

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

Session 2019

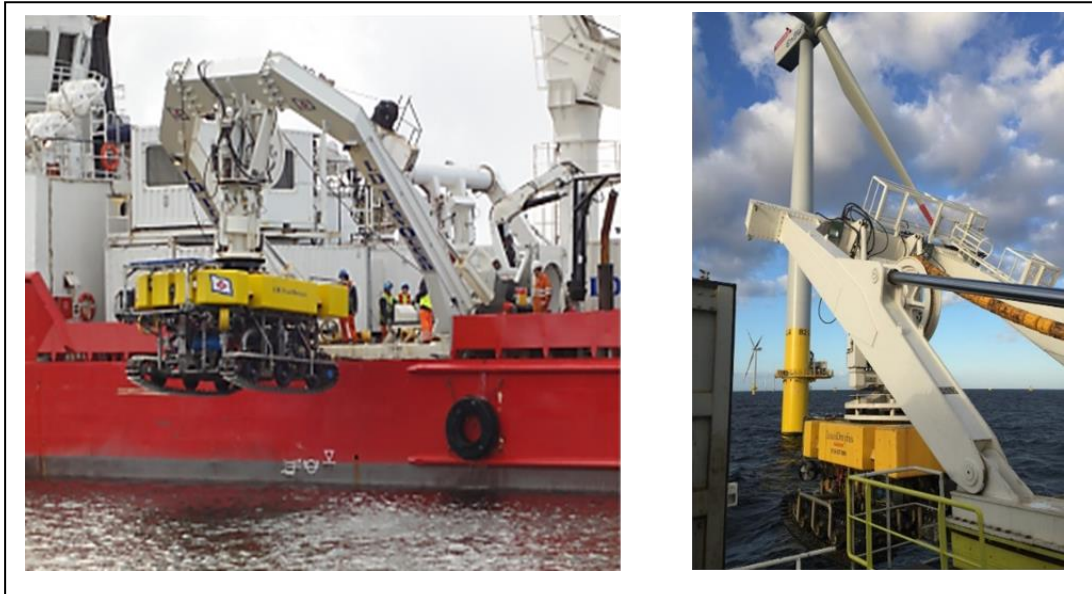
Sciences de l'ingénieur

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° 99-186 du 16 novembre 1999.

Système ROV



Constitution du dossier :

- texte (mise en situation et questionnement), pages 2 à 17 ;
- annexes, pages 18 à 26 ;
- documents réponses DR1 à DR5, pages 27 à 32.

Conseils au candidat

Vérifier que tous les documents définis ci-dessus sont présents. La phase d'appropriation d'un système pluri-technologique passe par la lecture attentive de l'ensemble du sujet. Il est fortement conseillé de consacrer au moins 30 minutes à cette phase indispensable de découverte.

Les documents réponses DR1 à DR5 sont à rendre agrafés avec la copie, même s'ils n'ont pas été complétés.

1. Introduction

1.1. Parc éolien

Le développement de fermes éoliennes en mer nécessite la pose de câbles sous-marins de forte puissance sur de très grandes distances. Le déploiement de ces câbles doit se faire en tenant compte de contraintes environnementales sévères visant à limiter l'impact sur le milieu marin. Les opérateurs « offshore » ont constaté une élévation de la température de l'eau autour du câble provoquant le développement de micro-organismes. Pour limiter ce phénomène, la solution est d'ensouiller (enfouir) le câble dans les sédiments terrigènes des plateaux continentaux.

La société *Louis Dreyfus TravOcéan* a acquis au fil des années une expertise unique dans les domaines de la pose et de la protection de câbles sous-marins, couvrant en particulier tous les types de sol (du sol très meuble au sol très dur) ainsi que tous les types de câbles (fibre optique, câbles électriques, ombilicaux).

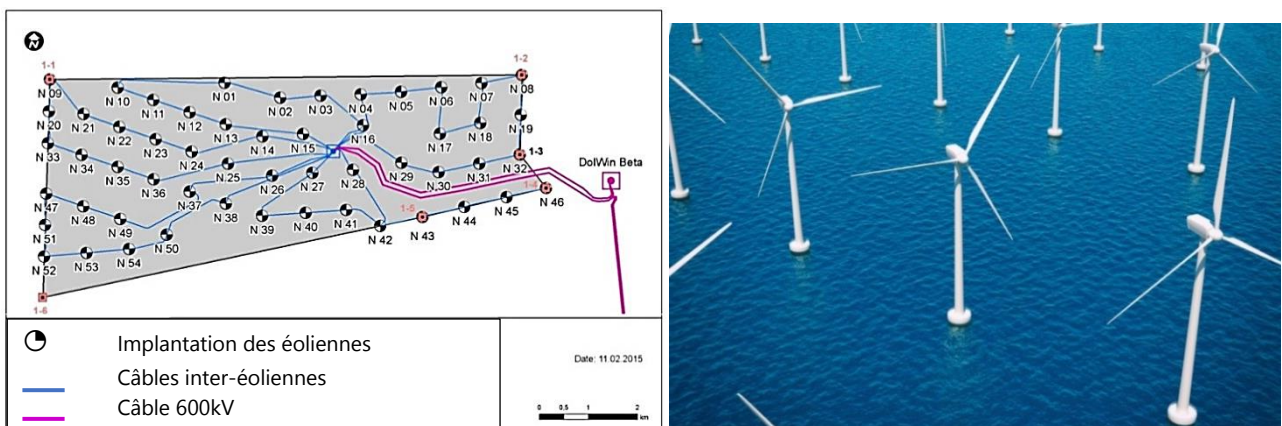


Figure 1 : implantation de la ferme éolienne North Sea One

1.2. Choix de la profondeur d'ensouillage

L'objectif de cette partie est de comprendre pourquoi la société TravOcéan a choisi d'ensouiller le câble à une profondeur de 1,5 m.

La société *TravOcéan* a fait appel à une société spécialisée *FIELAX* dans la simulation des températures des sédiments et de l'influence de l'ensouillage des câbles. À partir de nombreuses mesures thermiques dans différents environnements marins, elle a développé des logiciels de simulation prenant en compte les différents points suivants :

- influence du climat sur la température des eaux de fond ;
- propriétés thermiques des sédiments ;
- caractéristiques des câbles ensouillés.

Dans les mers peu profondes, les mers du Nord et Baltique, la température des eaux de fond est sensible aux saisons. Une campagne de mesures de cette température a permis de réaliser une modélisation (voir Annexe 1 – Modélisation de la température de l'eau en fonction du jour de l'année).

Question 1. À partir des résultats expérimentaux, déterminer l'écart maximal entre les T° mesurée et T° modélisée. Justifier le choix de la modélisation retenue et identifier ses caractéristiques (T_0 , ΔT , φ et ω).

Afin de pouvoir modéliser correctement le système il a fallu déterminer les propriétés thermiques des sédiments. Les résultats de la campagne de mesures sur les sédiments sont fournis en *Annexe 2 – Mesures expérimentales des propriétés thermiques des sédiments*.

Question 2. À partir des courbes expérimentales, donner une estimation de la valeur moyenne de la conductivité thermique λ et de la diffusivité thermique D des sédiments entre 0 et 3 m ?

Question 3. À partir de quelle profondeur peut-on supposer la température des sédiments comme constante ? Donner la valeur de cette température.

La simulation de l'évolution de la température des sédiments en fonction de la profondeur ainsi que du jour de l'année est donnée en *Annexe 3 – Modèle d'évolution de la température des sédiments*.

Question 4. À partir de quelle profondeur les variations de la température saisonnière n'influencent-elles plus la température des sédiments à 0,2°C près ?

Question 5. Comparer les résultats expérimentaux et simulés, peut-on considérer le modèle conforme à la réalité et sinon quelles sont les hypothèses erronées ?

À partir de cette première étude on choisira le seuil d'ensouillage des câbles à 1,5 m de profondeur.

Les échanges thermiques entre le câble et le milieu environnant proviennent des pertes par effet Joule du câble. La configuration du câble d'alimentation, essentiellement la résistivité déterminée par le matériau et le diamètre du conducteur, ainsi que la profondeur de sépulture réelle sont des facteurs importants. Les directives environnementales imposent le critère suivant nommé « 2K-critère » : *augmentation maximale de 2°C de la température au niveau de la jonction eau-fond des mers (épaisseur de la zone affectée de 20 cm)*.

Les variations annuelles de la température des sédiments pour différents scénarios de perte de puissance ont été simulées et les résultats se trouvent en *Annexe 4 – Modèle d'évolution de la température le long du câble*.

Question 6. À partir de l'analyse des différents scénarios de simulation, la profondeur d'ensouillage de 1,5 m est-elle suffisante pour vérifier le « 2K-critère » imposé par les directives environnementales ?

L'analyse générale a permis de justifier l'ensouillage des câbles du point de vue environnemental. La société *TravOcéan* doit donc répondre à la problématique suivante :

« *Comment ensouiller un câble haute tension dans le fond sédimentaire de la mer du Nord en toute sécurité pour l'environnement, les opérateurs et le matériel ?* »

2. Le système ROV (Remotely Operated Vehicle)

La société *TravOcéan* a été un acteur majeur de la création du parc éolien *North Sea One*, décrit *figure 1*. Dans ce projet, support de cette étude, 62 km de câbles ont été ensouillés par une profondeur de 30 m d'eau à l'aide d'un robot ROV dont les caractéristiques sont

données *figure 2*. Les conditions climatiques extrêmes de la mer du Nord nécessitent une grande maîtrise des opérations, en particulier lors des phases de mise à l'eau et de descente en pleine eau.

Les différents constituants du ROV sont détaillés dans l'*Annexe 5 – Descriptif du ROV*

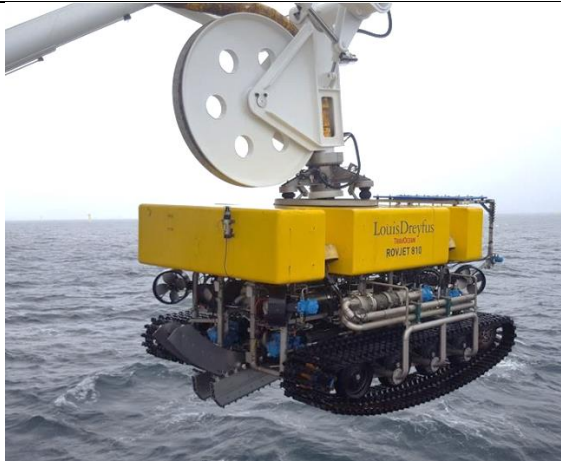
Les ROV série 800 sont équipés d'un câble ombilical électro-porteur.		
– longueur :	6,60 m	
– largeur avec chenilles :	3,40 m	
– hauteur :	2,80 m	
– masse :	13 t	
– profondeur de tranchage :	jusqu'à 2,20 m	
– largeur de tranchée :	jusqu'à 480 mm	
– puissance totale :	550 kW	
– profondeur d'immersion :	500 m	
– vitesse sur chenilles :	2 500 m·h ⁻¹	

Figure 2 : caractéristiques et mise à l'eau du ROV série 800

Les opérations de mise en œuvre du robot ROV utilisées pour l'ensouillage se font en trois étapes distinctes définies par les trois cas d'utilisation. Ils seront étudiés dans les différentes parties du sujet dans l'ordre des opérations nécessaires à l'ensouillage.

Cas d'utilisation n°1 : mise à l'eau

Cette phase utilise une grue portique pour transférer le ROV du pont du navire jusqu'à l'aplomb de la surface d'immersion (*voir figure 4*). Dans cette phase le ROV n'est pas porté par le câble ombilical mais par un dispositif d'accrochage spécifique appelé snubber (*voir figure 5*).

Cas d'utilisation n°2 : descente en pleine eau

Dans cette phase le ROV est suspendu au câble ombilical. Un bon équilibrage hydrostatique est nécessaire pour assurer l'horizontalité du ROV pendant la descente.

Cas d'utilisation n°3 : ensouillage ou enfouissement du câble

Dans cette phase le ROV est posé au fond de la mer. Il devra détecter le câble, s'aligner et commencer l'enfouissement en creusant une tranchée à l'aide des hydrojets.

Pour réaliser l'ensouillage, le câble est déposé sur le fond marin par un navire câblé. Le ROV est déposé sur le fond marin par un navire support et ensouille le câble après l'avoir détecté et s'être aligné dans l'axe de celui-ci (*voir figure 3*).

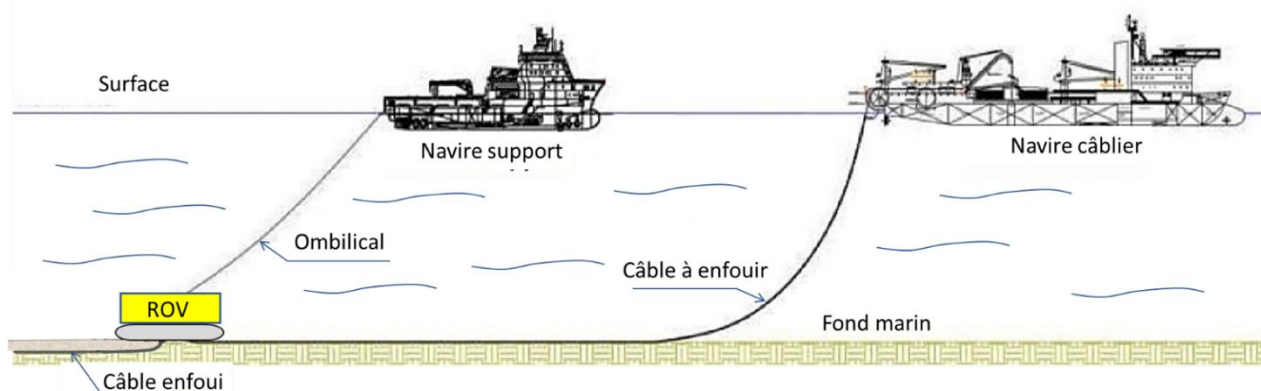


Figure 3 : environnement du ROV

2.1. Étude du cas d'utilisation n°1 : mise à l'eau du ROV

L'objectif de cette partie est de vérifier le dimensionnement de la grue portique permettant la mise à l'eau du ROV.

Le ROV est amené sur le site par un navire support. La mise à l'eau est faite à partir d'une grue portique embarquée (voir figure 4).



Figure 4 : ROV suspendu à la grue portique

Le câble ombilical est enroulé sur un tambour motorisé équipé d'un système de trancannage¹ (voir figures 5 et 6). Il est raccordé au ROV par un snubber de jonction. La grue portique est actionnée par deux vérins hydrauliques.



Figure 5 : photo de l'implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du navire

¹ Le trancannage est une opération de va et vient nécessaire au bon enroulement d'un câble sur une bobine (voir Annexe 7 – Système de trancannage).

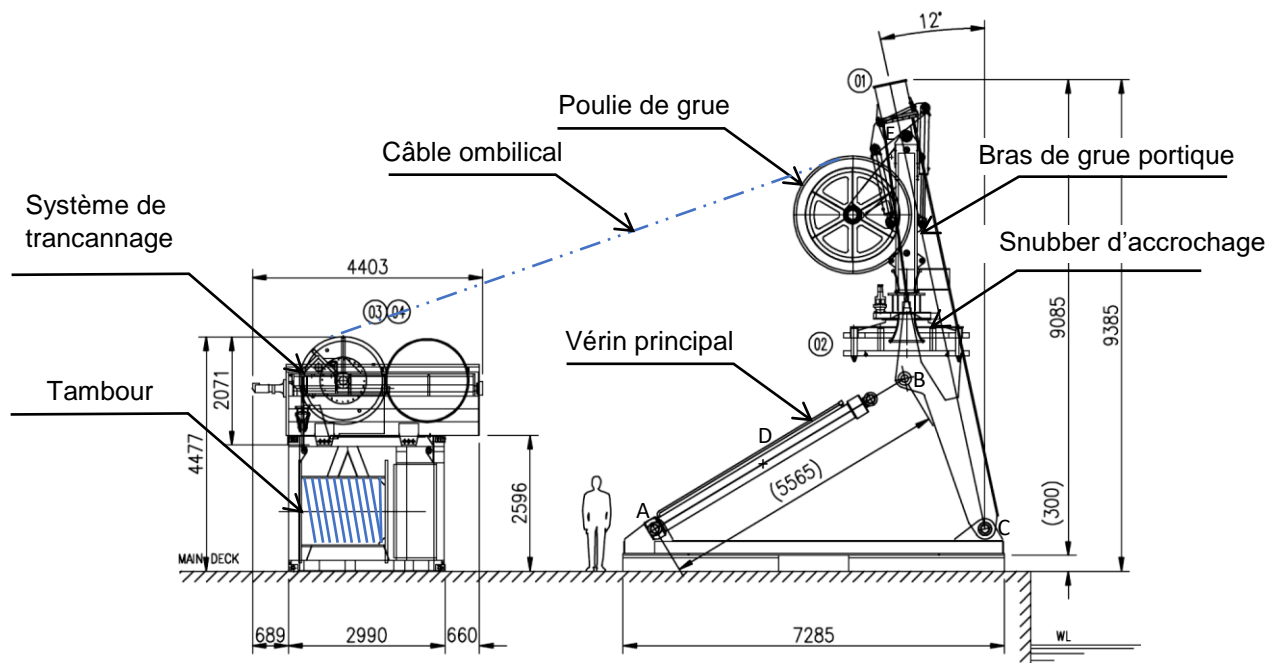


Figure 6 : implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du navire

Les conditions de houle et la masse importante du robot (13 tonnes) impliquent un dimensionnement précis des éléments défini par la norme « *Cranes and Submersibles Lifting Appliances* » qui impose des coefficients de majoration pour prendre en compte des effets dynamiques dus à une houle donnée.

La grue portique et les éléments de levage sont conçus pour être homologués avec une houle de 5 m.

Conditions d'étude :

- les effets de la houle impliquent une majoration de 100 % des efforts statiques ;
- le portique se déplace entre -12° et 53° par rapport à la verticale.

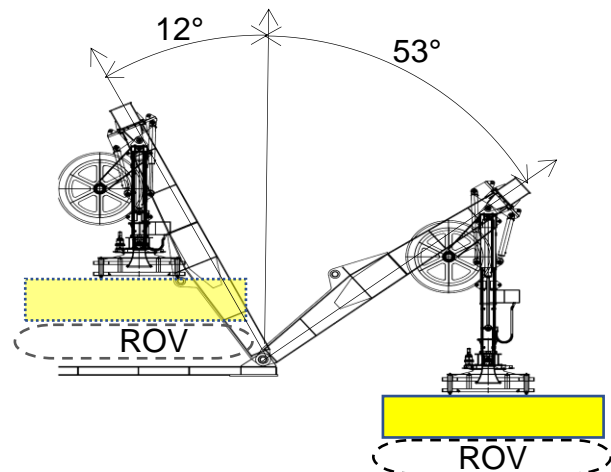


Figure 7 : positions extrêmes de la grue

La grue portique permet le transfert du ROV entre la surface et le navire. Dans cette phase le ROV est relié au snubber (voir figure 7). Le câble n'est plus porteur.

2.1.1. Étude de l'actionneur de mise à l'eau

On souhaite déterminer la course et les efforts dans les vérins pour vérifier que la pression du groupe hydraulique d'alimentation disponible sur le navire porteur est suffisante et que la géométrie choisie est correctement dimensionnée.

Pour cette étude le constructeur a fait les hypothèses suivantes :

- les liaisons sont considérées comme parfaites ;

- le problème est supposé plan du point de vue de la géométrie et des efforts ;
- le poids du ROV sera modélisé par un torseur glisseur d'axe vertical descendant appliqué à l'articulation du snubber ;
- le poids des autres pièces est négligé devant les autres efforts mis en jeu.

Une modélisation 3D du bras de grue portique et du vérin principal a permis d'obtenir le modèle mécanique à utiliser par la suite dans le modèle multiphysique de simulation.

Question 7. À partir de la *figure 6* préciser le nom normalisé des liaisons du modèle mécanique de simulation multiphysique de la grue portique sur le document réponses DR 1a. Quel(s) ensemble(s) n'ont pas été modélisés ?

Question 8. Compléter alors le schéma cinématique sur le document réponses DR 1b. Les sous-ensembles cinématiques seront nommés par le nom de la pièce principale.

Question 9. Déterminer la relation entre la longueur AB notée x et l'angle de rotation du bras de la grue portique noté θ par analyse géométrique dans le triangle ABC à partir des données du document réponses DR 1b. En déduire la course théorique du vérin.

La simulation à l'aide du modèle multiphysique complet a permis d'obtenir les courbes données en *Annexe 6 – Simulation du comportement de la grue portique*.

Question 10. Déterminer la course du vérin notée c à partir de la courbe de simulation. Comparer le résultat à celui obtenu à la question précédente.

Question 11. Placer sur le document réponses DR 1b, sans échelle précise mais en respectant le sens et la direction, l'effort du portique sur la tige noté $\vec{B}_{port \rightarrow tige}$ pour les deux positions (-12° et 53°) lorsque la grue portique est soumise au poids du ROV accroché au snubber.

Question 12. Justifier par une explication détaillée que l'effort dans le vérin est d'une intensité nulle dans une position particulière à préciser.

Le vérin utilisé a les caractéristiques suivantes :

- diamètre de la tige $\varnothing d = 180$ mm ;
- diamètre du piston $\varnothing D = 250$ mm ;
- course maximale $c_{maxi} = 3\ 800$ mm ;
- le port A permet la sortie de la tige, le port B la rentrée ;
- le circuit hydraulique peut délivrer une pression maximale de 200 bar.

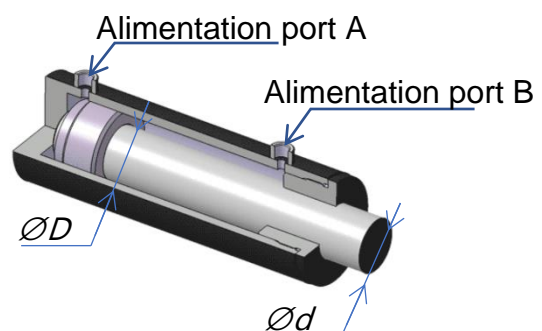


Figure 8 : vue en quart de coupe du vérin

Question 13. Déterminer la pression d'alimentation théorique maximale du vérin nécessaire pour assurer le maintien du portique dans la position la plus défavorable. Est-elle compatible avec le circuit hydraulique ? Conclure sur le choix du vérin à partir des résultats des questions précédentes.

2.1.2. Étude du circuit hydraulique et de la pression d'alimentation du vérin

Le document réponses DR 2 détaille le modèle multiphysique élaboré pour la simulation du système. Il est composé d'une partie contrôle et régulation, d'un circuit hydraulique et d'un modèle mécanique de la grue portique.

Question 14. Incrire sur le document réponses DR 2 la nature des différentes variables (effort, flux, information) circulant entre les connecteurs (pression, vitesse, tension, intensité...).

La courbe de simulation en l'Annexe 6 – *Simulation du comportement de la grue portique* montre que l'effort dans le vérin change de signe pendant le déploiement de la grue portique. Une commande directe imposerait de détecter la position du portique et de l'asservir pour inverser l'alimentation du vérin, solution complexe et peu fiable. La solution utilisée est de placer une soupape de compensation. Cette soupape est tarée à une pression prédéfinie de façon à assurer l'équilibre de l'ensemble dans le cas le plus défavorable. Un coefficient de sécurité sera appliqué à la pression de tarage ($K = 1,5$).

Question 15. En considérant que la pression de la chambre communiquant avec le port B du vérin notée P_B vaut 180 bar dans la position à 53° (voir figure 8 et DR 2) en déduire la pression de tarage notée P_t par majoration du coefficient de sécurité K .

Question 16. Déterminer la pression minimale de commande notée P_A permettant de déclencher le déplacement du portique en étudiant l'équilibre du piston du vérin.

2.2. Étude du cas d'utilisation n°2 : descente en pleine eau du ROV

2.2.1. Étude de l'enroulement du câble ombilical

L'objectif de cette partie est de vérifier le bon dimensionnement du système de trancannage.

Le câble ombilical permet de relier le ROV au navire. Il supporte la masse du ROV mais assure aussi les fonctions d'alimentation en énergie et de transmission des données par fibre optique.

Le système d'enroulement est décrit en *Annexe 7 – Système de trancannage*.

On fait l'hypothèse que le câble s'enroule par couche sans interstice :



Figure 9 : enroulement du câble sur le tambour

Question 17. Quelle est la longueur d'enroulement maximale du câble ombilical sur le tambour d'enroulement ? Le système respecte-t-il le cahier des charges ?

On désire régler la position du détecteur inductif permettant le déclenchement de l'avance du chariot.

Question 18. Sur le document réponses DR 3, tracer la position extrême du balancier pour une avance de 2 tours d'enroulement sur la poulie. En déduire l'angle de basculement du balancier.

Question 19. Déterminer la position limite théorique du centre noté A de la face avant du détecteur de position à partir des courbes « *Plage de fonctionnement* » de l'Annexe 7 – *Système de trancannage*. Sur le système réel, on a $\overrightarrow{OA} = -62\overrightarrow{x} + 150\overrightarrow{y}$ (en mm). Expliquer les écarts entre la position réelle et la position théorique du point A .

On considère un modèle simplifié du détecteur inductif associé à un montage de précaution (voir le document réponses DR 4).

Question 20. Le détecteur inductif est en mode « ouvert » (non passant) s'il n'y a pas de détection. Compléter le document réponses DR 4 en surlignant en rouge le passage du courant lors de la détection de l'aiguille du balancier et en bleu lors de la non-détection.

Question 21. Afin de limiter la tension de sortie de contrôle à 5 V pour une tension d'alimentation V à 12 V, quelle doit être la valeur de x image de la position du curseur sur R_2 en considérant que la résistance variable R_2 est linéaire ?

Question 22. Quel est l'avantage de la détection de la position du câble sur le système de trancannage ?

2.2.2. Étude de la flottabilité du ROV

L'objectif de cette partie est de vérifier la flottaison nulle du ROV totalement immergé.

Pour des raisons de manœuvrabilité et de sécurité, il est préférable que le ROV soit à flottaison quasi-nulle lorsqu'il est immergé.

À partir d'un logiciel de maquettage numérique et des caractéristiques constructeurs des éléments standards, une liste de tous les composants constituant le ROV est disponible avec les informations suivantes :

- nom de l'élément ;
- nombre présent dans le ROV ;
- masse ;
- volume ;
- matériau ;
- coordonnées du centre de masse par rapport à un point de prise de mesure sur le ROV.

Dans cette partie de l'étude, on ne s'intéressera qu'aux éléments solides ne pouvant pas se remplir d'eau ou d'huile. On se place dans la situation où le ROV est complètement immergé, et en mouvement uniforme.

Le point d'application C_i de la poussée d'Archimède sur un solide S_i de masse m_i et de centre de masse G_i est le centre du volume d'eau déplacé par ce solide.

Notations :

- $(O, \overrightarrow{x_{ROV}}, \overrightarrow{y_{ROV}}, \overrightarrow{z_{ROV}})$, repère associée au ROV ;

- C, point d'application de la poussée d'Archimède sur l'ensemble des solides avec $\overline{OC} = X\overline{x}_{ROV} + Y\overline{y}_{ROV} + Z\overline{z}_{ROV}$;
- i , indice des solides ;
- G_i , centre de masse du solide S_i avec $\overline{OG}_i = X_i\overline{x}_{ROV} + Y_i\overline{y}_{ROV} + Z_i\overline{z}_{ROV}$;
- $d_{\text{eau salée}}$, densité de l'eau salée ;
- d_i , densité de l'élément i ;
- m_i , masse de l'élément i ;
- $m_i(\text{eau salée})$, masse d'eau salée déplacée par l'élément i .

Question 23. Donner l'expression du vecteur position \overline{OC} en fonction de \overline{OG}_i et de $m_i(\text{eau salée})$

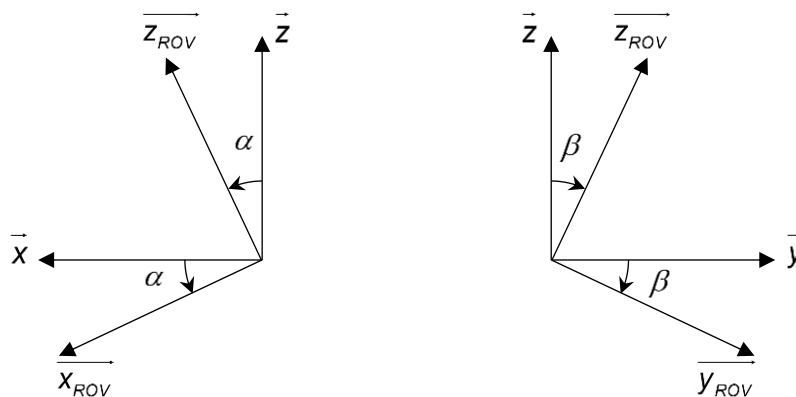
Question 24. Donner l'expression de $m_i(\text{eau salée})$ en fonction de $d_{\text{eau salée}}$, d_i et m_i .

Question 25. Compléter le pseudo-code du document réponses DR 5 permettant de calculer la position de C en s'appuyant sur les résultats trouvés aux deux questions précédentes.

Une étude plus complète du système en prenant en compte tous les éléments constituant le ROV a permis de déterminer les coordonnées du centre de poussée C et du centre de masse G :

$$\begin{aligned} \overline{OC} &= 57,66\overline{x}_{ROV} - 451,14\overline{z}_{ROV} \\ \overline{OG} &= 99,7\overline{x}_{ROV} + 57,63\overline{y}_{ROV} + 680,15\overline{z}_{ROV} \end{aligned} \quad \text{toutes les dimensions sont en mm.}$$

L'angle d'assiette α et l'angle de gîte β sont les angles d'inclinaison du ROV par rapport à la verticale naturelle portée par la direction \vec{z} du référentiel terrestre.



On souhaite que ces deux angles soient inférieurs à 3° pour des raisons de sécurité au moment de la sortie de l'eau du ROV.

Question 26. Calculer les angles d'assiette et de gîte. Conclure par rapport au cahier des charges.

2.3. Étude du cas d'utilisation n°3 : ensouillage ou enfouissement du câble

2.3.1. Étude de la détection du câble

L'objectif de cette partie est de définir les différents modes de détection du câble posé sur le fond marin.

La recherche du câble se fait par détection magnétique. Deux technologies sont utilisées. La première est une détection active par le capteur TSS 350 qui impose d'alimenter le câble avec un courant électrique de 30 A et 200 Hz pour générer un champ magnétique suffisant à la détection. La deuxième est une détection passive par le capteur TSS 440 qui permet de détecter un câble non alimenté en émettant un champ magnétique et en captant le courant induit dans le câble. Des altimètres informent de la distance entre le ROV et le fond marin.

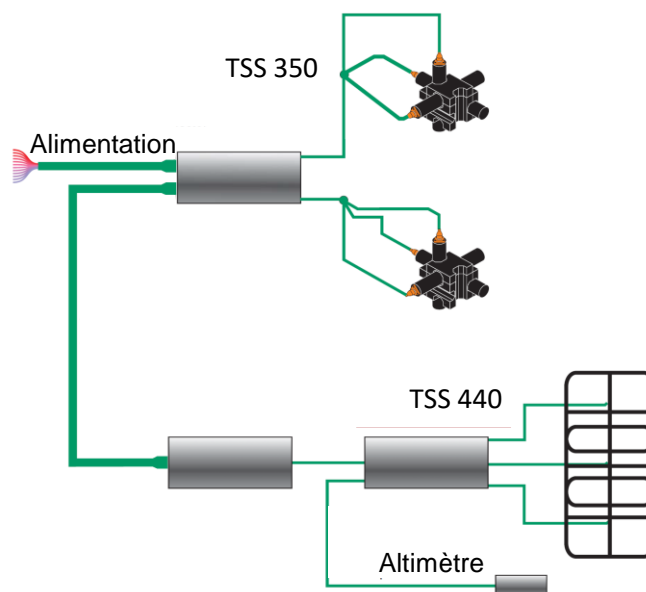


Figure 10 : détection passive

La détection active est effectuée par l'ensemble d'acquisition *TSS 350 Subsea Cable Tracking System*.

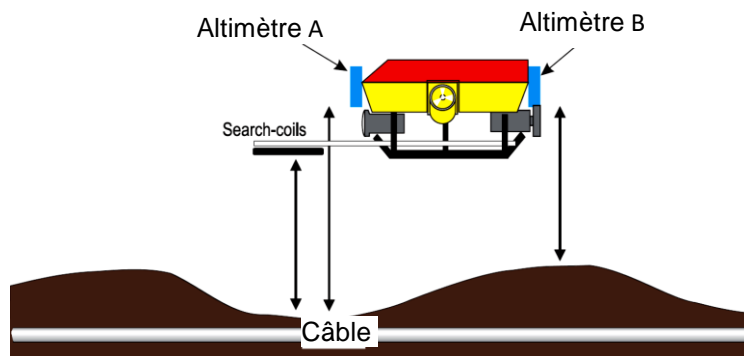


Figure 11 : ensemble de détection du câble

L'ensemble représenté sur la *figure 12* est constitué de deux fois trois bobines de détection en trièdre et d'altimètres. Un boîtier de jonction étanche rempli d'huile diélectrique contient la carte de traitement des signaux et l'interface de communication vers la fibre optique contenue dans le câble ombilical. Un terminal de réception équipé d'un logiciel de traitement informe l'opérateur en temps réel.

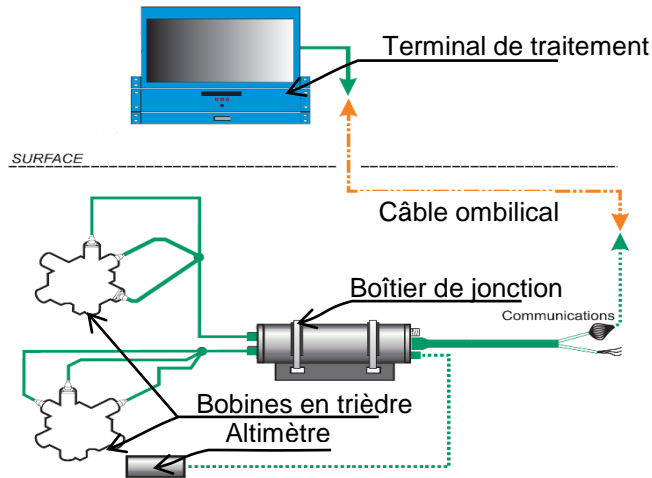


Figure 12 : Subsea Cable Tracking

La détection se déroule en trois phases (voir *figure 13*) :

- recherche du câble à longue distance ;
- centrage du ROV sur le câble ;
- alignement du ROV sur l'axe du câble pour le suivi.

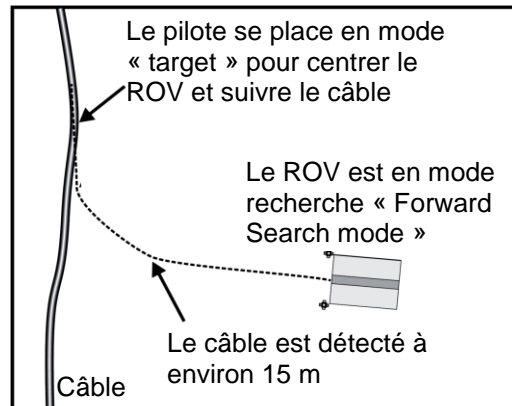


Figure 13 : recherche et suivi du câble

Les bobines en trièdre placées à l'avant du ROV (voir *Annexe 5 – Descriptif du ROV*) convertissent le champ magnétique du câble en une tension notée V_i pour l'axe i . La figure 14 décrit le principe utilisé pour d'obtenir l'angle entre le capteur et le câble conducteur par rapport au plan dirigé par (\vec{x}, \vec{z}) .

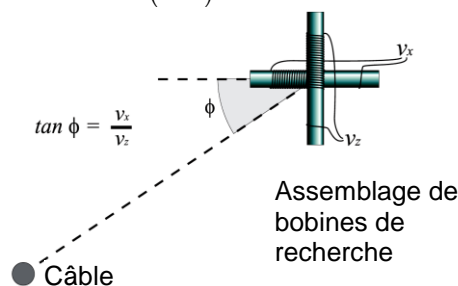


Figure 14 : détermination de l'angle relatif en utilisant deux bobines

La recherche du câble à longue distance met en œuvre un détecteur trièdre avant et l'altimètre en utilisant deux bobines. L'altimètre fournit une tension proportionnelle de coefficient K_{alt} à l'altitude par rapport au fond marin notée V_{alt} (voir figure 15).

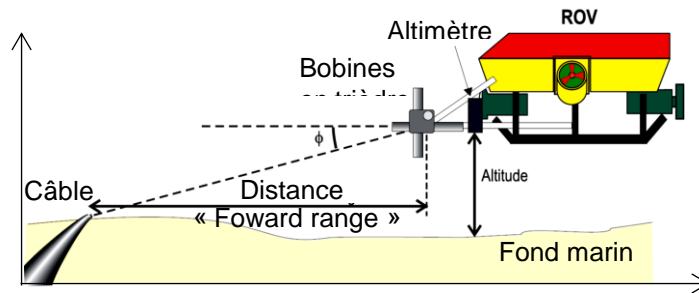


Figure 15 : recherche du câble à longue distance

Question 27. Proposer une méthode permettant de déterminer la distance (Forward range) entre le câble et le ROV « Forward search mode » en supposant le fond marin horizontal. Les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés seront précisées.

Une fois le câble trouvé, le ROV se centre sur le câble en utilisant les deux capteurs trièdre avant (voir figure 16).

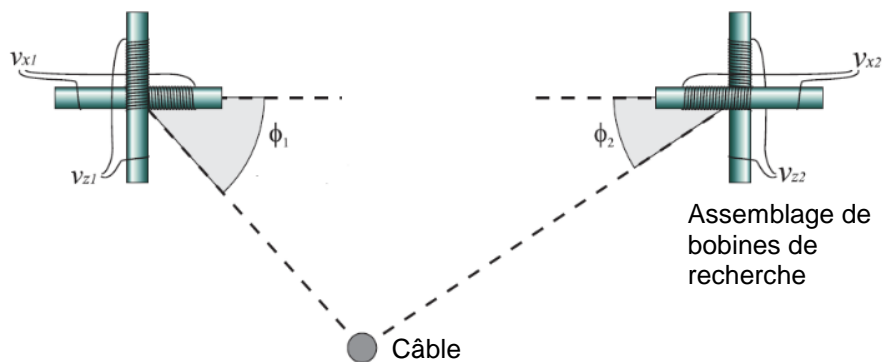


Figure 16 : centrage du ROV le long du câble

Question 28. Proposer une méthode permettant de déterminer la position latérale du câble par rapport à la direction \vec{y} du ROV pendant le suivi. Les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés seront précisées.

Une fois centré, le ROV se place dans l'axe du câble en utilisant un seul capteur trièdre avant (voir figure 17).

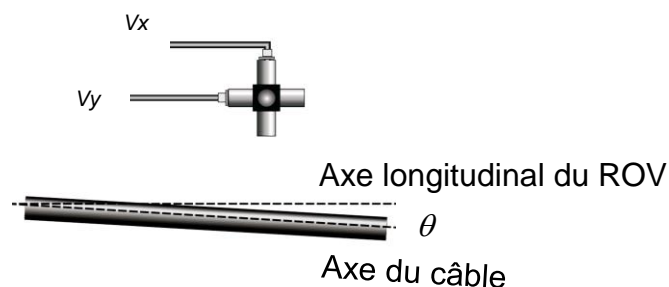


Figure 17 : alignement du ROV sur l'axe du câble

Question 29. Proposer une méthode permettant de déterminer la position angulaire θ du câble par rapport au le ROV « run mode ». Les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés seront précisées.

2.3.2. Étude de l'ensouillage du câble

L'objectif de cette partie est de vérifier la résistance au matage (compression) du câble lors de son plaquage dans la tranchée.

Lors de l'ensouillage du câble, une tranchée est réalisée par des hydrojets ayant une forte puissance à l'avant afin d'ouvrir le sol et des hydrojets à l'arrière ayant une puissance moindre permettant d'empêcher la fermeture de la tranchée avant la dépose du câble.

Dans ce tumulte, il faut que le câble soit fortement maintenu au niveau de la tranchée pour qu'il soit recouvert par les agrégats après le passage du ROV.

Le système qui permet de réaliser cette fonction est un presseur constitué :

- d'un bras plaqueur lié au châssis par une liaison pivot ;
- d'un vérin de plaquage associé à une soupape de décharge afin de limiter l'effort de plaquage du presseur sur le câble lié au châssis et au bras plaqueur par des pivots ;
- des détecteurs inductifs renseignant sur la présence du câble dans le guide.

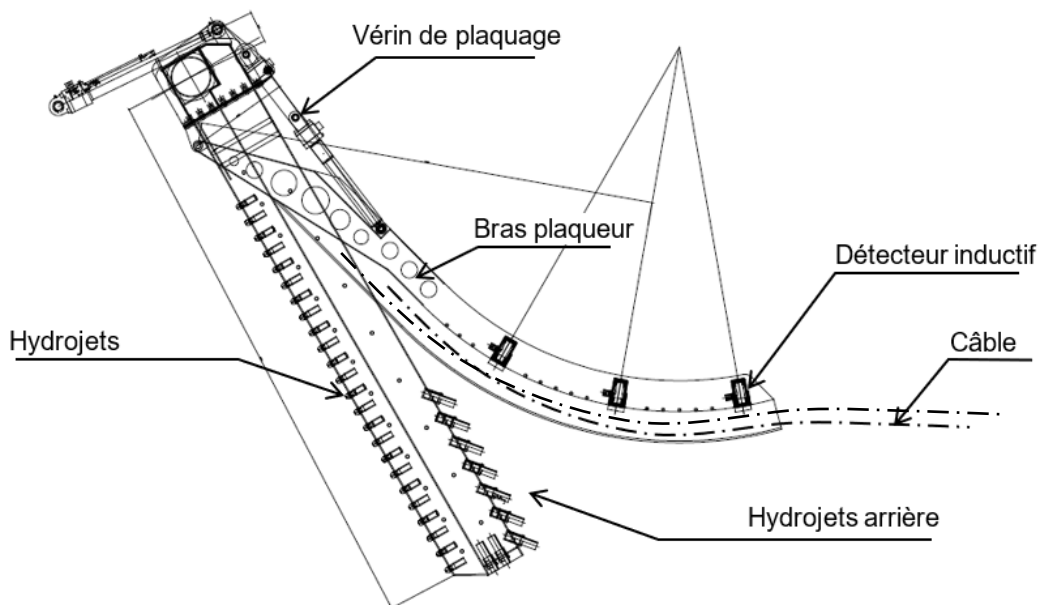


Figure 18 : système presseur et hydrojets

La société *Nexans*, fabriquant du câble, donne comme charge de travail : 160 kN.

Le matériau de la gaine extérieure du câble est en polyester thermoplastique dont la pression linéique admissible est de $p_{lim} = 200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Dans cette étude on néglige les effets dus aux frottements ainsi que les effets des turbulences sur le câble.

La pression d'alimentation du vérin et le réglage de la soupape de décharge permettent de transmettre un effort \vec{F}_p du bras plaqueur sur le câble au point A. On considérera que le contact du câble se fait sur un arc de 60° avec $F_p = 10\,000$ N.

En isolant le tronçon du câble en contact, on peut modéliser la tension du câble par deux efforts \vec{T}_1 et \vec{T}_2 à chaque extrémité.

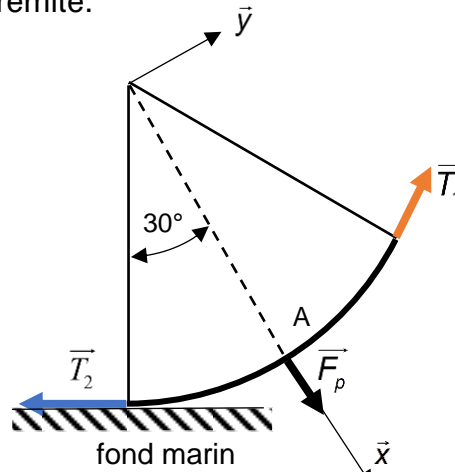


Figure 19 : modèle global

Question 30. Donner la relation entre T_1 , T_2 et F_p . La valeur de la tension dans le câble vérifie-t-elle le cahier des charges de Nexans ?

L'effort presseur \vec{F}_p crée une pression linéique uniforme p au contact du câble et du bras plaqueur de rayon de courbure $R = 1\,830$ mm.

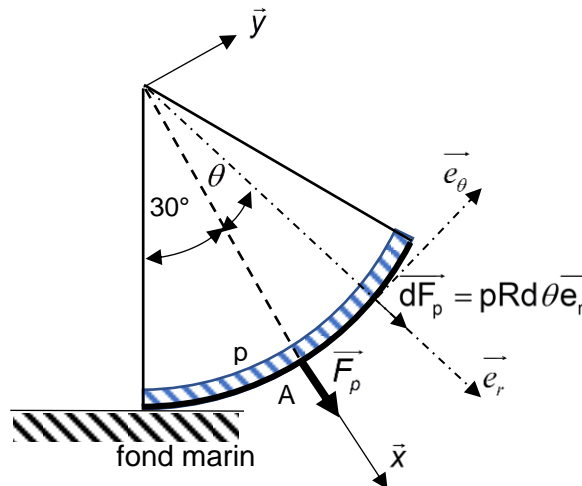


Figure 20 : modèle local

Question 31. Donner l'expression $d\vec{F}_p = dF_x\vec{x} + dF_y\vec{y}$, puis par intégration de dF_x et dF_y donner l'expression de l'effort global \vec{F}_p en fonction de p , R et toute autre donnée ?

Question 32. Calculer la valeur de la pression de contact. Le câble peut-il résister au matage dans ces conditions ?

2.3.3. Étude du plaquage sur le fond marin du ROV

L'objectif de cette partie est de vérifier le dimensionnement de l'ensemble moteur-pompe haute pression et les « thrusters » (propulseur hydraulique) permettant d'assurer le plaquage dans les fonds marins du ROV.

Précédemment, on a vu qu'il était nécessaire que le ROV soit à flottaison nulle lorsqu'il est immergé. Or l'effort presseur \bar{F}_p (avec $F_p = 10\,000\text{ N}$) participe à la force de portance du ROV qui doit être contrée par les « thrusters » (propulseur hydraulique) pour conserver le contact avec le fond marin.

Question 33. Quelle est la valeur de la participation de \bar{F}_p à la portance du ROV ?

Les hydrojets ont également une part importante dans la portance du ROV. Une étude spécifique a permis de montrer que les « thrusters » de plaquage doivent fournir un effort de poussée vers le fond marin de 10 000 N. La description de la chaîne de transmission est détaillée en *Annexe 8 – Transmission de puissance : plaquage du ROV par les « thrusters »*.

Question 34. Déterminer l'effort de poussée pour chaque « thruster » de plaquage en justifiant la réponse ? En déduire le débit volumique ainsi que la pression d'alimentation de chaque « thruster ».

Question 35. À partir de la pression trouvée précédemment et des caractéristiques de la pompe, déterminer le débit volumique de la pompe et sa vitesse angulaire. La pompe fournit-elle suffisamment de débit volumique pour tous les « thrusters » de plaquage ?

2.3.4. Étude des protocoles communication

L'objectif de cette partie est de vérifier la transmission des données entre le ROV et le navire.

Le câble ombilical permet l'échange des informations entre le ROV et le navire par fibre optique. Le système de communication retenu est un multiplexeur qui transmet simultanément :

- 8 canaux vidéo ;
- 4 canaux de DATA Full Duplex ;
- 2 canaux audio Full Duplex ;
- 2 canaux de télémétrie (Full Duplex).

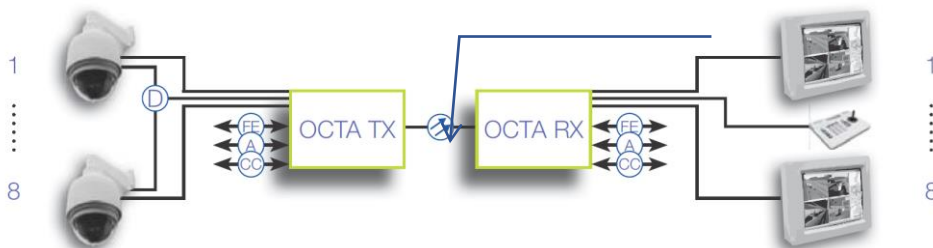


Figure 21 : architecture du système de communication

Le constructeur a choisi une technologie de fibre optique monomode avec une longueur d'onde de $Tx = 1\,310\text{ nm}$ / $Rx = 1\,550\text{ nm}$.

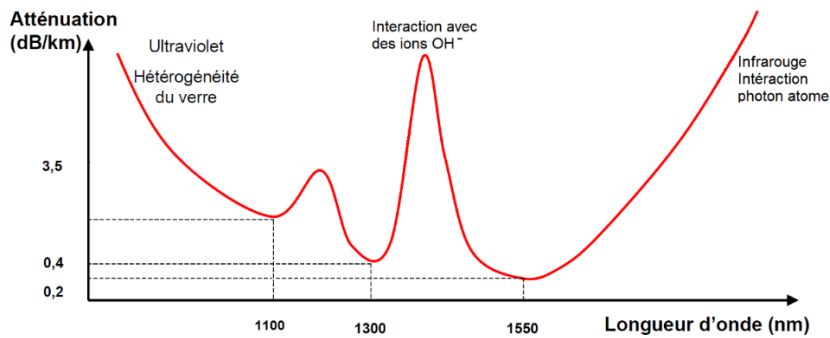


Figure 22 : atténuation du signal en décibel par km en fonction de la longueur d'onde de la lumière traversant la fibre

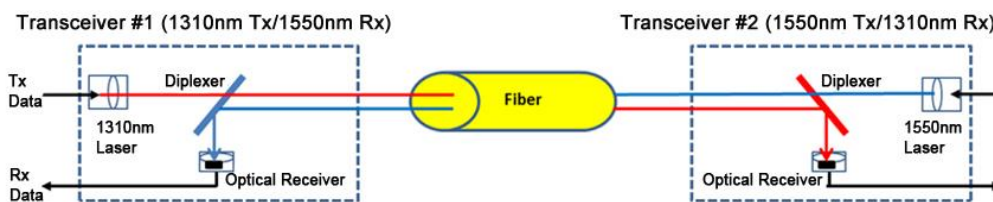


Figure 23 : architecture du système d'émission réception

Question 36. Donner les significations d'une liaison Simplex et Full Duplex.

Question 37. Justifier le choix des longueurs d'onde de 1 310 nm et 1 550 nm à partir de l'analyse des figures 22 et 23. Peut-on transmettre en Full Duplex avec une seule fibre ?

Le ROV est équipé de six caméras de résolution 640 × 400 en RVB codées chacune sur 10 bits avec 25 images par seconde.

Question 38. Déterminer le besoin en débit théorique de la transmission vidéo en $\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 39. Le débit de la fibre dans l'architecture Octa permet d'atteindre $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Conclure sur la capacité de transmission des données vidéo ?

3. Conclusion sur la problématique générale

L'objectif de cette partie est de synthétiser les différentes opérations nécessaires à la mise en œuvre du ROV.

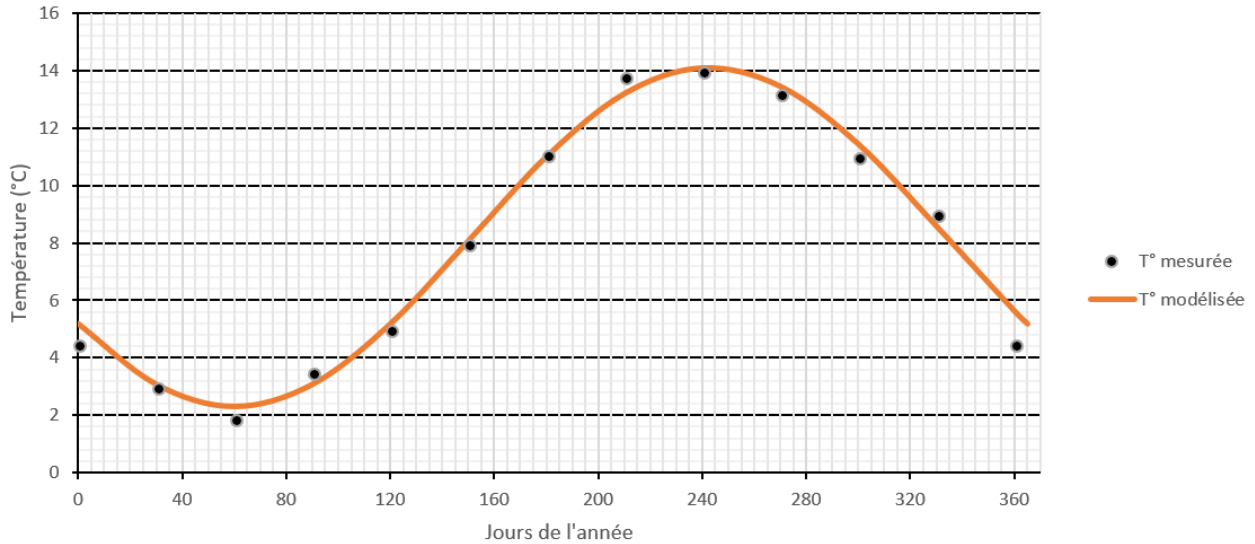
Question 40. Réaliser une synthèse décrivant les étapes d'ensouillage du câble et justifier l'intérêt de cette technique du point de vue environnemental.

Question 41. Quels sont les composants à dimensionner ayant un impact sur la sécurité des personnes ?

ANNEXES

Annexe 1 – Modélisation de la température de l'eau en fonction du jour de l'année

Les températures moyennes de l'eau, enregistrées par les stations de mesure des mers du Nord et Baltique sur une campagne de 5 ans, exploitées par l'agence fédérale maritime et hydrographique (BSH) de l'Allemagne, peuvent être approchées par une fonction sinus sur la durée d'une année définie par la température moyenne T_0 , l'amplitude ΔT et le déphasage φ sous la forme suivante : $T(^{\circ}\text{C}) = T_0 + \Delta T \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ avec t le jour de l'année, ω en $\text{rad} \cdot \text{jour}^{-1}$ la pulsation du signal et φ en radian.

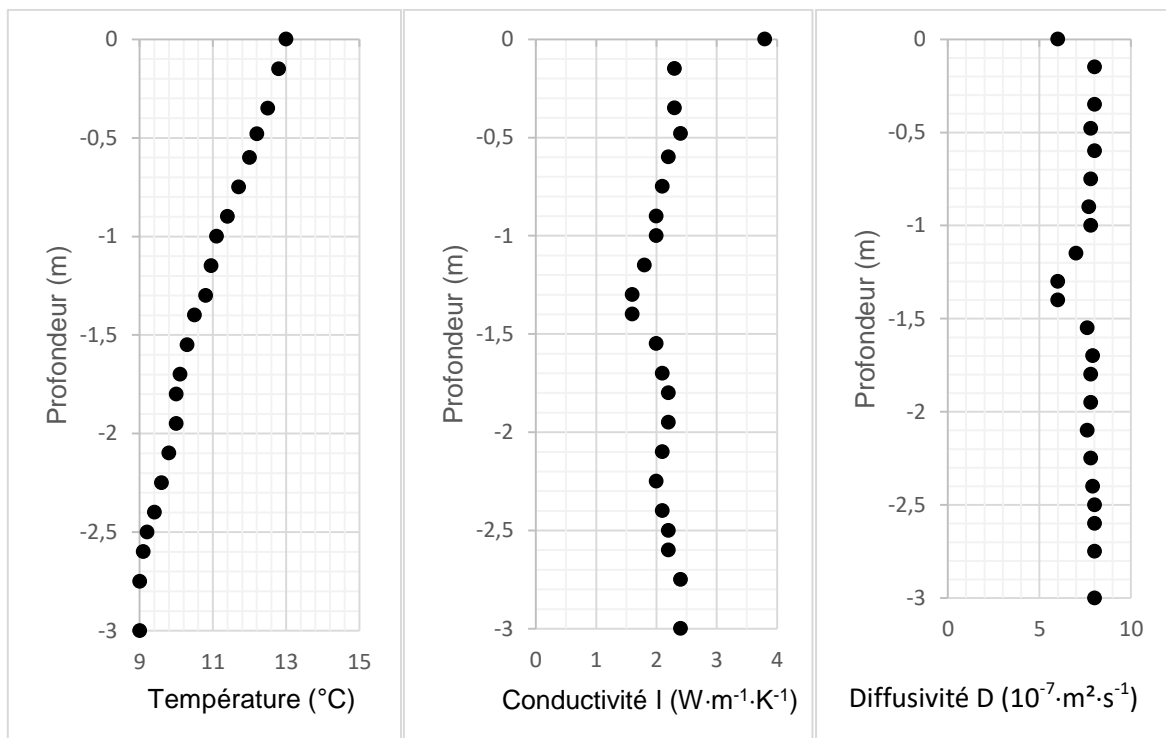


Le jour 0 correspond au premier jour de l'année soit le 1^{er} janvier.

Annexe 2 – Mesures expérimentales des propriétés thermiques des sédiments

Les propriétés thermiques mesurées telles que la conductivité thermique ou la diffusivité thermique sont essentielles pour la modélisation et l'évaluation des processus de transfert de chaleur thermique. Cela revêt une importance particulière dans les mers du Nord et Baltique, dont les fonds sont composés de sédiments hétérogènes.

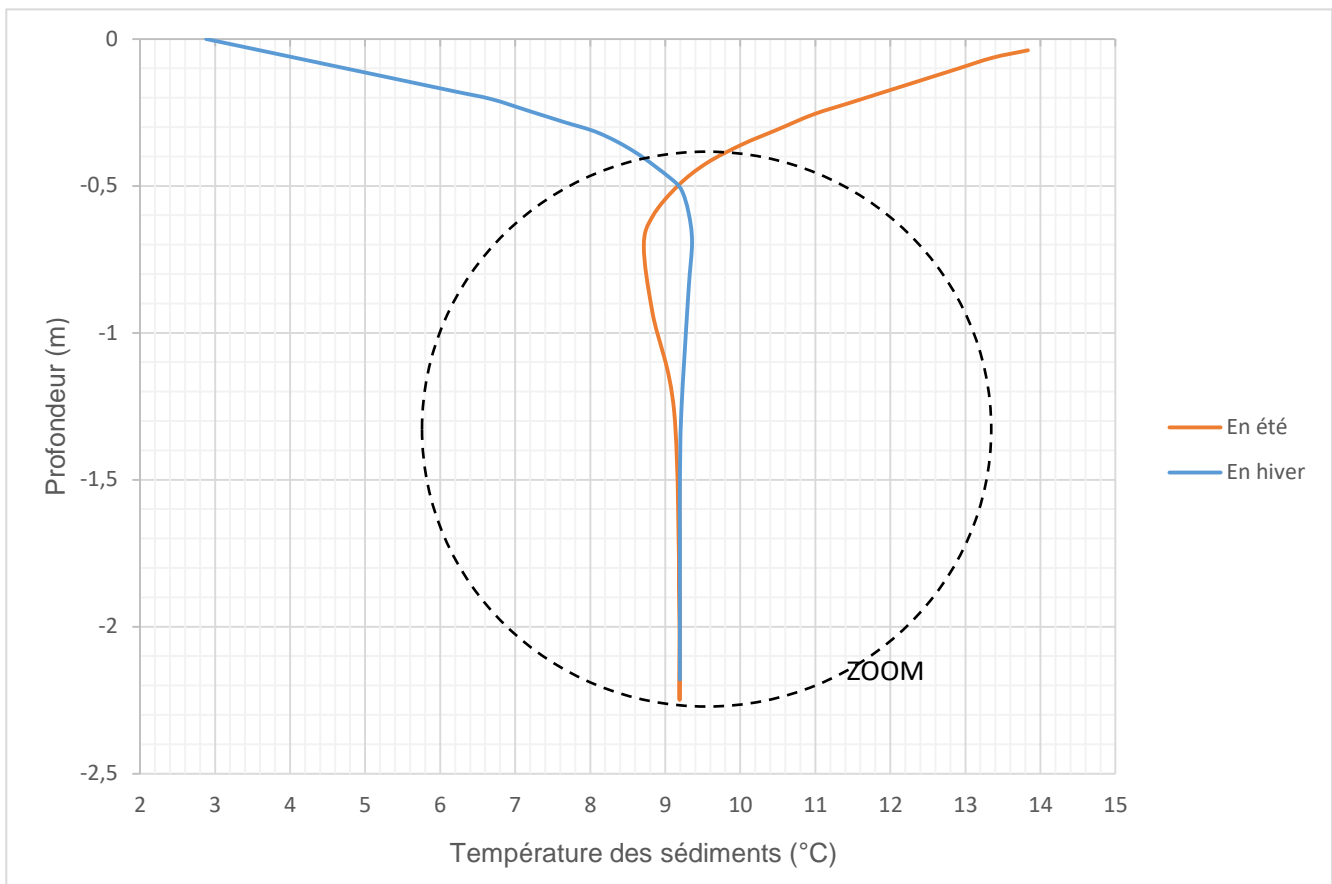
Les mesures expérimentales des propriétés thermiques suivantes ont été obtenues lors d'essais en haute mer.



Annexe 3 – Modèle d'évolution de la température des sédiments

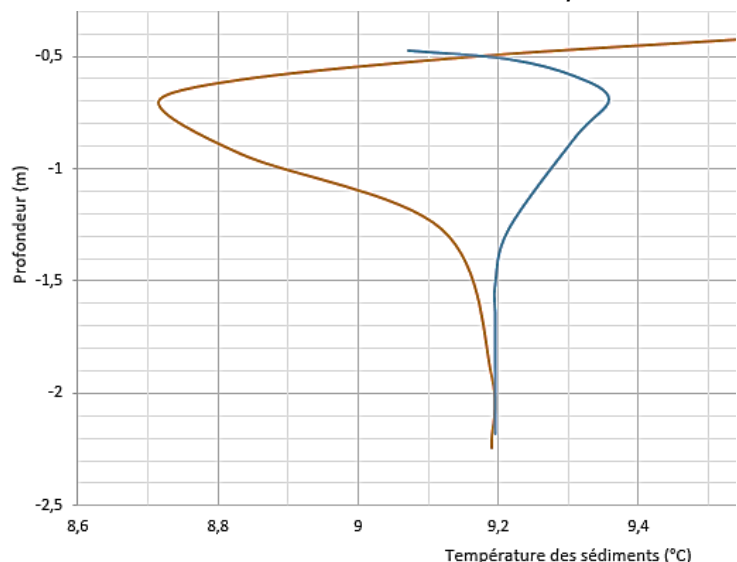
Dans les régions peu profondes telles que la mer Baltique et la mer du Nord, la température des sédiments varie naturellement selon la saison. Alors que la température des sédiments hivernaux augmente avec la profondeur, reflet de l'augmentation de la température de l'eau au cours de l'été précédent, la température en été diminue avec la profondeur reflet de la diminution de la température de l'eau durant l'hiver précédent.

La répartition de température dans les sédiments de diffusivité thermique $D = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et de conductivité $\lambda = 2,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, en prenant en compte les fluctuations saisonnières modélisées en *Annexe 1* est visualisable sur les deux courbes d'évolution en été et en hiver suivantes :



Évolution simulée annuelle de la température des sédiments en fonction de la profondeur

Zoom de la courbe précédente :



Annexe 4 – Modèle d'évolution de la température le long du câble

Propriétés du câble d'alimentation

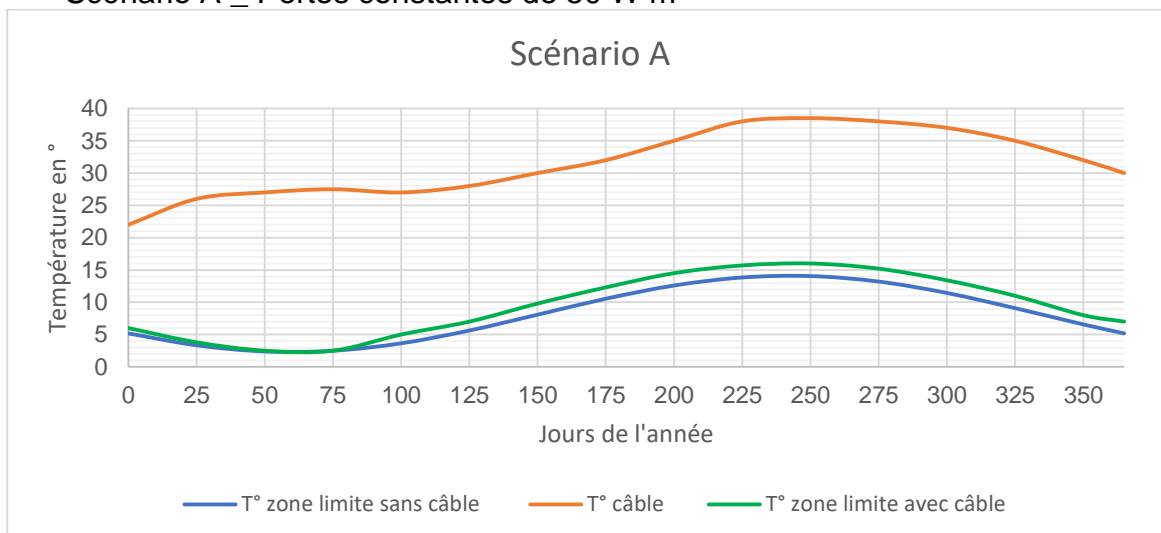
L'effet du chauffage par câble sur le milieu environnant dépend de la configuration du câble d'alimentation, essentiellement la résistivité déterminée par le matériau et le diamètre du conducteur et la profondeur de sépulture réelle. En incorporant les propriétés du câble dans les modèles, il est possible d'évaluer la profondeur minimale de sépulture et/ou le chauffage maximal des sédiments par les directives environnementales « 2K-critère » : *augmentation maximale de 2°C de la température au niveau de la jonction eau-fond des mers (épaisseur de la zone affectée de 20 cm).*

Les variations annuelles de températures pour différents scénarios de perte de puissance peuvent être simulées :

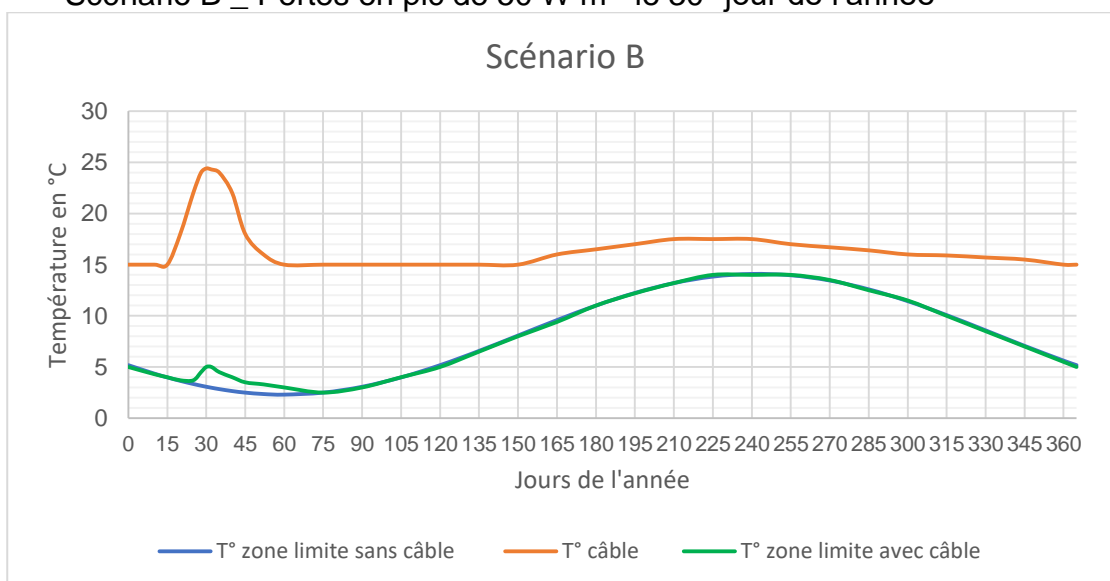
- T zone limite sans câble, température de l'eau au niveau de la limite de la zone affectée sans la présence du câble ;
- T zone limite avec câble, température de l'eau au niveau de la limite de la zone affectée avec la présence du câble ;
- T câble, température des sédiments au niveau du câble.

Les modèles suivants montrent les variations annuelles pour un câble d'alimentation sous-marin enfoui dans une profondeur de 1,5 m.

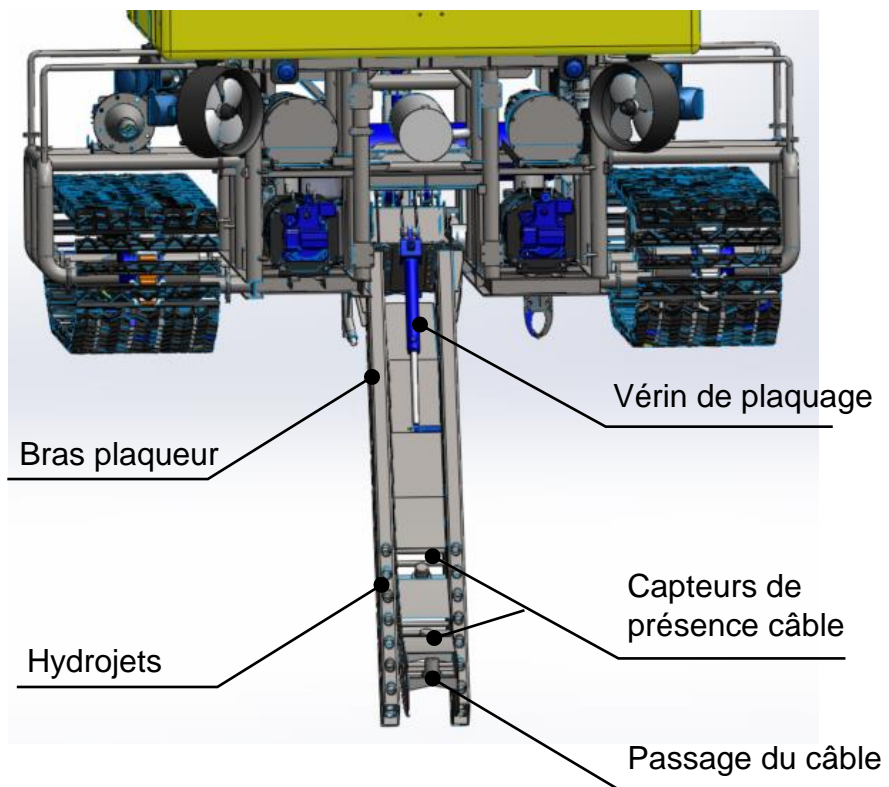
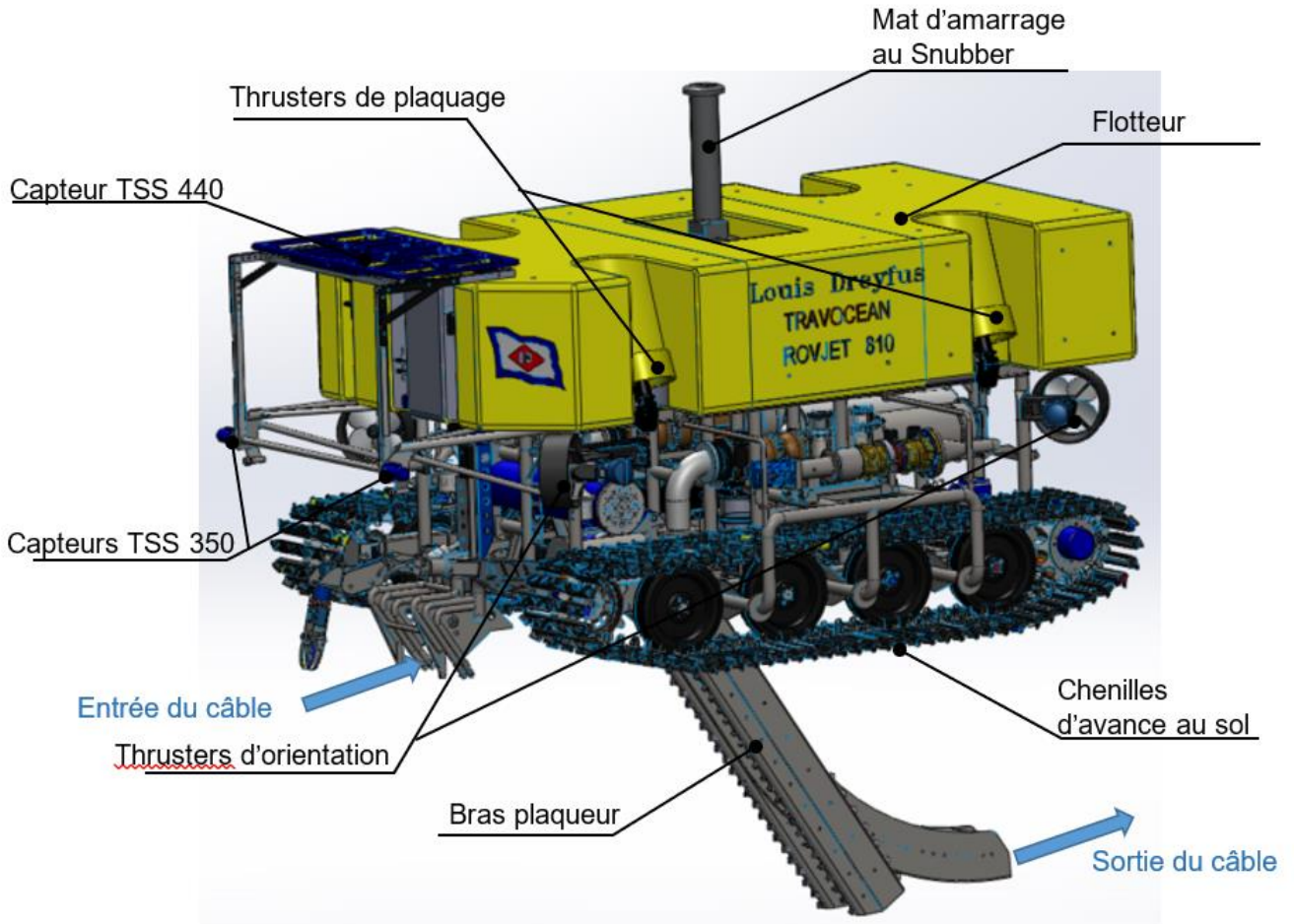
Scénario A _ Pertes constantes de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$



Scénario B _ Pertes en pic de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ le 30^e jour de l'année



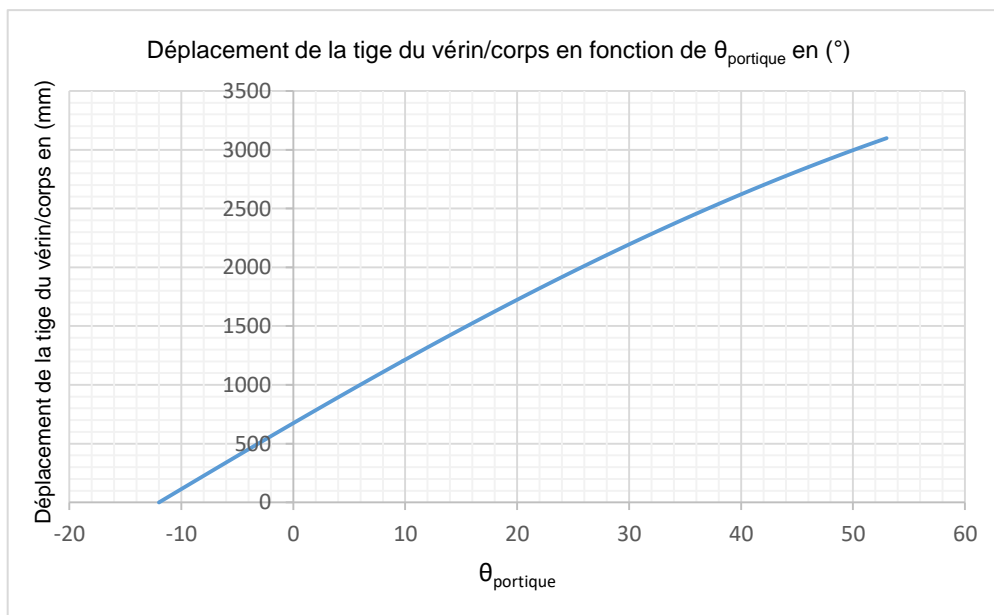
Annexe 5 – Descriptif du ROV



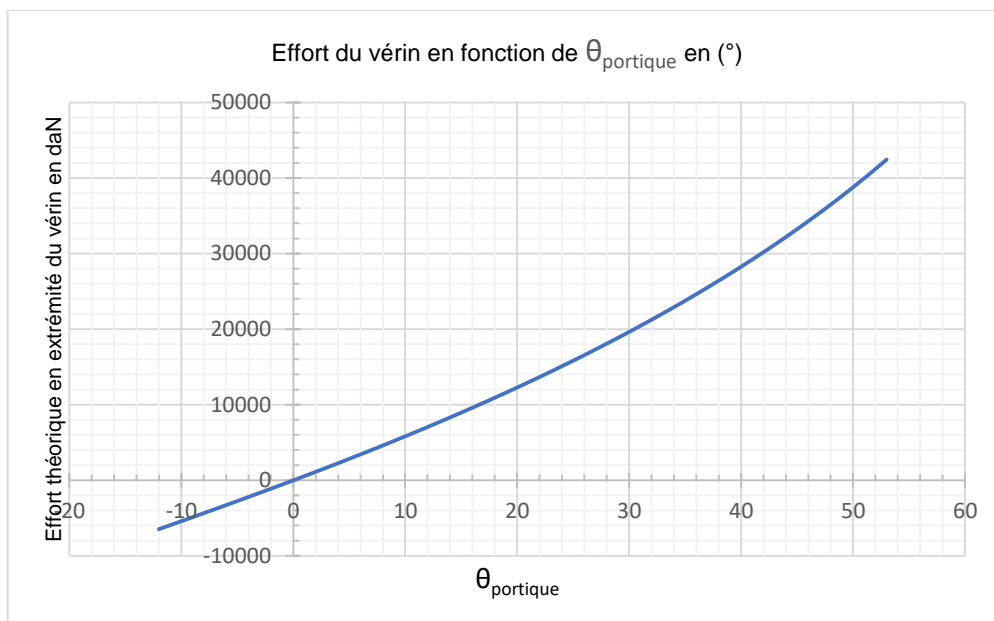
Annexe 6 – Simulation du comportement de la grue portique

La simulation prend en compte la majoration de la norme et les résultats donnés pour un seul vérin.

Analyse géométrique



Analyse statique



Annexe 7 – Système de trancannage

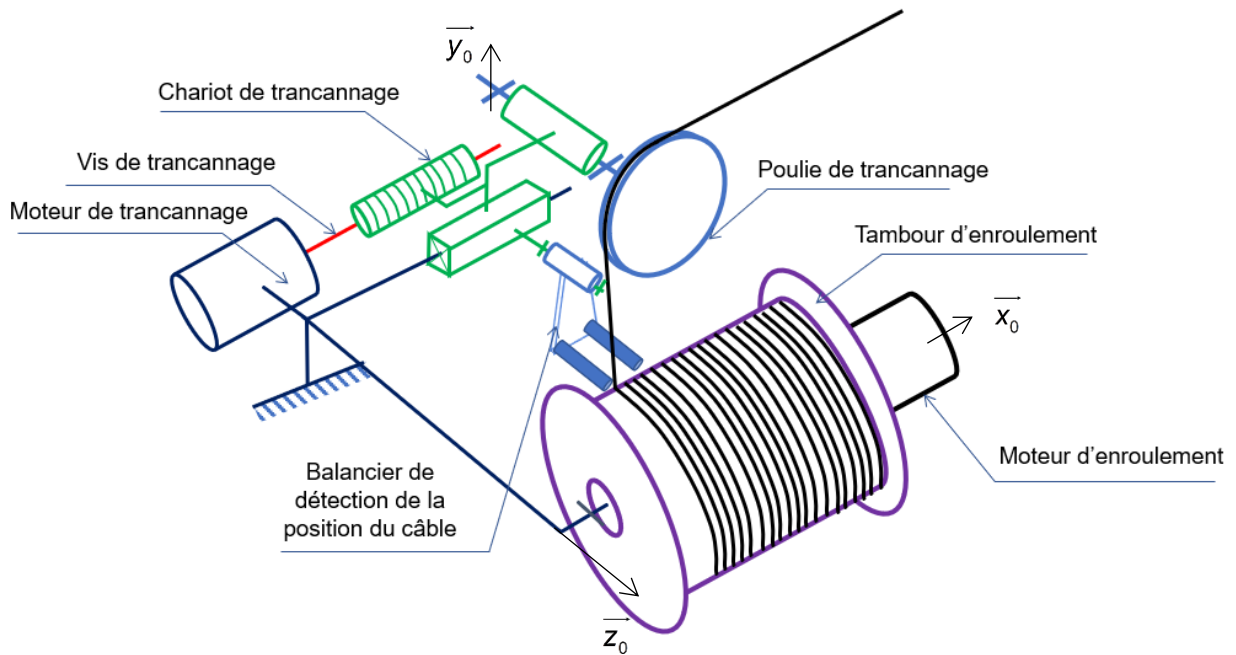
Cordon ombilical

Le cordon ombilical est composé de différents câbles de longueur maximale de 800 m :

- la fibre optique ;
- les câbles de cuivre de diamètre 2 mm et d'autres de diamètre 16 mm permettant le passage de l'électricité.

Le gainage du cordon permet de le solidifier ainsi que de le rendre étanche, son diamètre extérieur est 48,1 mm.

Le système de trancannage est composé de plusieurs sous-ensembles :



- un tambour d'enroulement en liaison pivot avec le châssis du bateau avec les caractéristiques suivantes ;

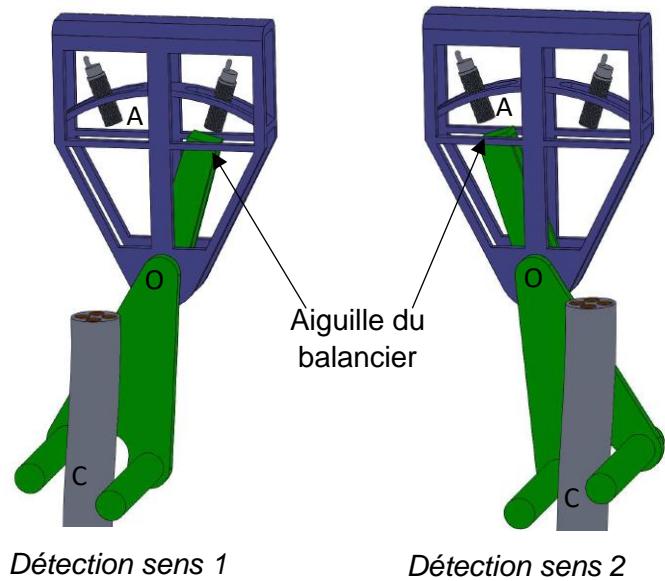
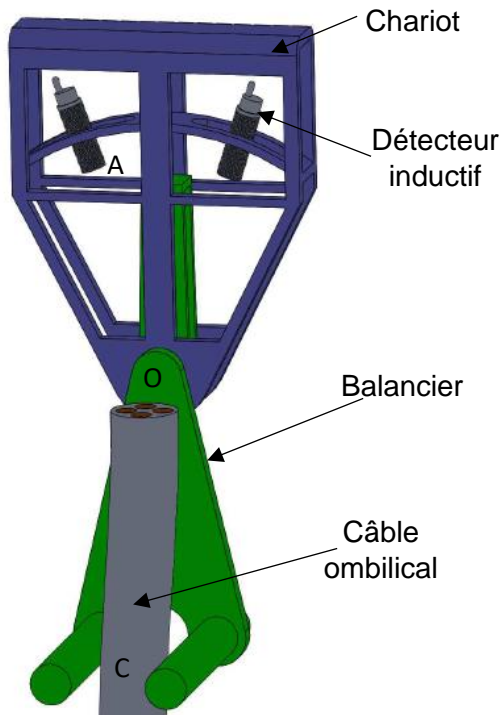
Rayon minimal d'enroulement	R_{mini}	650 mm
Rayon maximal d'enroulement	R_{maxi}	900 mm
Largeur d'enroulement	L	1 600 mm

- un chariot de trancannage du câble ombilical permettant un enroulement correct sur la poulie ;
- un système d'avance du chariot composé d'un moteur et d'un dispositif vis-écrou.

Le câble est guidé par une fourchette composée de deux doigts fixes sur le balancier de détection de la position du câble. Le câble en s'enroulant sur le tambour d'enroulement entraîne le balancier qui s'incline par rapport au chariot autour de l'axe (O, \vec{z}_0) jusqu'à la détection de l'aiguille du balancier par le détecteur inductif.

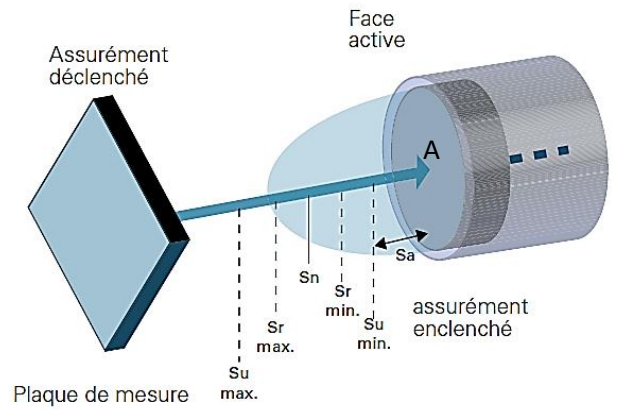
Le chariot de trancannage avance alors pendant une durée t déterminée pour que le balancier se repositionne en position milieu.

Ce système permet de suivre le câble tout au long de son enroulement sans risque de décalage possible. Un deuxième détecteur inductif permet de faire le retour.



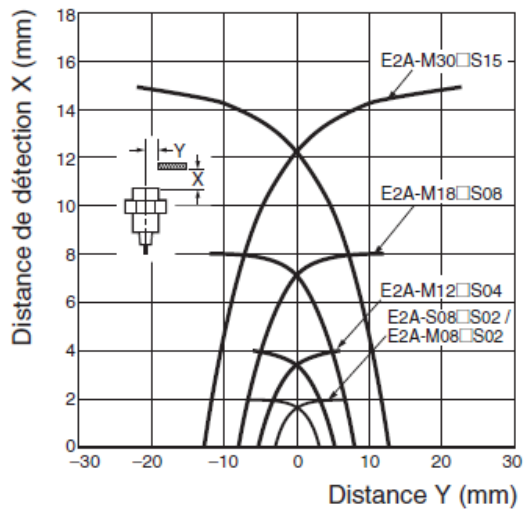
DéTECTEUR de proximité inductif : E2A-M18 S08

- S_n : portée nominale
- S_r : portée réelle de détection
- S_u : portée utile de détection
- S_a : portée de détection active, $0 < S_a < 0,81 \cdot S_n$

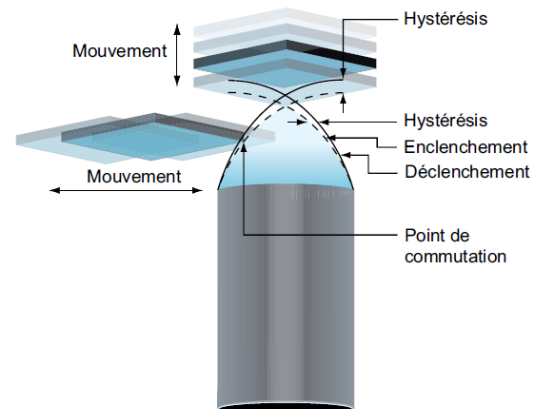


Plage de fonctionnement

Modèles blindés



L'hystérésis est la différence entre le point d'enclenchement à l'approche de la plaque de mesure et le point de déclenchement lorsque cette plaque s'éloigne du détecteur. L'hystérésis assure des commutations franches même en présence de vibrations.



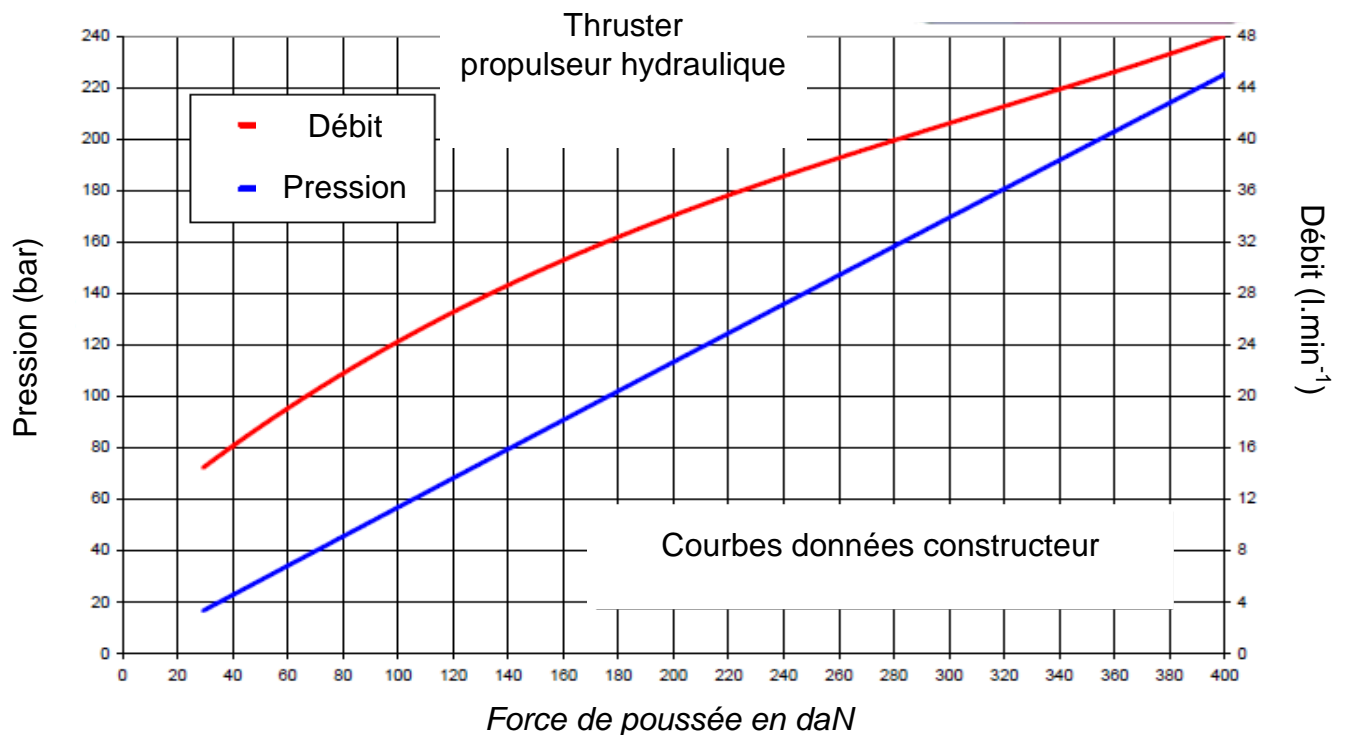
Annexe 8 – Transmission de puissance : plaquage du ROV par les thrusters

Extrait du circuit hydraulique

Le mécanisme est composé du moteur asynchrone associé à une pompe haute pression alimentant des thrusters identiques (4 de propulsion et 4 de plaquage).



Performances du « thruster »

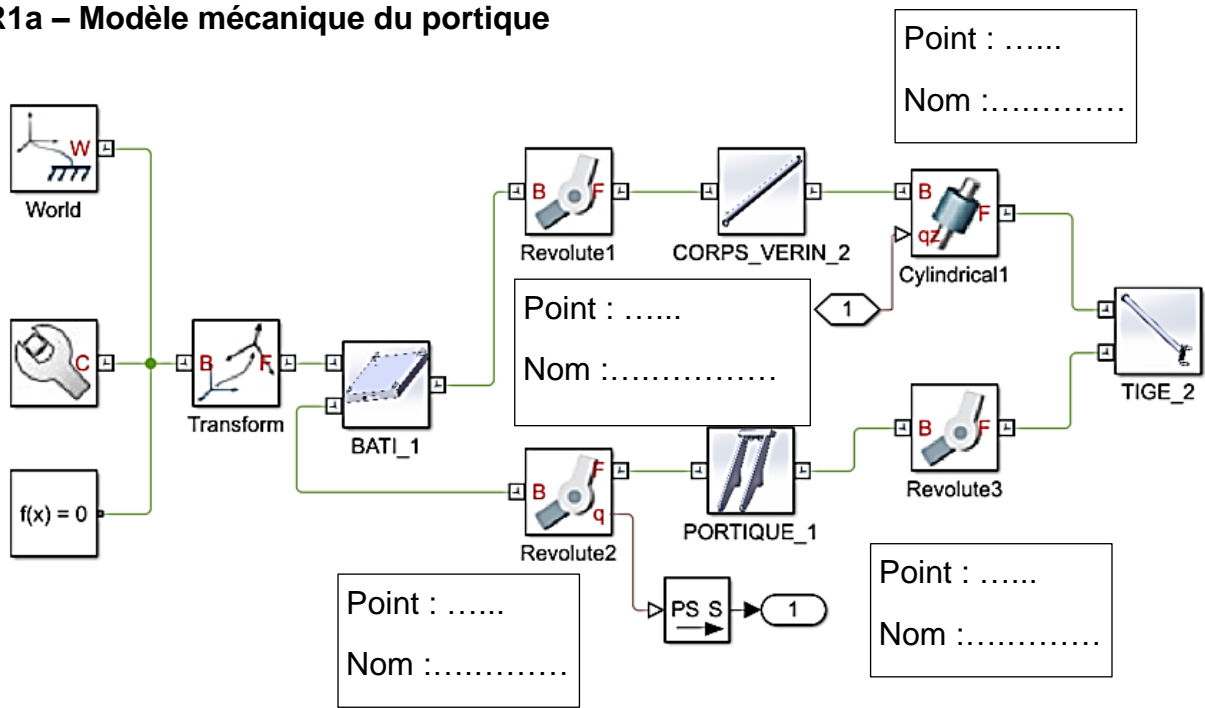


Caractéristiques de la pompe haute pression :

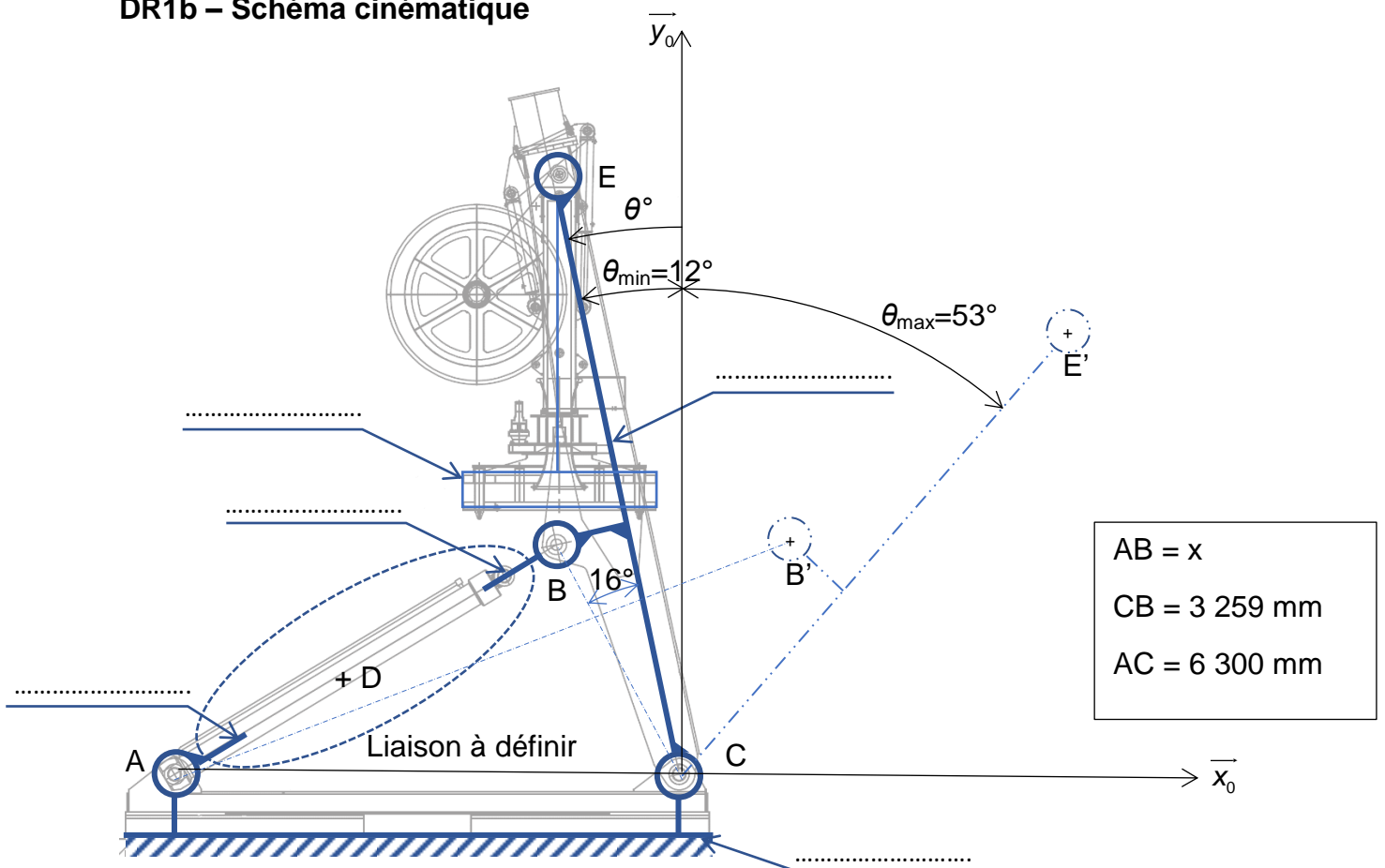
Cylindrée	Cy	$200 \text{ cm}^3 \cdot \text{tr}^{-1}$
Débit maxi	q_{\max}	$350-400 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
Vitesse angulaire à vide	N_{vide}	$1\ 900-2\ 200 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$
Vitesse angulaire minimale de fonctionnement	N_{\min}	$600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$
Couple	C	$1\ 400-1\ 379 \text{ N} \cdot \text{m}$
Pression à $N = 1\ 150 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$	P_1	$26 \text{ à } 122 \text{ bar}$
Pression à $N = 1\ 750 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$	P_2	$40 \text{ à } 185 \text{ bar}$
Rendement volumétrique	$\eta_V = \frac{q_{\text{réel}}}{q_{\text{théorique}}}$	$0,9$

DOCUMENTS – RÉPONSES

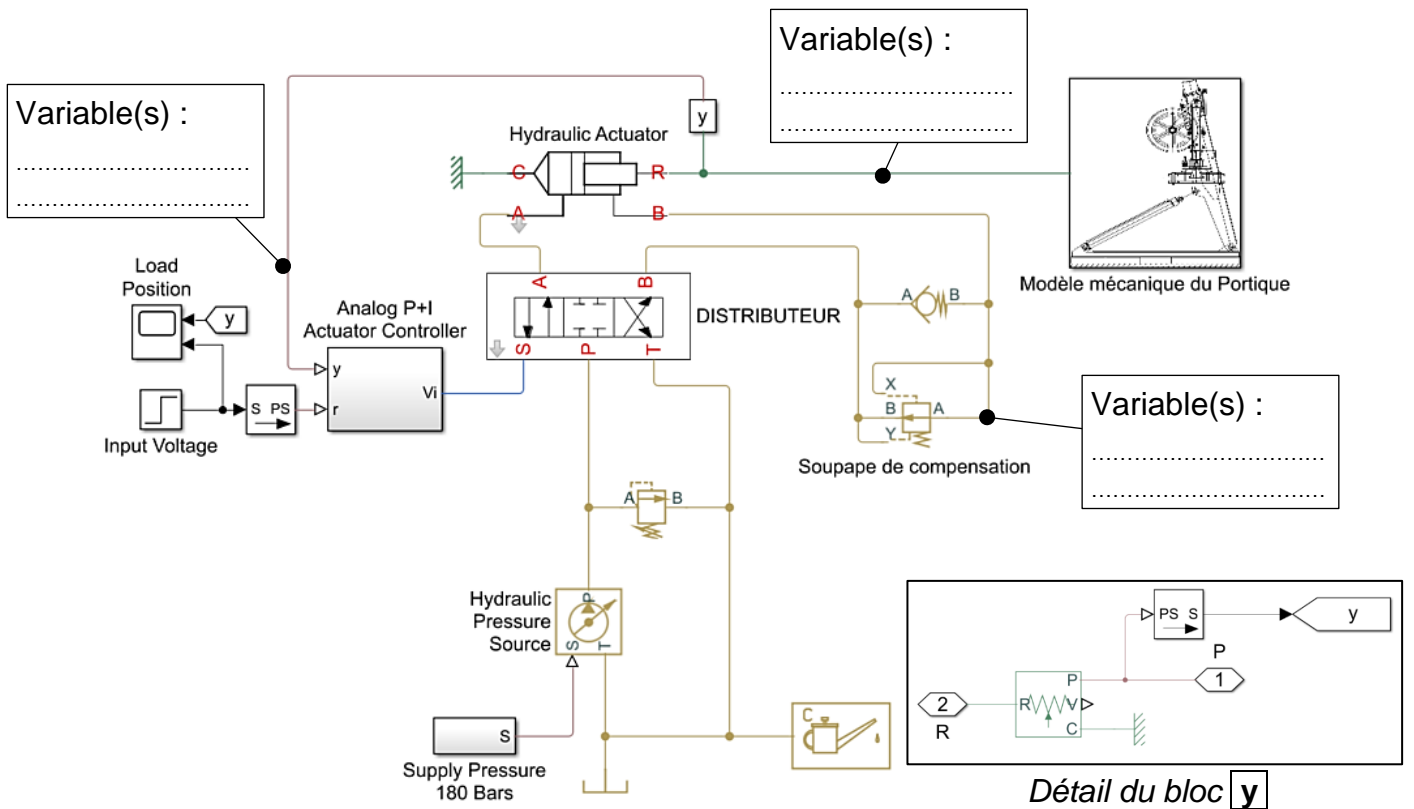
DR1a – Modèle mécanique du portique



DR1b – Schéma cinématique



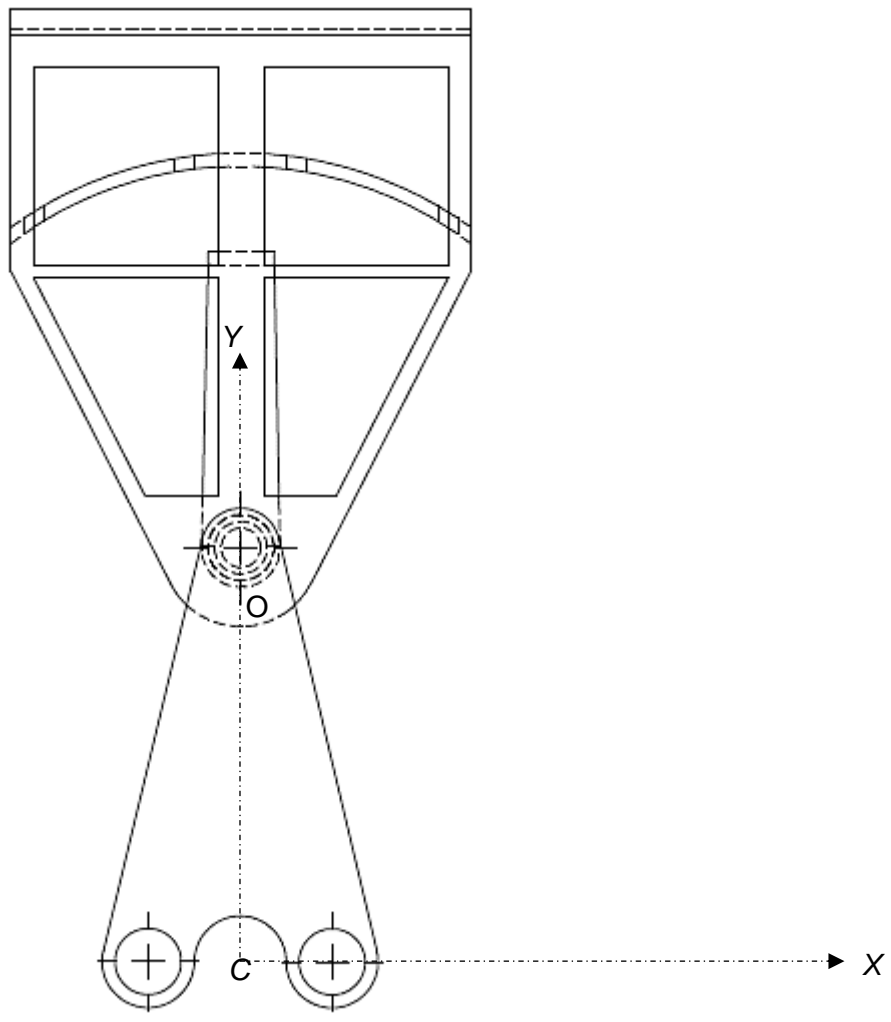
DR 2 – Modèle multiphysique de simulation



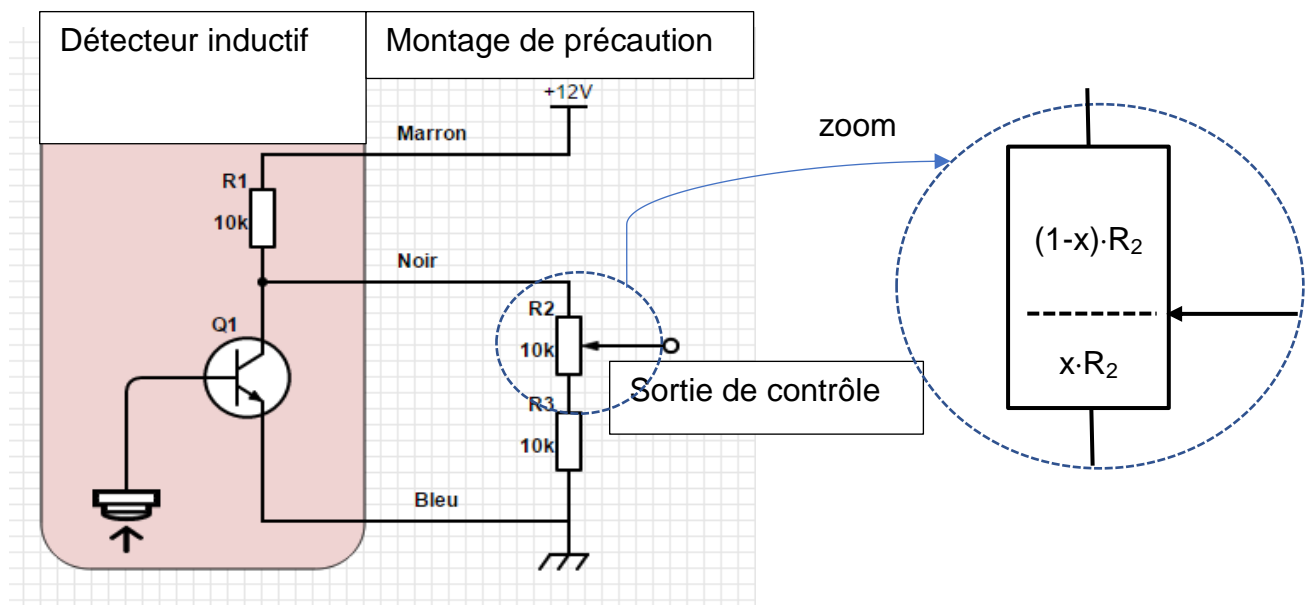
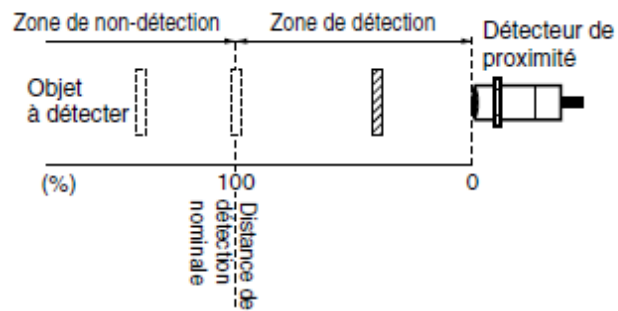
	Passage du domaine causal à acausal
	Passage du domaine acausal à causal
	Capteur de déplacement linéaire

Symboles utilisés

DR 3 – Angle de basculement du balancier
Dimension réelle : $OC = 220$ mm



DR 4 – Conditionnement du signal du détecteur inductif



DR 5 – Programme en pseudo-code de la détermination du centre de poussée du ROV

Objet : calculer le centre de poussée du ROV immergé.

Principe : calculer le centre de poussée des solides S_i puis la masse d'eau déplacée par les solides. On en déduit la position du centre de poussée de l'ensemble.

Entrées : listes des masses m_i des solides S_i , des coordonnées X_i, Y_i, Z_i des centres de masse des solides S_i , des densité d_i des solides S_i .

Sorties : coordonnées X, Y, Z du centre de poussée du ROV.

Déclaration des variables

```
i ← 0, n ← 0
de ← 1,025                                # densité de l'eau salée
Liste_masse ← [ ]                          # Liste vide des masses mi
Liste_X ← [ ]                               # Liste vide des coordonnées Xi
Liste_Y ← [ ]                               # Liste vide des coordonnées Yi
Liste_Z ← [ ]                               # Liste vide des coordonnées Zi
Liste_D ← [ ]                               # Liste vide des densités di
Liste_m(eau salée) ← [ ]                   # Liste vide des masses mi(eau salée)
```

Corps du programme

```
Tant que i ≠ fin_saisie faire
    n ← n+1                                # compteur
    saisir mi
    insérer mi à la fin de Liste_masse
    saisir Xi
    insérer Xi à la fin de Liste_X
    saisir Yi
    insérer Yi à la fin de Liste_Y
    saisir Zi
    insérer Zi à la fin de Liste_Y
    saisir di
    insérer di à la fin de Liste_D

    mi(eau salée) ← .....
    Insérer mi(eau salée) à la fin de .....

Fin tant que
Sx ← 0
Sy ← 0
Sz ← 0
M ← 0
Pour k = 1 à ..... faire
    Sx ← .....
    Sy ← .....
    Sz ← .....
    M ← .....
Fin pour
X ← ..... # coordonnées de C suivant X
Y ← ..... # coordonnées de C suivant Y
Z ← ..... # coordonnées de C suivant Z
Fin programme.
```