

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).

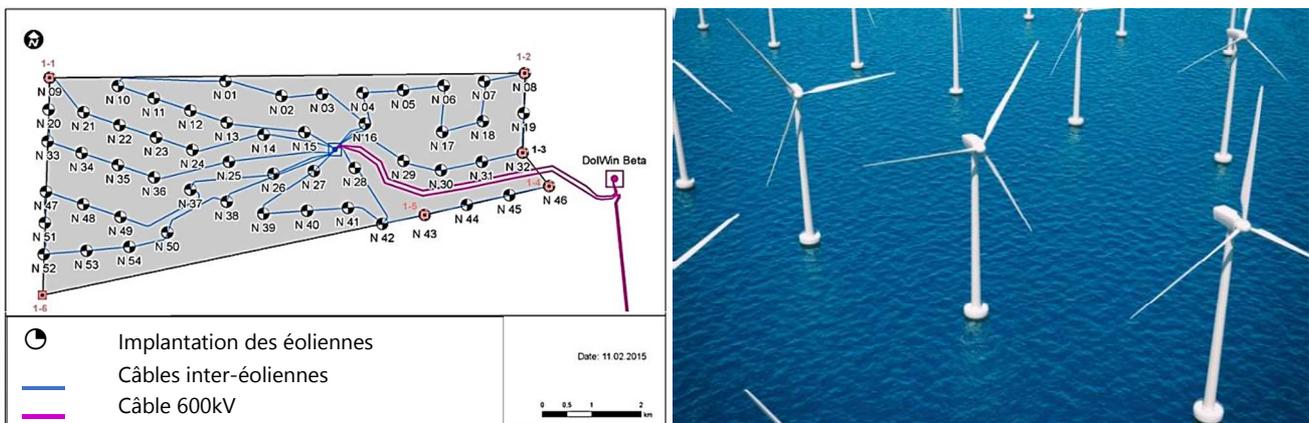


Figure 1 : implantation de la ferme éolienne North Sea One

1.2. Choix de la profondeur d'ensouillage

L'objectif de cette partie est de comprendre pourquoi la société TravOcéan a fait le choix 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)

L'écart maximal est de 1,2 °C pour le 360^e jour avec une amplitude de 12°C soit un maximal de 10% d'écart. La modélisation par une sinusoïde est justifiée avec les caractéristiques suivantes :

- $T_0 = 8,2^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T = 5,9^{\circ}\text{C}$

– $\varphi = -2,62 \text{ rad}$ ou $0,54 \text{ rad}$

– $\omega = 0,017 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$

$$T(^{\circ}\text{C}) = 8,2 - 5,9 \sin(0,017 \cdot t + 0,54)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = 8,2 + 5,9 \sin(0,017 \cdot t - 2,62)$$

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 ?

$\lambda_{\text{moyen}} = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $D_{\text{moyen}} = 7,5\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

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

La température reste constante à environ $9,2^{\circ}\text{C}$ à partir d'une profondeur de $2,5 \text{ m}$.

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 $0,2^{\circ}\text{C}$ près ?

À partir d'une profondeur de 2 m , la température saisonnière n'influence plus la température des sédiments.

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

En dessous d'une profondeur de $0,5 \text{ m}$, le modèle semble correct. Les variations proviennent de la valeur constante de λ et D dans le modèle ce qui n'est pas le cas en réalité.

À partir de cette première étude on choisira le seuil d'ensouillage des câbles à $1,5 \text{ m}$ 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 « 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 $1,5 \text{ m}$ est-elle suffisante pour vérifier le « 2K-critère » imposé par les directives environnementales ?

À partir de l'analyse des deux scénarios la profondeur d'ensouillage de $1,5 \text{ m}$ est suffisante. 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 *ROVJET* 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 ROVJET*

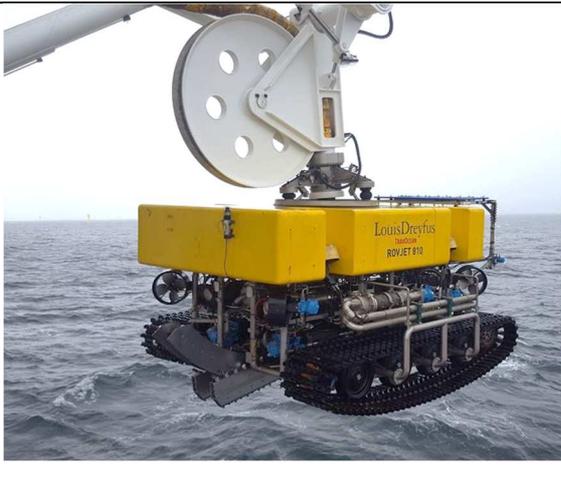
<p>Les <i>ROVJET</i> série 800 sont équipés d'un câble ombilical électro-porteur.</p> <ul style="list-style-type: none">– Longueur : 6,60 m– Largeur avec chenilles : 3,40 m– Hauteur : 2,80 m– Masse : 13 tonnes– Profondeur de tranchage : jusqu'à 2,20 m– Largeur de tranchée : jusqu'à 480 mm– Puissance 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 ROVJET 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 bateau 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 4*).

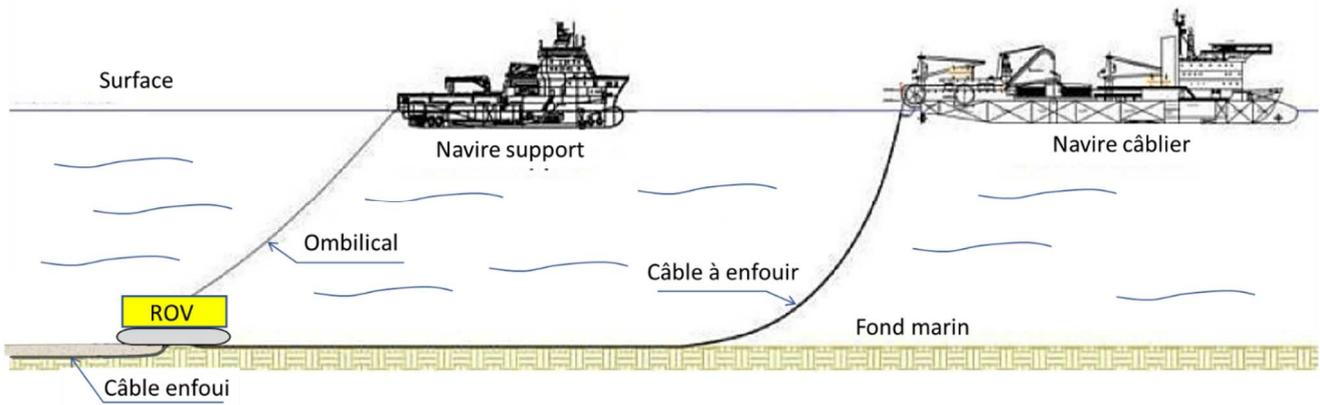
Cas d'utilisation N°2 : descente en pleine eau

Dans cette phase le ROV est suspendu au câble ombilical. Un bon équilibre 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*).



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 trancannage⁽¹⁾ (voir figures 5 et 6). Il est raccordé au ROV par un *snubber* de jonction. La grue portique est actionnée par deux vérins hydrauliques.

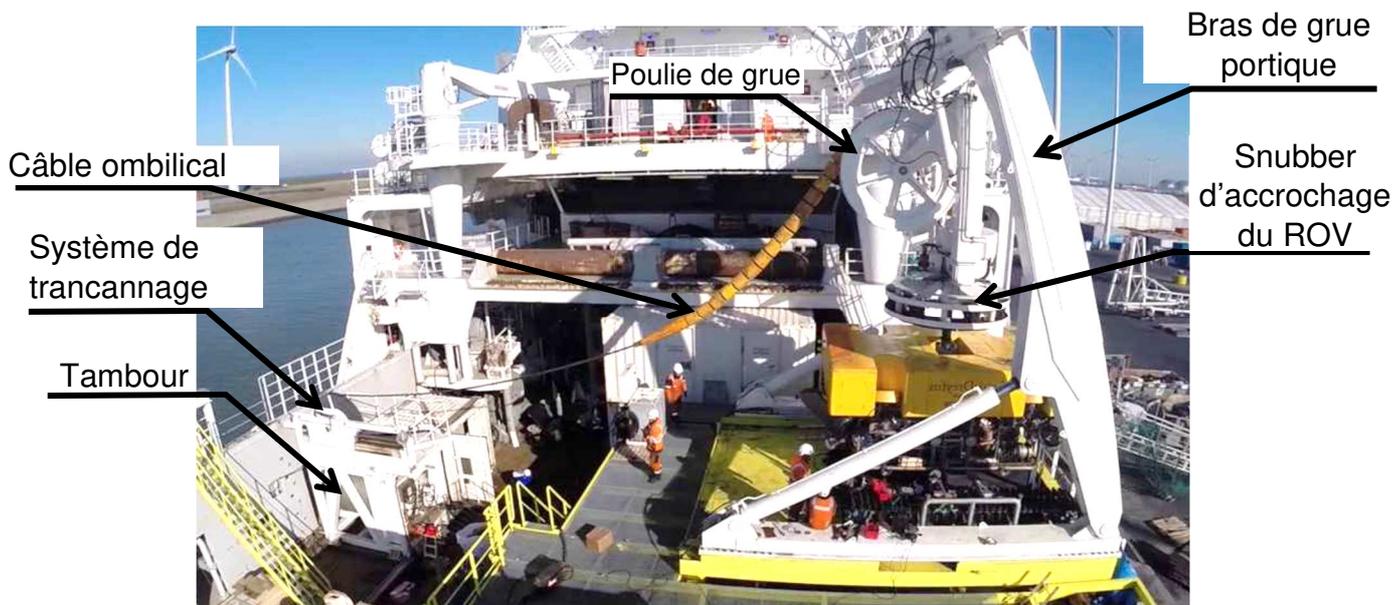


Figure 5 : photo de l'implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du bateau

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

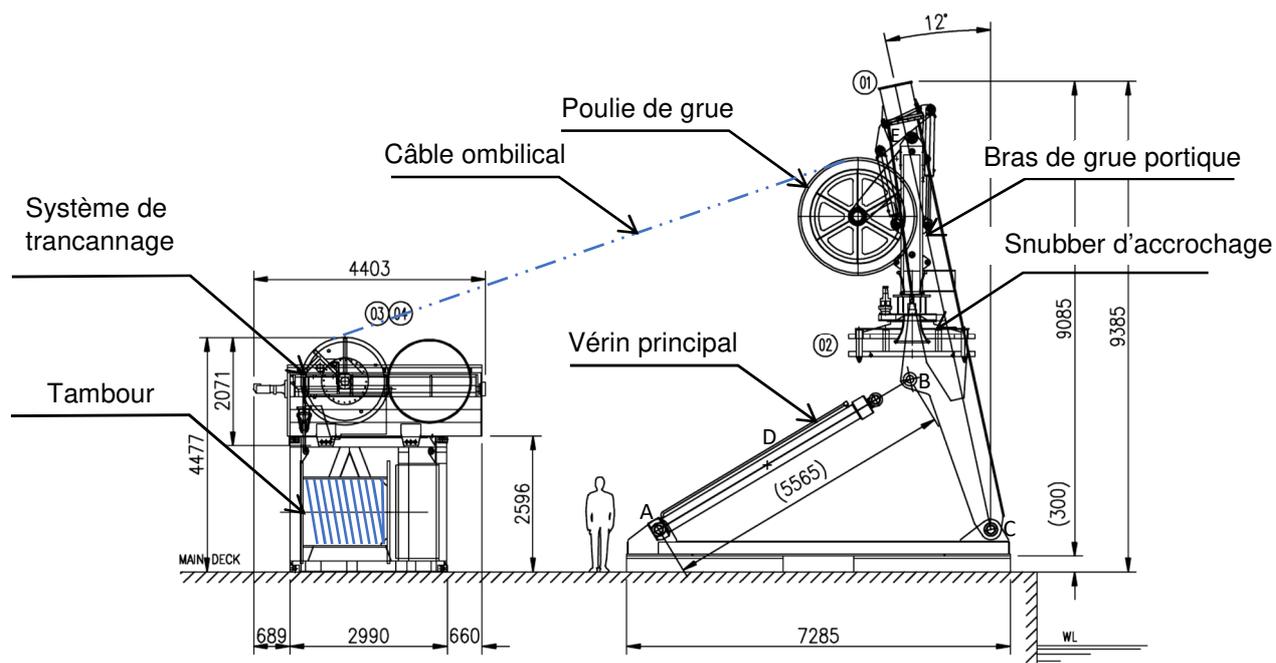


Figure 6 : implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du bateau

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 dynamique 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.

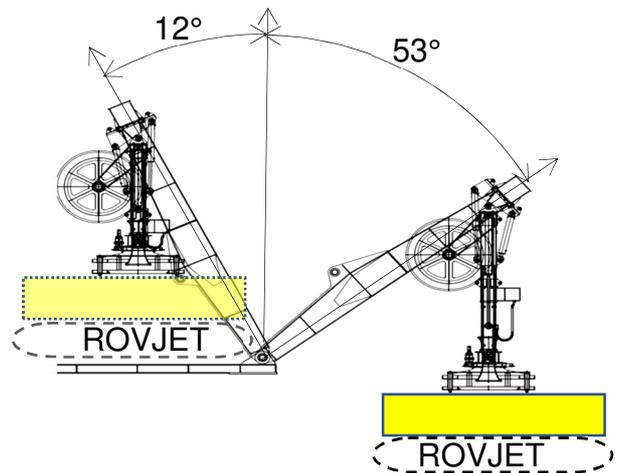


Figure 7 : positions extrêmes de la grue

La grue portique permet le transfert du ROV entre la surface et le bateau. 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 bateau 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 DR 1a. Quel(s) ensemble(s) n'ont pas été modélisés ?

Voir DR 1a

Les ensembles non modélisés sont la poulie de grue, le câble ombilical, le snubber et le ROV. (Leur poids sera appliqué au portique pour tenir compte de leur effet)

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

Voir DR 1b

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 réponse DR 1b. En déduire la course théorique du vérin.

Par le théorème d'Al-Kashi ou Pythagore généralisé dans le triangle ABC on obtient la relation suivante $x(\theta) = \sqrt{(AC)^2 - 2 \cdot AC \cdot CB \cdot \cos(\theta - 74^\circ) + (CB)^2}$

La course théorique du vérin vaut $c = x_{\max} - x_{\min} = x(-53^\circ) - x(12^\circ)$ soit $c = 3\,091$ mm.

La simulation à l'aide du modèle multiphysique complet a permis d'obtenir les courbes données en l'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.

La course du vérin à partir de la simulation est $c = 3\ 100\text{ mm}$. Les deux valeurs sont semblables. La simulation est conforme au modèle géométrique (écart $< 1\%$)

Question 11. Placer sur 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 Rovjet accroché au snubber.

Voir DR 1b

L'ensemble {tige + corps} est soumis à deux glisseurs donc l'effort est dirigé selon (AB) (respectivement (AB')).

Pour θ_{min} , le poids crée un moment positif selon \vec{z}_0 en C, il faut le contrer avec un effort de la tige sur le portique selon \vec{AB} . Pour θ_{max} , on a l'inverse.

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

L'effort dans le vérin est d'intensité nulle lorsque le portique est en position verticale car le moment créé par le poids est nul dans cette position.

Le vérin utilisé a les caractéristiques suivantes :

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

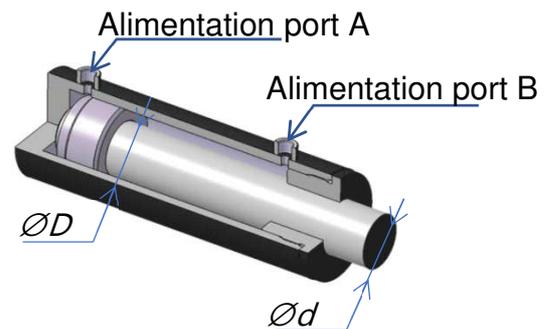


Figure 8 : vue en quart de coupe du vérin

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.

La position la plus défavorable correspond à la position $\theta_{max} = 53^\circ$ pour deux raisons :

- la surface de contact utile avec l'huile dans le vérin est la plus faible (phase de rentrée de tige) ;
- le moment dû au poids est le plus grand alors que l'angle ABC est le plus faible soit le moment dû à l'effort de la tige est le plus faible.

L'effort maximal théorique est de $F_{max} = 42\ 500\text{ daN}$ pour $\theta_{max} = 53^\circ$ or $F = p \cdot S = p \cdot \pi \frac{D^2 - d^2}{4}$

$$\text{soit } p = \frac{4 \cdot F}{\pi(D^2 - d^2)}$$

D'où la pression maximale est $p_{max} = 180\text{ bars}$, ce qui est compatible avec le circuit hydraulique de pression maximale de 200 bars.

D'autre part, la course utile de 3 100 mm est bien inférieure à la course maximale du vérin (3 800 mm). Donc le choix du vérin est validé suivant deux critères géométrique et statique.

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

Le document 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. Inscrire sur le document DR 2 la nature des différentes variables circulant entre les connecteurs (pression, vitesse, tension, intensité...).

Voir DR 2

La courbe de simulation en l'Annexe 6 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 bars 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 .

La pression de tarage doit valoir $P_t = K \cdot P_B$ soit $P_t = 270$ bars.

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.

L'équation de la résultante de la statique en projection sur l'axe de la tige du vérin en isolant le piston est la suivante : $F_A - F_B + F_{portique \rightarrow tige} = 0$ soit $P_A \cdot S_A = P_t \cdot S_B - F_{portique \rightarrow tige}$ soit

$$P_A = \frac{P_t \cdot \pi (D^2 - d^2) - 4 \cdot F_{portique \rightarrow tige}}{\pi D^2}$$

Par lecture de la courbe en annexe la valeur minimale de $F_{portique \rightarrow tige}$ est de - 5 000 daN, on en déduit la pression minimale $P_A = 140$ bars.

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 bateau. Il supporte la masse du ROV mais assure aussi les fonctions d'alimentation en énergie et de transmissions 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 ?

La largeur d'enroulement est de 1 600mm, le diamètre du câble est de $d = 48,1$ mm donc par couche on a 33 tours de câble.

Le nombre de couche est $N = \left\lfloor \frac{R_{\max i} - R_{\min i}}{d} \right\rfloor = 5$.

A la $n^{\text{ième}}$ couche on a :

– Le rayon d'enroulement $R(n) = R_{\min i} + \frac{d}{2} + n \cdot d$

– la longueur enroulée pour la couche n vaut $L(n) = 66 \cdot \pi \cdot R(n) = 66 \cdot \pi \cdot \left(R_{\min i} + \frac{d}{2} + n \cdot d \right)$

La longueur totale d'enroulement vaut

$$L = \sum_{n=1}^{n=N} L(n) = \sum_{n=1}^{n=N} 66 \cdot \pi \cdot \left(R_{\min i} + \frac{d}{2} + (n-1) \cdot d \right) = 66 \cdot \pi \cdot \left(N \cdot \left(R_{\min i} + \frac{d}{2} \right) + d \cdot \sum_{n=1}^{n=N} (n-1) \right)$$

$$L = 66 \cdot \pi \cdot \left(N \cdot \left(R_{\min i} + \frac{d}{2} \right) + d \cdot \frac{N(N-1)}{2} \right) \text{ soit } L = 798,5 \text{ m ce qui est conforme au cahier des}$$

charges en sachant qu'il y a toujours une partie du câble non enroulé entre le tambour et le ROV.

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

Question 18. Sur le document réponse 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.

Voir DR 3 on trouve un angle de 23° .

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 $\overline{OA} = -62\bar{x} + 150\bar{y}$ (en mm). Expliquer les écarts entre la position réelle et la position théorique du point A.

La face avant du capteur doit se situer à 7 mm maxi de l'aiguille du balancier pour pouvoir le détecter (voir document constructeur en annexe).

Sachant que la distance $OD = 156 \text{ mm}$, on a $\overline{OA} = -63,8\bar{x} + 150,3\bar{y}$.

Les écarts proviennent :

- erreur de tracé ;
- position en amont du capteur sur le système réel pour prendre en compte le temps de réponse du capteur ;
- La distance DA prise pour le tracé est au seuil de détection alors que sur le système réel A se trouve plus proche de D. $AD_{\text{réel}} = 6,3 < 7 \text{ mm}$.

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

Question 20. Le capteur inductif est en mode « ouvert » (non passant) s'il n'y a pas de détection. Compléter le document réponse 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.

Voir DR 4

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

Par la méthode du pont diviseur de tension on obtient la relation suivante :

$$U_{\text{contrôle}} = \frac{R_3 + x \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_{\text{alim}} \text{ d'où } x = 0,25 = 25\%$$

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

Pour éviter le décalage possible du trancannage et connaître exactement la longueur déroulée de câble.

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 volumique et des caractéristiques constructeurs des éléments standards, une liste de tous les composants constituant le ROV est disponible où l'on peut avoir les informations suivantes :

- le nom de l'élément ;
- le nombre présent dans le ROV ;
- la masse ;
- le volume ;
- le matériau ;
- les coordonnées du centre de gravité 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 ni d'eau ni d'huile. On se place dans la situation où le ROV est complètement immergé.

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

Notations

- $(O, \overline{x_{ROV}}, \overline{y_{ROV}}, \overline{z_{ROV}})$: repère associée au ROV
- C : le 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 : le centre de gravité du solide S_i avec $\overline{OG_i} = X_i\overline{x_{ROV}} + Y_i\overline{y_{ROV}} + Z_i\overline{z_{ROV}}$;
- $d_{\text{eau salée}}$: la densité de l'eau salée ;
- d_i : la densité de l'élément i ;
- m_i : la masse de l'élément i ;
- $m_i(\text{eau salée})$: la masse d'eau salée déplacée par l'élément i .

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

On suppose que tous les solides S_i sont homogène et complètement immergés. On peut donc assimiler C_i à G_i . Dans ce cas C est le barycentre des G_i pondérés par les masses m_i .

$$\overline{OC} = \frac{\sum_i m_i(\text{eau salée}) \cdot \overline{OG_i}}{\sum_i m_i(\text{eau salée})}$$

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

$$m_i(\text{eau salée}) = V_i \cdot \rho_{\text{eau salée}} = \frac{m_i}{\rho_i} \cdot \rho_{\text{eau salée}} = m_i \cdot \frac{d_{\text{eau salée}}}{d_i}$$

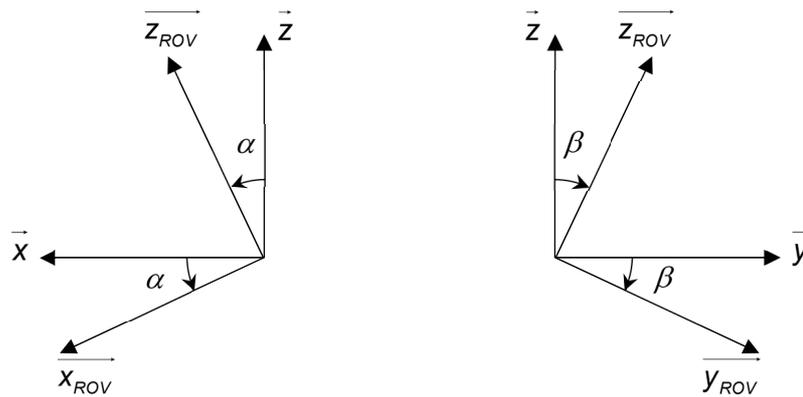
Question 25. Compléter le pseudo code du document réponse DR 5 permettant de calculer la position de C en vous aidant des résultats trouvés aux deux questions précédentes.

Voir DR 5

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 gravité 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 l'axe \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.

La verticale naturelle est selon (CG) car le ROV n'étant soumis qu'à deux glisseurs (poids et la poussée d'Archimède) il a ses efforts colinéaires aux deux points d'applications.

D'où $\vec{CG} = \vec{OG} - \vec{OC} = 42,04\vec{x}_{ROV} + 57,63\vec{y}_{ROV} + 1131,29\vec{z}_{ROV}$ on en déduit :

$$\tan \alpha = \frac{42,04}{1131,29} \text{ soit } \alpha = 2,1^\circ$$

$$\text{et } \tan \beta = \frac{57,63}{1131,29} \text{ soit } \beta = 2,9^\circ$$

Ces deux angles sont conformes 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.

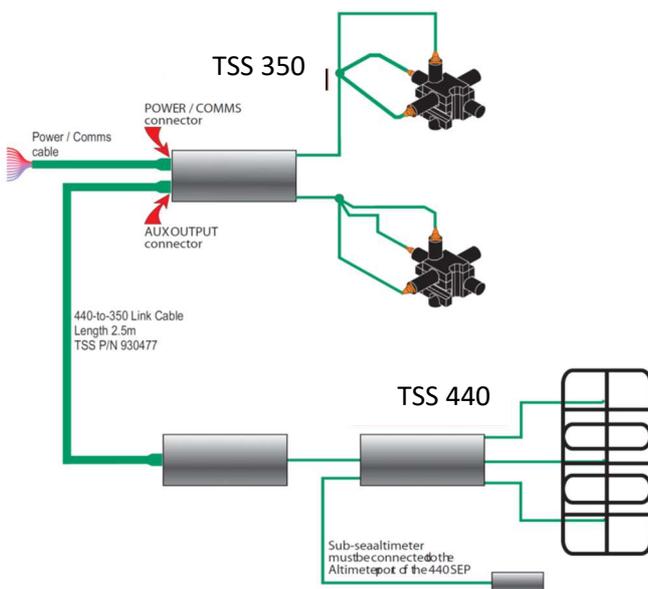


Figure 10 : détection passive

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 30A et 200Hz pour générer un champ magnétique suffisant à la détection. La deuxième est une

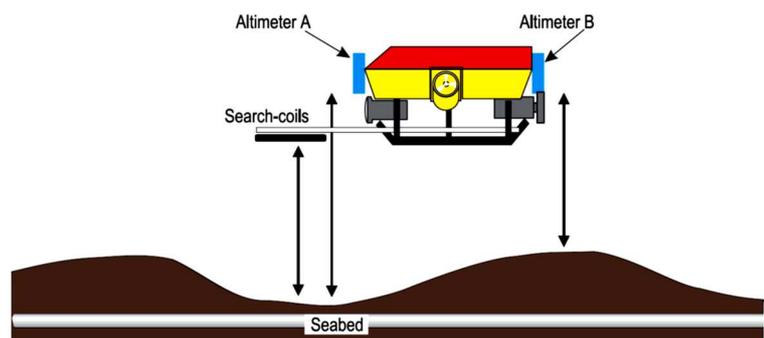


Figure 11 : ensemble de détection du câble

détection passive par le capteur TSS 440, 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.

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

L'ensemble représenté sur la *figure 12* est constitué de 2 fois 3 bobines de détection en trièdre (Coil array) 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.

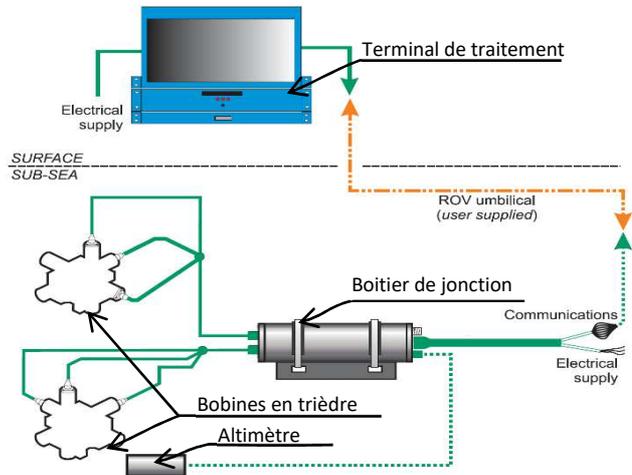


Figure 12 : Subsea Cable Tracking

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

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

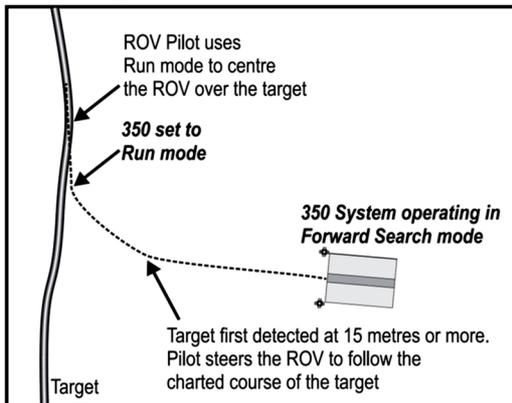


Figure 13 : recherche et suivi du câble

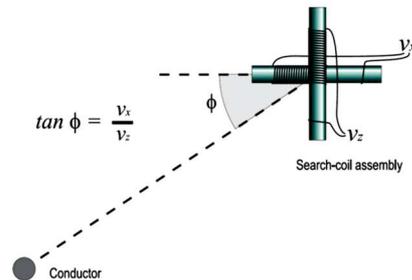


Figure 14 : détermination de l'angle relatif en utilisant deux bobines

Les bobines en trièdre placées à l'avant du ROV (voir *annexe 5*) convertissent le champ magnétique du câble en une tension notée V_i pour l'axe i . La figure 13 décrit le principe utilisé pour d'obtenir l'angle entre le capteur et le câble conducteur par rapport au plan (\vec{x}, \vec{z}) .

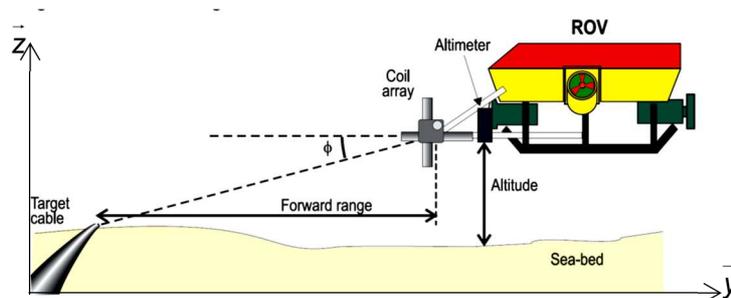


Figure 15 : recherche du câble à longue distance

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).

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. Vous préciserez les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés.

$$Forward\ range = \frac{K_{alt} \cdot V_{alt}}{\tan(\arctan\left(\frac{V_z}{V_y}\right))} = \frac{K_{alt} \cdot V_{alt}}{\left(\frac{V_z}{V_y}\right)}$$

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

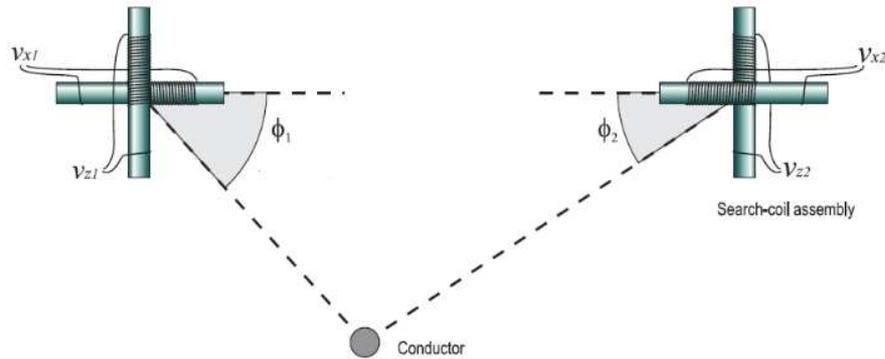


Figure 16 : Centrage du ROV le long du câble

Question 28. Proposer une méthode permettant de déterminer la position latérale du câble par rapport à l'axe \bar{y} du ROV pendant le suivi. Vous préciserez les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés.

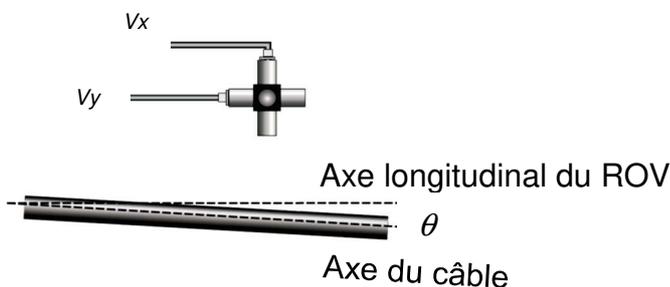
Pour le centrage du câble il faut avoir $\phi_1 = \phi_2$ soit $\arctan\left(\frac{V_{z1}}{V_{x1}}\right) = \arctan\left(\frac{V_{z2}}{V_{x2}}\right)$

De plus : (référence de la figure 16)

Si $\phi_1 > \phi_2$ on déplace le ROV à droite

Si $\phi_1 = \phi_2$ on va tout droit

Si $\phi_1 < \phi_2$ on déplace le ROV à gauche



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 ». Vous préciserez les relations entre les tensions des différents capteurs utilisés.

On détermine $\theta = \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right)$

2.3.2. Étude de l'ensouillage du câble

L'objectif de cette partie est de vérifier la résistance au matage 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 de :

- un bras plaqueur lié au châssis par une liaison pivot ;
- 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.

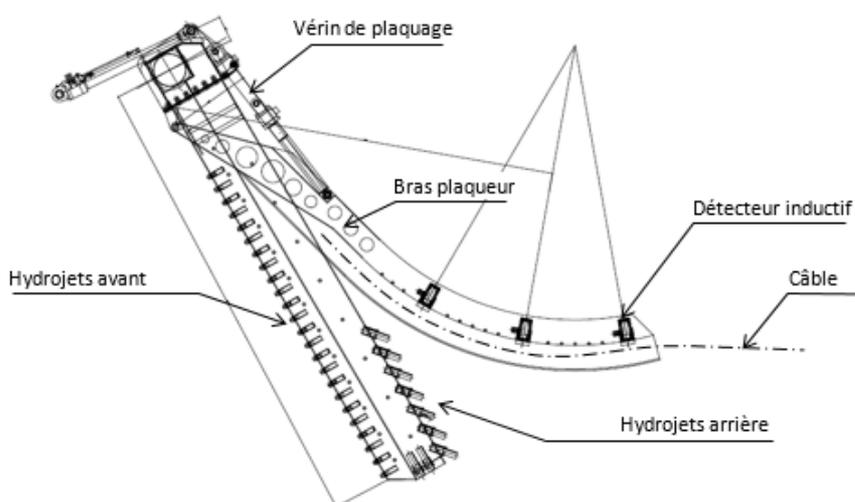


Figure 18 : Système presseur et hydrojets

La société *Nexans*, fabricant du câble, donne les caractéristiques mécaniques de son produit :

Caractéristiques mécaniques	Unité	Valeur Nominale
Diamètre extérieur	mm	60
Masse linéique (approchée)	kg·m ⁻¹	5,2
Masse linéique apparente dans l'eau (approchée)	kg·m ⁻¹	3,9
Rayon de courbure minimum	mm	600
Charge de rupture	kN	570
Charge de travail	kN	160

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

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

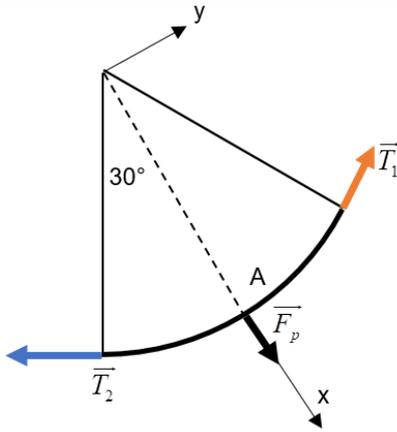


Figure 19 : modèle global

La pression d'alimentation du vérin et le réglage de la soupape de décharge permet 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 $F_p = 10\,000\text{ N}$

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.

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 ?

En appliquant le théorème de la résultante statique au

câble soumis à trois efforts on obtient :

$$\vec{y} \rightarrow T_1 = T_2$$

$$\vec{x} \rightarrow F_p = 2 \cdot T_1 \cdot \sin(30^\circ) = T_1$$

D'où $T_1 = T_2 = F_p = 10\text{ kN}$ bien inférieur à la charge de travail du câble de 160 kN .

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

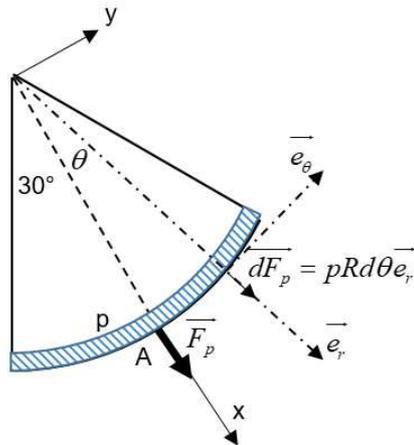


Figure 20 : modèle local

Question 31. Donner l'expression de $d\vec{F}_p$ dans la base (\vec{x}, \vec{y}) . On notera $d\vec{F}_p = dF_x \vec{x} + dF_y \vec{y}$, 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 ?

$$d\vec{F}_p = pRd\theta \vec{e}_\theta = pRd\theta (\cos\theta \vec{x} + \sin\theta \vec{y})$$

$$\vec{F}_p = \int_{-30^\circ}^{30^\circ} d\vec{F}_p = pR \left(\int_{-30^\circ}^{30^\circ} \cos\theta d\theta \vec{x} + \int_{-30^\circ}^{30^\circ} \sin\theta d\theta \vec{y} \right) = 2pR \sin(30^\circ) \vec{x} = pR \vec{x}$$

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

$p = \frac{F_p}{R}$ d'où $p = 5,46\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ inférieure à la pression limite de matage de $200\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ donc le câble peut résister.

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 \vec{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 \overline{F}_p à la portance du ROV ?

Le câble sortant à l'horizontal, \overline{F}_p participe pour $F_p \cos(30^\circ)$ à la portance soit 8 660 N.

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 une force de poussée vers le fond marin de 10 000 N.

La description de la chaîne de transmission est détaillée dans l'Annexe 8 – Transmission de puissance : plaquage du ROV par les « thrusters »

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

Les 4 thrusters de plaquage exercent un effort vertical de 2 500N chacun. Ainsi par lecture des courbes on en déduit un débit de 38 l·min⁻¹ et une pression d'alimentation de 143 bars.

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

Le débit de la pompe est de 4 fois le débit d'un thruster soit, débit pompe = 4·38 = 152 l·min⁻¹

La pompe peut fournir un débit de 350 l·min⁻¹ ce qui est largement suffisant.

Les pressions sont identiques dans chaque thruster et dans la pompe (équilibre des pressions en négligeant les pertes de charges). La pompe peut fournir 185 bars à 1750 tr·min⁻¹ ce qui est suffisant car la pression nécessaire est de 143 bars

2.3.4. Étude des protocoles communication

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

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).

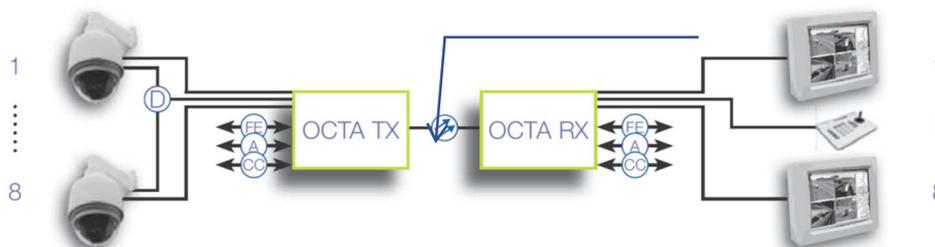


Figure 21 : architecture du système de communication

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

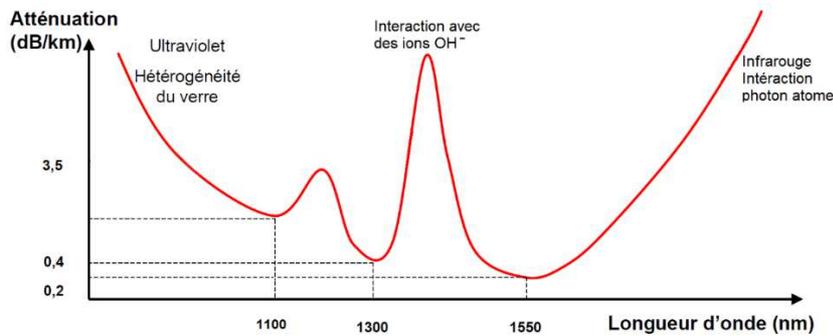


Figure 22 : atténuation du signal en décibel par km en fonction de la longueur d'onde de la lumière traversant la fibre

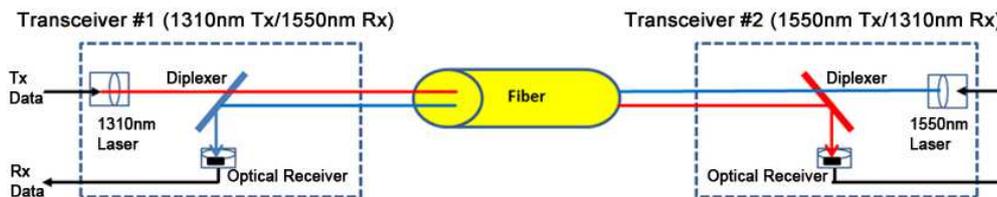


Figure 23 : architecture du système d'émission réception

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

Dans une liaison simplex la circulation des données est unidirectionnelle.

Dans une liaison Full Duplex la circulation des données est bidirectionnelle simultanément

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

Ces deux longueurs d'ondes présentent les plus faibles atténuations du signal donc un meilleur débit théorique.

On peut transmettre du Full duplex avec une seule fibre car les signaux Tx et Rx sont sur deux longueurs d'ondes différentes et ne se perturbent donc pas s'ils sont transmis en simultané. Les capteurs de réception fonctionnent chacun sur une longueur d'onde différente.

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 $\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$.

$\text{Débit} = 640 \cdot 400 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 25 \cdot 6 = 11,5 \cdot 10^8 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}$ soit $1,15 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$

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 ?

Le débit est suffisant d'un facteur 2,5.

3. Conclusion sur la problématique

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

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

L'ensouillage nécessite la mise en place d'un écosystème composé d'un navire câblé, d'un bateau porteur et d'un ROV.

Étapes :

- déposer le câble au fond de l'océan ;
- transférer le ROV du bateau à la surface de l'océan ;

- descendre le ROV en pleine eau ;
- rechercher le câble et positionner le ROV dans l'axe ;
- creuser la tranchée et plaquer le câble tout en assurant une flottabilité négative grâce aux thrusters.

Question 41. Quels sont les composants à dimensionner ayant un impact sur la sécurité des personnes ? Quelle norme marine régit ces dimensionnements ?

Les composants à dimensionner sont :

- La grue portique et la motorisation du tambour d'enroulement
- Le câble ombilical
- Le débit de transmission des données pour éviter toute coupure entre le ROV et l'opérateur lors du travail en profondeur
- La norme à respecter est « *Cranes and Submersibles Lifting Appliances* » qui majore les calculs en fonction de la hauteur de houle pour laquelle on souhaite certifier les éléments.

FIN DE L'ÉPREUVE