



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE

EDE MEC 2

SESSION 2019

**CAPET  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP CORRESPONDANT**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**ÉTUDE 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.*

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

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

Tournez la page S.V.P.

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

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

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

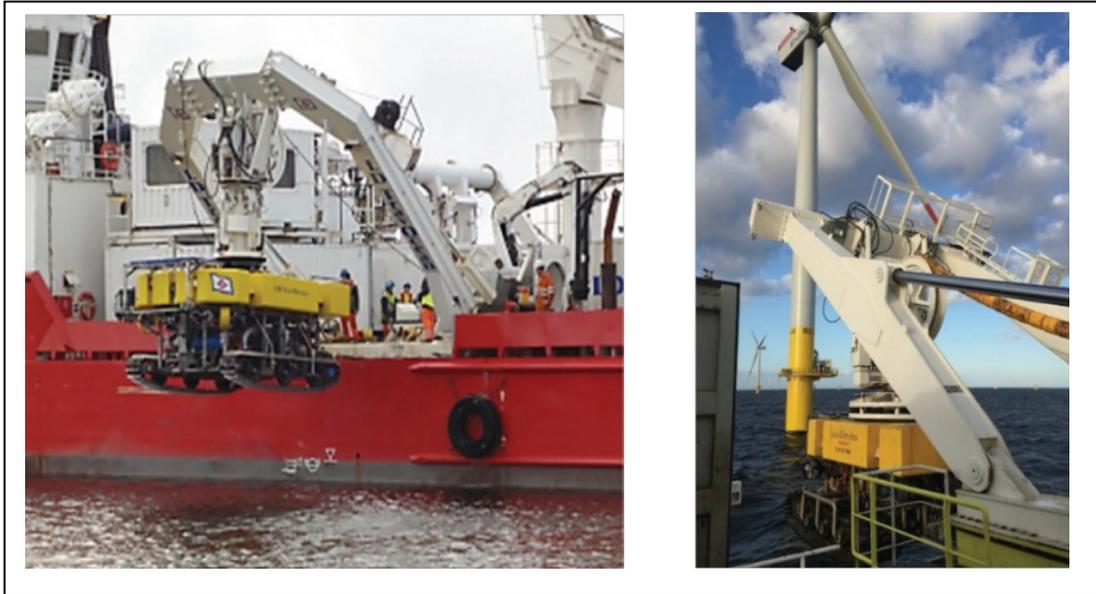
► **Concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1414E	102	7048

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

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1414E	102	7048

## Systeme ROV



### Constitution du dossier :

- texte (mise en situation et questionnement), pages 2 à 15 ;
- annexes, pages 16 à 24 ;
- documents réponses DR1 à DR2, pages 25 à 27.

### 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 DR2 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).

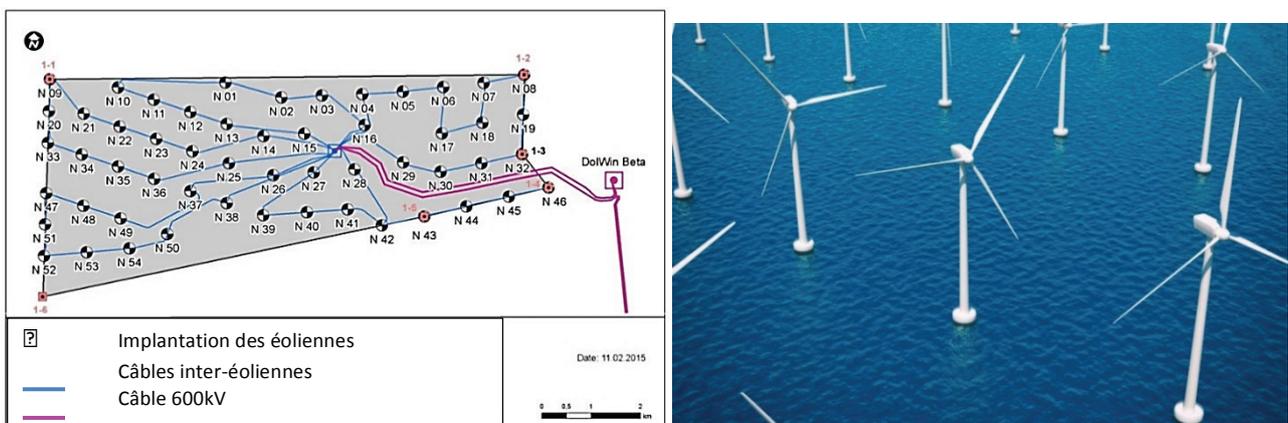


Figure 1 : implantation de la ferme éolienne North Sea One

## 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  $T^\circ$  mesurée et  $T^\circ$  modélisée. Justifier le choix de la modélisation retenue et identifier ses caractéristiques ( $T_0$ ,  $\Delta T$ ,  $\varphi$  et  $\omega$ ).

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  $\lambda$  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 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 <sup>-1</sup>	

*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*).

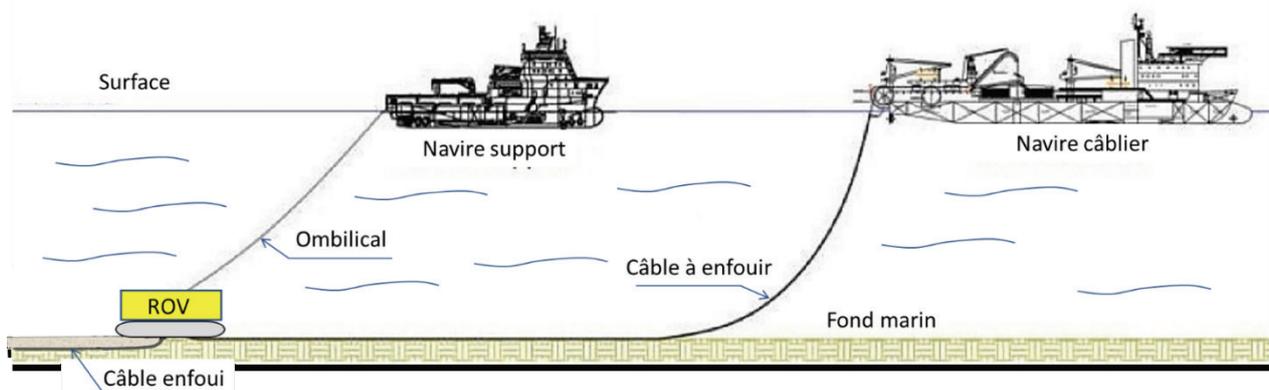
#### *Cas d'utilisation n°2 : descente en pleine eau*

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

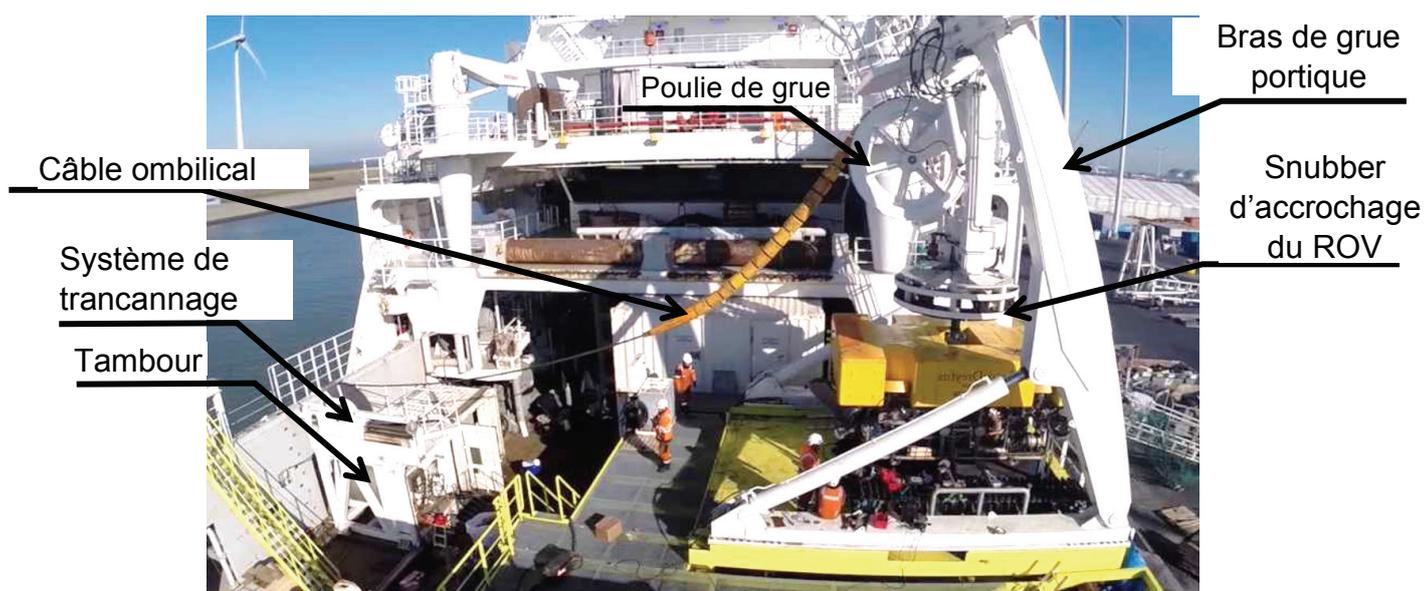


Figure 5 : photo de l'implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du navire

<sup>1</sup> Le trancannage est une opération de va et vient nécessaire au bon enroulement d'un câble sur une bobine.

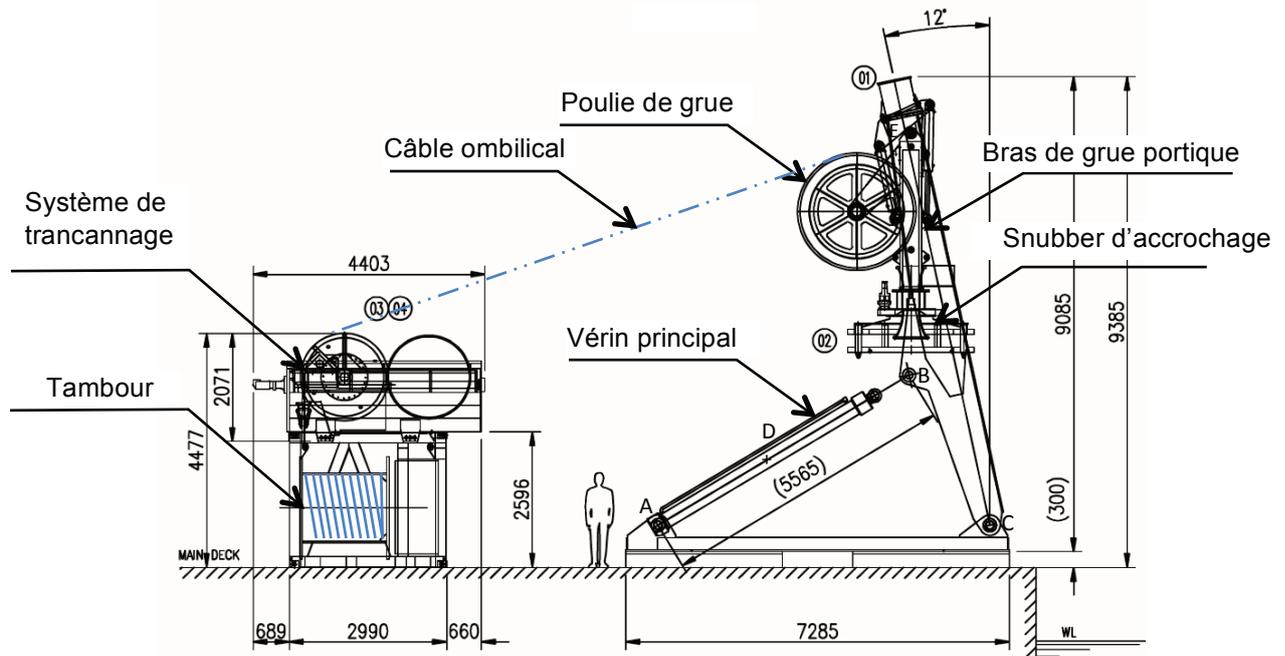


Figure 6 : implantation de la grue et du tambour d'enroulement sur le pont du navire

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  $-12^\circ$  et  $53^\circ$  par rapport à la verticale.

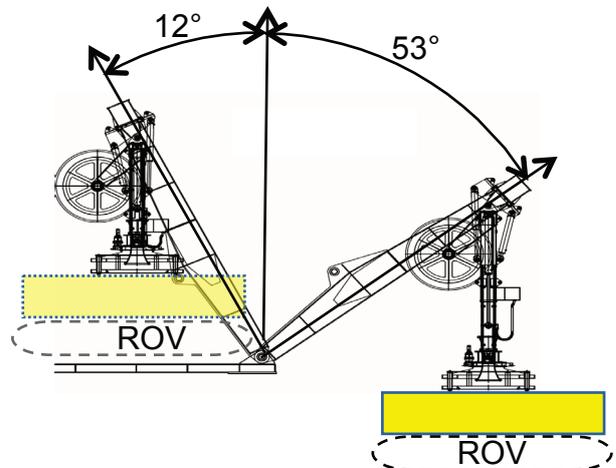


Figure 7 : positions extrêmes de la grue

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 l'expression littérale et la valeur numérique de la course 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 ( $-12^\circ$  et  $53^\circ$ ) 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  $\varnothing d = 180 \text{ mm}$  ;
- diamètre du piston  $\varnothing D = 250 \text{ mm}$  ;
- 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 bar.

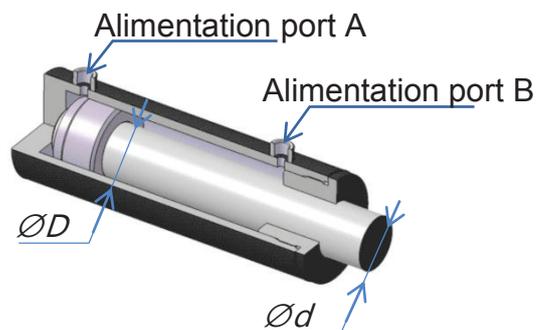


Figure 8 : vue en quart de coupe du vérin

**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.** Inscire 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  $53^\circ$  (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.

### 2.1.3. Étude du dimensionnement de la grue portique

La grue portique subit des efforts importants lors de la mise à l'eau. Une étude de résistance des matériaux s'avère nécessaire pour assurer le transfert du sous-marin en toute sécurité pour les biens et les personnes.

Deux études sont envisagées :

- un prédimensionnement du portique par la théorie des poutres pour choisir un profil géométrique des bras du portique ;
- une optimisation par éléments finis pour tenir compte des singularités de formes et des états de contraintes locaux.

**Première modélisation : modèle poutre (voir figure 10)**

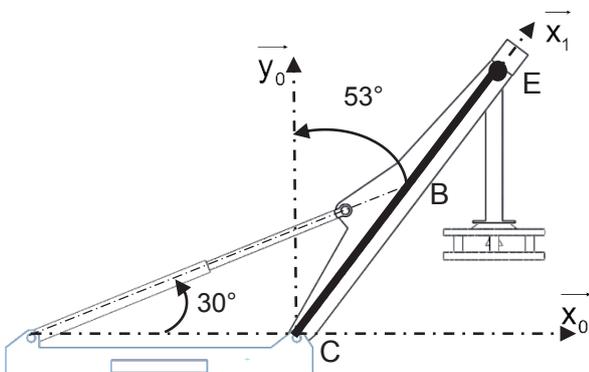


Figure 9 : grue portique

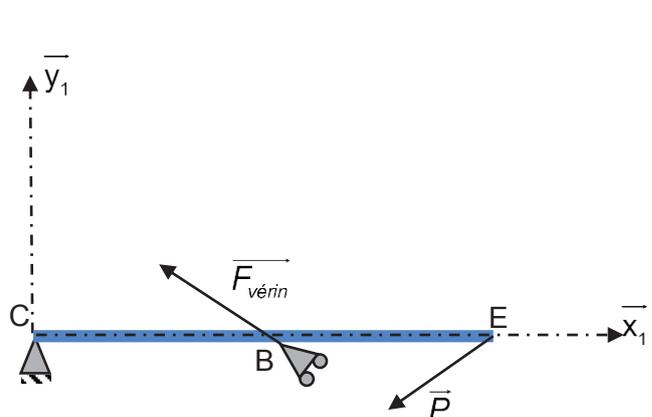


Figure 10 : modèle poutre du bras du portique

Hypothèses :

- le système est étudié dans le plan  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0)$  ;
- les efforts extérieurs sont modélisables par des glisseurs ;
- seuls les montants latéraux se déforment, la poutre de jonction est supposée indéformable ;
- les montants latéraux sont de section rectangulaire creuse évolutive ;
- la longueur du vérin ne varie pas sous l'effet de la charge.

Valeurs numériques :

- $\vec{F}_{\text{vérin}} = -37\,000 \cdot \vec{x}_1 + 19\,700 \cdot \vec{y}_1$  (en daN) ;
- $\vec{P} = -9\,900 \cdot \vec{x}_1 - 8\,300 \cdot \vec{y}_1$  (en daN) ;
- CE=7 435 mm et CB=3 132 mm.

**Question 17.** Après avoir justifié la modélisation proposée, déterminer l'état de sollicitations dans les différents tronçons de la poutre. Tracer le diagramme du moment de flexion.

**Question 18.** Expliquer la démarche de calcul pour concevoir une poutre à iso-contrainte. Rappeler pour cela l'expression de la contrainte normale dans la poutre pour la sollicitation de flexion.

**Question 19.** Conclure sur la forme choisie par le constructeur (*voir figures 5 et 9*).

### Deuxième modélisation : modèle par éléments finis

Le résultat de la simulation dans la position la plus défavorable est donnée en *Annexe 9 – Modèle par élément finis du bras portique*. Le critère de Von Mises a été choisi pour l'analyse des contraintes.

**Question 20.** Proposer les conditions aux limites à imposer au logiciel de simulation par éléments finis.

**Question 21.** Après analyse du résultat de la simulation par éléments finis, proposer une modification possible du bras.

## 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 11 : enroulement du câble sur le tambour

**Question 22.** Quelle est la longueur d'enroulement maximale du câble ombilical sur le tambour d'enroulement ? Le système respecte-t-il le cahier des charges ?

L'inversion du sens de déplacement du chariot impose des accélérations importantes de l'axe moteur du système de trancannage.

Le constructeur souhaite optimiser le choix du moteur. Une étude dynamique permet de choisir le pas optimal de la vis de trancannage qui minimise le couple moteur.

Le modèle est défini en *Annexe 7 – Système de trancannage*. Une représentation partielle plane du système de transformation de mouvement est donnée *figure 12*.

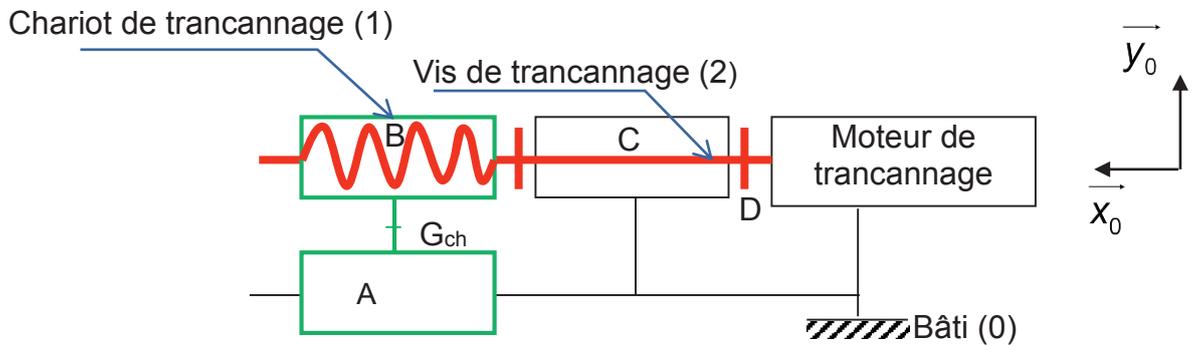


Figure 12 : schéma cinématique minimal du système de trancannage

Hypothèses :

- les liaisons sont considérées comme parfaites ;
- le centre de gravité de la vis est sur l'axe de rotation (BC) ;
- le poids de la vis est négligé ;
- le couple moteur  $C_m$  appliqué en D est supposé constant dans la phase de démarrage.

Notations :

- $(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$  base associée à la pièce  $i$  ;
- $\theta_{20}$  angle de rotation de la vis (2) par rapport au bâti (0) ;
- $x$  position du chariot (1) suivant  $\vec{x}_0$  .

Données :

- le chariot a pour centre de gravité  $G_{ch}$  et pour masse  $m_{ch} = 40$  kg ;
- la vis est de pas  $p$  (à déterminer) ;
- le moment d'inertie de l'ensemble {vis + arbre moteur} autour de son axe est  $I_{vis} = 3 \cdot 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$  ;
- la loi d'évolution du chariot est en loi de vitesse en triangle (voir figure 13).

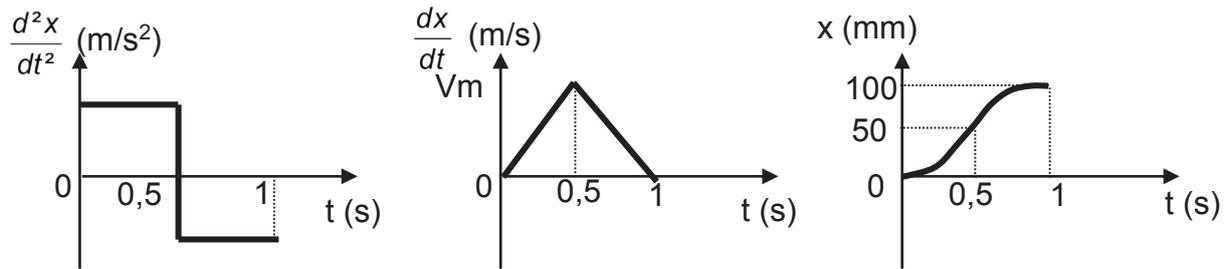


Figure 13 : loi d'évolution du chariot

**Question 23.** Déterminer l'expression du couple moteur  $C_m$ . En déduire l'expression du pas de la vis  $p$  permettant d'avoir un couple moteur minimal pour une accélération donnée.

**Question 24.** Calculer le couple moteur et comparer cette valeur au couple moteur nominal du constructeur de 10 N·m.

### 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 ni d'eau ni 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  $\overrightarrow{OC} = X \overrightarrow{x_{ROV}} + Y \overrightarrow{y_{ROV}} + Z \overrightarrow{z_{ROV}}$  ;
- $i$ , indice des solides ;
- $G_i$ , centre de masse du solide  $S_i$  avec  $\overrightarrow{OG_i} = X_i \overrightarrow{x_{ROV}} + Y_i \overrightarrow{y_{ROV}} + Z_i \overrightarrow{z_{ROV}}$  ;
- $d_{\text{eau salée}}$ , 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  $i$ .

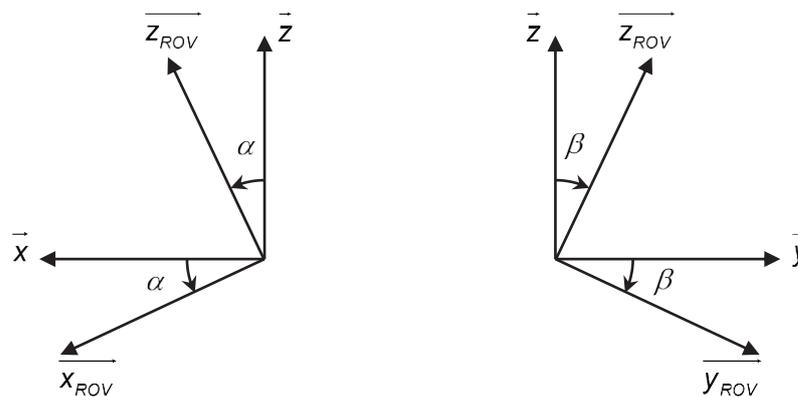
**Question 25.** Donner l'expression du vecteur position  $\overrightarrow{OC}$  en fonction de  $\overrightarrow{OG_i}$  et de  $m_i(\text{eau salée})$

**Question 26.** Donner l'expression de  $m_i(\text{eau salée})$  en fonction de  $d_{\text{eau salée}}$ ,  $d_i$  et  $m_i$ .

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  $G$  :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OC} &= 57,66\overrightarrow{x_{ROV}} - 451,14\overrightarrow{z_{ROV}} \\ \overrightarrow{OG} &= 99,7\overrightarrow{x_{ROV}} + 57,63\overrightarrow{y_{ROV}} + 680,15\overrightarrow{z_{ROV}} \end{aligned} \quad \text{toutes les dimensions sont en mm.}$$

L'angle d'assiette  $\alpha$  et l'angle de gîte  $\beta$  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  $3^\circ$  pour des raisons de sécurité au moment de la sortie de l'eau du ROV.

**Question 27.** 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 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.

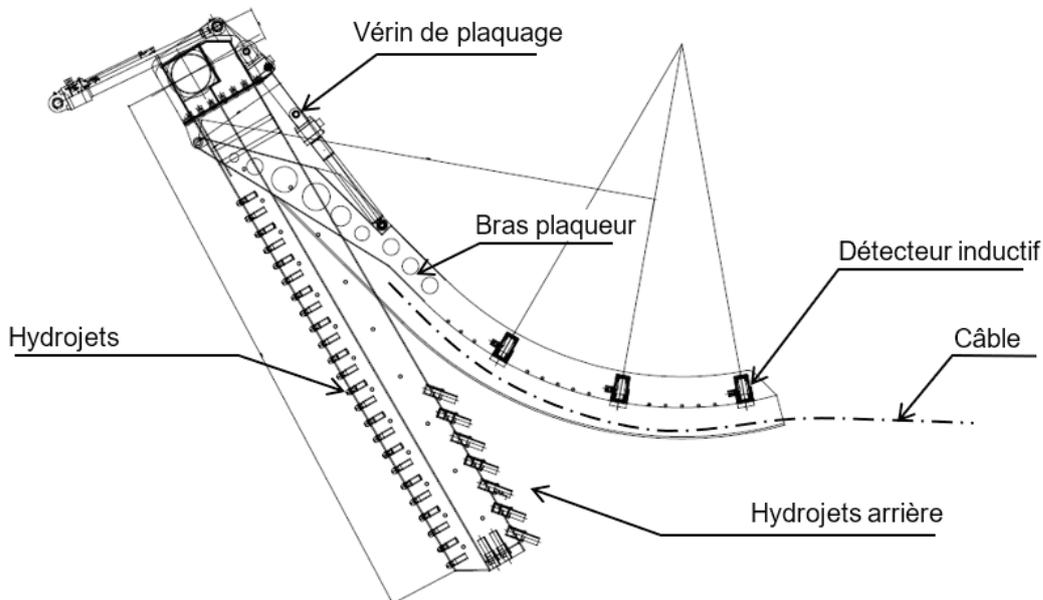


Figure 14 : système presseur et hydrojets

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

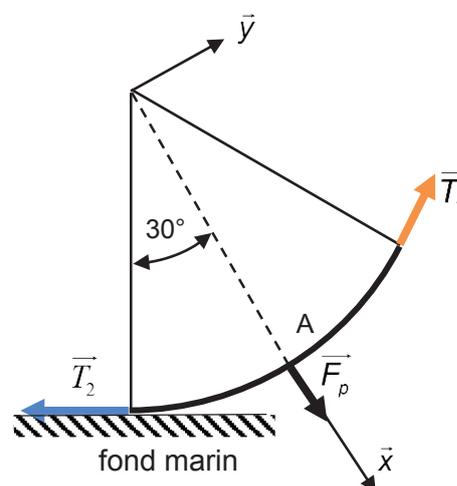
Le matériau de la gaine extérieure du câble est en polyester thermoplastique dont la pression linéique admissible est de  $p_{lim} = 200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ .

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  $60^\circ$  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.

Figure 15 : modèle global



**Question 28.** 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.

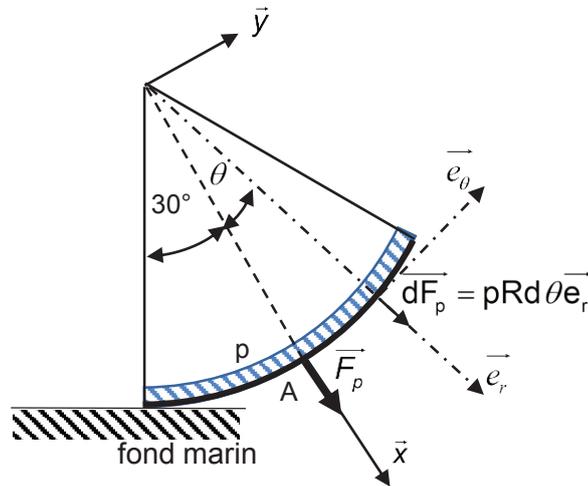


Figure 16 : modèle local

**Question 29.** 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 30.** 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  $\vec{F}_p$  (avec  $F_p = 10\,000$  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 31.** Quelle est la valeur de la participation de  $\vec{F}_p$  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 32.** 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 33.** 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 ?

### **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.*

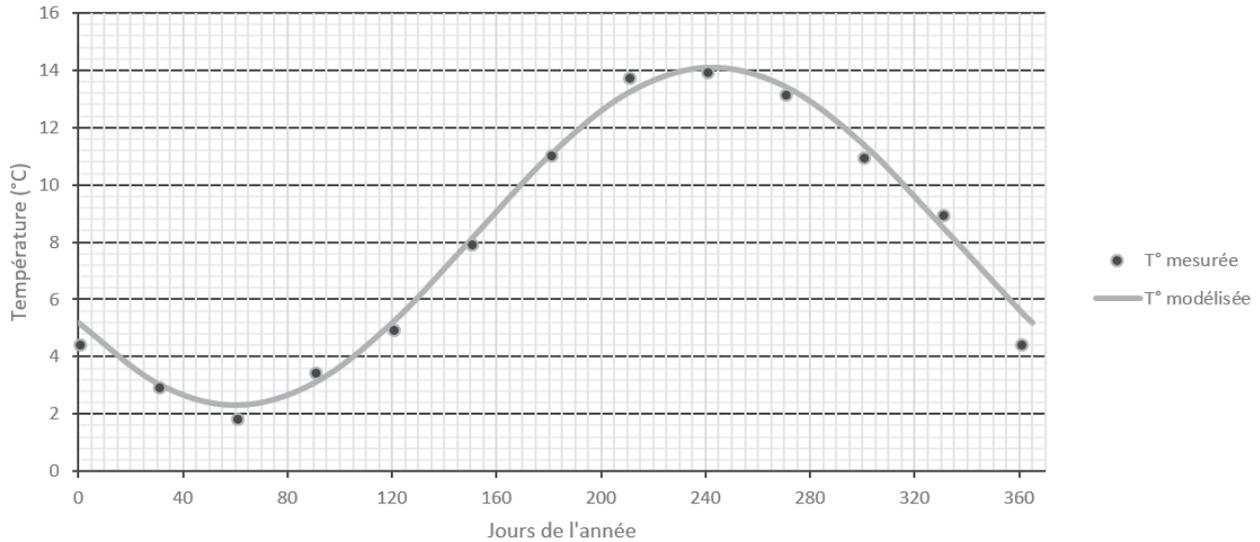
---

**Question 34.** Réaliser une synthèse décrivant les étapes d'ensouillage du câble et justifier l'intérêt de cette technique du point de vue environnemental.

# 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  $\Delta T$  et le déphasage  $\varphi$  sous la forme suivante :  $T(^{\circ}\text{C}) = T_0 + \Delta T \sin(\omega \cdot t + \varphi)$  avec  $t$  le jour de l'année,  $\omega$  en  $\text{rad} \cdot \text{jour}^{-1}$  la pulsation du signal et  $\varphi$  en radian.

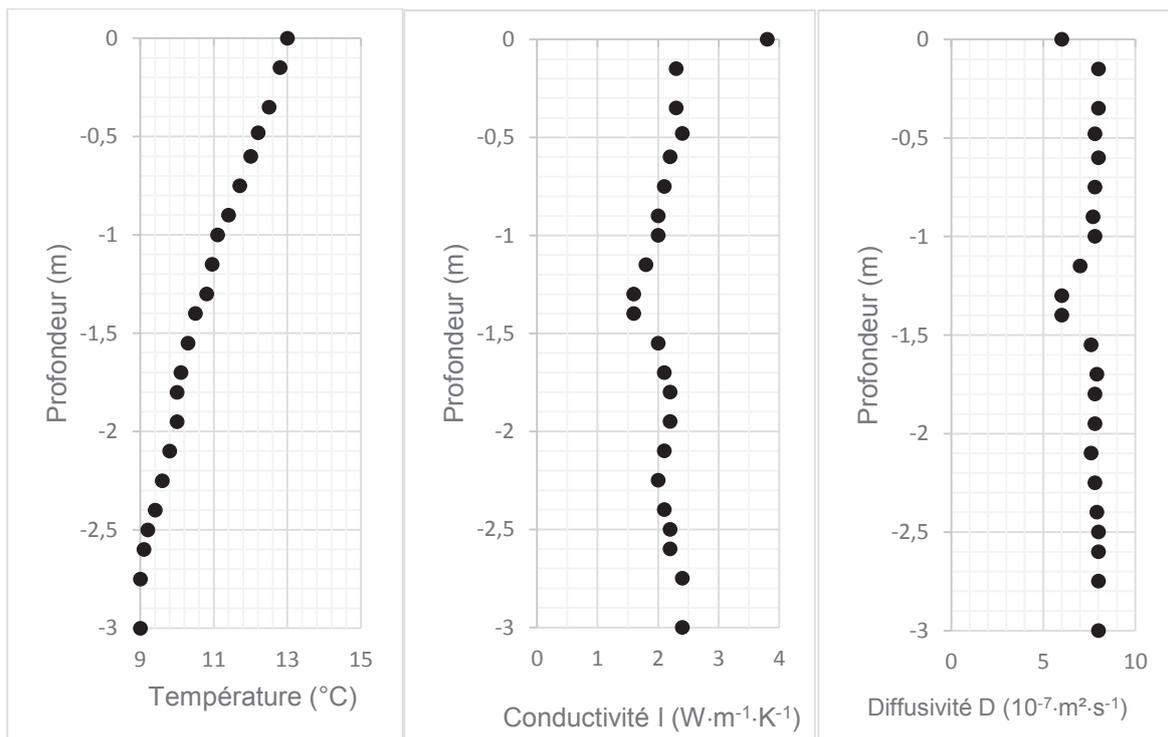


Le jour 0 correspond au premier jour de l'année soit le 1<sup>er</sup> janvier.

### 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.

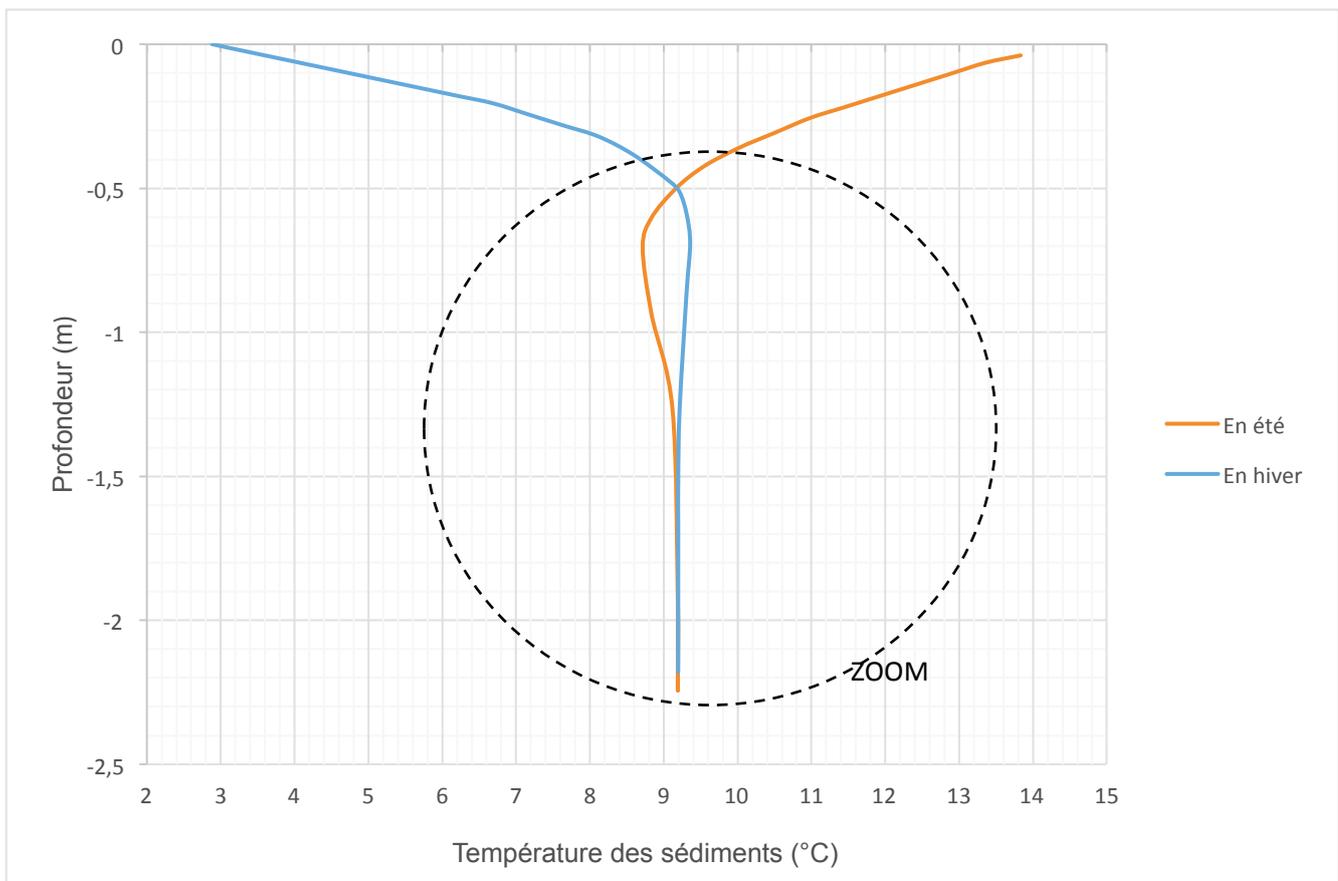
Les mesures expérimentales des propriétés thermiques suivantes ont été obtenues lors d'essais en haute mer.



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

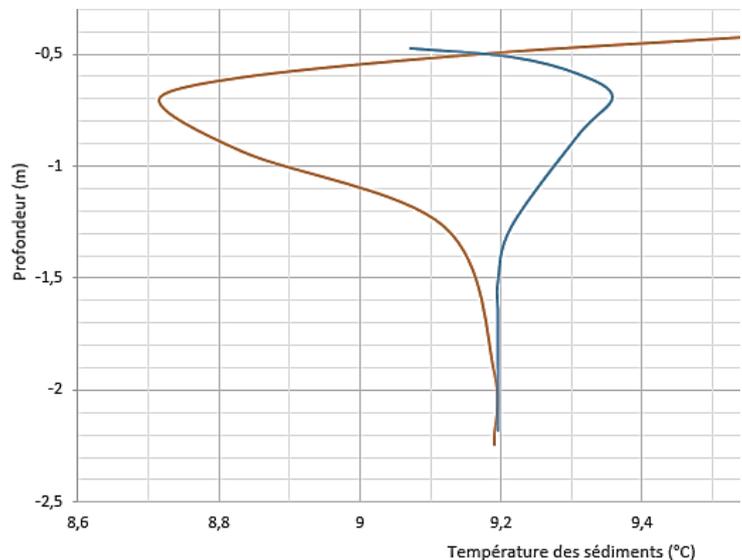
Dans les régions peu profondes telles que la mer Baltique et la mer du Nord, la température des sédiments varie naturellement selon la saison. Alors que la température des sédiments hivernaux augmente avec la profondeur, reflet de l'augmentation de la température de l'eau au cours de l'été précédent,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

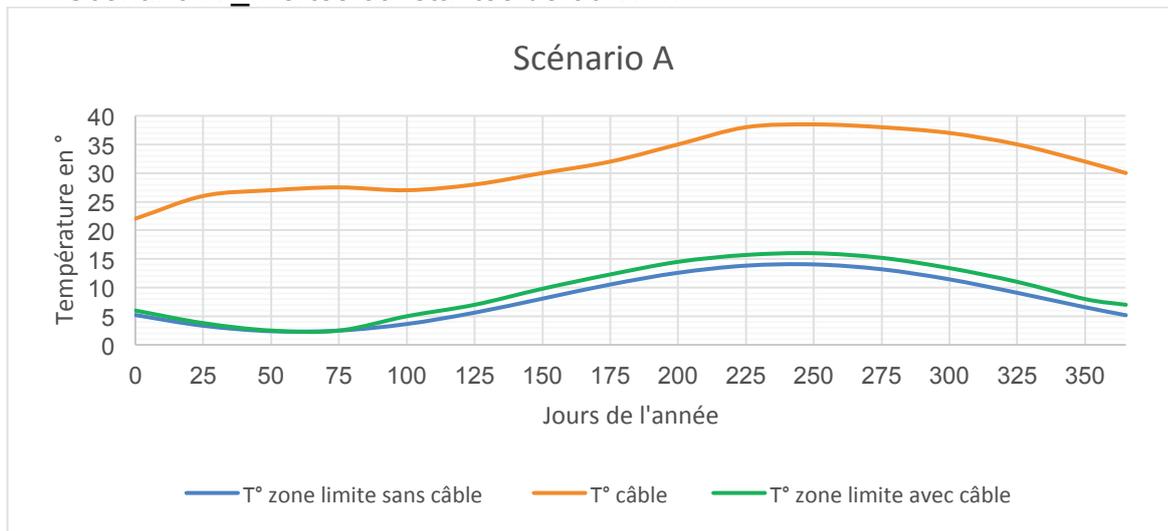
L'effet du chauffage par câble sur le milieu environnant dépend de la configuration du câble d'alimentation, essentiellement la résistivité déterminée par le matériau et le diamètre du conducteur et la profondeur de sépulture réelle. En incorporant les propriétés du câble dans les modèles, il est possible 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 :

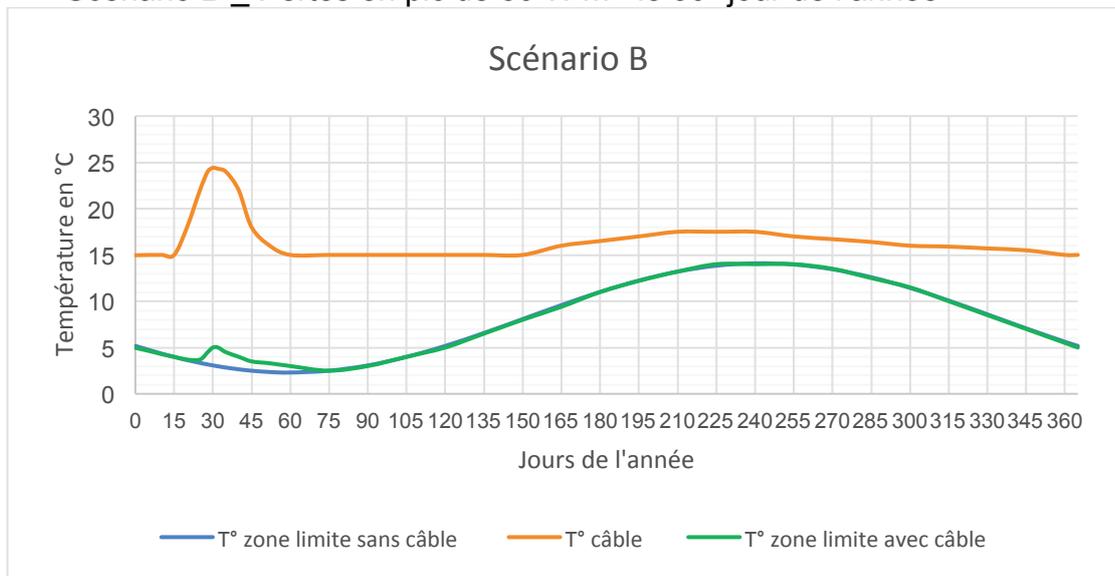
- T zone limite sans câble, température de l'eau au niveau de la limite de la zone affectée sans la présence du câble ;
- T zone limite avec câble, température de l'eau au niveau de la limite de la zone affectée avec la présence du câble ;
- T câble, température des sédiments au niveau du câble.

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

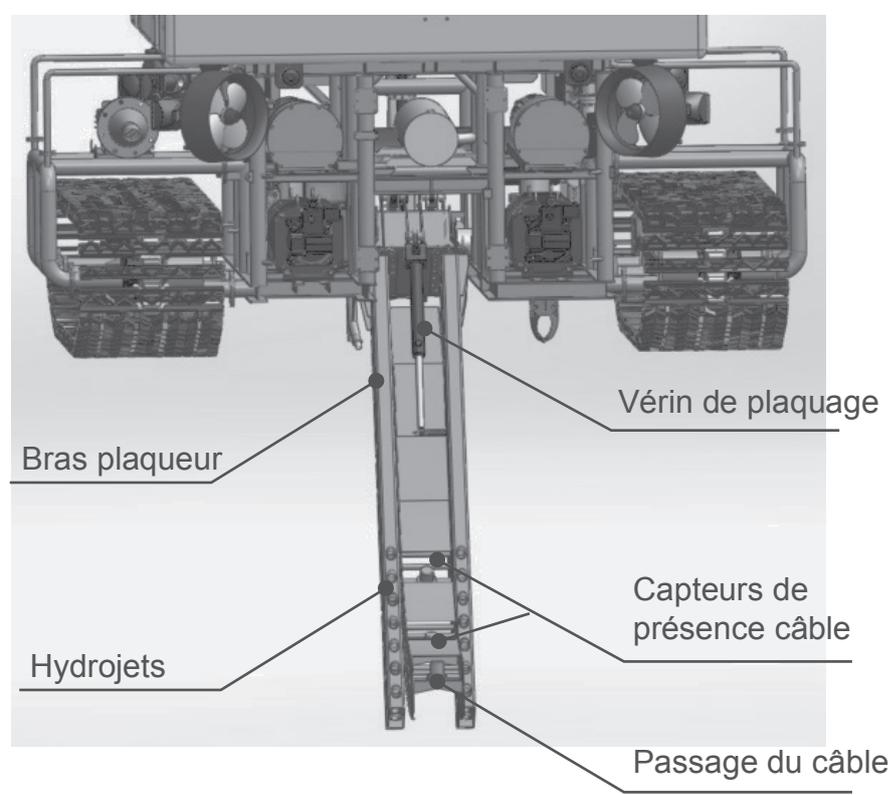
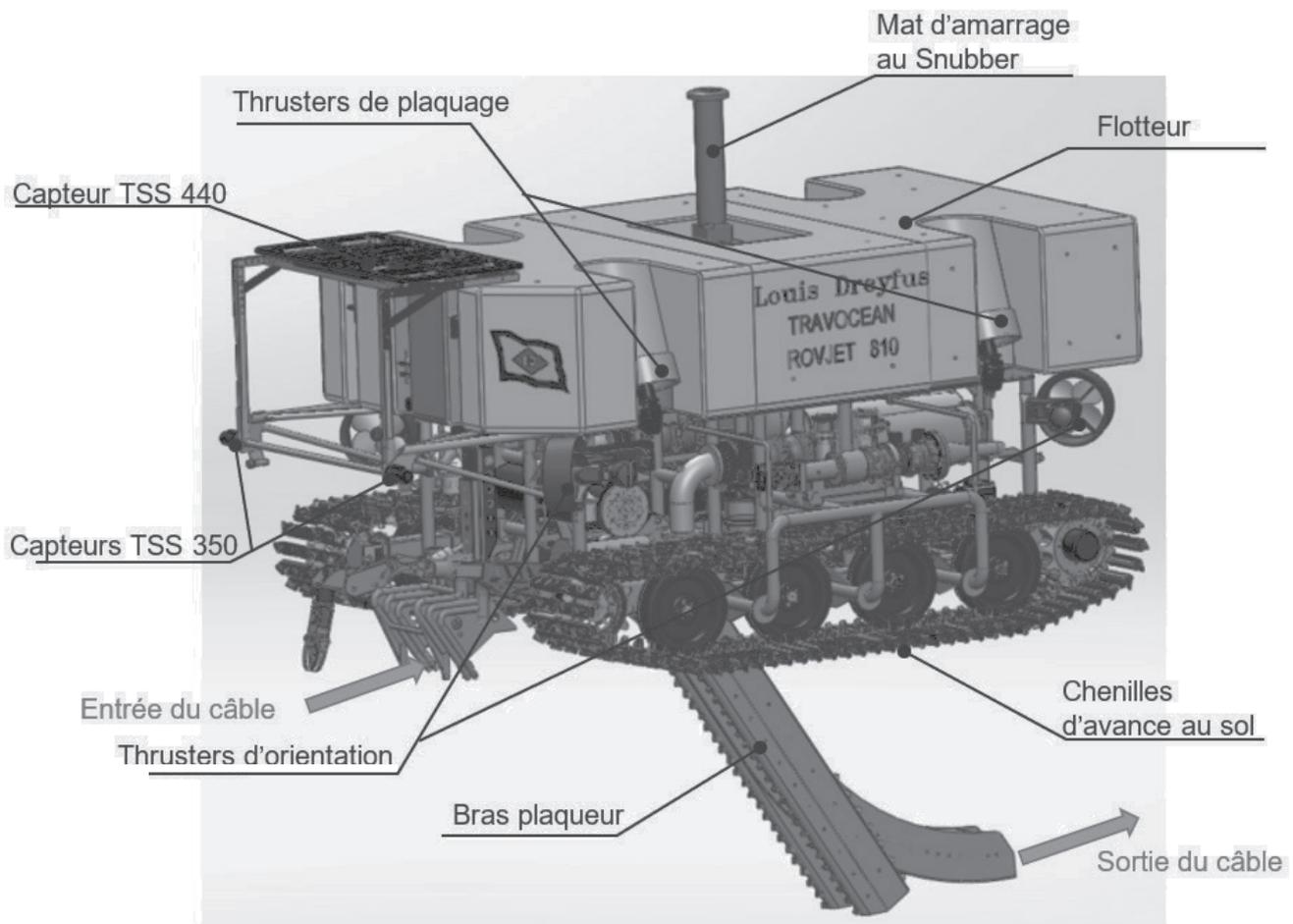
### Scénario A \_ Pertes constantes de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$



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



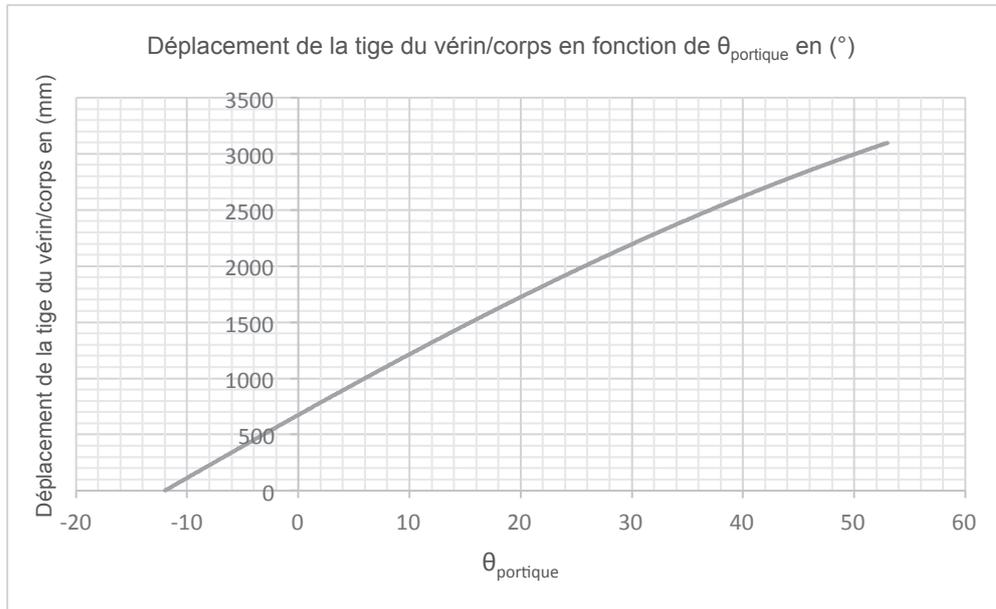
**Annexe 5 – Descriptif du ROV**



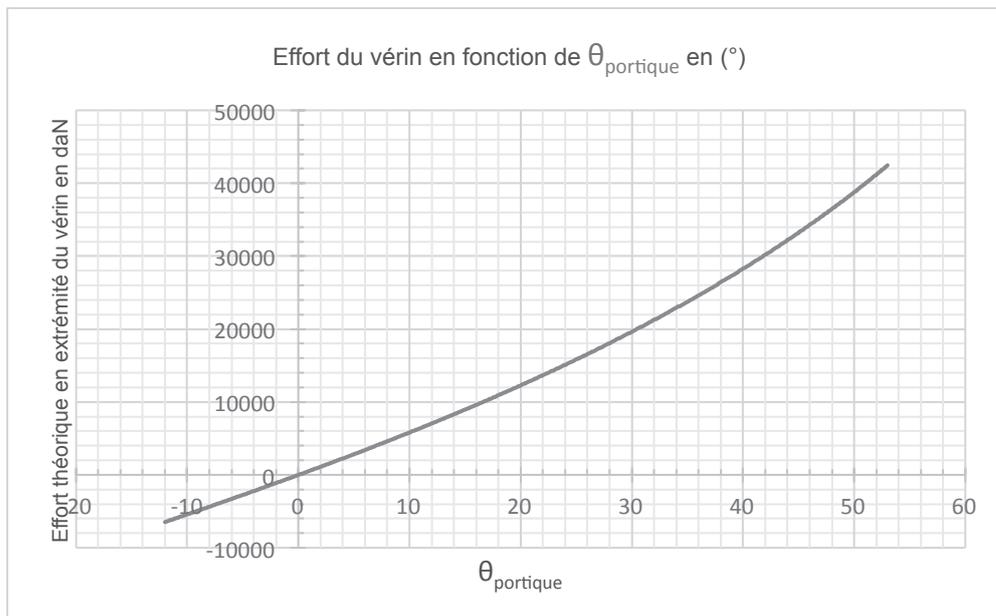
### Annexe 6 – Simulation du comportement de la grue portique

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

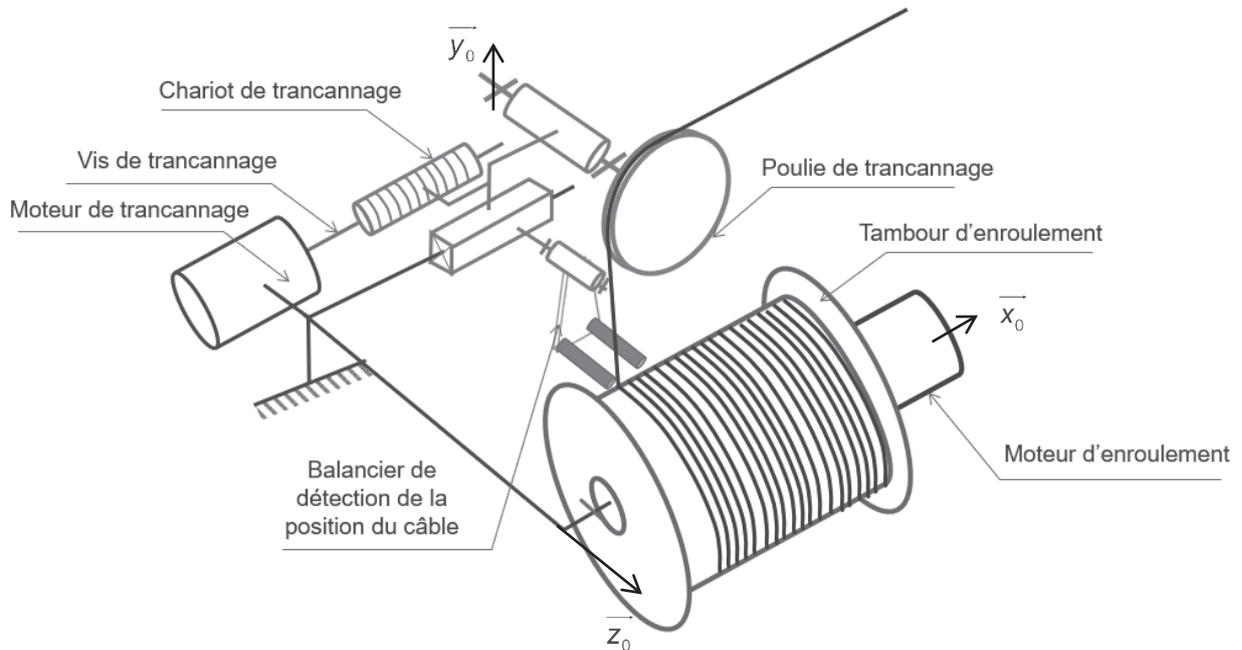
### Cordon ombilical

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	$R_{\text{mini}}$	650 mm
Rayon maximal d'enroulement	$R_{\text{maxi}}$	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.

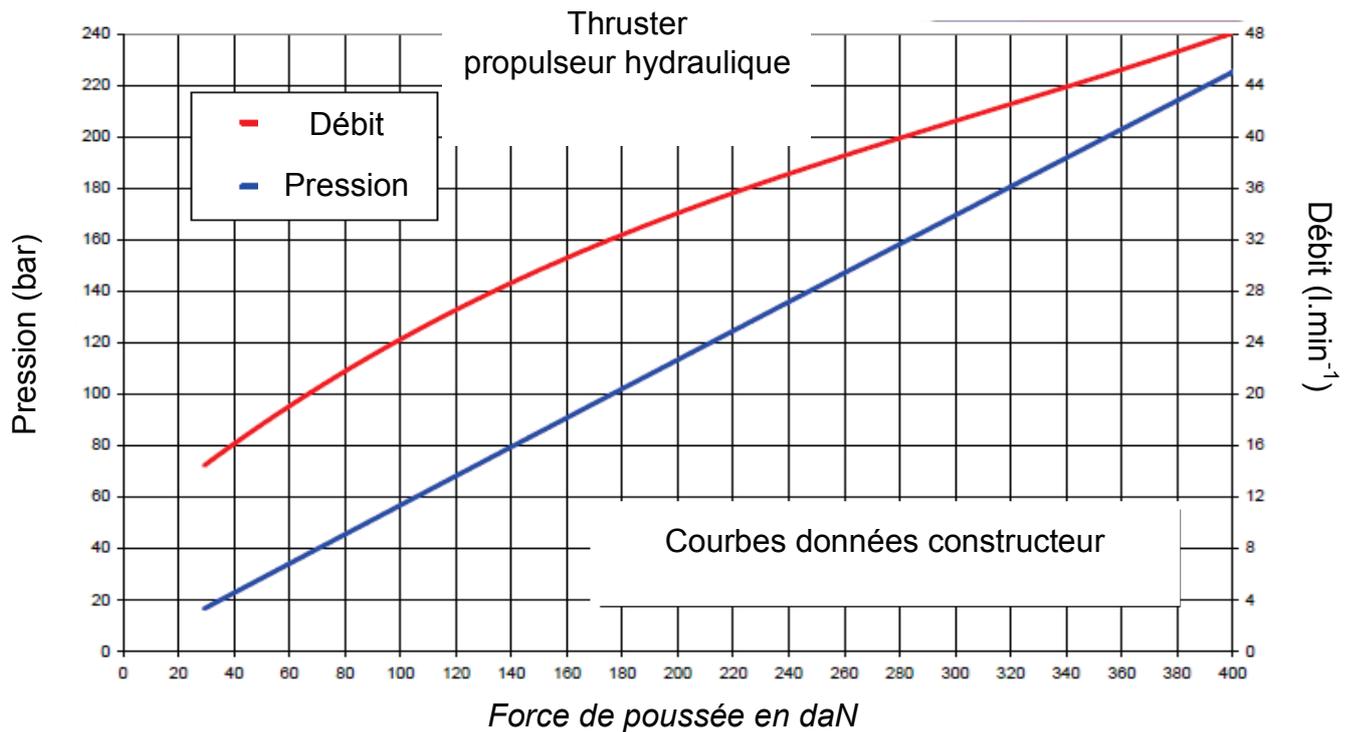
## Annexe 8 – Transmission de puissance : plaquage du ROV par les thrusters

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 :

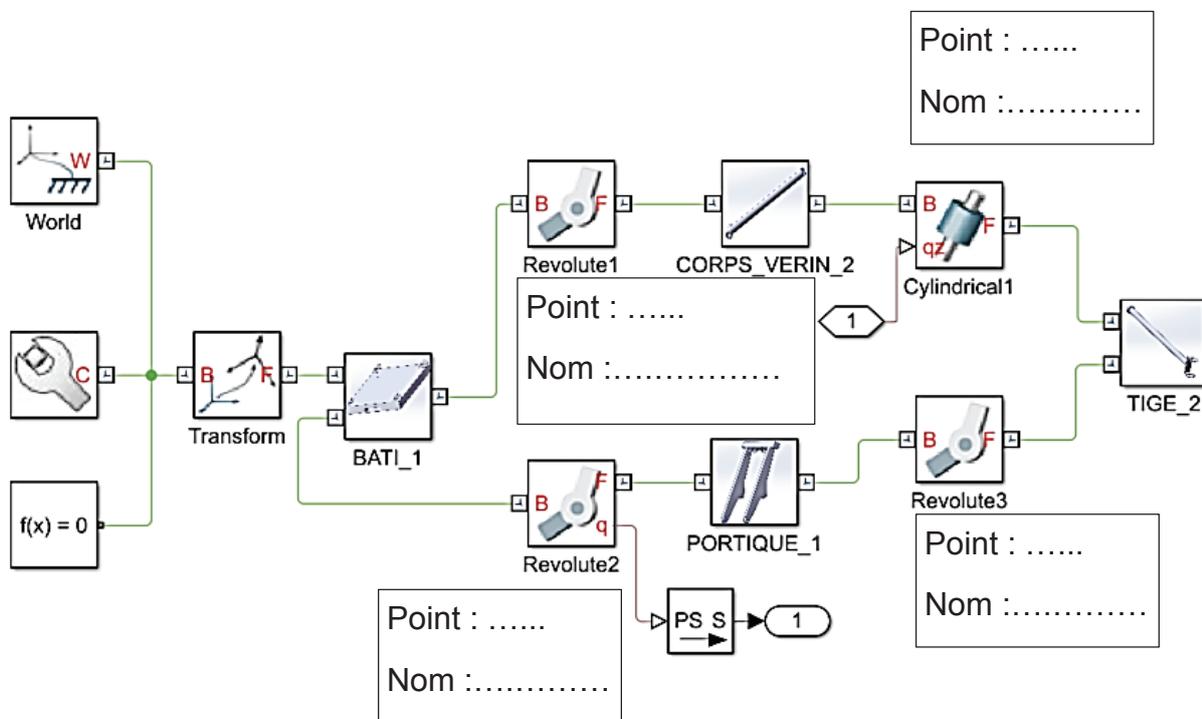
Cylindrée	$Cy$	$200 \text{ cm}^3 \cdot \text{tr}^{-1}$
Débit maxi	$q_{\max}$	$350\text{-}400 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
Vitesse angulaire à vide	$N_{\text{vide}}$	$1\ 900\text{-}2\ 200 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$
Vitesse angulaire minimale de fonctionnement	$N_{\min}$	$600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$
Couple	$C$	$1\ 400\text{-}1\ 379 \text{ N} \cdot \text{m}$
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	$\eta_V = \frac{q_{\text{réel}}}{q_{\text{théorique}}}$	$0,9$



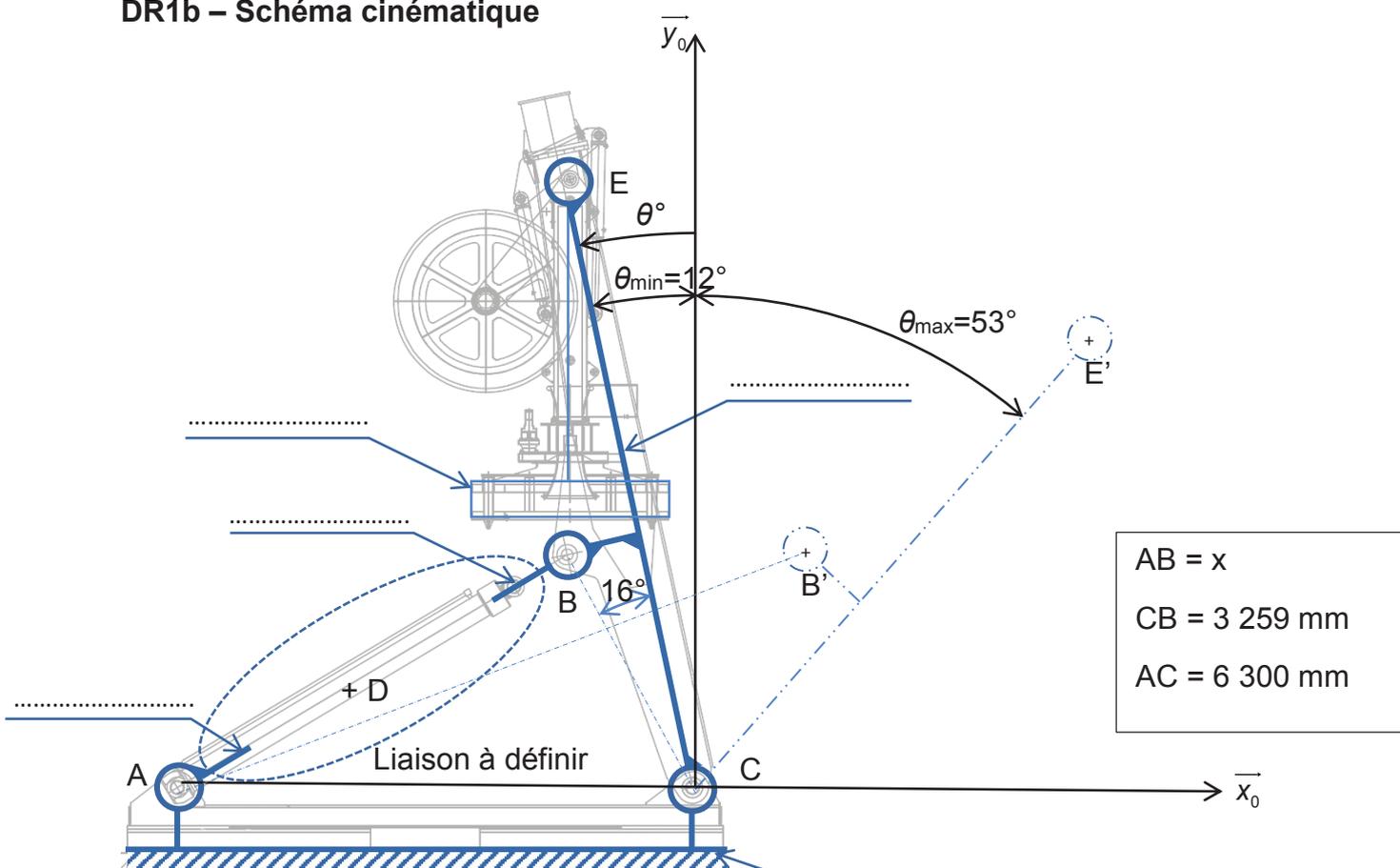


NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

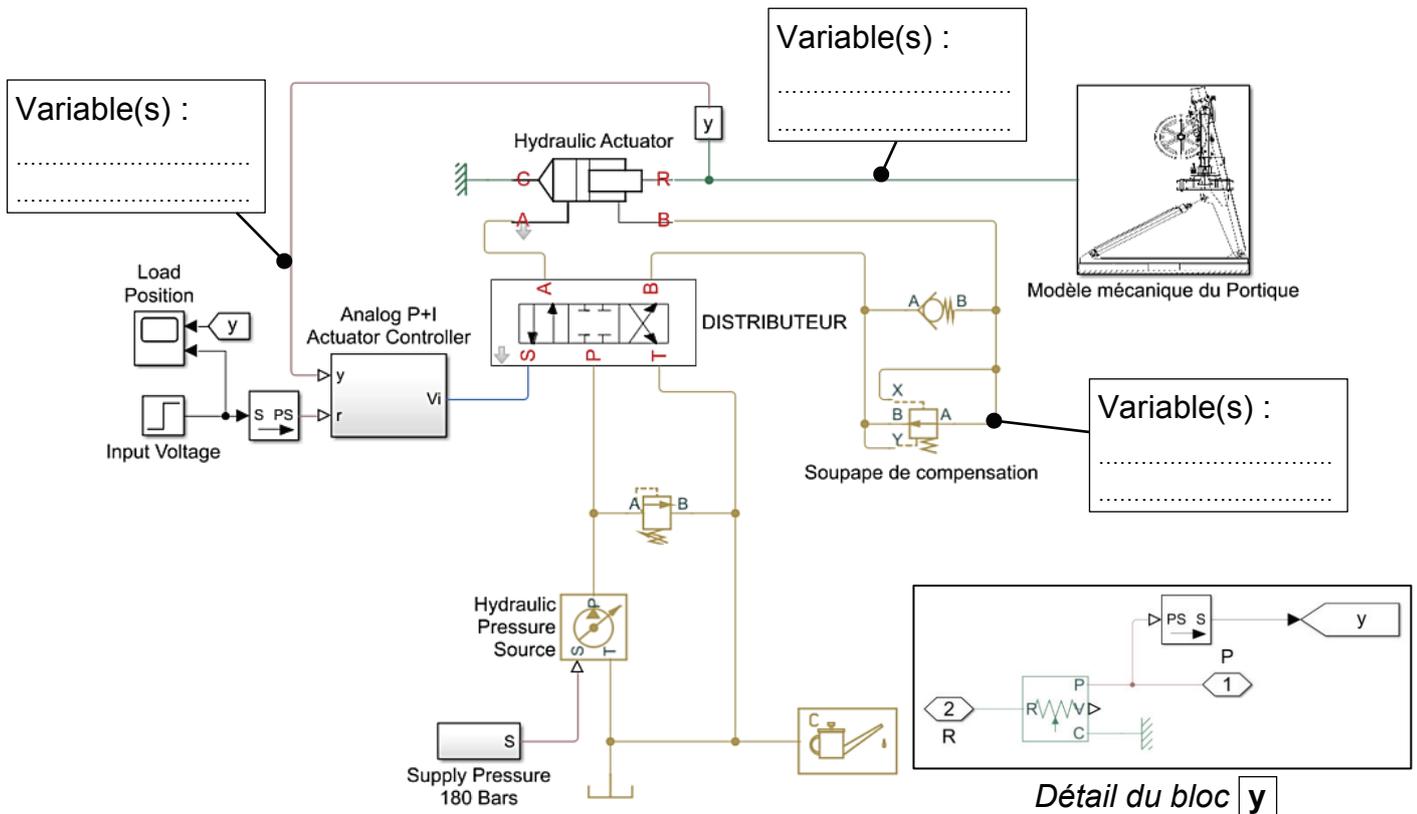
DR1a – Modèle mécanique du portique



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*