

Projet UE 2.2

Treuillage sonar remorqué

Élèves Thomas FERRER
Ewen PINSARD
Elouan STASSEN
Lancelot RAMIS

Encadrants :

Jean-François GUILLEMETTE
Irvin PROBST

ENSTA Bretagne
Institut Polytechnique de Paris

13 juin 2025

Table des matières

1	Introduction	2
2	Analyse du cahier des charges	3
2.1	Objectifs fonctionnels	3
2.2	Contraintes techniques	3
3	Interprétation des données du sonar	4
3.1	Compréhension des images sonar	4
3.2	Artefacts dans les images	5
3.3	Évaluation de la hauteur d'un objet immergé	5
3.4	Géoréférencement des données sonar	6
3.5	Problèmes lors des mesures	6
4	Etude théorique	8
4.1	Modélisation du système	8
4.1.1	Démarche	8
4.1.2	Données, paramètres et hypothèses de travail	8
4.1.3	Modélisation des efforts hydrodynamiques	9
4.2	Estimation de la position du sonar	12
4.3	Simulation et validation	13
4.3.1	Résultats et Validation du modèle	13
4.3.2	Analyse critique	13
5	Conception d'un support de treuil de mise à la mer	14
5.1	Contexte	14
5.1.1	Contexte	14
5.1.2	Expression succincte du besoin	14
5.2	Choix techniques et conception	14
5.2.1	Architecture retenue	15
5.2.2	Choix des composants	15
5.2.3	Calculs associés	15
5.2.4	Maquette numérique	15
6	Conclusion et perspectives	16
.1	Annexe 1 : Données techniques	16
.2	Annexe 2 : Codes ou algorithmes utilisés	16

Chapitre 1

Introduction

Les sonars latéraux sont largement utilisés pour détecter la présence d'objets posés sur les fonds marins. Ils sont montés sur des « poissons » remorqués, immergés à faible distance du fond afin de bénéficier d'une bonne rasance. Ce mode de détection permet de repérer les objets par leur « ombre acoustique », formée par la réflexion des ondes sonores sur ces derniers.

Cependant, plusieurs défis techniques doivent être relevés pour une mise en œuvre efficace. L'un des principaux est le positionnement du sonar : les données recueillies sont géo-référencées à partir de la position GPS du navire, alors que le sonar est décalé horizontalement vers l'arrière. Il est donc nécessaire d'estimer cette distance, appelée « layback », pour corriger le positionnement. Cela peut être réalisé soit expérimentalement, soit par modélisation de la déformée du câble de remorquage.

Par ailleurs, la mise à l'eau du sonar repose actuellement sur un touret manuel, peu pratique à utiliser. L'objectif du projet est donc double : modéliser la déformée du câble pour estimer le layback, et concevoir un support pour un treuil motorisé, permettant de faciliter et d'automatiser la mise à la mer du sonar.

Chapitre 2

Analyse du cahier des charges

2.1 Objectifs fonctionnels

Les objectifs principaux du projet sont les suivants :

- Permettre la mise à l'eau et la récupération du sonar grâce à un treuil motorisé ;
- Estimer la déformée du câble afin de corriger le positionnement géographique des mesures du sonar (calcul du layback) ;
- Étudier les efforts mécaniques subis par le câble et le point d'ancrage ;
- Concevoir une structure de support pour le treuil adaptée à l'environnement du navire « Mélité » ;
- Proposer une solution éventuellement évolutive vers un système automatique de régulation de profondeur du sonar.

2.2 Contraintes techniques

Le cahier des charges impose plusieurs contraintes à respecter :

- Le treuil doit permettre l'enroulement homogène de 50 m de câble électroporteur ;
- Il doit supporter une tension en pointe d'au moins 1500 N, voire 2000 N en cas d'accrochage du sonar ;
- La structure de support devra être compatible avec les platines latérales présentes sur la plage arrière de la « Mélité » ;
- Le support devra être suffisamment robuste et ne pas interférer avec les autres équipements du navire ;
- Le projet doit être mené en mode collaboratif, avec une démarche rigoureuse de conception (analyse fonctionnelle, modélisation, maquette numérique, choix des matériaux).

Une tâche complémentaire optionnelle consiste à concevoir un système de tract-cannage pour assurer un enroulement optimal du câble.

Chapitre 3

Interprétation des données du sonar

3.1 Compréhension des images sonar

Le principe de fonctionnement d'un sonar latéral repose sur la mesure du temps de propagation d'une onde acoustique entre son émission et sa réception après réflexion sur un obstacle. Dans une image fournie par un sonar (fig. 3.1), l'axe horizontal des images produites peut donc être interprété à la fois comme un axe temporel et, par conversion via la vitesse du son dans l'eau, comme un axe spatial.

La luminance (ou intensité) des pixels dans les images obtenues est proportionnelle à l'amplitude de l'onde acoustique réfléchie. Une luminance élevée traduit une forte réflexion, généralement causée par un objet dur ou dense, tandis qu'une zone sombre peut indiquer l'absence de réflexion significative.

Une caractéristique récurrente est la bande noire centrale, qui correspond au temps pendant lequel l'onde se propage sans rencontrer d'obstacle, typiquement la colonne d'eau sous le sonar. Cette bande permet d'estimer la hauteur d'eau sous l'appareil : sa demi-largeur multipliée par la célérité du son dans l'eau donne une estimation de la profondeur.

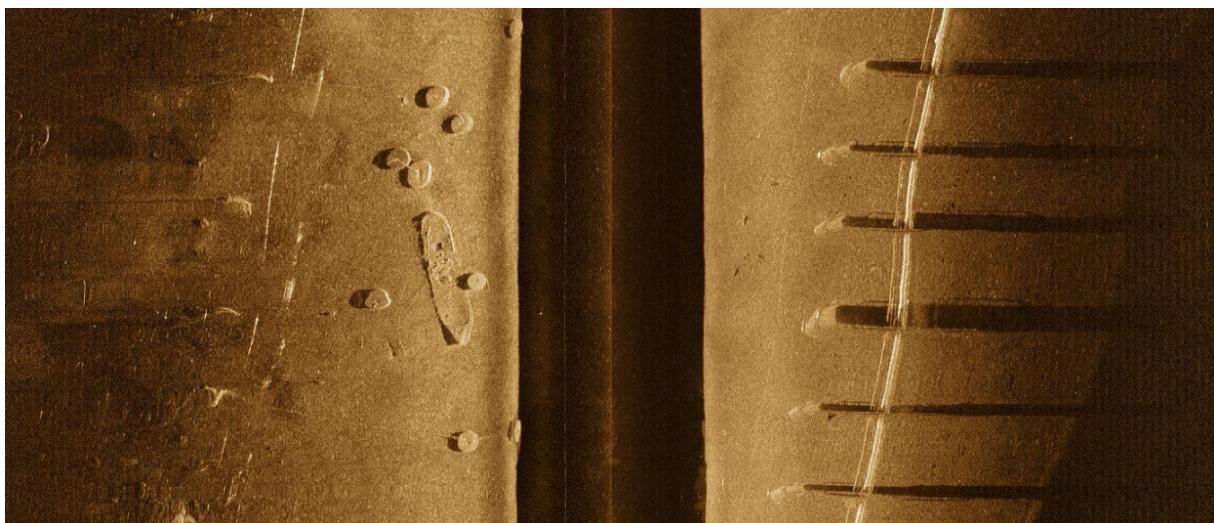


FIGURE 3.1 – Exemple de bande noire centrale sur une image sonar

La diminution soudaine de la largeur de cette bande indique un rapprochement du sonar avec le fond, signalant un risque potentiel de collision.

D'autre part, certaines structures observées dans les images présentent des ombres acoustiques atteignant les bords du relevé. Cela implique que ces objets s'étendent potentiellement jusqu'à la surface. Leur régularité spatiale suggère la présence de piliers ou de structures immergées (type digue ou ponton).

Une bande lumineuse continue est visible même dans les zones d'ombre : cela implique que la structure qui en est la source n'est pas immergée, mais peut résulter d'une réflexion secondaire sur des surfaces émergées partiellement immergées, telles que la structure d'un ponton.

3.2 Artefacts dans les images

Certaines images présentent des perturbations inhabituelles dans la bande noire, sous la forme de motifs internes (fig. 3.2). Ces anomalies peuvent être attribuées à des particules en suspension dans la colonne d'eau (sable, vase), capables de réfléchir partiellement les ondes avant leur atteinte du fond.

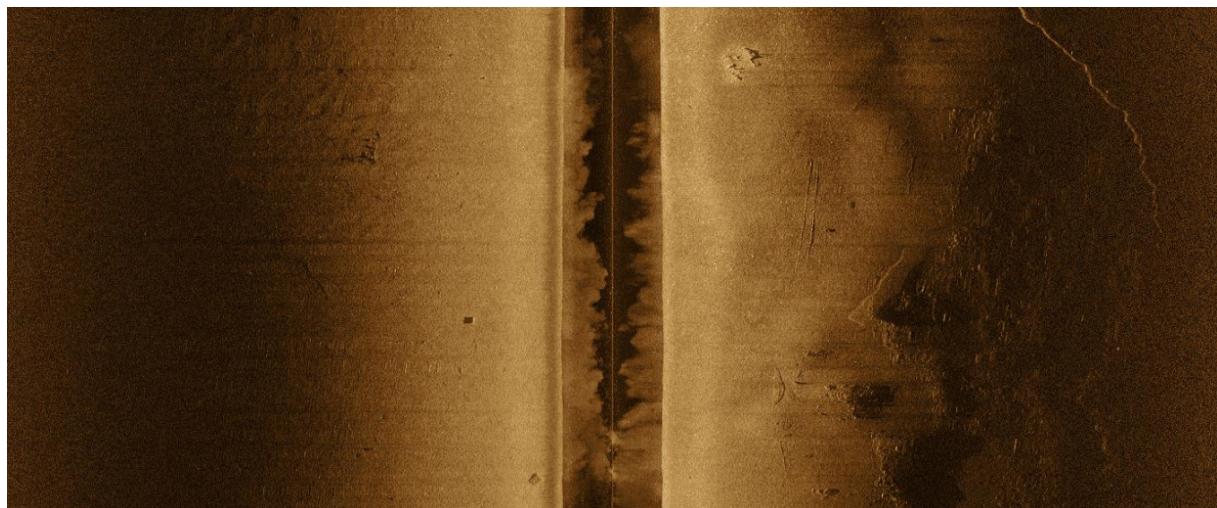


FIGURE 3.2 – Exemple de perturbations internes à la bande noire

Ces effets ne traduisent pas la présence d'obstacles solides, mais plutôt des conditions particulières du milieu marin.

3.3 Évaluation de la hauteur d'un objet immergé

La hauteur d'un objet détecté peut être déterminée par une interprétation géométrique des ombres acoustiques générées. En considérant la profondeur du fond P , la distance horizontale entre le sonar S et l'objet L_{obj} , ainsi que la longueur de l'ombre projetée L_{omb} , il est possible d'utiliser le théorème de Thalès (fig. 3.3) pour obtenir :

$$h = \frac{L_{\text{omb}}}{L_{\text{obj}} + L_{\text{omb}}} \cdot P$$

Cette méthode repose sur la connaissance des distances fournies par le logiciel d'analyse (par exemple DeepView).

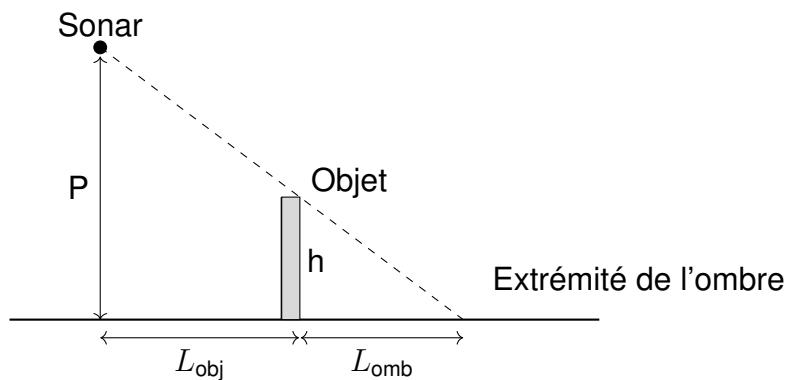


FIGURE 3.3 – Schéma d'application du théorème de Thalès pour l'estimation de la hauteur d'un objet

Une mesure réalisée sur un objet visible aux coordonnées $48^{\circ}22,635'N / 4^{\circ}29,156'W$ dans le fichier `tripode_1.dvs` a permis d'estimer une hauteur d'environ **0,6 m** (fig. 3.6). Les informations demandées par le logiciel (profondeur, position de l'ombre) sont cohérentes avec la formule ci-dessus.

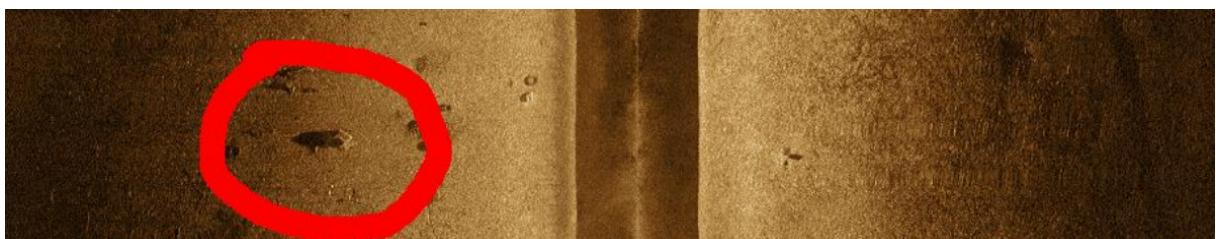


FIGURE 3.4 – Objet $48^{\circ}22,635'N / 4^{\circ}29,156'W$

3.4 Géoréférencement des données sonar

Le positionnement géographique des objets détectés repose sur une estimation précise de la distance horizontale entre le bateau (point de référence GPS) et le sonar remorqué. Ce décalage est appelé le *layback*.

Étant donné que les signaux GPS ne pénètrent pas l'eau, il est impossible d'équiper directement le sonar d'un récepteur. Le layback peut néanmoins être déterminé empiriquement : en réalisant deux passages sur un même objet à des caps opposés et en notant les positions GPS du bateau lorsque l'objet est détecté, le layback correspond à la moitié de la distance entre ces deux positions (fig. 3.5).

Cette méthode suppose une vitesse constante du bateau et un environnement stable pendant la collecte de données.

3.5 Problèmes lors des mesures

En pratique, bon nombre de mesures semblent perturbées, ondulées (fig. 3.6). On peut supposer qu'il s'agit de conséquence d'une action d'un opérateur.

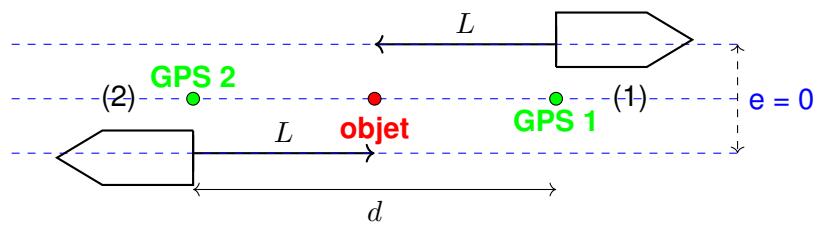


FIGURE 3.5 – Détermination empirique du layback par double passage sur un même objet

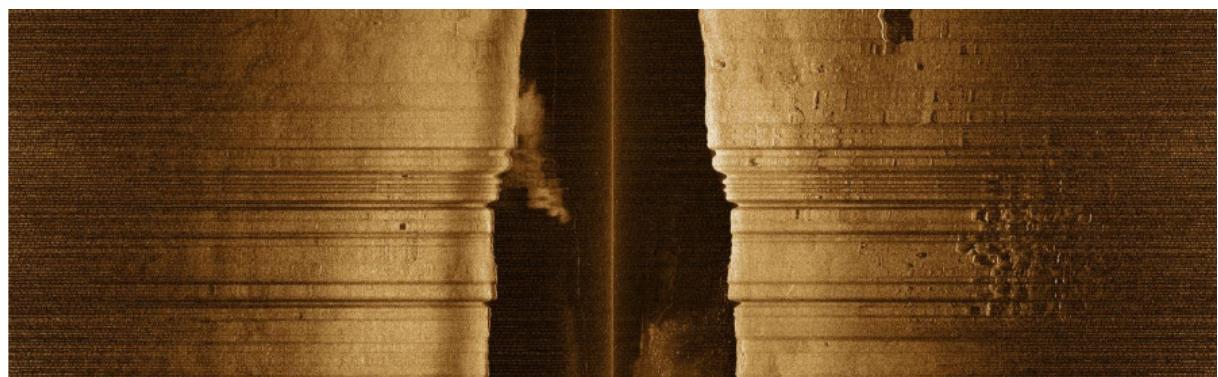


FIGURE 3.6 – Artefact dans une mesure

Chapitre 4

Etude théorique

4.1 Modélisation du système

Pour recueillir des données exploitables à partir du sonar, il est nécessaire de connaître sa position exacte. En effet, si le navire tracteur peut être géolocalisé par GPS, ce n'est pas le cas du sonar, car les ondes électromagnétiques pénètrent très peu dans l'eau. La difficulté réside donc dans l'estimation de la position du sonar immergé.

Une solution envisageable consiste à estimer la déformée du câble à partir des efforts subis par le système. Cela permet ensuite d'estimer la distance horizontale entre le navire et le sonar, appelée layback, et ainsi d'en déduire une position approximative du sonar.

4.1.1 Démarche

- Déterminer les efforts s'exerçant à l'extrémité du câble en isolant le sonar.
- Discrétiser le câble en n éléments indéformables.
- Calculer l'inclinaison du premier segment de câble par rapport à la verticale, en utilisant l'équilibre des forces appliquées sur le sonar.
- Réaliser une itération sur l'ensemble des segments restants pour déterminer progressivement la forme du câble.
- Estimer la distance horizontale entre le sonar et le navire (layback) et verticale (profondeur) à partir de la déformée obtenue.

4.1.2 Données, paramètres et hypothèses de travail

Hypothèses de modélisation :

- Cable pesant, flottant et non élastique
- Angle du premier élément de cable dans l'axe de la résultante sonar <-> câble
- Cable orienté selon son effort

Données d'entrée :

- Vitesse du bateau : 4 nœuds, soit 2,05 m/s.
- Diamètre du câble : 6,3 mm.
- Longueur du câble : 50 m.
- Propriétés de l'eau de mer (à 15 °C) :
 - Masse volumique : 1025 kg/m³.
 - Viscosité dynamique : $1,22 \times 10^{-3}$ Pl.

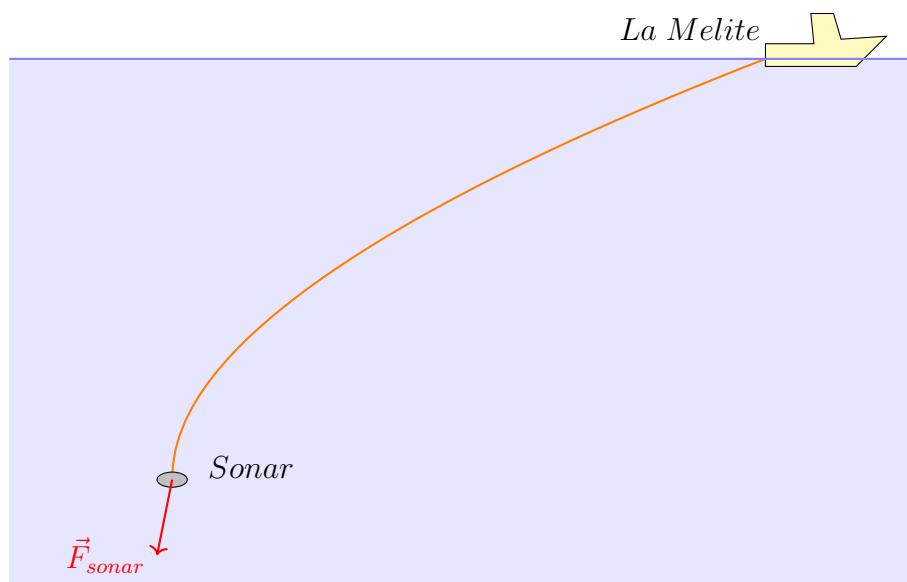


FIGURE 4.1 – Vue générale : bateau, câble déformé et sonar

4.1.3 Modélisation des efforts hydrodynamiques

Pour chaque élément de câble, on cherche à définir l'angle suivant à partir des données déjà connues. On découpe alors deux parties :

- L'initialisation, avec les efforts du sonar et une estimation de l'angle de la première section de câble
- La reccurence, on calcul l'angle de la section suivante en connaissant celui de la section actuelle et celui de l'effort de la section précédente.

Isolement du sonar

L'initialisation dans un premier temps est plutôt évidente, on connaît les efforts du sonar sur le câble et donc les efforts du câble sur le sonar par principe d'action réciproque. Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, nous supposons le sonar en translation rectiligne uniforme. On considère la force de pesanteur et la poussée d'archimède (ces deux sont représentés par \vec{P}), les frottements visqueux du sonar dans l'eau \vec{f}_{frot} , ainsi que la force du câble sur le sonar \vec{F}_{cable}

Dimension du sonar :

- Longueur : 830 m

— Diamètre : 60 m

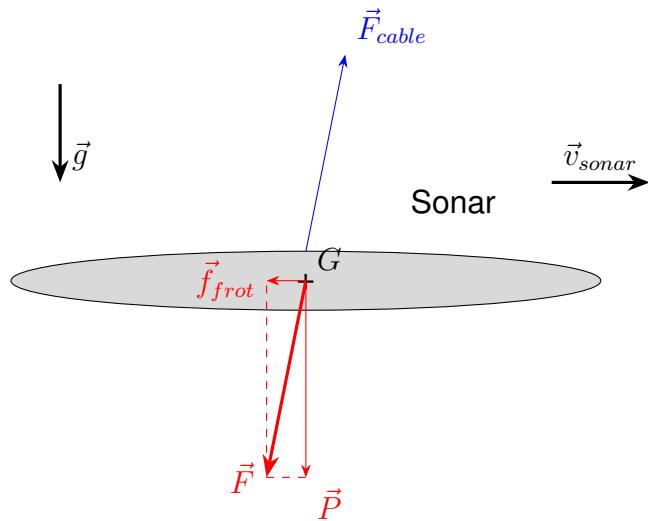


FIGURE 4.2 – Efforts appliqués sur le sonar

Dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, nous considérons le sonar en translation rectiligne uniforme.

Les forces appliquées sur le système (le sonar) sont les suivantes :

- La force de pesanteur \vec{P} .
- La poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$.
- La force de traînée hydrodynamique tangentielle.
- Les frottements dus à l'eau (traînée normale).
- La force exercée par le câble sur le sonar.

L'ensemble de ces forces est pris en compte dans l'analyse dynamique pour déterminer l'orientation initiale du câble ainsi que le comportement du système tracté.

On en déduit l'équation suivante issue du principe fondamental de la statique

$$\vec{F}_{cable} + \vec{f}_{frot} + \vec{P} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{F}_{cable} = -(\vec{f}_{frot} + \vec{P})$$

Cette équation permet ainsi de déduire l'orientation de l'effort du câble sur le sonar. Attention, ici se joue une approximation importante, on sait que le câble sera orienté entre la verticale et la direction de son effort. En effet, son inclinaison dépend des efforts qui s'appliquent en ses extrémités mais aussi celles qui s'appliquent en son milieu (forces de trainée sur le câble). Ces efforts implique que le câble ne tire pas dans son axe mais bien avec un angle dépendant des frottements visqueux.

Isolement du câble

projection sur la normal du câble :

$$-F_{nc} + \sin(\alpha_1) \times F_1 - \sin(\alpha_0) \times (F_0 - P_c) = 0$$

projection sur la tangente du câble :

$$\begin{aligned}
 -F_t + \cos(\alpha_1) \cdot F_1 - \cos(\alpha_0) \cdot (F_0 + P_c) &= 0 \\
 \begin{cases} (\sin(\alpha_1) \cdot F_1)^2 = (F_n + \sin(\alpha_0) \cdot (F_0 - P_c))^2 \\ (\cos(\alpha_1) \cdot F_1)^2 = (F_n + \cos(\alpha_0) \cdot (F_0 + P_c))^2 \end{cases} \\
 (\sin^2(\alpha_1) + \cos^2(\alpha_1)) \cdot F_1^2 &= (F_n + \sin(\alpha_0) \cdot (F_0 - P_c))^2 + (F_n + \cos(\alpha_0) \cdot (F_0 + P_c))^2 \\
 \Rightarrow F_1 &= \sqrt{(F_n + \sin(\alpha_0) \cdot (F_0 - P_c))^2 + (F_n + \cos(\alpha_0) \cdot (F_0 + P_c))^2} \\
 \alpha_1 &= \arcsin\left(-\frac{1}{F_1} \cdot (F_n + \sin(\alpha_0) \cdot (F_0 - P_c))\right)
 \end{aligned}$$

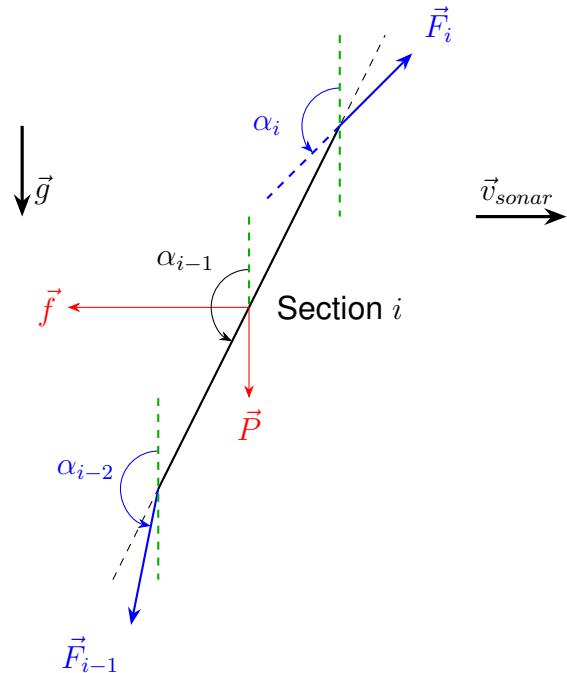
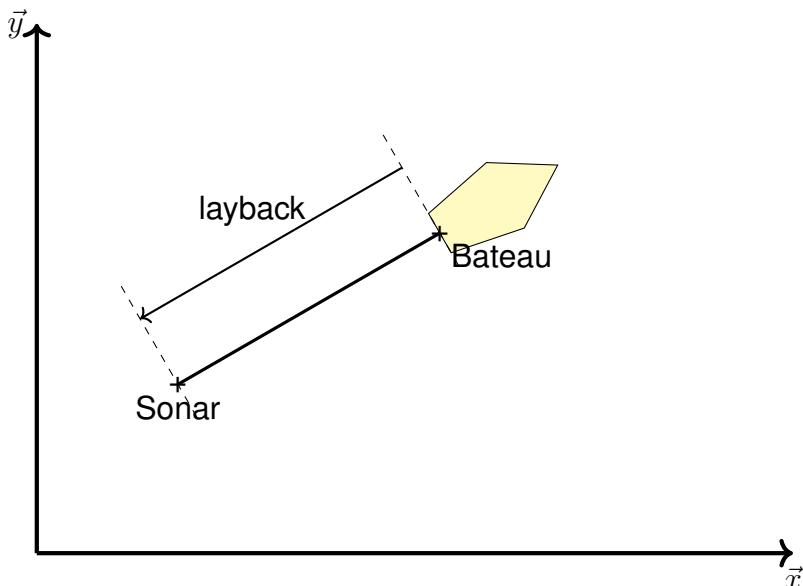


FIGURE 4.3 – Bilan des forces sur un segment du câble

4.2 Estimation de la position du sonar



Une fois la valeur du *layback* estimée, on peut calculer la position réelle du sonar tracté. Cela permet d'associer précisément les données acoustiques enregistrées par le sonar aux bonnes coordonnées géographiques, ce qui est essentiel pour produire des cartes fiables et interprétables.

Pour effectuer cette estimation, plusieurs données de navigation du navire et les caractéristiques du câble sont nécessaires, notamment :

- Le **cap du navire** (ou direction), noté θ (en radians ou degrés, à convertir selon le contexte)
- Les **coordonnées du navire** à l'instant considéré, notées x_{navire} et y_{navire} (en système cartésien ou géographique)
- La **valeur du layback**, notée L , qui représente la distance entre le sonar et le point de remorquage à la poupe du navire, selon la modélisation du câble

En supposant une ligne droite entre le navire et le sonar (modèle simplifié), les **coordonnées du sonar** peuvent être estimées par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}x_{\text{sonar}} &= x_{\text{navire}} - L \cdot \cos(\theta) \\y_{\text{sonar}} &= y_{\text{navire}} - L \cdot \sin(\theta)\end{aligned}$$

Ce calcul permet de **géoréférencer correctement les données sonar**, ce qui est fondamental pour toute analyse bathymétrique, cartographique ou d'imagerie sous-marine.

4.3 Simulation et validation

4.3.1 Résultats et Validation du modèle

Grâce au code python disponible en annexe, nous avons obtenus ces résultats :

Layback (à 4 noeuds) : 39.97 m Profondeur (à 4 noeuds) : 26.82 m

Si les ordres de grandeurs semblent être respectés, on constate tout de même une différences de plusieurs mètres, allant jusqu'à près de 20% dans les cas les plus critiques. De tel écart peuvent sembler être mineur mais sont en réalité important lorsqu'on parle de récif dans un port par exemple.

On peut alors supposer plusieurs sources d'erreurs ou d'écart :

- Constantes d'entrée différentes et incertitude
- Calculs de trainées peu précis

Layback

	Cable out meter	Speed knots					
		0.5	1	1.5	2	3	5
	10	0	0	1	2	4	7
	25	1	4	8	12	18	22
	50	4	15	27	35	42	47
	100	17	51	73	83	92	97
	150	37	95	121	133	142	147
	200	63	141	171	183	192	197

Table 3: The layback in metres with the information of the speed and the length of the cable.

FIGURE 4.4 – Layback annoncé par le constructeur

Profondeur

	Cable out meter	Speed knots					
		0.5	1	1.5	2	3	5
	10	10	9	9	9	8	5
	25	24	24	22	20	14	8
	50	49	46	39	31	20	10
	100	98	81	58	43	25	12
	150	143	105	71	50	28	13
	200	186	124	80	55	30	14

Table 2: The depth in metres with the information of the speed and the length of the cable.

FIGURE 4.5 – Profondeur annoncée par le constructeur

4.3.2 Analyse critique

Chapitre 5

Conception d'un support de treuil de mise à la mer

5.1 Contexte

5.1.1 Contexte

Dans le cadre de ce projet, il est proposé de concevoir un support pour un treuil motorisé destiné à la mise à l'eau d'un sonar tracté. Cette demande provient d'enseignants-rechercheurs de l'ENSTA Bretagne, investis dans des recherches hydrographiques, notamment sur la localisation de l'épave de la nef *La Cordelière*, coulée en 1512 au large de Brest. Ce treuil serait intégré au nouveau navire hydrographique de l'école, *La Mérité*, inauguré en 2023.

Actuellement, la mise à l'eau du sonar DeepEye s'effectue de manière entièrement manuelle. Afin d'automatiser cette opération, l'objectif est de concevoir un support capable d'accueillir un treuil motorisé permettant de réguler la longueur du câble déroulé. À plus long terme, ce système pourrait être automatisé pour adapter la profondeur du sonar en fonction de la bathymétrie rencontrée.

Le support devra respecter plusieurs contraintes techniques, telles que la compatibilité avec les platines latérales de fixation du navire, la non-interférence avec les éléments déjà présents à bord, et la capacité à résister à des tensions allant jusqu'à 2000 N dans le câble. Une attention particulière sera également portée à la géométrie, aux matériaux, à l'ergonomie d'usage et à l'intégration d'un éventuel système de trancannage.

5.1.2 Expression succincte du besoin

- Description de l'état actuel (touret manuel)
- Objectif à court terme : touret motorisé
- Objectif à long terme : adaptation automatique à la bathymétrie
- Contraintes spécifiques : charge, fixation, intégrité du câble, encombrement

5.2 Choix techniques et conception

5.2.1 Architecture retenue

- Présentation des options retenues
- Critères de choix : encombrement, accessibilité, sécurité
- Vue d'ensemble de la solution choisie

5.2.2 Choix des composants

- Matériaux envisagés (acier, aluminium, etc.)
- Critères de sélection : résistance, masse, coût, corrosion

5.2.3 Calculs associés

- Calculs de résistance (charges, efforts, déformations)
- Outils utilisés (analytique, logiciel RDM Le Mans)

5.2.4 Maquette numérique

- Présentation de la CAO réalisée sous Catia V5

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

- .1 Annexe 1 : Données techniques**
- .2 Annexe 2 : Codes ou algorithmes utilisés**

Bibliographie

- [1] Titre du document, Auteur, Année.
- [2] Titre ou site, consulté le jj/mm/aaaa.