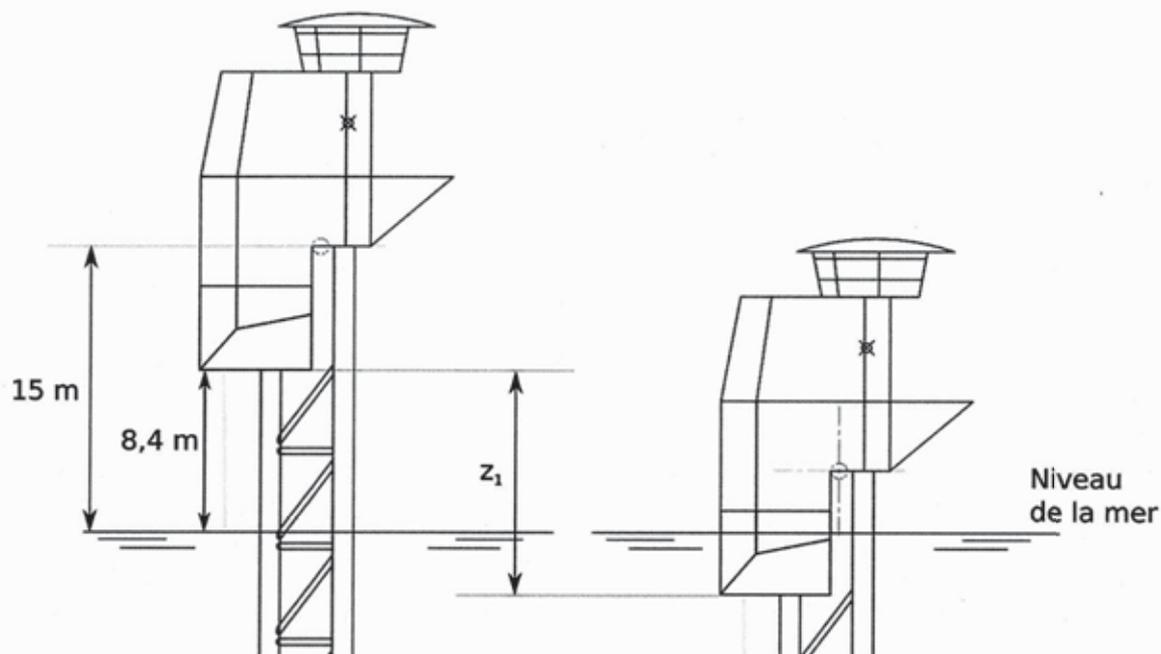


Figure 4 – Polar Pod en position verticale (à gauche) et à la fin de l'étape 1 (à droite).

4.2. Dimensionnement de la poutre centrale de la structure

La poutre centrale en acier constitue véritablement le squelette de la structure du Polar Pod puisqu'elle maintient ensemble la nacelle supérieure, le flotteur central et le caisson bas. Deux pistes sont alors envisagées pour sa fabrication : une poutre pleine, de section circulaire constante et une structure de type treillis (voir document technique DT1).

Il faut se placer dans la situation la plus contraignante pour dimensionner cette poutre centrale. Cette situation survient lorsque le Polar Pod est en position horizontale et que la houle soulève le Polar Pod par ses extrémités (le caisson bas et la nacelle supérieure).

4.2.1. Dimensionnement d'une poutre de section circulaire pleine

On cherche dans un premier temps à dimensionner la poutre centrale à partir d'une poutre de section circulaire pleine et constante (on note D son diamètre extérieur). Le modèle défini dans le document technique DT4 est adopté. La poutre est en appui simple en A et en C . Le poids du flotteur central est modélisé par un glisseur qui s'applique localement au point B . On suppose pour simplifier les calculs que celui-ci se situe au milieu de la poutre. Par ailleurs, l'action mécanique de la pesanteur sur la poutre est modélisée par une charge répartie, notée p .

Q12. Exprimer littéralement le moment fléchissant en fonction de x (la distance par rapport au point A) et des paramètres du modèle sur le tronçon $[AB]$ uniquement. **Tracer** l'allure du moment fléchissant sur toute la longueur de la poutre et **préciser** l'expression littérale du moment fléchissant maximal que l'on note $\max(M_{fz})$ en fonction de m_f , m_p , g et L

Q13. Rappeler le type de sollicitation à laquelle est soumise la poutre. **Tracer** l'allure de la répartition de la contrainte normale dans une section droite. **Exprimer** la contrainte normale maximale $\sigma_{\max} = \max(|\sigma(x,y,z)|)$ en fonction de m_f , L , ρ_{acier} , g et D .

La modification du diamètre de la poutre entraîne une modification de son poids et donc une modification de la force répartie p . Il n'est donc pas possible d'obtenir une relation explicite entre le diamètre de la poutre et la contrainte normale maximale à partir de l'expression obtenue à la question précédente.

Un calcul numérique avec Python est envisagé. Certaines fonctions sont déjà implémentées. Leurs spécifications sont détaillées dans le tableau 2.

<pre>def mfz_max(D) : """ Fonction qui retourne la valeur maximale du moment fléchissant à partir d'un diamètre D Entrée : réel > 0 Sortie : réel """</pre>	<pre>def lgz(D) : """ Fonction qui retourne la valeur du moment quadratique à partir d'un diamètre D Entrée : réel > 0 Sortie : réel """</pre>
--	---

Tableau 2 – Spécifications des fonctions « mfz_max » et « lgz »

Q14. Écrire une fonction appelée « sigma_max » en langage Python qui retourne la valeur de la contrainte normale maximale calculée pour un diamètre D donné.

Cette fonction a permis de calculer la contrainte normale maximale pour différentes valeurs de diamètre et ainsi tracer la figure du document technique DT4. Le matériau retenu est un acier à haute limite élastique S420. Sa limite élastique Re vaut 420 MPa.

Q15. Donner la valeur numérique du diamètre minimal D_{\min} de la poutre en prenant un coefficient de sécurité de 2.

La poutre ainsi dimensionnée est relativement massive. Une structure plus légère de type treillis est alors envisagée.

4.2.2. Dimensionnement du treillis

Le même matériau (acier S420) est envisagé pour la réalisation du treillis. Un logiciel de calcul numérique des structures a permis de faire les calculs de contraintes et de déformations de cette structure à partir d'un modèle de liaison et de chargement similaire à celui présenté dans la partie précédente. Avec la géométrie retenue, la section droite la plus sollicitée est soumise à une contrainte de 134,8 MPa.

La déformation globale est présentée sur la figure 5.

Q16. Conclure sur le dimensionnement de la structure de type treillis proposée.



Figure 5 – Déformation du treillis

4.3. Influence de la géométrie de la poutre centrale sur la stabilité par mer agitée

La figure 6 présente l'amplitude du pilonnement pour les deux types de poutre.

Q17. Au regard des études menées dans la partie 4.2 et de la figure 6, **justifier** le type de structure centrale à retenir pour la réalisation du Polar Pod.

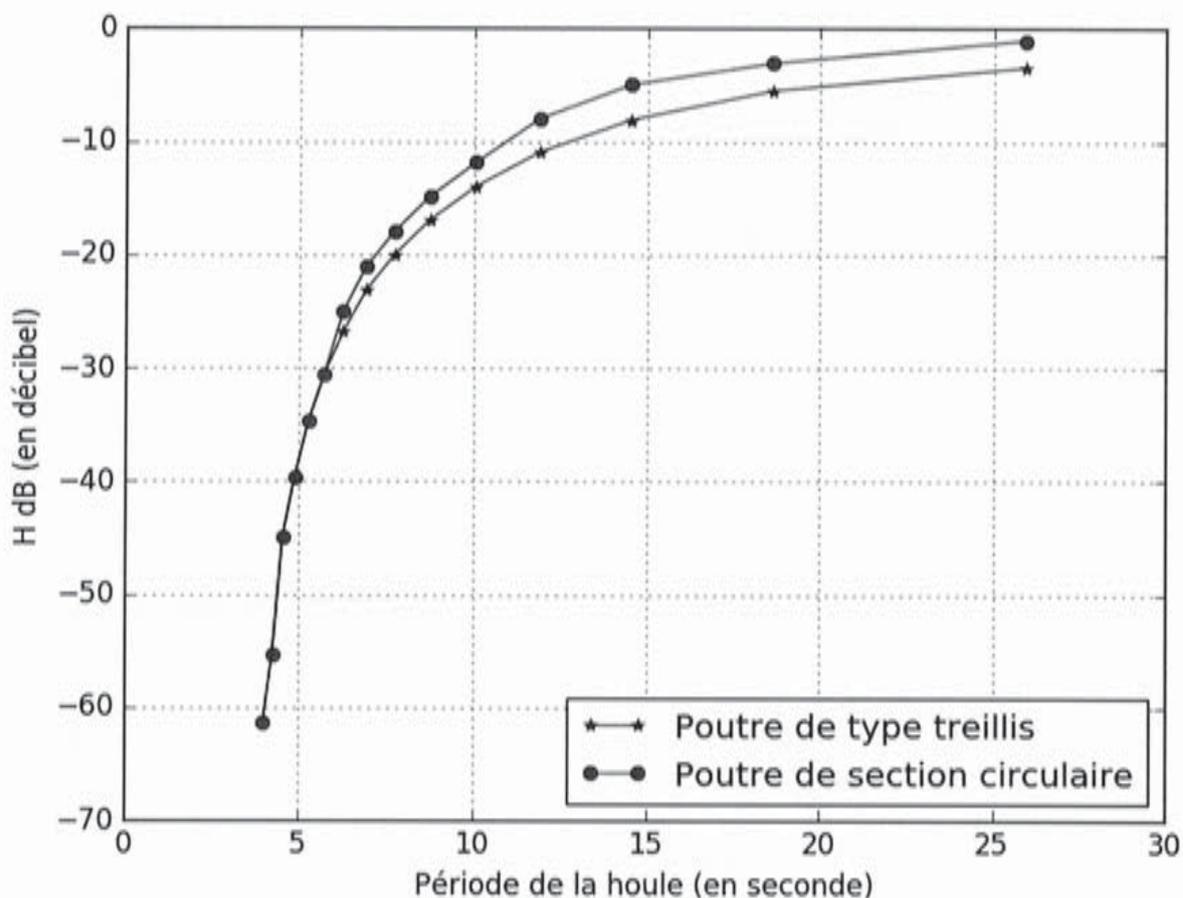


Figure 6 – Atténuation du pilonnement du Polar Pod en fonction de la houle et du type de poutre

5. Évacuation du Polar Pod en cas d'urgence

Objectif : dimensionner un treuil afin de permettre une évacuation sécurisée des passagers y compris dans des conditions extrêmes de houle.

Une fuite dans le flotteur central entraîne une perte de flottabilité du Polar Pod. Pour des raisons évidentes de sécurité, l'engin doit donc contenir une embarcation de secours afin d'extraire rapidement les personnes à bord. Le principal risque est le renversement de l'embarcation par les vagues lors de la mise à l'eau. Pour cela, un treuil électrique (entraîné par un moteur asynchrone triphasé et alimenté via un variateur de vitesse) permet de piloter la position verticale de l'embarcation (cf. figure 7). L'arbre moteur est solidaire d'un réducteur qui entraîne un tambour sur lequel le câble est enroulé. La figure 8 montre la cinématique partielle du système de mise à l'eau.

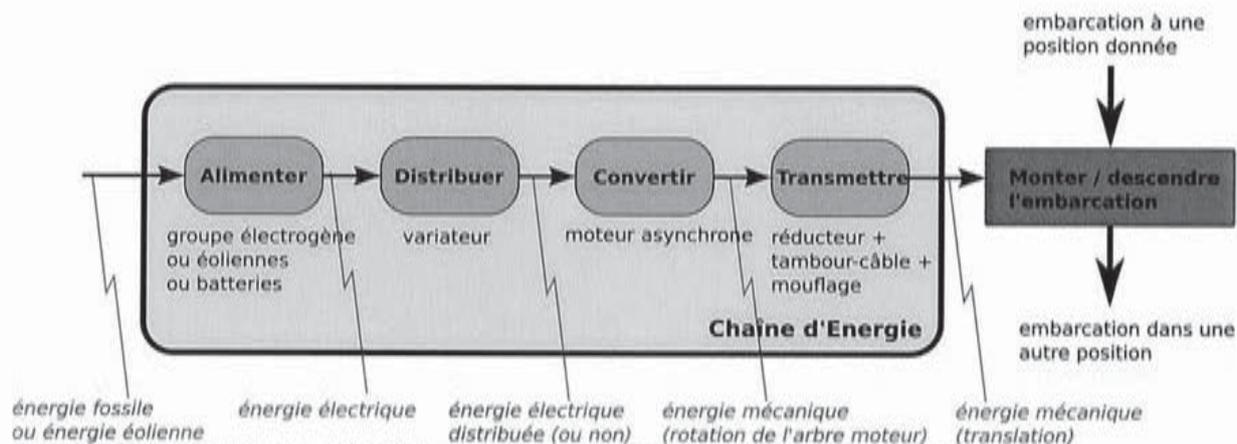


Figure 7 – Chaîne d'énergie d'un treuil électrique de levage

Le système de mise à l'eau est composé de deux treuils identiques (cf. figure 8).

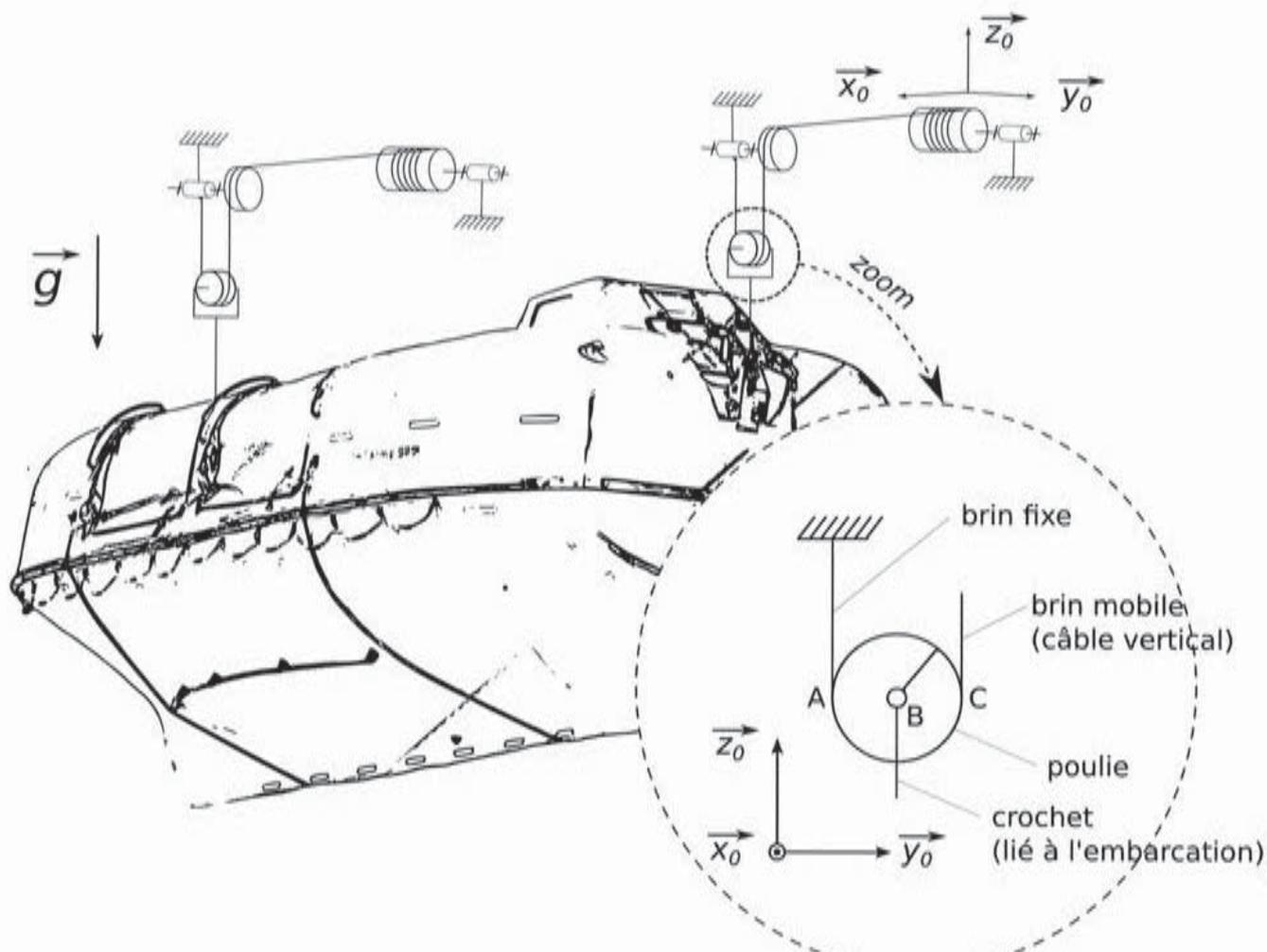


Figure 8 – Système de mise à l'eau de l'embarcation de secours (moteurs et réducteurs non représentés)

Notations :

- C_m , couple exercé par un moteur en entrée du réducteur ;
- ω_m , vitesse de rotation de l'arbre moteur par rapport à $R_0(0, \overline{x_0}, \overline{y_0}, \overline{z_0})$, repère lié au châssis du Polar Pod, supposé être un référentiel Galiléen (simplification de l'étude) ;
- $J_m = 0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, moment d'inertie de l'arbre moteur autour de son axe ;
- $k = 0,15$, rapport de réduction du réducteur ;
- $\eta = 0,87$, rendement énergétique du réducteur lors de la phase de montée de l'embarcation (supposé constant quel que soit le point de fonctionnement) ;
- $J_{red} = 0,04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, moment d'inertie de l'ensemble des pièces en mouvement dans le réducteur ramené à son arbre de sortie ;
- $R_t = 150 \text{ mm}$, rayon du tambour sur lequel le câble est enroulé ;
- $J_t = 0,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, moment d'inertie du tambour par rapport à son axe de rotation ;
- V_c , vitesse de défilement du câble par rapport au châssis du Polar Pod, on a donc $\vec{V}_{\text{câblevertical}}/R_0 = V_c \cdot \vec{z}_0$ et $\vec{V}_{\text{câblehorizontal}}/R_0 = -V_c \cdot \vec{x}_0$;
- R_p , rayon de la poulie de renvoi d'angle et de la poulie du système de mouflage ;
- V , vitesse de translation verticale de l'embarcation par rapport au châssis, on a donc $\vec{V}_{\text{embarcation}}/R_0 = V \cdot \vec{z}_0$;
- $M = 1\,500 \text{ kg}$, la masse maximale de l'embarcation de secours (comprenant 7 personnes).

Hypothèses :

- toutes les liaisons sont supposées parfaites ;
- les variations du diamètre d'enroulement du câble liées à son épaisseur sont négligées ;
- la masse des câbles est négligée ;
- les masses des poulies de renvoi d'angle et ainsi que celles du système de mouflage sont négligées ;
- la masse de l'embarcation est équitablement répartie entre les deux crochets, celui de l'avant et celui de l'arrière.

Remarque : une vitesse de rotation du moteur ω_m positive entraîne une montée de l'embarcation correspondant à une vitesse V positive.

5.1. Dimensionnement du câble

Dans un premier temps, on se place dans la situation où l'embarcation est immobile.

Q18. Exprimer puis calculer numériquement la tension maximale T_{stat} dans les câbles lorsque l'embarcation est au repos en fonction des données du problème. Il est demandé de préciser clairement le système isolé ainsi que le(s) théorème(s) utilisé(s).

On souhaite désormais prendre en compte l'accélération de l'embarcation lors de son mouvement vertical.

Q19. Exprimer puis calculer numériquement la nouvelle tension maximale T_{dyn} dans les câbles lorsque l'embarcation suit le profil imposé sur la figure 9 en fonction des données du problème. Il est demandé de préciser clairement le système isolé ainsi que le(s) théorème(s) utilisé(s).

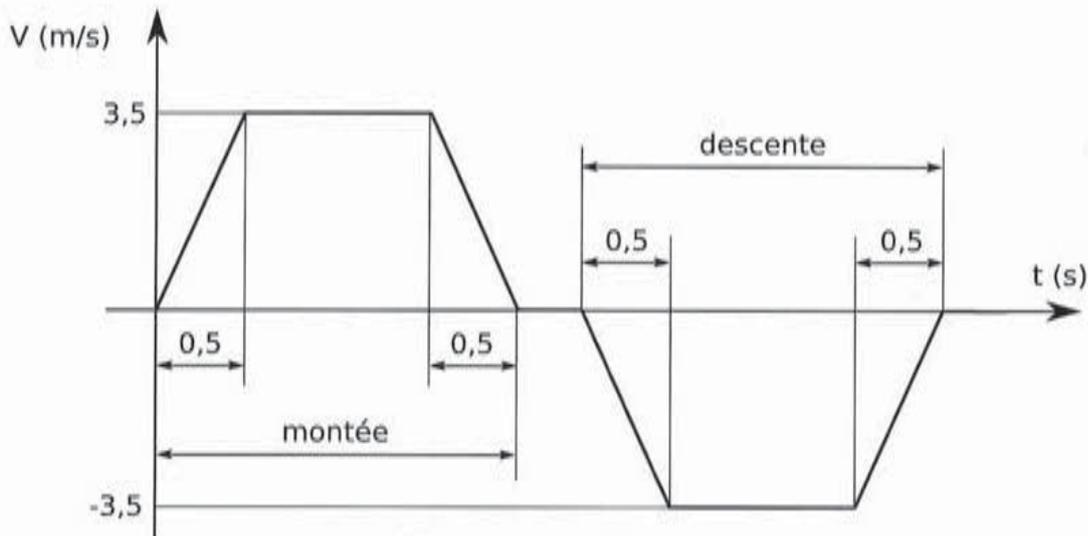


Figure 9– Profil de vitesse

Le câble retenu est composé de 6 torons de 36 fils et d'une âme en textile au milieu.

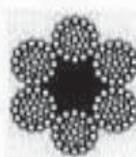
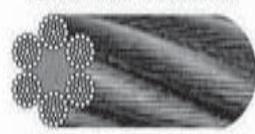
CÂBLE Galva 6 x 36 fils « Warrington Seale » (1+7+7/7+14 fils) - Âme textile  réf. 1062 ^{AT}

 Galvanized steel wire rope 6x36 « Warrington Seale » - Fibre core

Applications : câble pour grues, palans, treuils, portique, skips, dragages, exploitations forestières

Nuance de l'acier : GALVANISÉ / Ame : TEXTILE
CROISÉ DROITE (Croisé gauche sur demande)
Résistance de l'acier : 180 kg/mm²
Tolérance sur le diamètre : selon norme

AME TEXTILE

CODE	AAGA 180	AGA 180	BGA 180	CGA 180	DGA 180	EGA 180	FGA 180	GGA 180	HGA 180	IGA 180	JGA 180	KGA 180	LGA 180	MGA 180
Ø câble (mm)	12	13	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
poids/mètre (kg)	0,531	0,623	0,723	0,944	1,19	1,48	1,78	2,12	2,49	2,89	3,32	3,78	4,26	4,78
Rupture mini (kg)	8570	10100	11700	15200	19300	23800	28800	34300	40200	46700	53600	61000	68800	77100

Figure 10 – Différentes références de câbles

Q20. Donner la référence du câble qui convient pour l'application en s'appuyant sur la documentation du fabricant (cf. figure 10) et en prenant un coefficient de sécurité minimal de 3 par rapport à la rupture du câble.

On souhaite désormais vérifier que le rayon d'enroulement sur lequel s'enroule le câble n'induit pas de déformation plastique. Le câble est fabriqué à partir d'un acier galvanisé, de limite élastique $R_e = 900$ MPa et de module d'Young $E = 220\,000$ MPa. On suppose que cet acier est homogène, que sa déformation est linéaire dans la zone de déformation élastique et que ses propriétés physiques sont isotropes.



Figure 11 – Modélisation d'une portion de fil

On considère une portion de fil de longueur initiale L et de diamètre $d = 0,52 \text{ mm}$ (modélisée par une poutre) que l'on enroule sur un tambour de rayon R (cf. figure 11). Les déformations du fil liées à la forme torsadée du câble sont négligées. On suppose également que les sections droites et perpendiculaires à la ligne moyenne du fil le restent après l'enroulement.

Q21. Exprimer les deux relations géométriques qui existent entre le diamètre du fil (d), le rayon d'enroulement (R), l'angle d'enroulement (ϕ), la longueur de la fibre inférieure ($L - \Delta L$) et la longueur de la fibre supérieure ($L + \Delta L$).

On note $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ la déformation longitudinale d'une fibre du fil.

Q22. En utilisant la loi de Hooke, **exprimer** puis **calculer** le rayon du tambour minimal (noté R_{mini}) de telle sorte que chaque fil composant le câble reste dans son domaine élastique lors de l'enroulement. **Conclure** sur le choix des caractéristiques géométriques du tambour.

5.2. Dimensionnement de l'entraînement mécanique

Lors de la mise à l'eau de l'embarcation, il est nécessaire de pouvoir ajuster la position verticale de l'embarcation de telle manière que les vagues ne viennent pas la percuter violemment en cas de mer très agitée.

On souhaite dans un premier temps déterminer l'équation du mouvement de l'ensemble limité à la phase de montée de l'embarcation.

On rappelle que chaque treuil permet la mise en mouvement de la moitié de la masse de l'embarcation, que l'on appellera dans ce sujet, « demi-embarcation ». On note Σ l'ensemble {arbre moteur, pièces composants le réducteur, tambour, câble, poulie de renvoi d'angle, système de mouflage, demi-embarcation}.

Q23. Exprimer la puissance des actions mécaniques intérieures au système Σ lors de la phase de montée de l'embarcation.

Q24. Exprimer la puissance des actions mécaniques extérieures au système Σ par rapport à R_0 .

Q25. Préciser où se situe le centre instantané de rotation du mouvement de la poulie (du système de mouflage) par rapport au châssis du Polar Pod puis **démontrer** rigoureusement que $V_o = 2 \cdot V$.

Q26. Exprimer l'énergie cinétique galiléenne de l'ensemble Σ en fonction des données du problème.

Q27. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique au système Σ puis **déterminer** l'équation du mouvement de montée et la mettre sous la forme

$J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = \eta \cdot C_m - C_{req}$. Il est demandé d'exprimer clairement J_{eq} l'inertie équivalente ramenée à l'axe moteur et C_{req} le couple résistant équivalent ramené à l'axe moteur en fonction des données du problème.

Dans la situation la plus contraignante, la houle monte et descend à une vitesse de $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. On admettra que le profil de vitesse tel que défini sur la figure 9 page 14 permet d'être suffisamment réactif et rapide pour compenser le mouvement de la houle dans le pire des cas.

Q28. Tracer, les profils de régime moteur (en $\text{tour}\cdot\text{min}^{-1}$), couple moteur (en $\text{N}\cdot\text{m}$) et puissance moteur (en kW) nécessaires pour respecter le profil de vitesse en se limitant à la phase de montée de l'embarcation (cf. figure 9 page 14). Indiquer toutes les valeurs numériques caractéristiques de ces courbes.

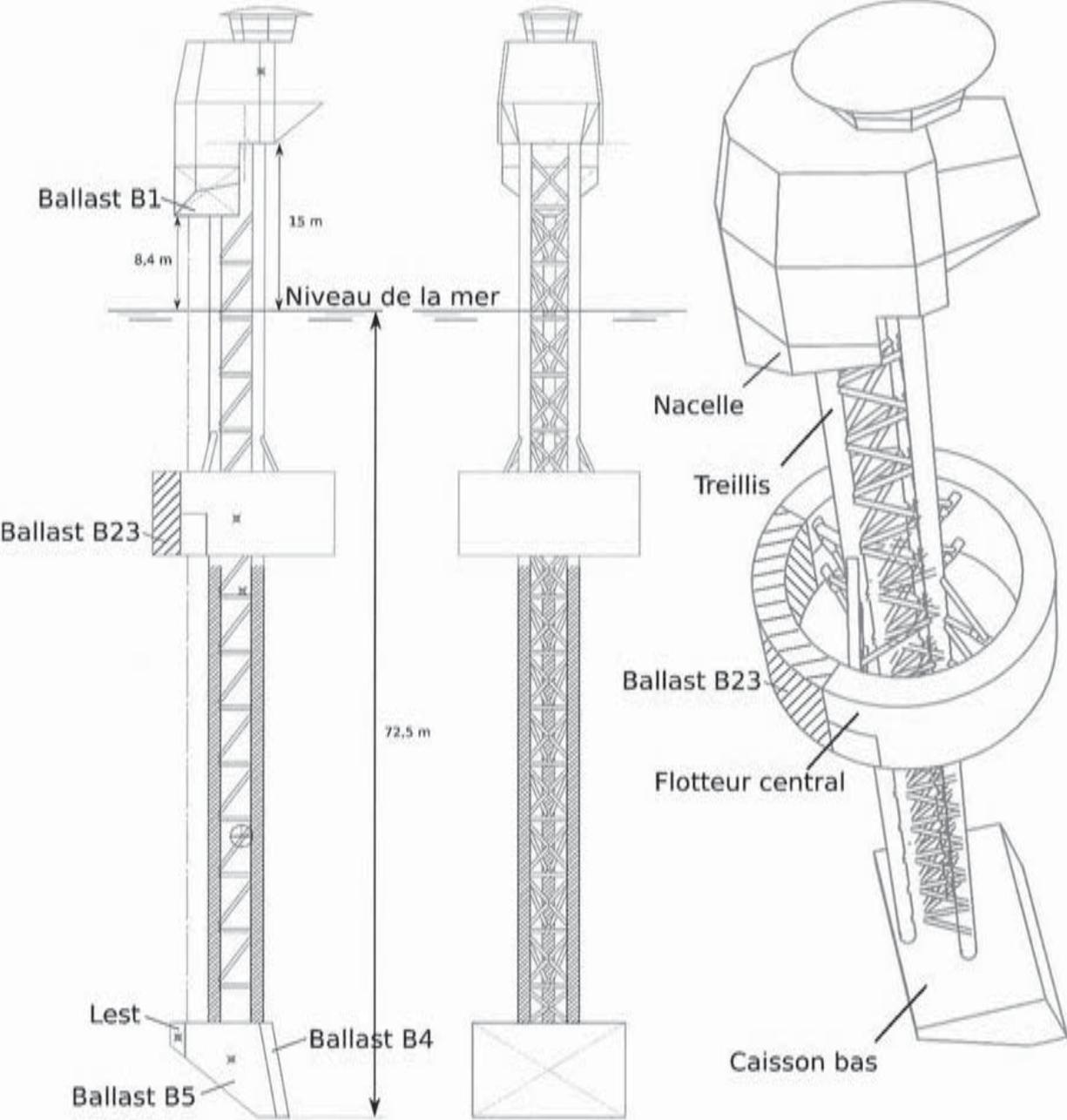
Q29. À partir de la documentation à disposition (cf. document technique DT5), **proposer** (en la justifiant) une référence de moteur asynchrone qui convienne à cette application.

6. Synthèse finale

Q30. Rappeler les principales exigences liées à la conception du Polar Pod abordées dans ce sujet et **commenter** les solutions constructives retenues de manière synthétique (3 lignes maximum par exigence).

DOCUMENTS TECHNIQUES

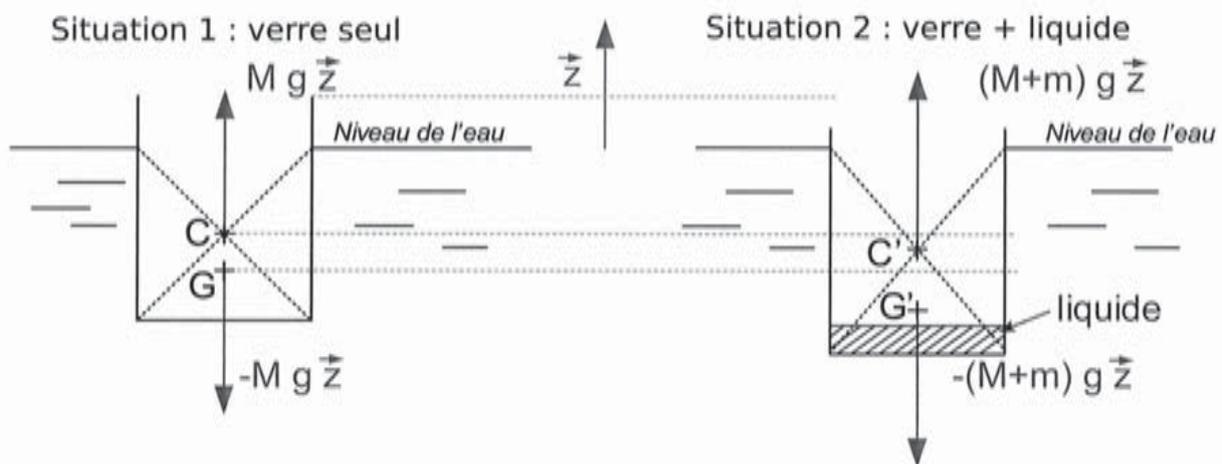
DT1. Structure globale du Polar Pod



DT2. Carène d'un navire et poussée d'Archimède

La carène est la partie immergée de la coque d'un navire. C'est l'ensemble des parties du flotteur qui sont, à un moment donné, en contact avec l'eau. Le centre de carène est le centre du volume d'eau déplacé par la carène d'un navire. Il s'agit du point d'application de la poussée d'Archimède qui est égale au poids du volume d'eau déplacé. La surface de flottaison est l'aire de la surface définie par l'intersection entre le niveau de la mer et la carène d'un navire.

Dans l'exemple ci-dessous, on considère un verre de masse M , de diamètre extérieur D en équilibre sur l'eau et deux situations sont illustrées. g est l'accélération de la pesanteur et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau. Le vecteur \vec{z} est un vecteur de norme 1.



Dans la première situation, le verre est en équilibre sous l'action mécanique de deux forces :

- la force de pesanteur $-M \cdot g \cdot \vec{z}$ s'appliquant au centre de masse G ,
- la poussée d'Archimède $M \cdot g \cdot \vec{z}$ s'appliquant en C , centre de carène (le centre du volume d'eau déplacé).

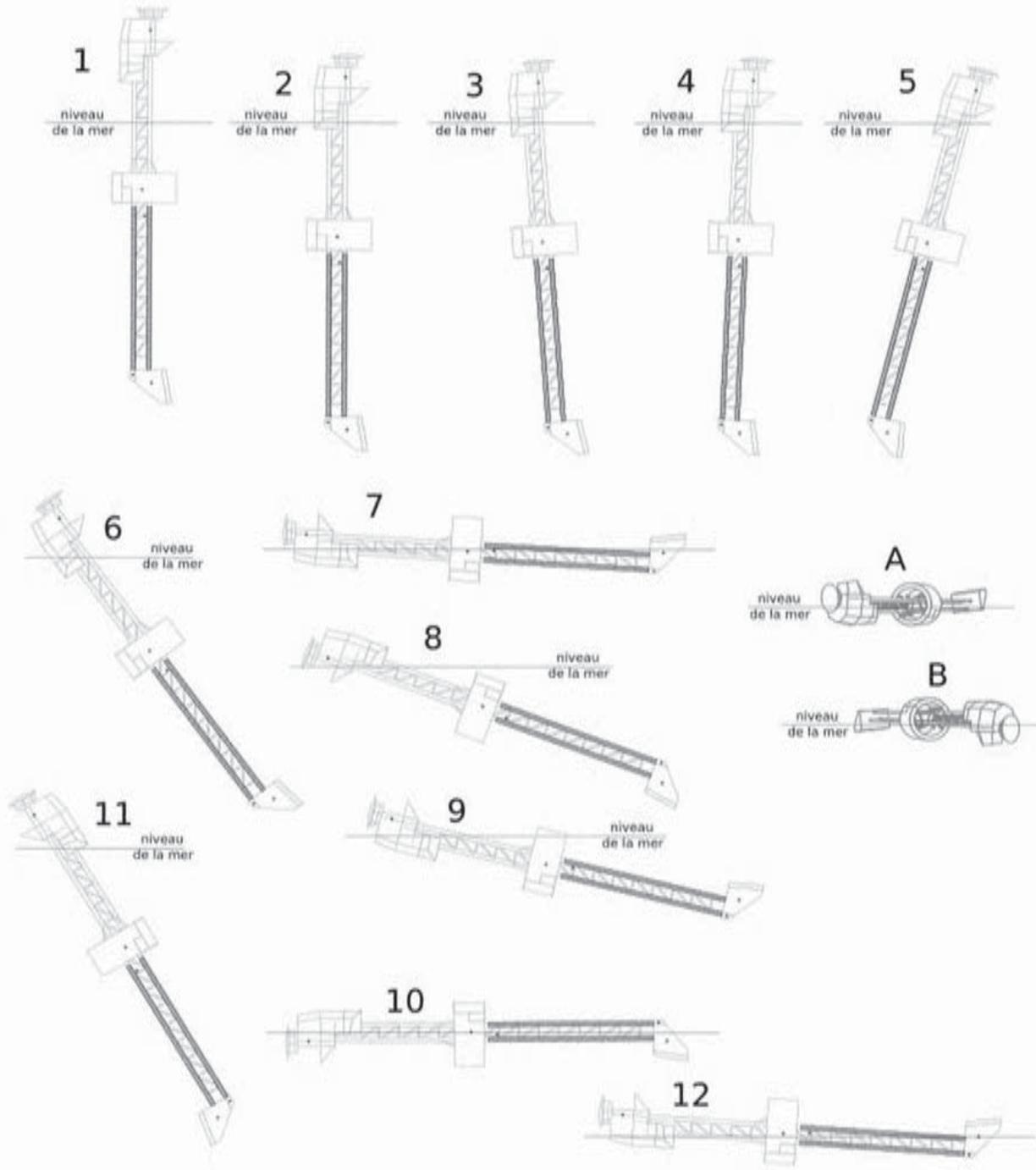
Le volume de carène vaut $\frac{M}{\rho_{\text{eau}}}$ et la surface de flottaison vaut $\pi \frac{D^2}{4}$.

Dans la deuxième situation, en remplissant le verre d'un liquide de masse m , on constate que le verre s'est « enfoncé » dans l'eau et a atteint une nouvelle position d'équilibre stable. En isolant l'ensemble verre + liquide, on constate qu'il est désormais en équilibre sous l'action mécanique de deux efforts :

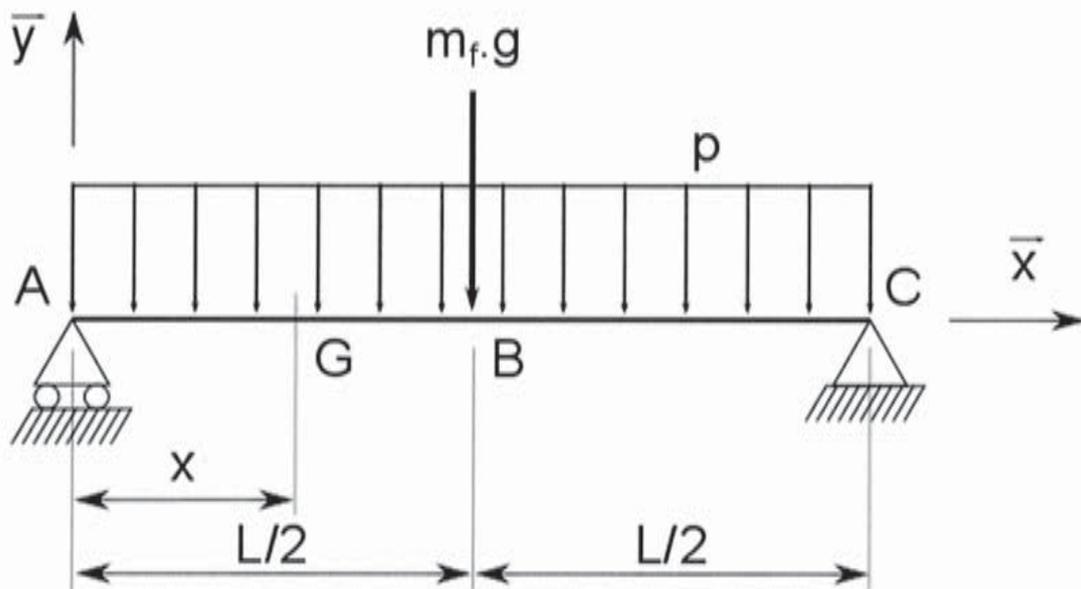
- la force de pesanteur $-(M + m) \cdot g \cdot \vec{z}$ s'appliquant au centre de masse G' de l'ensemble verre + liquide;
- la poussée d'Archimède $(M + m) \cdot g \cdot \vec{z}$ s'appliquant en C' , le nouveau centre de carène.

Le nouveau volume de carène vaut $\frac{M + m}{\rho_{\text{eau}}}$ la surface de flottaison est inchangée.

DT3. Différentes positions du Polar Pod

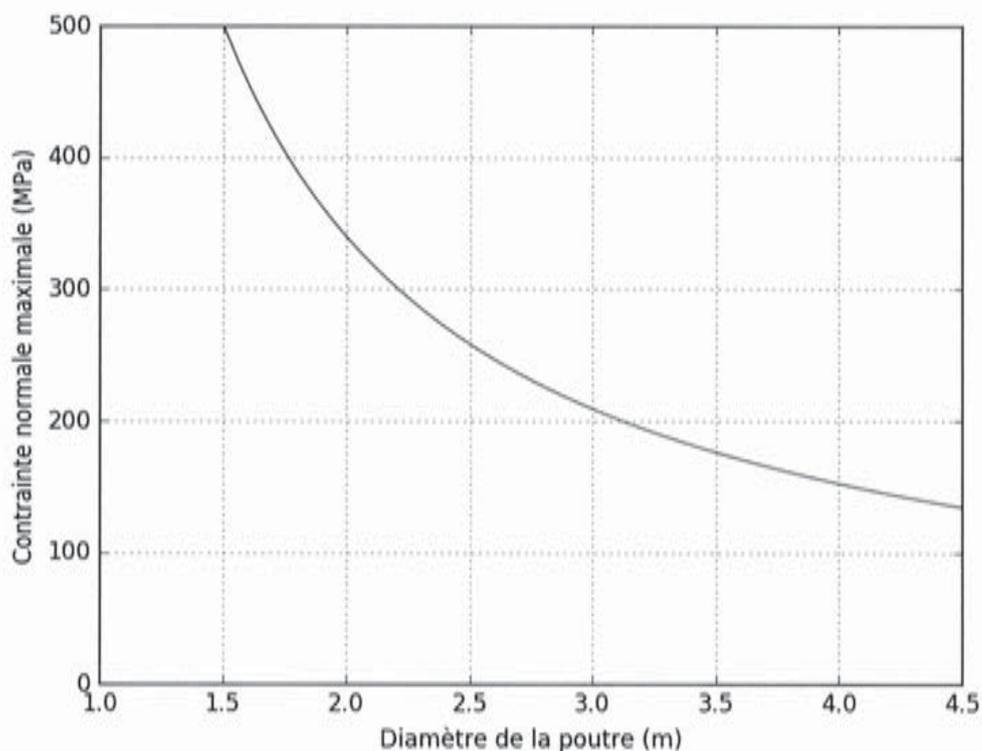


DT4. Modèle de la poutre centrale



Ce modèle est caractérisé par :

Longueur de la poutre centrale	$L = 87,5 \text{ m}$
Masse du flotteur central	$m_f = 172\,300 \text{ kg}$
Masse de la poutre centrale	m_p
Masse volumique de l'acier	$\rho_{\text{acier}} = 7\,800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Chargement linéique	$p = \frac{m_p \cdot g}{L}$



DT5. Moteurs asynchrones triphasés

IP 55 - 50 Hz - Classe F - ΔT 80 K - 230 V Δ / 400 V Y et 400 V Δ - S1 - Classe IE1

2
pôles
3000 min⁻¹

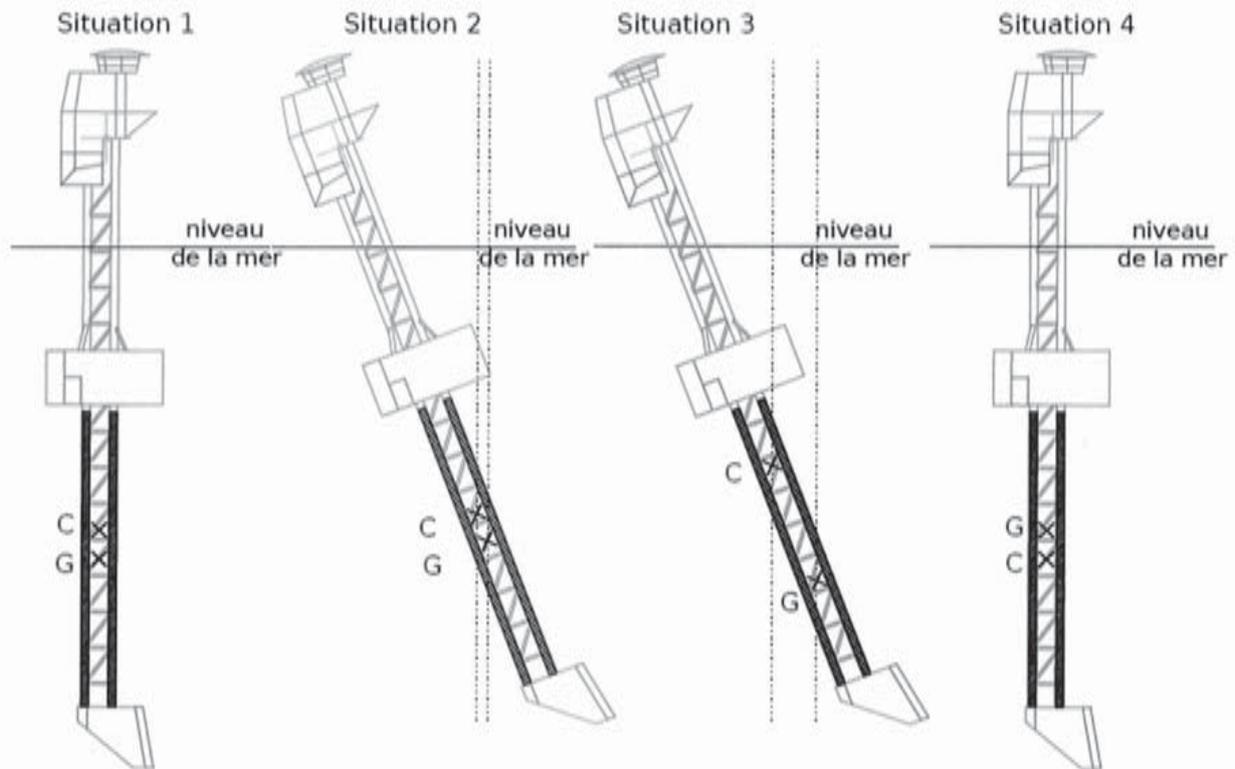
IE1

Type	Puissance nominale	Vitesse nominale	Moment nominal	Intensité nominale	Facteur de puissance			Rendement* CEI 60034-2-1; 2007			Courant démarrage/ Courant nominal	Moment démarrage/ Moment nominal	Moment maximum/ Moment nominal	Moment d'inertie	Masse	Bruit
	P_N	N_n	M_n	$I_{n(400)}$	Cos Phi			η			I_d / I_n	M_d / M_n	M_g / M_n	J	IM B3	LP
	kW	min-1	N.m	A	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4				kg.m ²	kg	db(A)
LS 56 M	0.09	2860	0.3	0.44	0.55	0.45	0.4	54	45.2	37.1	5.0	5.3	5.4	0.00015	3.8	54
LS 56 M	0.12	2820	0.4	0.5	0.6	0.55	0.45	58.7	54	45.2	4.6	4.0	4.1	0.00015	3.8	54
LS 63 M	0.18	2790	0.6	0.52	0.75	0.65	0.55	67.4	66.9	59.3	5.0	3.3	2.9	0.00019	4.8	57
LS 63 M	0.25	2800	0.9	0.71	0.75	0.65	0.55	67.8	67.3	59.2	5.4	3.2	2.9	0.00025	6	57
LS 71 L	0.37	2800	1.3	0.98	0.8	0.7	0.6	68.4	67.6	63.9	5.2	3.3	3.9	0.00035	6.4	62
LS 71 L	0.55	2800	1.9	1.32	0.8	0.7	0.55	75.7	75.2	71.1	6.0	3.2	3.1	0.00045	7.3	62
LS 71 L	0.75	2780	2.6	1.7	0.85	0.75	0.65	74.6	75.8	73.1	6.0	3.3	2.9	0.0006	8.3	62
LS 80 L	0.75	2840	2.5	1.64	0.87	0.8	0.68	75.7	76.1	73.3	5.9	2.4	2.2	0.0007	8.2	61
LS 80 L	1.1	2837	3.7	2.4	0.84	0.77	0.65	77.3	78.3	76.4	5.8	2.7	2.4	0.0009	9.7	61
LS 80 L	1.5	2859	5.0	3.2	0.83	0.76	0.62	79.3	80	78.1	7.0	3.2	2.8	0.0011	11.3	61
LS 90 S	1.5	2870	5.0	3.4	0.81	0.72	0.58	80	79.5	75.9	8.0	3.9	4.0	0.0014	12	64
LS 90 L	1.8	2865	6.0	3.6	0.86	0.8	0.69	81.9	82.5	81.4	8.0	3.6	3.6	0.0017	14	64
LS 90 L	2.2	2862	7.3	4.3	0.88	0.83	0.73	82	83	82	7.7	3.7	3.3	0.0021	16	64
LS 100 L	3	2868	10.0	6.3	0.81	0.73	0.59	82.6	82.6	80.1	7.5	3.8	3.9	0.0022	20	66
LS 100 L	3.7	2850	12.5	8	0.85	0.76	0.62	82.7	82.2	77.2	8.6	0.0	0.0	0.0022	21	66
LS 112 M	4	2877	13.3	7.8	0.85	0.78	0.65	85	85.3	83.7	7.8	2.9	2.9	0.0029	24.4	66
LS 112 MG	5.5	2916	18.0	10.5	0.88	0.81	0.71	86.1	86.4	84.7	9.0	3.1	3.5	0.0076	33	66
LS 132 S	5.5	2916	18.0	10.5	0.88	0.81	0.71	86.1	86.4	84.7	9.0	0.0	0.0	0.0076	34.4	72
LS 132 S	7.5	2905	24.5	14.7	0.85	0.78	0.63	86	85.8	83.2	8.7	0.0	0.0	0.0088	39	72
LS 132 M	9	2910	29.5	17.3	0.85	0.8	0.71	87.9	88.5	87.5	8.6	2.5	3.5	0.016	49	72
LS 132 M	11	2944	35.7	20.7	0.86	0.81	0.69	88.2	88.3	86.7	7.5	2.7	3.4	0.018	54	72
LS 160 MP	11	2944	35.7	20.7	0.86	0.81	0.69	88.2	88.3	86.7	7.5	2.7	3.4	0.019	62	72
LS 160 MP	15	2935	48.8	28.4	0.85	0.79	0.71	89.3	89.7	88.6	8.1	3.0	3.5	0.023	72	72
LS 160 L	18.5	2934	60.2	33.7	0.87	0.83	0.75	90.09	90.6	90.0	8.0	3.0	3.3	0.044	88	72
LS 180 MT	22	2938	71.5	39.9	0.87	0.84	0.76	90.6	91.2	90.8	8.1	3.1	3.1	0.052	99	72
LS 200 LT	30	2946	97.2	52.1	0.9	0.87	0.82	91.5	92.1	91.7	8.6	2.7	3.4	0.089	154	73
LS 200 L	37	2950	120	65	0.89	0.87	0.82	92.1	92.6	92.3	7.4	2.6	3.0	0.12	180	73
LS 225 MT	45	2950	146	78	0.9	0.87	0.82	92.5	92.7	92.7	7.5	2.8	3.1	0.14	200	73
LS 250 MZ	55	2956	178	96	0.89	0.86	0.8	92.9	93.6	92.5	8.3	3.1	3.4	0.173	235	78
LS 280 SC	75	2968	241	129	0.9	0.87	0.82	93.5	93.6	93.1	8.5	2.6	3.4	0.39	330	79
LS 280 MC	90	2968	290	154	0.9	0.88	0.83	93.8	94.0	93.6	8.4	2.6	3.3	0.47	375	79
LS 315 SN	110	2984	354	184	0.92	0.9	0.86	94	94.2	93.9	8.6	2.7	3.4	0.55	445	80
LS 315 MP	132	2976	424	227	0.89	0.87	0.82	94.4	94.2	93.1	7.6	2.8	2.9	1.67	715	83
LS 315 MR	160	2976	513	271	0.9	0.88	0.84	94.6	94.6	93.7	7.6	2.9	3.1	1.97	820	83
LS 315 MR*	200	2982	640	350	0.87	0.86	0.82	94.8	94.3	92.9	9.3	3.8	3.9	1.97	845	83

• Echauffement classe F
* Cette norme remplace la CEI 60034-2; 1996.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR1. Actions mécaniques



DR2. Positions du Polar Pod

Étape	N°figure
Étape 0 : position verticale	
Étape 1 : abaissement	
Étape 2 : préparation du basculement	
Étape 2" : situation intermédiaire	
Étape 2''' : fin du basculement	
Étape 3 : mise en flottaison du caisson de pied	
Étape 4 : allègement - position horizontale	