

PROJET DE FIN D'ETUDES

Traitement du signal de fibre optique et capot de protection



Olatz LÓPEZ AHEDO

Année 2020-21

DÉPARTEMENT : Matériaux

TUTEURS DE STAGE : Florentin BERTHET ; Quentin GOVIGNON ; Gilles DUSSE

TUTEUR ACADEMIQUE : Laurent MICHEL

DATE DU STAGE : June 2021- Octobre 2021

NOM ET ADRESE DE L'ORGANISME : IMT Mines Albi-Carmaux

Remerciements

Je veux remercier toute l'École des Mines d'Albi de m'avoir si bien accueilli pendant ces quatre mois et de l'opportunité qui m'a été donnée de participer à un projet aussi intéressant. Je remercie spécialement mes tuteurs Florentin Berthet, Quentin Govignon et Gilles Dusserre pour leur temps et leur aide pendant tout mon stage, toutes les explications et leur contribution qui m'ont permis d'avancer dans l'apprentissage et le développement du travail. À tous les stagiaires qui ont partagé et contribué à créer une excellente ambiance de travail et à mes amis Loïc et Alejandro pour leur grande aide. Finalement, merci à ISAE-SUPAERO pour cet échange académique qui, malgré les temps incertains, a été très gratifiant.

Table des matières

Table des figures	5
Liste des tableaux	6
1 État de l'art	5
1.1 Réseaux de Bragg dans les composites	5
1.1.1 Description géométrique du guidage optique	7
1.1.2 Diffusion de la lumière : comment mesurer des déformations	7
1.1.3 Intégration du réseau de Bragg dans les composites	8
1.2 La réalisation de mesures	9
1.3 Charges sur la coque du navire	10
1.3.1 Phénomènes environnementaux	11
1.3.2 Réponse des navires	11
2 Tâche 1 : Exploitation des données extraites des fibres optiques	13
2.1 Géométrie du navire	13
2.2 Analyse structurelle	16
2.2.1 Flexion	22
2.2.1.1 Modèle 1 : Charge en flexion	22
2.2.1.2 Modèle 2 : Déplacements	23
2.2.1.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle	24
2.2.2 Torsion	24
2.2.2.1 Modèle 1 : Charge en torsion	24
2.2.2.2 Modèle 2 : Déplacements	25
2.2.2.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle	25
2.2.3 Simulation d'une vague	26
2.2.3.1 Modèle 1 : Pression normale	26
2.2.3.2 Modèle 2 : Déplacements	27
2.2.3.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle	28
2.3 Amélioration du modèle par l'ajout de raidisseurs	28
2.4 Automatisation de la saisie des données dans Abaqus avec Phyton	30
3 Tâche 2 : Nouveau design du capot de protection de la fibre optique	34
4 Conclusion et perspectives	38
4.1 Interprétation des résultats	38
4.1.1 Cas Flexion	38

4.1.2	Cas Torsion	39
4.1.3	Cas pression hydrostatique de l'eau	40
4.2	Améliorations futures	41
4.3	Erreurs de calcul possibles	41
4.4	Conclusions	42

Références		51
-------------------	--	-----------

Table des figures

2	Bateau Alfred Merlin	2
3	Réseau de Bragg fibré et sa réponse spectrale	6
4	Réflexion totale à l'interface cœur/gaine	7
5	Composants de la fibre optique	7
6	L'insertion de la fibre optique à travers les couches de renfort	9
7	Positionnements des capteurs envisagés par iXBlue	9
8	Affaissement du navire (1)/Bombement du navire (2)	12
9	Gauche : Collision entre le navire et les vagues (Slamming) et droite : panting	12
10	Gauche : cisaillement et droite : torsion	12
11	Modèle de base CAO avec points de mesure	13
12	CAO coque moitié finale	14
13	Détail de l'image CAO moitié finale	14
14	Créer une pièce à partir d'un fichier ACIS	15
15	Géométrie imprécise	15
16	Géométrie finale bateau	16
17	Orientation et plis des fibres	17
18	Composite Layup	18
19	Orientation du matériel	18
20	Le maillage de la Coque	19
21	Représentation du connecteur axial	19
22	BC : Déplacements des connecteurs	20
23	Représentation des conditions de déplacements des connecteurs	20
24	Détail de la représentation des conditions déplacements des connecteurs . .	20
25	Calcul du déplacement relatif	21
26	Résumé de la procédure de la première tâche	22
27	Représentation du modèle de chargement en flexion	23
28	Représentation de la déformation longitudinale de la flexion	23
29	Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en flexion	24
30	L'imposition des déplacements et des conditions aux limites pour le cas en flexion.	24
31	Représentation du modèle de chargement en torsion	25
32	Représentation de la déformation longitudinale de la torsion	25
33	Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en torsion	26
34	L'imposition des déplacements et des conditions aux limites pour le cas en Torsion	26
35	Représentation du modèle de chargement du pression normale	27

36	Contrainte rigide de type coude pour joindre la section au centre de gravité (encastre)	27
37	Représentation de la déformation longitudinale du pression normale	27
38	Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en pression normale	28
39	Détail de la figure 38 avec les fibres optiques en rouge	28
40	Représentation de la déformation longitudinale du modèle 3	28
41	Photographie de la structure interne du navire	29
42	Représentation de la moitié du modèle CAO de la ligne de navigation et des raidisseurs longitudinaux et transversaux.	30
43	Cadres transversaux et longitudinaux en vert et jaune respectivement, et les vannes	30
44	Entrée-sortie Abaqus	31
45	Données exportées	31
46	Installation de la protection sur le stratifié	34
47	Capot de protection - pistes d'amélioration	35
48	Comparaison du nouveau design (à gauche) avec l'ancien.	36
49	Installation de la protection sur le stratifié	36
50	Modification (en rouge) de la courbure du pas de la fibre optique afin que l'écart ne soit pas aussi serré.	37
51	Axe X de la navire (pour la représentation des déformations)	38
52	La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques en Flexion	39
53	La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques en Torsion	39
54	La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques pour la pression normale	40

Liste des tableaux

1	Caractéristiques des fibres optiques et des FBG	7
2	Résumé des réseaux actifs et inactifs	10
3	Propriétés du matériel : E-glass/polyester laminé	17
4	Mesures des déplacements en mm des 8 fibres optiques pour le cas en flexion	23

Liste des sigles et acronymes

- **AUV** Autonomous underwater vehicle
- **BC** Boundary Condition
- **CAO** Computer Assisted Ordering
- **CNRS** Centre national de la recherche scientifique
- **DRASSM** Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines
- **EF** Éléments finis
- **ICA** Institut Clement Ader
- **IMT** École nationale supérieure des mines d'Albi-Carmaux
- **FBG** Fiber Bragg grating
- **USA** United States of America
- **INSA** Institut National des Sciences Appliquées
- **ISAE** Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace
- **ROV** Remotely operated vehicle
- **PRF** Plastic Recycling Facilities
- **RTM** Resin transfer molding
- **UMR** Unité Mixte de Recherche
- **UMS** Universal Measurement System

Introduction

Contexte général

L'adoption de la technologie des matériaux composites a connu une augmentation significative dans un certain nombre d'industries, comme l'industrie navale et aéronautique, grâce au développement de matériaux composites innovants et aux progrès réalisés dans les processus de fabrication. Les matériaux composites sont légers et présentent un rapport résistance/poids élevé, ce qui rend possible leur utilisation dans une série d'applications.

La production à l'échelle industrielle de composants en matériaux composites n'intègre pas actuellement de capteurs dans le composant pour surveiller le processus de fabrication, et le contrôle de la qualité est en grande partie effectué de manière empirique. Un certain nombre de méthodes non optiques sont utilisées pour le contrôle en laboratoire à petite échelle de certains aspects du processus de fabrication : les capteurs diélectriques, les transducteurs à ultrasons, les thermocouples et les thermomètres infrarouges, les transducteurs de pression, etc. L'utilisation de ces capteurs non optiques est limitée aux applications de laboratoire, car les capteurs ne sont pas adaptés à l'intégration dans les composites renforcés de fibres de verre, ou sont trop grands pour être intégrés dans les composites critiques. Le contrôle de la qualité dans les processus de fabrication des composites pourrait être simplifié par l'utilisation de capteurs embarqués qui peuvent fournir une surveillance en temps réel. [4]

En effet, la demande de nouvelles constructions dédiées à l'exploration des mers et des océans est croissante. Il y a encore beaucoup à découvrir dans les eaux profondes, et les activités humaines mettent en danger les zones côtières et offshore. Le développement de nouvelles méthodes, d'outils et de navires de recherche optimisés semble être une réponse pour la récolte d'informations et la protection des zones marines.

Dans ce but, une étude a été réalisée sur le traitement du signal d'un bateau composite dans lequel la technologie des capteurs sur fibres optiques est appliquée. Ce document commence par la présentation des entreprises impliquées dans le projet et du contexte des travaux. Après cela, les principes théoriques les plus importants qui ont servi de base à la compréhension de la technologie utilisée seront brièvement exposés. Ensuite, le travail sera expliqué en détail, les tâches et les étapes développées au cours du travail et enfin les principaux résultats, les erreurs possibles et les améliorations qui pourraient être apportées pour les travaux futurs seront commentés.

Contexte du projet

L'Alfred Merlin est un navire français d'exploration archéologique affecté au service du DRASSAM (Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines). La construction du navire débute en septembre 2019 et il a été libéré et mis en service cette année 2021. Le navire est conçu par l'entreprise Mauric et construit par le chantier naval iXblue Shipyard à La Ciotat, à côté de Marseille [3].



FIGURE 2 – Bateau Alfred Merlin

Le navire présentera plusieurs aspects clés tels qu'un impact environnemental minimisé de la construction au démantèlement grâce à l'utilisation de PRF recyclés de haute qualité. La coque sera surveillée et le comportement du PRF recyclé de haute qualité sera évalué. En effet, l'inconvénient majeur de ce matériau déjà utilisé par les chantiers navals est le retour d'information limité sur l'évolution de ses performances dans le temps. C'est pourquoi des fibres optiques, avec capteurs à réseaux de Bragg, seront installées dans le fond de la coque (sur toute la longueur) et sur les parois frontales pour enregistrer les déplacements dans le composite dus aux effets d'accostage et d'affaissement (hogging and sagging) du navire et à la pression d'impact sur les coques latérales avant. Les chapelets de réseaux de Bragg ont été installés avant l'infusion de la coque.

Le navire est construit entièrement en matériaux composites. Du fait de sa taille, le navire comporte des capteurs de déformation. La longueur est de 46 mètres pour une largeur maximale de 10.8 mètres et un tirant d'eau de 3.2 mètres, l'Alfred Merlin affichera une jauge de 498 UMS et un tonnage de 420 tonnes à pleine charge (380 à mi-charge). Le navire possédera un pont vaste de 150 m. En ce qui concerne les outils scientifiques, NESSIE sera équipé de sonars dans une nacelle située sur la quille. De plus, la mise à l'eau et la récupération ont été spécifiquement optimisées pour le déploiement de ROV et d'UAV, avec un châssis en A (7t), une grue de 15 t.m, un treuil de levage hydraulique (7t) et un treuil électrique scientifique (1t).

Après avoir collecté les informations des systèmes téléguidés et des sonars, les scientifiques auront la possibilité de traiter les données et d'effectuer des recherches directement à bord grâce au grand laboratoire sec et à la salle d'étude entièrement équipée pour la supervision des opérations des AUV et ROV et le post-traitement.

iXblue est une entreprise de haute technologie spécialisée dans la conception et la fabrication de technologies avancées autonomes, marines et photoniques. L'expertise interne du groupe comprend des systèmes et solutions innovants dédiés à la navigation inertielle, au positionnement sous-marin, à l'imagerie sous-marine, ainsi qu'à la construction navale et aux moyens de tests et de simulation.

La participation de Armines/IMT Mines Albi a été compilé dans un document intitulé *Projet NESSIE : tâches 2.1.4 et 3.1.8* (Florentin Berthet, Quentin Govignon, 30 Mars 2020). La tâche 2.4.1 concerne le recyclage du matériau composite en fibres de carbone recyclées et la tâche 3.1.8 l'intégration des réseaux de Bragg. Ce travail appartient à la tâche 3.1.8 qui vise l'intégration des réseaux de Bragg dans la carcasse du navire et la mesure et l'analyse en temps réel des contraintes mécaniques appliquées à la structure au moment de la navigation.

Objectifs et finalité du projet

Le projet de stage, en continuité des travaux précédents, se concentrera sur l'acquisition et sur l'exploitation des données de déformation récupérées sur fibre optique. À cette fin, il sera nécessaire de faire une V2 du capot de protection pour le rendre peut-être plus facile d'utilisation. La première tâche consiste à effectuer une analyse par EF de la déformation globale du navire, en partant des déformations locales. Les réseaux de Bragg mesurent la déformation locale en un point spécifique du navire où les fibres de verre ont été installées (avec plusieurs capteurs de Bragg). Ces déformations locales sont prises comme point de départ pour calculer la déformation globale du navire. Le fait de pouvoir obtenir une représentation de la déformation nous donne des informations sur la déformation du navire par différents agents externes. Nous pouvons, par exemple, savoir comment l'impact des vagues affecte le navire en fonction du temps et de la position, du type de mer dans lequel se trouve le navire, du moment où il est sollicité au maximum, etc [6].

Une seconde partie concernera le développement d'une nouvelle version de capot de protection (imprimé 3D). La résine est entrée dans certains des capots de protection et il faudra penser à un nouveau design.

Présentation de l'entreprise

A mi-juin 2021, j'ai commencé un stage à temps plein à l'Institut Clément Ader sur le site de l'IMT Mines Albi-Carmaux dans le cadre du projet NESSIE avec IxBlue et l'école

des Mines d'Alès, au département des matériaux, jusqu'à mi-octobre 2021.

L'École nationale supérieure des Mines d'Albi-Carmaux fait partie de l'Institut Mines-Télécom, qui est aujourd'hui le premier groupe d'écoles d'ingénieurs et de management de France. IMT Mines Albi est aussi membre associé de l'Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées et partenaire de très nombreuses institutions et universités prestigieuses en France et à l'international.

L'Institut Clément Ader (ICA) est un laboratoire de recherche sous tutelle de l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse (INSA Toulouse), de l'Université Toulouse-III-Paul-Sabatier (UPS), de l'École nationale supérieure des mines d'Albi-Carmaux (IMT Mines Albi), de l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAERO) et du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

1 État de l'art

1.1 Réseaux de Bragg dans les composites

Les matériaux composites sont obtenus par l'assemblage d'au moins deux constituants non miscibles (avec une capacité d'adhésion élevée) qui confèrent à l'assemblage des propriétés physiques non présentes dans les constituants eux-mêmes. Les matériaux composites sont le plus souvent réalisés par association de fibres de renfort à une matrice (résine thermoplastique ou thermodurcissable). Les fibres de renfort permettent d'améliorer les propriétés mécaniques (résistance mécanique, rigidité, dureté, etc.) et physiques (résistance thermique, résistance au feu, résistance électrique). Elles ont une faible densité et sont faciles à manipuler. Les fibres les plus souvent rencontrées sont les fibres de verre et les fibres de carbone. La matrice est présente pour garantir un bon transfert de la contrainte aux fibres de renforcement, pour les protéger contre les perturbations extérieures et pour assurer, après le moulage, la forme géométrique du produit.

Les matériaux composites peuvent être construits par différentes techniques. La plus simple est bien sûr le moulage, qui peut être réalisé par simple contact (les fibres de renfort placées dans le moule sont imprégnées manuellement de la résine), sous vide ou avec le procédé plus avancé de moulage par transfert de résine (RTM).

Des études récentes ont montré que les capteurs à réseau de Bragg en fibre (FBG) présentent de nombreux avantages lorsqu'ils sont utilisés dans un composite pour étudier son comportement. Parmi les différentes configurations de fibres optiques, les réseaux de Bragg (FBG) photo-inscrits dans le cœur d'une fibre optique sont les plus répandus pour une utilisation dans les matériaux composites.

Un FBG est une modification périodique et permanente de la valeur de l'indice de réfraction du cœur le long de l'axe de la fibre optique. Cette modification est généralement obtenue en exposant transversalement le cœur d'une fibre optique photosensible à un motif d'interférence intense de lumière UV à une longueur d'onde d'environ 240 nm. En effet, grâce à la présence de dopants d'oxyde de germanium à l'intérieur du cœur en silicium, une fibre optique est photosensible (c'est-à-dire qu'elle bénéficie de la propriété de changer de façon permanente son indice de réfraction lorsqu'elle est exposée à la lumière). Un FBG comporte un miroir à indice sélectif, qui réfléchit une longueur d'onde particulière, appelée longueur d'onde de Bragg (λ_B). Cette longueur d'onde de Bragg est proportionnelle au pas (Λ) et à l'indice effectif du cœur de la fibre (n_{eff}). En surveillant ces décalages spectraux, il est possible de remonter aux paramètres inductifs tels que la température ou les déformations locales subies par la fibre [9].

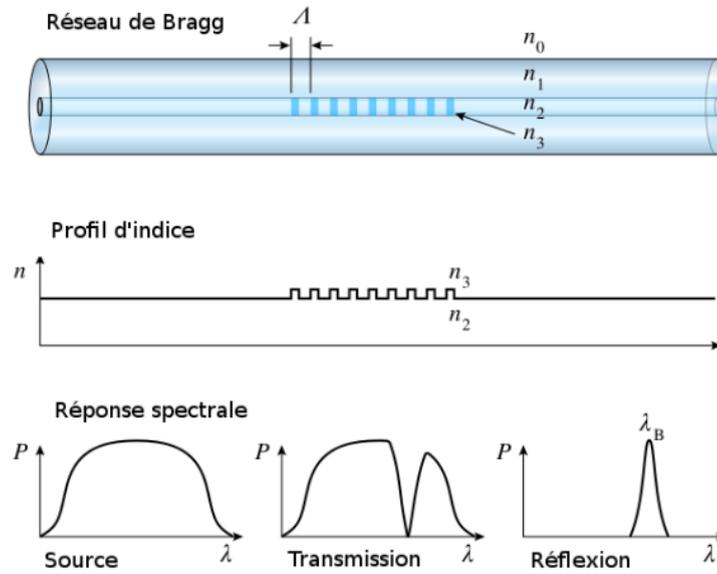


FIGURE 3 – Réseau de Bragg fibré et sa réponse spectrale

Parmi les différents avantages :

- Ils ont une longue durée de vie (plus de 20 ans).
- Permet de disposer d'un équipement de mesure intégré et portable avec des résultats d'analyse spectrale très fins.
- L'information détectée est directement encodée dans une longueur d'onde, qui est un paramètre absolu. Le rendement ne dépend pas du niveau de lumière total, ni des pertes des fibres de liaison, ni des couplages optiques, ni des fluctuations de puissance de la source optique.
- Le codage en longueur d'onde des capteurs facilite le multiplexage des capteurs. Il permet de distribuer différentes sections de capteurs dans la même fibre optique, en attribuant à chaque capteur une portion différente du spectre de la source lumineuse disponible.
- Il n'y a pas de risque de décharge de haute tension et ils sont antidéflagrants d'explosion.
- Les fibres optiques sont très petites (diamètre = 120 μm), très légères et de géométrie variable.
- Un capteur FBG peut résister à des températures et des pressions élevées.
- Un capteur FBG est insensible à la corrosion et à la fatigue.
- L'immunité aux l'interférence électromagnétique.
- Il a une double fonction : capteur et récepteur.

D'autre part, les fibres optiques sont très fragiles, ce qui rend leur manipulation difficile. L'intégration et la connexion doivent se faire de la manière la plus prudente.

Les caractéristiques des fibres optiques et des FBG sont compilées dans les deux ta-

bleaux suivants :

Principales caractéristiques des fibres optiques	
Nb de points par mesure	1 mesure / mètre approx.
Fréquence d'acquisition	> 10 Hz
t d'acquisition	<0,1s

TABLE 1 – Caractéristiques des fibres optiques et des FBG

1.1.1 Description géométrique du guidage optique

La description du mode de guidage de l'onde lumineuse dans une fibre optique est basée sur la réflexion totale du rayon lumineux au sein de la fibre à l'interface cœur/gaine. Pour cela il faut que l'indice du cœur soit plus élevé que celui de la gaine ($n_c < n_g$).

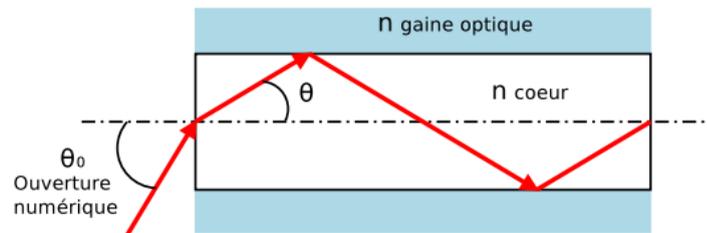


FIGURE 4 – Réflexion totale à l'interface cœur/gaine

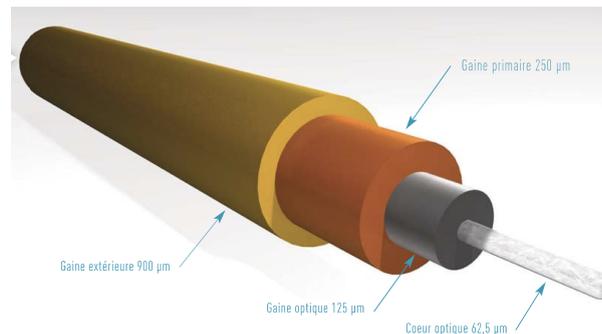


FIGURE 5 – Composants de la fibre optique

1.1.2 Diffusion de la lumière : comment mesurer des déformations

L'indice effectif du mode guidé dans la fibre optique est généralement sensible aux variations thermiques et de déformations de la fibre optique. Cet effet est très largement exploité dans la mesure à partir de réseaux de Bragg fibrés qui sont couramment utilisés comme transducteurs. Enfin nous noterons que la fibre optique peut également sonder le milieu extérieur dans lequel elle est plongée en mesurant son indice. À la frontière entre deux couches, il se produit une réflexion partielle des ondes. Pour les ondes dont la longueur d'onde est égale à environ quatre fois l'épaisseur optique d'une couche, les réflexions

se combinent par interférences constructives et les couches agissent comme un miroir de grande qualité [8].

En effet, la relation de Bragg donne [7] :

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

où n est l'indice effectif du milieu, λ le pas du réseau et Λ égal à l'épaisseur d'un couple de couches.

La bande passante $\Delta\nu_0$ de la bande de coupure peut être calculée ainsi [7] :

$$\Delta\nu_0 = \frac{4\nu_0}{\pi} \arcsin \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (2)$$

où ν_0 est la fréquence centrale de la bande.

Ainsi, augmenter le nombre de couples de couches d'un réseau de Bragg augmente la réflectivité du miroir, et augmenter la différence d'indice de réfraction entre les deux matériaux augmente à la fois la réflectivité et la bande passante.

Ci-dessous figure l'équation de la relation entre le décalage de la longueur d'onde, la déformation et le changement de température [7]. Ce dernier terme peut être négligé car il ne sera pas pris en compte par le FBG.

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{12} + p_{11}))\right)\epsilon_z - \alpha\Delta T \quad (3)$$

Où p_{ijkl} sont les composantes du tenseur photoélastique et ν sont les composantes du tenseur de déformation. En simplifiant l'expression, nous pouvons exprimer le changement de longueur d'onde comme suit :

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}(1 - p_e)\epsilon_z \quad (4)$$

1.1.3 Intégration du réseau de Bragg dans les composites

La structure du bateau a été fabriquée en plusieurs étapes. La peau de la coque a d'abord été infusée sous vide en deux éléments. Il a ensuite été démoulé et collé sur un squelette de poutres. D'autres éléments ont été ajoutés, comme des cloisons pour rigidifier la structure ou des revêtements ignifuges.

Les réseaux de Bragg ont été intégrés au cœur des stratifiés composites, au plus près de la source de la défaillance pour permettre une détection précoce et assurer une protection optimale de la fibre optique contre les agressions extérieures comme le risque d'arrachement. Cependant, cela peut provoquer des perturbations qui peuvent conduire à des poches

de résine qui introduisent des contre-intensités résiduelles. Pour cette raison, il a été décidé d'introduire la fibre optique à l'aide d'un patch dans des fibres de verre unidirectionnelles de faible grammage. Cela semble bien fonctionner pour toute séquence d'empilement du stratifié composite.

Le patch "intelligent" est composé de fibres de verre unidirectionnelles de 10 cm de large et de longueur variable. Le réseau de Bragg a été inséré dans le patch au moyen d'un montage, car le bateau aura besoin de patches de près de 40 m de long (ce qui ne peut être fait à la main). Au niveau de chaque réseau de Bragg, la couture est interrompue afin de ne pas endommager le capteur, ou de le croiser avec un fil à coudre, et ainsi de pouvoir le localiser plus facilement. L'insertion de la fibre optique à travers les couches de renfort est visible sur la figure 6.

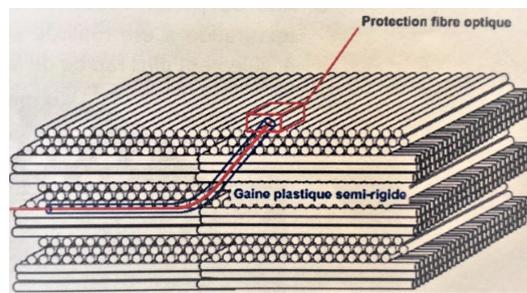


FIGURE 6 – L'insertion de la fibre optique à travers les couches de renfort

Sur le bateau, les patches doivent être fixés aux plis déjà installés, faute de quoi ils peuvent glisser sur les zones pentues du bateau.

1.2 La réalisation de mesures

Pour obtenir les informations provenant des mesures de déformation, 4 fibres optiques ont été réparties de chaque côté du navire, comme le montre la figure 7.

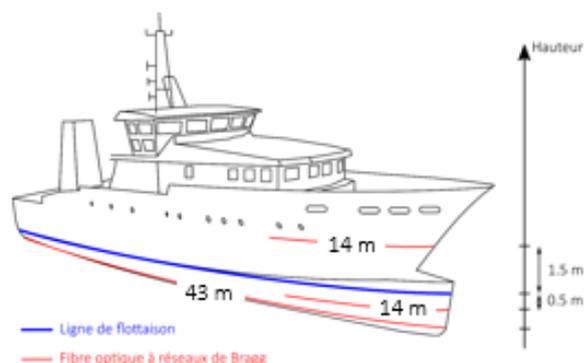


FIGURE 7 – Positionnements des capteurs envisagés par iXBlue

Le tableau suivant résume les performances (ou non) des différents réseaux après in-

fusion. Au total, 5/8 réseaux de Bragg sont en service. Les causes possibles sont l'échec des réseaux de Bragg dû à une courbure locale très importante de la fibre optique associée au déplacement de la prise lors de la création du vide du tissu dans l'infusion. Malgré les précautions prises, on a constaté que deux prises n'étaient pas totalement imperméables à la résine.

Bâbord	Sanction	Tribord	Sanction
1:Bragg avant haut	OK (installation soudure)	:Bragg avant haut	OK (ouverture du capot et soudure d'une nouvelle pig-tail)
2:Bragg avant milieu	HS(courbure trop importante glissement et/ou mise sous vide)	:Bragg avant milieu	OK
3:Bragg avant bas	HS(courbure trop importante glissement et/ou mise sous vide)	:Bragg avant bas	OK
4:Bragg arrière	OK	:Bragg arrière	HS

TABLE 2 – Résumé des réseaux actifs et inactifs

Les dommages dans les composites sont des fissures locales qui serviront de point d'initiation à la rupture, mais qui ne modifient pas fortement le champ de déformation global, seuls quelques centimètres autour de la fissure sont affectés. Les capteurs à fibre optique agissent principalement comme des capteurs de déformation, donc à moins qu'un dommage ne se produise très près de l'emplacement du capteur, il peut facilement passer inaperçu. Pour autant que la fissure traverse le chemin de la fibre optique elle ne sera pas détectée. Pour des structures réalistes, un grand nombre de capteurs est nécessaire, chaque capteur produisant des données pour chaque cas de charge ou incrément de charge.

Ainsi, même pour des expériences simples, d'énormes ensembles de données de l'ordre du gigabit seront générés, qui contiennent des informations redondantes et répétées accompagnées de bruit.

Il était prévu qu'elle soit réalisée pendant la période de formation, mais en raison de la situation actuelle, elle n'a pas pu être réalisée. Tous les calculs ont été effectués à partir de données fictives créant différents cas de figure tels que la flexion, la torsion, etc. Les données obtenues seront les déformations en fonction du temps et les différents réseaux de Bragg.

1.3 Charges sur la coque du navire

La coque des navires est soumise à un certain nombre de charges. Même lorsqu'ils sont à quai ou à l'ancre, la pression de l'eau environnante déplacée par le navire exerce une pression sur sa coque. Le poids de la coque, de la cargaison et des composants du navire pèse sur la coque. Le vent souffle contre la coque et les vagues la heurtent. Lorsqu'un

navire se déplace, il y a une résistance supplémentaire de la coque, la force des hélices, l'eau poussée contre la proue.

1.3.1 Phénomènes environnementaux

Les trois principaux facteurs environnementaux sont le vent, les vagues et la glace. La réponse de la coque est caractérisée directement ou indirectement par le mouvement du navire (six degrés de liberté), la contrainte exercée sur la coque (globale et locale), la stabilité et la performance de la propulsion. Bien que les vagues et la glace sont les principales sources de danger pour les structures des navires, d'autres facteurs environnementaux augmentent le danger potentiel comme le vent nuit, la visibilité réduite (brouillard, conditions de tempête ou nuit tombée), même des conditions météorologiques moins sévères peuvent causer des dommages structurels (élasticité, fatigue, etc.) entraînant des frais de réparation et une perte de productivité.

1.3.2 Réponse des navires

Compte tenu des dangers qui existent dans l'environnement marin, il est possible de définir les types de réponse de la coque. Les navires réagissent aux vagues de l'océan selon six degrés de liberté : trois translations (cavalement, embardée, pilonnement) et trois rotations (tangage, roulis, lacet). Le roulis, le tangage et le pilonnement sont généralement les plus préoccupants, que ce soit du point de vue du mouvement synchrone ou du mouvement extrême.

Les réponses sont fonction de la masse (y compris l'eau entraînée), de l'amortissement (linéaire et non linéaire), des taux de restauration (c.-à-d. les taux de ressort déterminés par la géométrie de la coque), et du degré de résonance.

La stabilité d'un navire est fonction de sa forme géométrique, de la répartition de son poids, de son étanchéité, et de la disposition des réservoirs. La planification du voyage basée sur les prévisions météorologiques et les caractéristiques connues du navire peut permettre de réaliser d'importantes économies de carburant. On peut déterminer la relation entre les performances du navire (résistance ajoutée, puissance) et les conditions météorologiques (vent, température, etc.) à l'échelle réelle.

Le réseau de Bragg nous donne un temps d'acquisition de 1s par capteur environ, ce qui nous permet d'avoir des calculs de la déformation par des charges statiques et dynamiques. La position des fibres optiques en haut nous donne des informations sur le hogging et le sagging et les deux en bas sur le comportement des vagues.

Parmi les différents types de contraintes supportées par le navire figurent les suivantes :

Hogging et Sagging

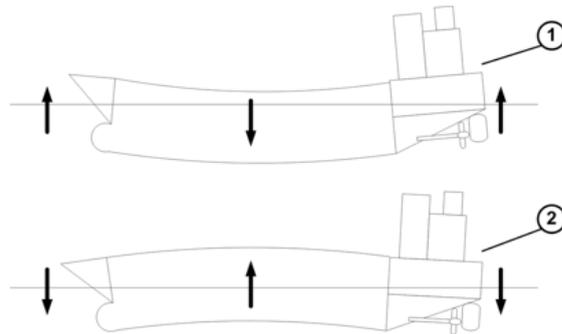


FIGURE 8 – Affaissement du navire (1)/Bombement du navire (2)

Slamming et Panting

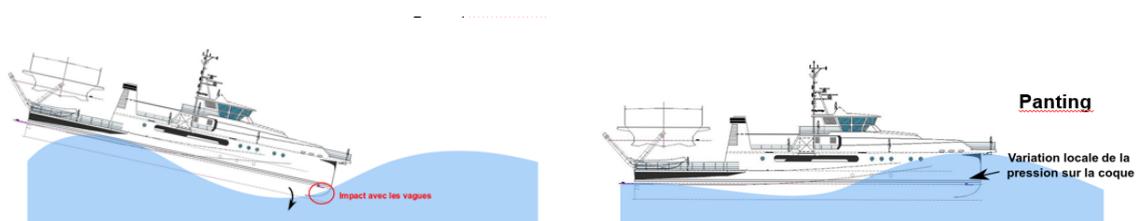


FIGURE 9 – Gauche : Collision entre le navire et les vagues (Slamming) et droite : panting

Shear and Torsion

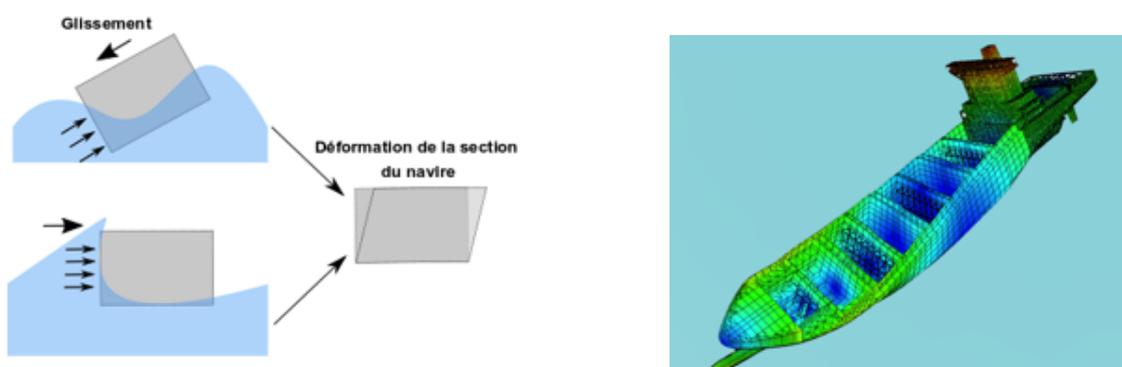


FIGURE 10 – Gauche : cisaillement et droite : torsion

2 Tâche 1 : Exploitation des données extraites des fibres optiques

Pour représenter le modèle de déformation global souhaité à partir des mesures de déformation locales du navire, il faut une bonne conception de la géométrie et des propriétés des matériaux et une représentation correcte des charges et des conditions aux limites. Les étapes suivies pour obtenir le modèle de déformation global sont présentées ci-dessous.

Le point de départ initial était une géométrie de base fournie par la société ixBlue, qui était chargée de la conception du navire Alfred Merlin. Ci-dessous, on trouve une image du point de départ de la modélisation [5], [11].

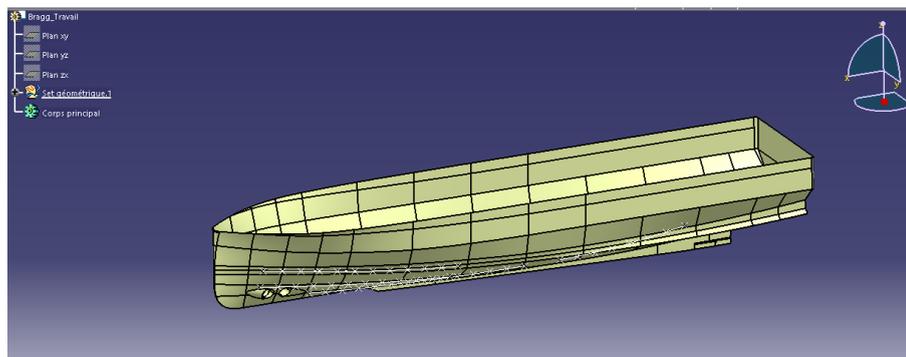


FIGURE 11 – Modèle de base CAO avec points de mesure

2.1 Géométrie du navire

La plupart de la géométrie a été modifiée grâce à l'utilisation du logiciel Catia v5, qui dispose de plus d'outils de design qu'Abaqus, où le reste de l'analyse structurelle a été effectué. L'idée principale est de simuler les déformations des différents capteurs, pour cela nous avons choisi d'imposer différents déplacements des éléments filaires par rapport à une longueur qui simule la déformation mesurée dans la fibre optique avec les réseaux de Bragg. Ce point sera expliqué plus en détail ci-dessous.

Afin de créer les éléments filaires, il est nécessaire de créer des partitions des différentes surfaces pour créer de nouveaux points où appliquer le déplacement. Cette partie a été coûteuse, car il est souvent facile de créer des bords ou des surfaces répétées qui bloquent toute analyse structurelle ultérieure.

Afin d'alléger l'importation du fichier dans Abaqus, il a été décidé de travailler avec la moitié de la géométrie, car la structure est supposée être symétrique.

En créant différents plans qui passent par les points où l'on veut créer l'élément filaire, et en les coupant avec la ligne où se trouve la fibre optique, on peut découper la géométrie comme souhaité. L'élément filaire comporte en son centre la position de chaque capteur de Bragg. Les points d'intérêt sont donc tous les points situés au milieu des croix et deux autres créés dans chaque coin équidistant.

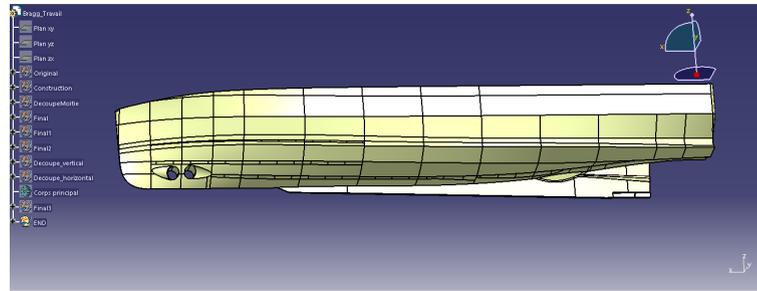


FIGURE 12 – CAO coque moitié finale

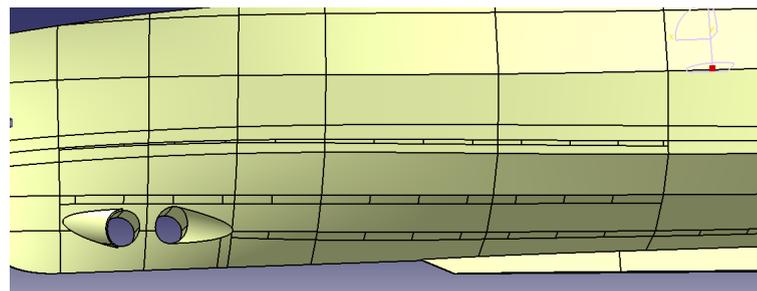


FIGURE 13 – Détail de l'image CAO moitié finale

La pièce est ensuite importée dans Abaqus en tant que PART (.stp, .step ou .CAT-PART) en la combinant en une seule pièce et en sélectionnant une tolérance suffisamment grande pour que certaines erreurs géométriques soient acceptées (dans ce cas, une valeur de 100, figure 14). Les nouvelles faces sont créées en assemblant automatiquement les espaces entre les bords libres. L'assemblage des espaces permet de remplacer les petites faces, ou les espaces vides qui ont été précédemment supprimés.

Le modèle FE doit être vérifié systématiquement (pendant le processus de modélisation) pour détecter les erreurs possibles suivantes :

- nœuds fixes, sans rigidité et intermédiaires sur les bords de l'élément non reliés à l'élément
- éléments doubles
- formes d'éléments extrêmes (rapport d'aspect des bords de l'élément et éléments déformés)
- conditions aux limites incorrectes.

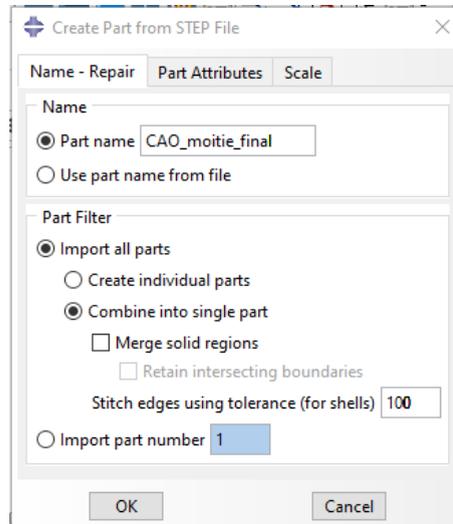


FIGURE 14 – Créer une pièce à partir d'un fichier ACIS

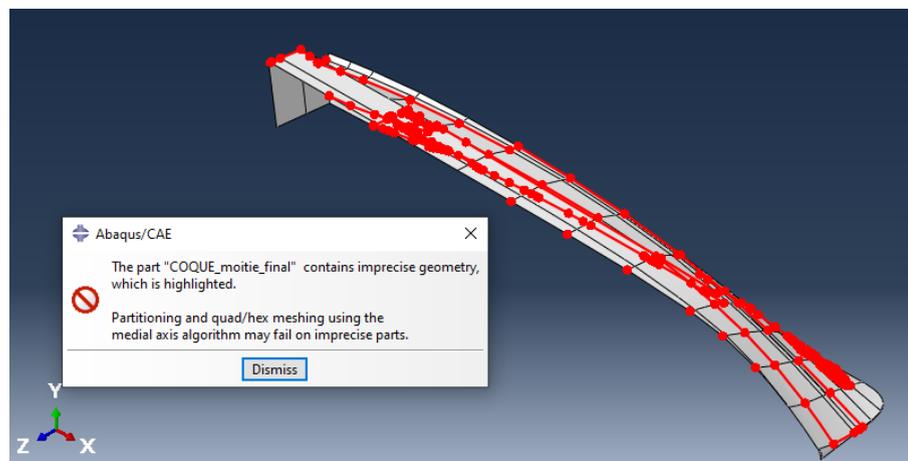


FIGURE 15 – Géométrie imprécise

Afin d'améliorer la géométrie, étant donné que certains éléments classés "pauvres" ont été trouvés, les mesures suivantes ont été prises :

- **Tools -> Geometry Edit -> Category : edge -> Remove redundant entities**
- **Tools -> Geometry Edit -> Category : edge -> Merge** (pour créer une seule arête droite lorsqu'il y a des irrégularités lors de l'importation du fichier)

Ensuite, un plan de référence XZ a été créé dans la symétrie centrale de la pièce et avec l'outil «**Miroir**», la pièce complète est obtenue. Enfin, une surface fermée est créée avec l'outil des bords de recouvrement afin que l'enveloppe ne se déforme pas librement et maintienne une rigidité de l'enveloppe (**Tools -> Geometry Edit -> Category : Face -> Cover Edges**). L'image de la géométrie finale est présentée dans la Figure 16. Dans le cas contraire, il faudrait ajouter les raidisseurs correspondants, et d'autres éléments, ce

qui rendrait la géométrie beaucoup plus compliquée à concevoir.

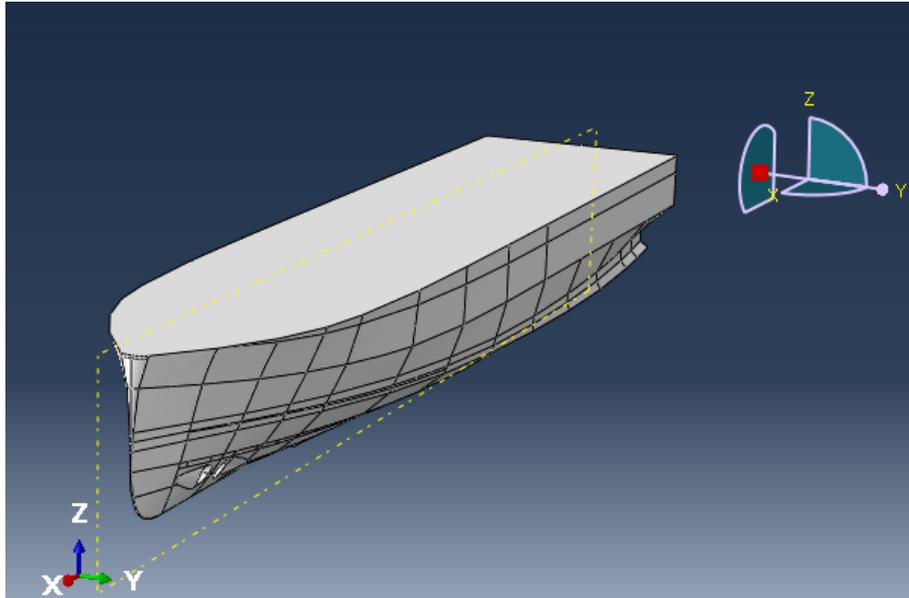


FIGURE 16 – Géométrie finale bateau

2.2 Analyse structurale

Dans cette section, les étapes suivies pour la création de l'analyse structurale du navire avec le logiciel Abaqus seront expliquées. Il faut noter que le fichier Catia V5 contient les unités en mm, donc les entités transmises seront le SI en mm (mm, tonne, MPa, s, tonne/mm³).

Le modèle global doit représenter la rigidité globale de manière satisfaisante par rapport à l'objectif de l'analyse. Le modèle global est utilisé pour calculer les contraintes globales nominales dans les éléments primaires loin des zones avec des concentrations de contraintes. Dans les zones où les contraintes locales doivent être évaluées, le modèle global fournit les déformations utilisées comme conditions limites pour les modèles locaux.

Tout d'abord, dans le module «Property», nous allons créer le matériau correspondant au navire. Dans ce cas, il s'agit d'un **composite monolithique multiaxial en résine polyester avec des fibres de renforcement en verre**. L'épaisseur de chaque couche est de 1 mm. Chaque couche contient 8 plis orientés comme indiqué sur la figure. Au total, l'enveloppe du bateau est composée de 12 couches d'une épaisseur totale de 12 mm.

Pour le matériau (verre-polyester), nous utiliserons les valeurs suivantes, comme indiqué dans le tableau 3 :

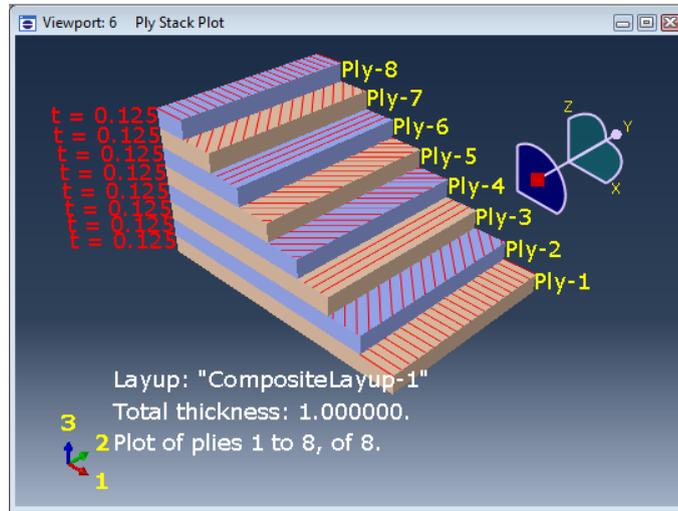


FIGURE 17 – Orientation et plis des fibres

E1 (GPa)	E2(GPa)	E3(GPa)	Nu12	Nu13	Nu23	G12(GPa)	G13(GPa)	G23(GPa)
40	12	12	0,28	0,28	0,5	4,34	4,34	2,8

TABLE 3 – Propriétés du matériel : E-glass/polyester laminé

Pour créer la couche composite, il faut sélectionner «Create Composite Layup» (8 folds and Elemet type : Conventional Shell) où on peut sélectionner la région, le matériau, l'épaisseur et l'orientation de chaque couche comme le montre l'image 18. Les éléments ont une longueur d'environ 1265 mm par rapport à l'épaisseur de 12 mm du navire, de sorte que l'hypothèse de prendre des éléments de type coque est appropriée pour cet état de contrainte [1].

Ce qui est très important dans cette section, c'est de donner au matériel une orientation correcte. Nous choisirons l'axe 1 comme direction normale. Les orientations de matériau que l'on attribue à une pièce ou à une région sont automatiquement attribuées à toutes les instances de cette pièce dans l'assemblage. Dans le module «Part», **Attribute -> Material orientation; Edit material orientation -> Discrete; Edit Discrete Orientation -> Normal Axis direction et primary axis**; la normale doit être positionnée correctement pour tous les surfaces de la coque (figure 19).

Ensuite, une section est créée où un comportement global de la pièce a été défini : **Homogène, Coque** (Élément de surface avec rigidité bi-axiale et dans le plan de l'élément de plaque) avec une épaisseur totale de 12mm, et la section est assignée à la CAO.

Dans le module «Mesh», en termes de maillage, la plupart de la structure est composée d'éléments quadrilatéraux (S4R) ont été définis pour une maillage structurel, mais dans certaines régions, ce type de maillage n'a pas été possible et des éléments triangulaires linéaires (S3) avec une maillage libre [10]. Il convient de souligner que les éléments qua-

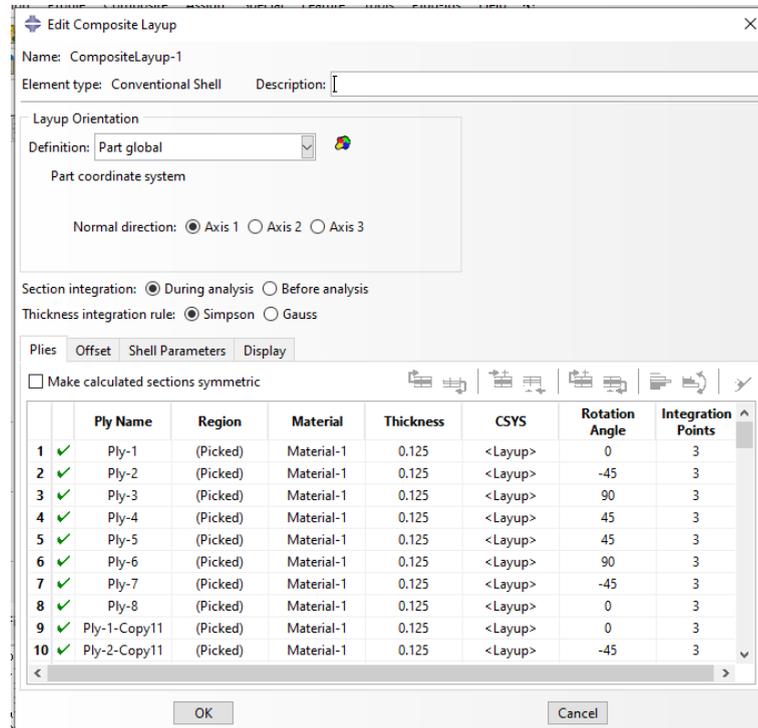


FIGURE 18 – Composite Layup

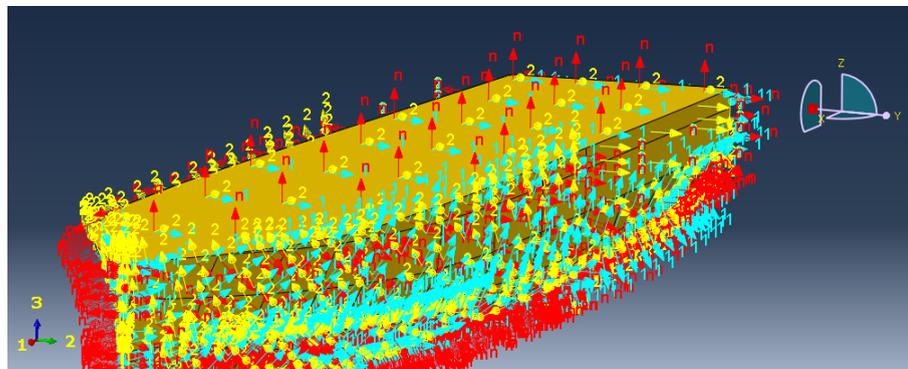


FIGURE 19 – Orientation du matériel

drilatéraux sont préférés aux éléments triangulaires car ces derniers sont des éléments à déformation constante et peuvent donner des résultats moins précis que les éléments. Le maillage pourrait encore être affiné, mais pour l'instant, l'essentiel est ailleurs et le maillage sera donc laissé plutôt automatique comme le montre l'image.

Dans le module "Interaction", les différents éléments filaires seront créés où la fibre optique sera simulée avec le réseau de Bragg qui mesurera une déformation. La déformation est équivalente à un déplacement par unité de longueur pour chaque réseau de Bragg dans les 8 fibres optiques (4 de chaque côté du navire). Pour les fibres optiques où il y a 11 FBG, la longueur entre chacun d'eux est de 127 ± 5 ycm et pour les fibres optiques avec 12 FBG, l'espacement est de 126 ± 5 . Ces informations sont données dans les fiches

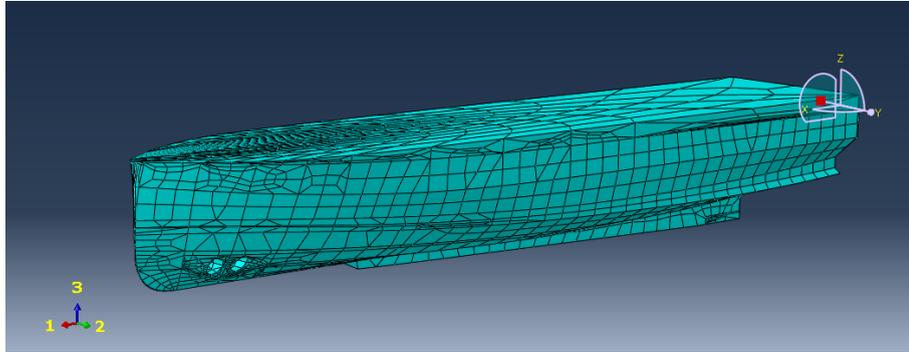


FIGURE 20 – Le maillage de la Coque

techniques de l'annexe 3, cependant, nous avons travaillé avec les dessins simplifiés fournis par iXBlue, donc ces chiffres peuvent varier un peu plus. Le nombre de FBGs dans les dessins ne correspond pas non plus aux fiches techniques, au lieu de 11, 12 ont été simulés, mais l'erreur est assumée comme faisant partie des simplifications.

La procédure est la suivante :

- 1. Créer une caractéristique de fil, avec les différentes paires de nœuds dans les sections précédemment modifiées : **Connecteur -> Assignment -> Créer**
- 2. Chaque connecteur est fixé à la surface de la coque comme un élément qui se déforme axialement dans la direction U1.

Dans le module «Load», nous allons imposer le déplacement longitudinal à chaque élément, comme le montre la figure 22. Sélectionnez **BC-> Créer -> Déplacement du connecteur**. Il faut garder à l'esprit que l'entrée est un déplacement et non une déformation, donc les valeurs devraient être recalculées en fonction de la longueur entre deux capteurs de Bragg [2].

Le déplacement axiale d'un élément filière répond aux équations suivantes :

$$u_1 = l - l_0 \quad (5)$$

$$l = \| x_b - x_a \| \quad (6)$$

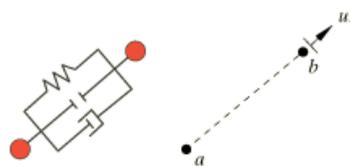


FIGURE 21 – Représentation du connecteur axial

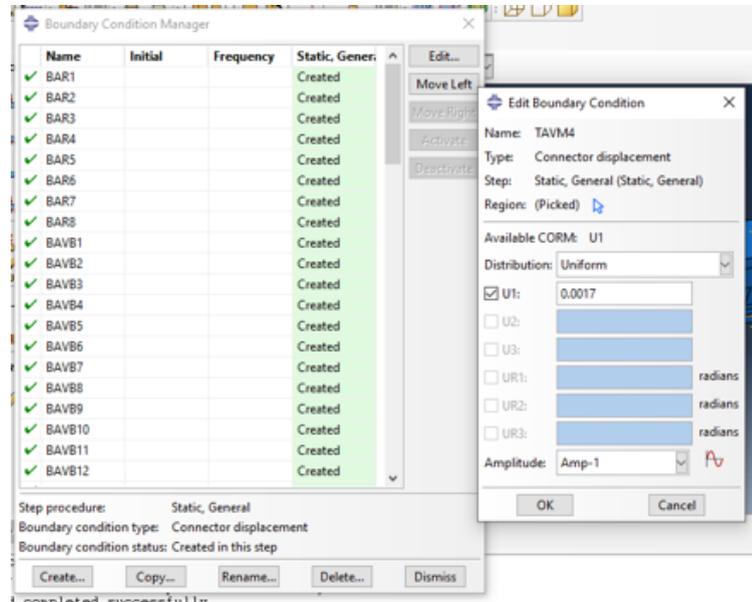


FIGURE 22 – BC : Déplacements des connecteurs

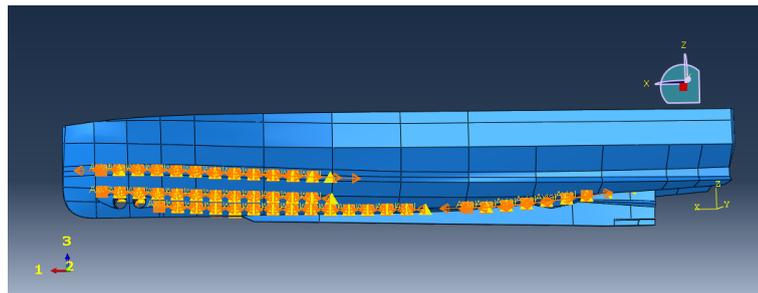


FIGURE 23 – Représentation des conditions de déplacements des connecteurs

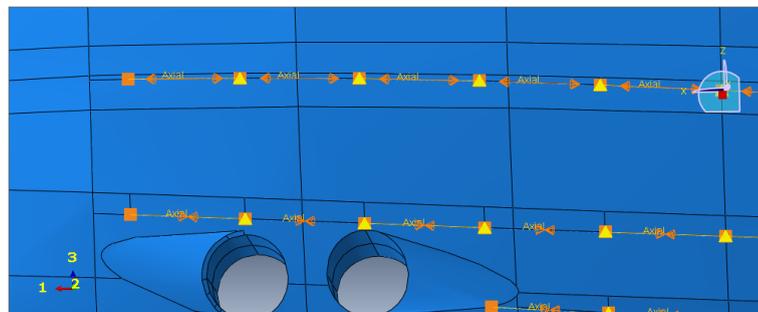


FIGURE 24 – Détail de la représentation des conditions déplacements des connecteurs

Les conditions aux limites du modèle structural global doivent refléter des supports simples qui éviteront les contraintes intégrées. Les conditions aux limites doivent être spécifiées uniquement pour éviter les mouvements de corps rigides. Les forces de réaction dans les limites doivent être minimisées, et les points de fixation doivent être situés loin des zones d'intérêt, car les charges appliquées peuvent entraîner un déséquilibre dans le modèle. Les points de fixation sont souvent appliqués sur l'axe central, près des extrémités

arrière et avant.

Dans le module «Step», on peut créer le type de modèle de calcul souhaité. Dans le cas du navire, nous avons effectué les analyses **Linéaire, Statique** pour simplifier le calcul.

Dans le module «Job», en prenant en compte les exigences de sortie de champ, nous sélectionnons le type de réponse que nous voulons (S,U,E), en particulier U1.

Dans le module «Visualisation», nous pouvons voir le résultat de la déformation du navire dans le sens longitudinal. Une erreur courante s'est produite en raison du mappage du **Hourglass mode**. Il s'agit d'un type d'instabilité dans le maillage qui affecte les éléments d'intégration réduite continue de premier ordre et les éléments de coque à réintégration réduite, et qui fait qu'ils ne génèrent aucune énergie de contrainte au point d'intégration. Pour résoudre ce problème, on sélectionne un facteur de déformation de valeur égale à 1 (**Common plot options -> Deformation Scale Factor -> Uniform =1**).

Une fois exécuté et le travail terminé, nous pouvons mesurer le déplacement relatif de chaque élément en cliquant sur **Query -> Distance** et en effectuant l'extraction entre la distance finale et initiale, comme le montre l'image.

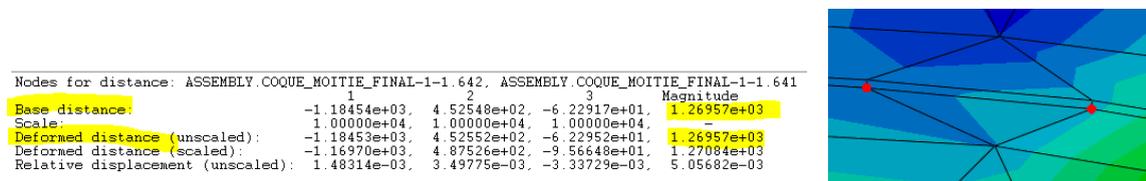


FIGURE 25 – Calcul du déplacement relatif

Les résultats des 3 simulations sont présentés ci-dessous. En tant que résumé des sections suivantes, l'organigramme suivant explique la ligne de travail établie pour justifier les modèles de contrainte du navire :

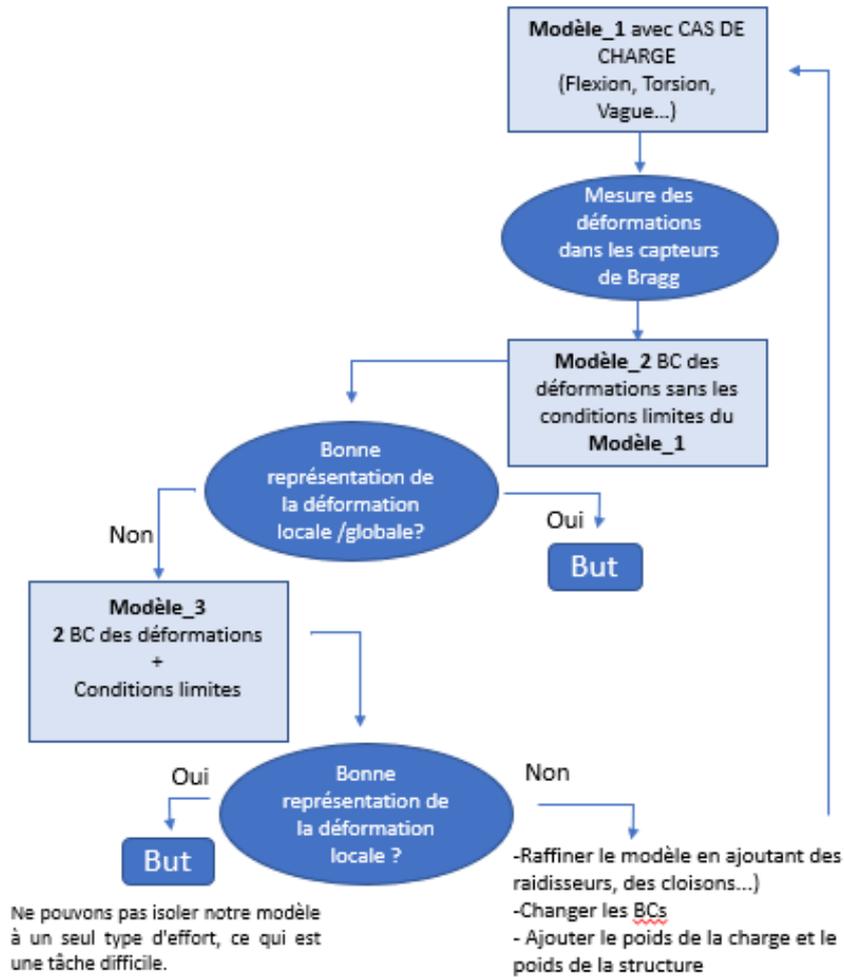


FIGURE 26 – Résumé de la procédure de la première tâche

2.2.1 Flexion

2.2.1.1 Modèle 1 : Charge en flexion

Le navire fléchit de deux manières différentes : il s'affaisse et s'accroche. Une charge de 1000N (vers -z) a été appliquée sur chaque côté du navire. Comme conditions aux limites, un encastrement a été appliqué au fond de la poupe et un support simple ($U_3=0$) au fond de la proue, comme le montre l'image 27. Ces déplacements sont ensuite mesurés pour chacun des deux réseaux de Bragg dans les fibres optiques, comme indiqué dans le tableau 4.

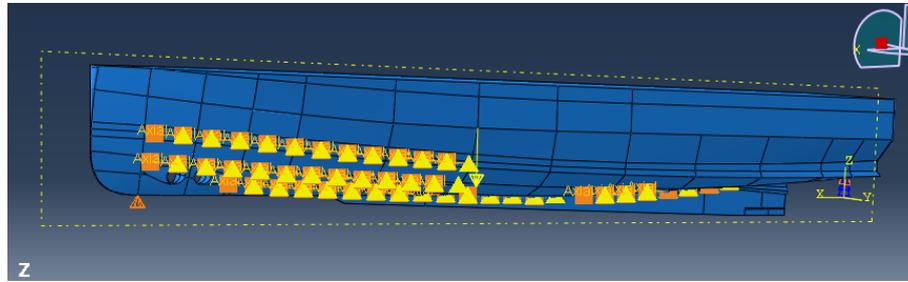


FIGURE 27 – Représentation du modèle de chargement en flexion

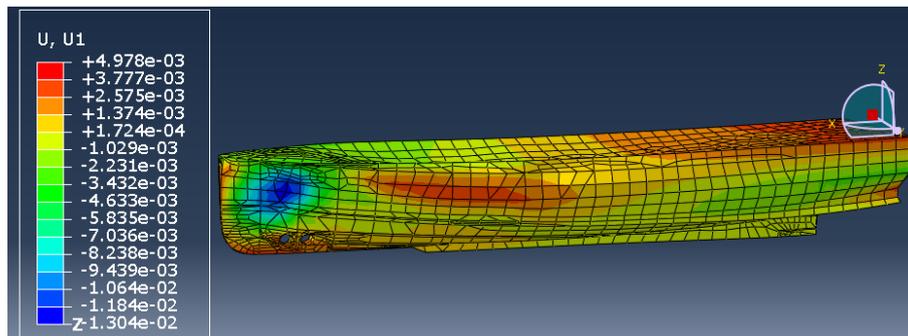


FIGURE 28 – Représentation de la déformation longitudinale de la flexion

BABOR				TRIBORD			
AV HAUT	AV MILIEU	AV BASS	AR BASS	AV HAUT	AV MILIEU	AV BASS	AR BASS
BAVHA 6.56915e-01	BAVMA 8.47778e-02	BAVBA -1.82787e+01	BARBA -7.66045e-01	TAVHA 8.41036e-02	TAVMA -8.97706e-01	TAVBA -1.64904e+01	TARBA -7.50300e-01
BAVHB -3.05977e-01	BAVMB 2.28311e+00	BAVBB 8.60214e+00	BARBB -9.65798e-01	TAVHB -4.34760e-01	TAVMB 3.52017e+00	TAVBB 9.51043e+00	TARBB -9.64623e-01
BAVHC -2.70601e+00	BAVMC -7.63638e+00	BAVBC 1.26674e+01	BARBC -1.24365e+00	TAVHC -3.87882e+00	TAVMC -9.55575e+00	TAVBC 1.15299e+01	TARBC -1.24298e+00
BAVHD 2.52861e-01	BAVMD -1.40088e+01	BAVBD 4.37055e+00	BARBD -1.70993e+00	TAVHD -5.94884e-01	TAVMD -1.40263e+01	TAVBD 4.80809e+00	TARBD -1.72736e+00
BAVHE -5.91029e+00	BAVME -2.51531e+01	BAVBE 1.47311e+00	BARBE -2.30639e+00	TAVHE -6.05313e+00	TAVME -2.39062e+01	TAVBE 1.37810e+00	TARBE -2.34164e+00
BAVHF -4.69489e+00	BAVMF 1.41800e-01	BAVBF 7.62914e-01	BARBF -3.77909e-0	TAVHF -4.54972e+00	TAVMF 1.27697e+00	TAVBF 7.55638e-01	TARBF -4.17471e-01
BAVHG -4.38284e+00	BAVMG 1.21390e+01	BAVBG 5.09847e-01	BARBG 1.09298e+00	TAVHG -4.64365e+00	TAVMG 1.05829e+01	TAVBG 5.74961e-01	TARBG 1.10036e+00
BAVHH -6.79461e-01	BAVMH 8.76439e+00	BAVBH 3.94521e-01	BARBH 2.26815e+00	TAVHH -7.82618e-01	TAVMH 9.30894e+00	TAVBH 3.62967e-01	TARBH 2.31825e+00
BAVHI 3.46642e-02	BAVMI 6.41573e+00	BAVBI 2.93226e-01		TAVHI 2.85614e-01	TAVMI 6.36898e+00	TAVBI 2.98411e-01	
BAVHJ 2.20899e+00	BAVMJ 4.12240e+00	BAVBJ 3.01104e-01		TAVHJ 2.15485e+00	TAVMJ 6.36898e+00	TAVBJ 3.25661e-01	
BAVHK 1.33857e+00	BAVMK 3.05723e+00	BAVBK 7.02782e-02		TAVHK 1.45960e+00	TAVMK 3.02304e+00	TAVBK 1.90020e-02	
BAVHL 8.29180e-01	BAVML 2.34456e+00	BAVBL 1.49189e-01		TAVHL 8.82858e-01	TAVML 2.28360e+00	TAVBL 1.97239e-01	
		BAVBM -1.02625e-01				TAVBM -1.14975e-01	
		BAVBN -6.92480e-01				TAVBN -7.26549e-01	

TABLE 4 – Mesures des déplacements en mm des 8 fibres optiques pour le cas en flexion

Pour faciliter l'identification de chacune d'entre elles pour les huit fibres optiques, une première colonne a été créée avec la position et une seconde avec la valeur de ΔL . Par exemple BAVHA signifie B=Bâbord AV=Avant H=Haut et la lettre suivante fait appel à l'ordre A=1, B=2, C=3, etc.

2.2.1.2 Modèle 2 : Déplacements

Un autre modèle a été créé sans les charges et conditions précédentes mais avec les déplacements notés ci-dessus. Il est très clair qu'avec les fibres optiques équipées de réseaux

de Bragg, il est impossible de simuler une déformation globale ou de savoir quel cas de charge est concerné. Nous obtenons seulement une approximation de la déformation du mouvement dans la zone, ce qui nous donne quelques informations.

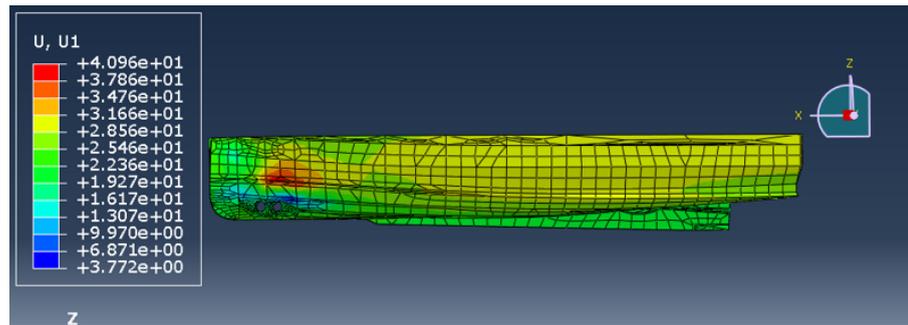


FIGURE 29 – Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en flexion

2.2.1.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle

Dans le troisième modèle, les charges du premier modèle plus l'imposition de déplacements seront introduites pour voir si nous pouvons nous rapprocher de la déformation réelle. Malgré cela, nous pouvons voir que si nous connaissons le type de contrainte, l'information sur le déplacement correspondrait bien aux données du premier modèle.

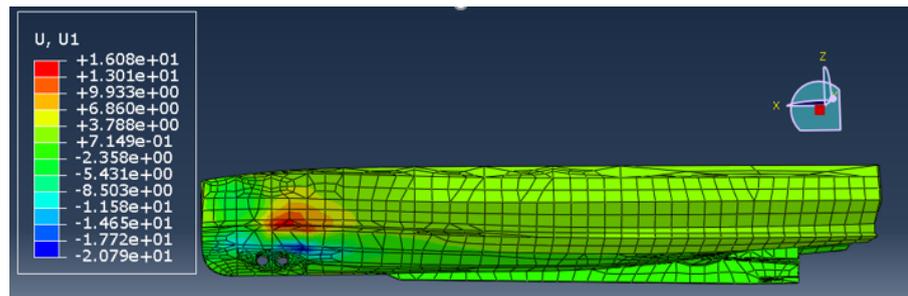


FIGURE 30 – L'imposition des déplacements et des conditions aux limites pour le cas en flexion.

2.2.2 Torsion

Nous avons simulé un autre cas de charge que le navire pourrait subir, la torsion étant représentée sur la figure 31, et nous allons procéder comme avant.

2.2.2.1 Modèle 1 : Charge en torsion

Pour le modèle de torsion, il a été choisi d'encasturer toute la zone de la poupe et de fixer le bord de la proue à un point de référence situé à $45E+03$, 0 , $3E+03$ de l'origine

des coordonnées. On suppose que le mât d'étrave est un élément rigide, ce qui constitue une bonne approximation. Deux moments opposés de valeur $1E+11$ N mm sont ensuite appliqués. Bien que cette valeur puisse sembler très élevée, elle a été exagérée afin d'obtenir des déplacements suffisamment importants pour qu'Abaqus prenne en compte les décimales et n'arrondisse pas le résultat à 0.

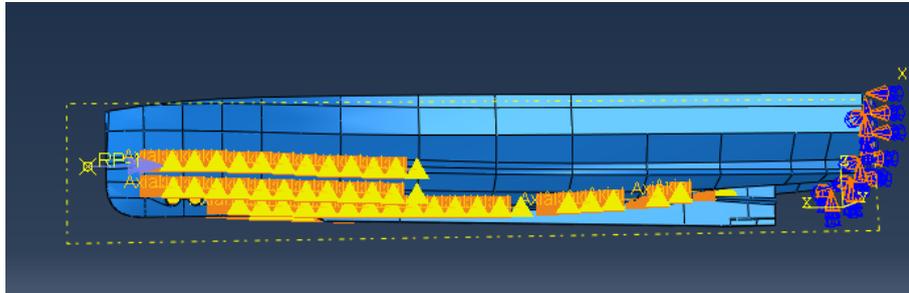


FIGURE 31 – Représentation du modèle de chargement en torsion

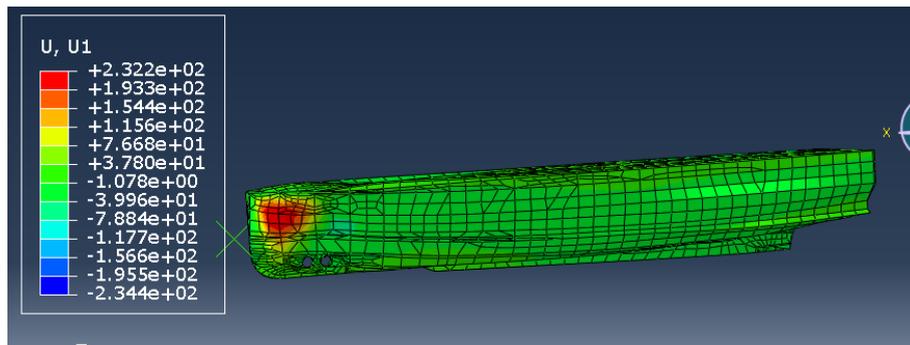


FIGURE 32 – Représentation de la déformation longitudinale de la torsion

2.2.2.2 Modèle 2 : Déplacements

En appliquant à nouveau les déplacements mesurés du 1er modèle, on obtient cette déformation globale. On constate clairement qu'il ne suffit pas avec les données des 8 fibres optiques d'approximer un modèle théorique de déformation, car les valeurs des déformations ne correspondent pas entre les deux modèles.

2.2.2.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle

Là encore, comme dans le cas de la flexion, il faut connaître les conditions limites du navire pour obtenir une déformation globale cohérente à partir de quelques mesures de déformation locale.

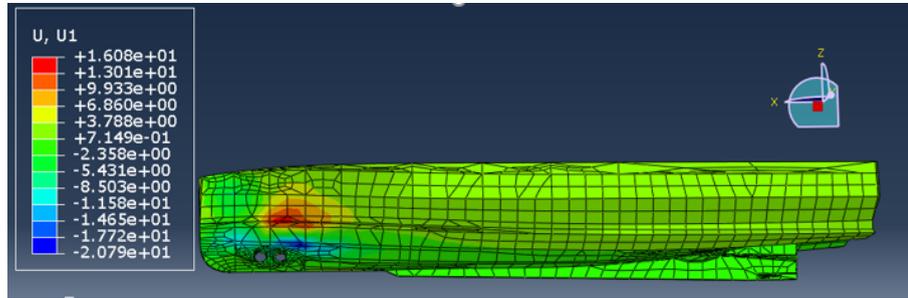


FIGURE 33 – Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en torsion

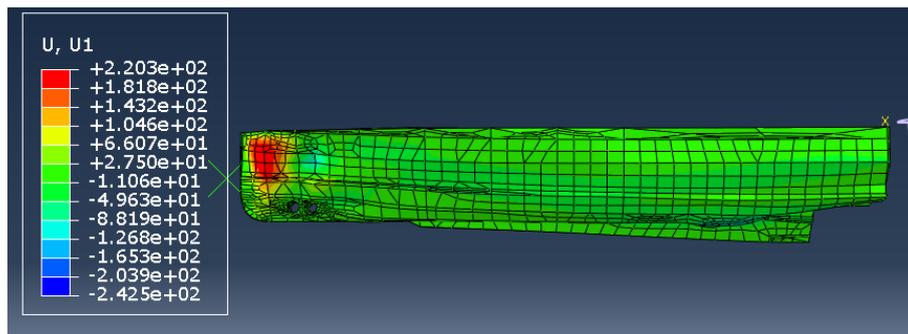


FIGURE 34 – L'imposition des déplacements et des conditions aux limites pour le cas en Torsion

2.2.3 Simulation d'une vague

L'objectif de cette section est de simuler la force d'une vague sur la structure. Pour ce faire, une pression est appliquée dans un plan qui coupe la pièce en fonction de sa hauteur. En appliquant une pression normale à plusieurs charges. Le modèle est présenté dans la figure 35. L'objectif de la simulation d'une vague est d'approcher un modèle de charge plus réaliste que les précédents parce que les contraintes sont réparties plus uniformément. Cependant, l'application du calcul de l'équation de charge et le choix des BC n'est pas une tâche simple. Les BC et les charges du site ont été appliquées de manière approximative mais sans aucune référence réelle.

2.2.3.1 Modèle 1 : Pression normale

Il a été décidé de relier la zone centrale au point de gravité et d'encasturer ce pont en partant du principe que le navire aura plus de rigidité au centre de la structure. Cela signifie que la zone proche de l'encastrement ne correspond pas à une déformation réelle (car elle est trop limitée), mais qu'une fois que nous nous éloignons de ce point, elle correspondra davantage à la déformation. Le centre de masse est situé aux coordonnées suivantes : 19857.14, -4.97e-04, 3541.45 en mm.

Nous savons que la pression hydrodynamique sera maximale à la partie la plus basse

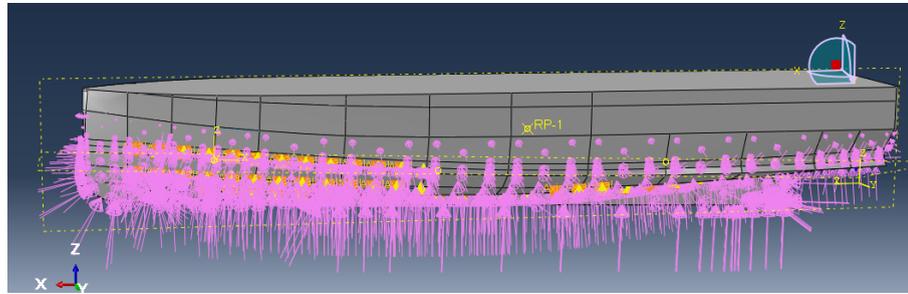


FIGURE 35 – Représentation du modèle de chargement du pression normale

du bateau et diminuera jusqu'à la ligne de perte de contact avec l'eau (3.2m du fond). Donc, pour appliquer la pression, un champ analytique a été créé, avec une valeur de : $2000-Z$.

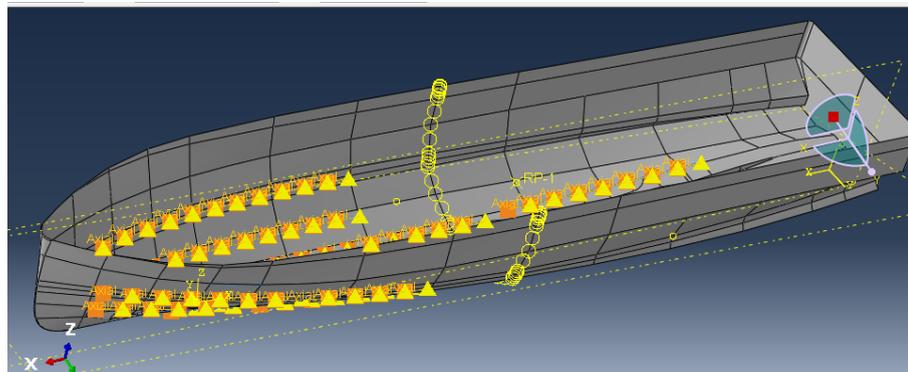


FIGURE 36 – Contrainte rigide de type coude pour joindre la section au centre de gravité (encastre)

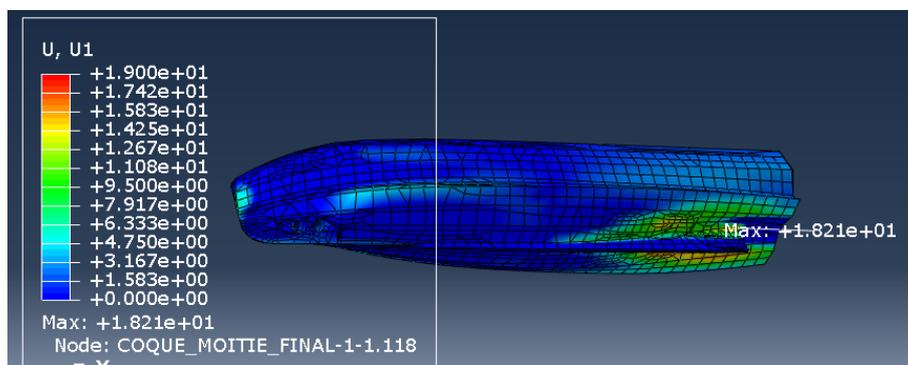


FIGURE 37 – Représentation de la déformation longitudinale du pression normale

2.2.3.2 Modèle 2 : Déplacements

En appliquant à nouveau les déplacements mesurés du 1er modèle, on obtient cette déformation globale.

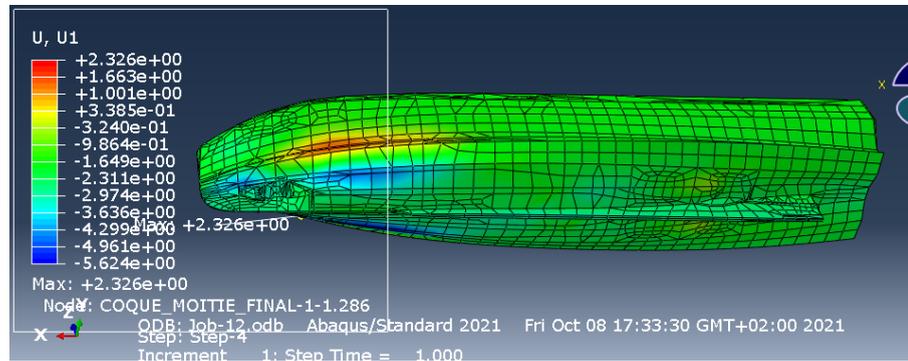


FIGURE 38 – Déformé avec seulement les données de déplacement des 8 fibres optiques sans conditions limites pour le cas en pression normale

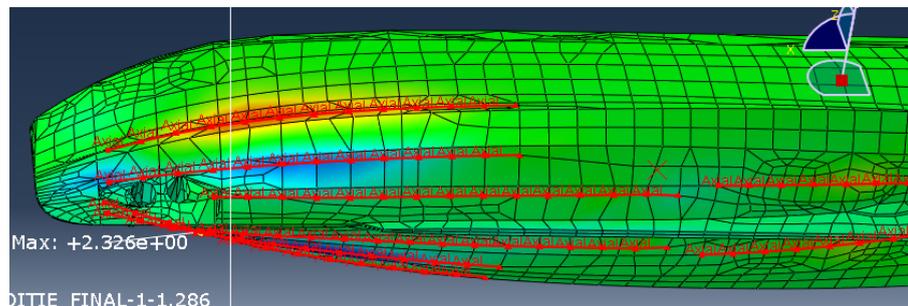


FIGURE 39 – Détail de la figure 38 avec les fibres optiques en rouge

2.2.3.3 Modèle 3 : Déplacements + Conditions aux limites du premier modèle

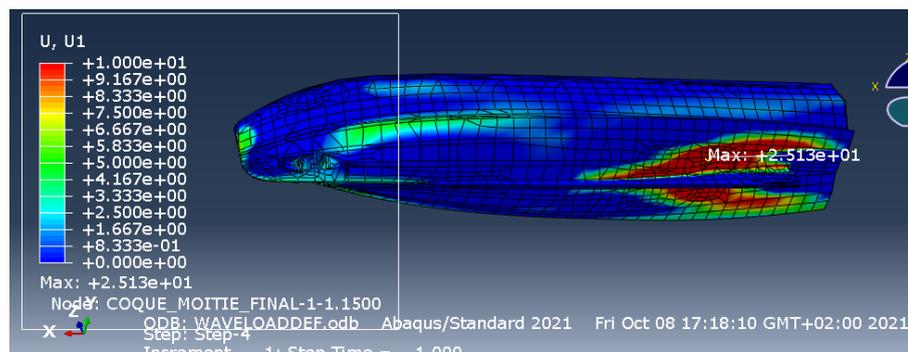


FIGURE 40 – Représentation de la déformation longitudinale du modèle 3

On peut voir, comme dans les autres cas, comment la déformation correspond au premier modèle. En d'autres termes, une fois que le type de contrainte subie par le navire est connu, l'imposition des déplacements n'est pas redondante.

2.3 Amélioration du modèle par l'ajout de raidisseurs

Ensuite, comme nous avons vu que les déformations sont très localisées dans la partie avant du bateau, et afin de se rapprocher de la réalité et d'avoir un modèle plus proche du

modèle réel, nous allons ajouter quelques éléments qui apportent de la rigidité au bateau, comme les cloisons et les raidisseurs horizontaux et verticaux.

Le fichier `Reseau_Bragg_RevD.CATPart` a été utilisé pour créer une série de raidisseurs de navires où les différentes chaînes longitudinales et transversales sont représentées (figure 41). Un CATproduct a été créé avec le fichier original `CAO_COQUE_moitie.CATPart` et `Reseau_Bragg_RevD.CATPart` afin de découper la structure de manière très simplifiée. De nouveau, la pièce a été importée dans Abaqus et les mêmes étapes et ajustements que le modèle simple sont été appliqués. Pour couvrir le trou de la quille inférieure **Geometry Edit -> Face -> Blend** a été utilisé. Pour créer les différentes stringers dans le module «Propriété», sélectionnez **Special -> Stringer -> Create** et en choisissant les axes créés à partir de la nouvelle géométrie modifiée dans Catia, comme on peut le voir dans la figure 42.

Les éléments de surface sont généralement positionnés dans le plan médian des composants correspondants. Pour structures à parois minces, les éléments peuvent également être disposés au niveau des lignes de moulage, à titre d'approximation. Une section poutre avec profil rectangulaire est attribuée aux raidisseurs, ayant les dimensions suivantes, pour a en x et b en y dans le cas de $a=253\text{mm}$ et $b=180\text{mm}$ longitudinaux pour $a=370\text{mm}$ et $b=634\text{mm}$ transversaux, compte tenu de la bonne orientation de la section.

Ces options permettent de créer des éléments supplémentaires de poutre (longeron) qui partagent des nœuds avec le maillage sous-jacent. Ils n'ont pas besoin d'être maillés séparément et aucun lien n'est requis. Les propriétés peuvent être définies de la même manière que pour les éléments de coque ou de poutre ordinaires.



FIGURE 41 – Photographie de la structure interne du navire

Ensuite, les panneaux transversaux ont été créés et on leur a attribué une section de 106 mm d'épaisseur et le même matériau que le reste de la structure. Puis, ce modèle va être comparé avec le cas de torsion, avec les mêmes conditions aux limites, pour voir si les

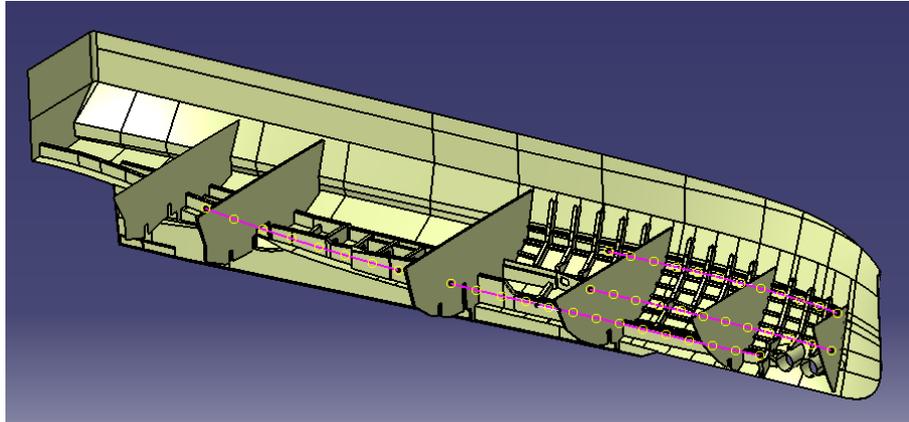


FIGURE 42 – Représentation de la moitié du modèle CAO de la ligne de navigation et des raidisseurs longitudinaux et transversaux.

informations de déformation de notre modèle peuvent être plus proches des informations théoriques.

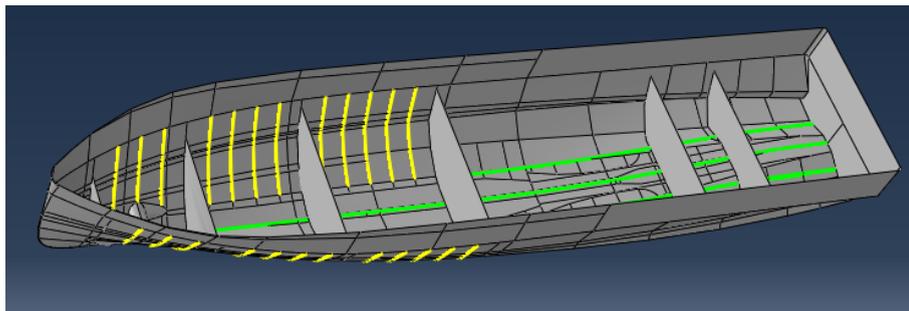


FIGURE 43 – Cadres transversaux et longitudinaux en vert et jaune respectivement, et les vannes

Cependant, une fois le nouveau modèle relayé, il semble y avoir un problème dans le maillage, peut-être dû à une imprécision dans la géographie qui rend impossible toute simulation. Le mieux serait de réaliser cette partie pour voir si nous pouvons obtenir des modèles uniquement avec les données de déformation sans connaître les conditions aux limites et voir si cela est plus proche de notre modèle théorique.

2.4 Automatisation de la saisie des données dans Abaqus avec Python

Comme mentionné ci-dessus, les données que nous recevons de la navire grâce au logiciel Catman sont un grand nombre de déformations correspondant à chaque capteur de Bragg en fonction du temps. Même si on ne parvient pas à définir notre déformation globale, on dispose d'informations sur les déformations locales. Afin d'automatiser les simulations dans Abaqus et d'automatiser l'entrée des données, une fonction a été programmée dans le logiciel Anaconda, qui permet d'extraire directement les données (déformations ponctuelles) et de les importer dans Abaqus à partir d'un script Python.

La logique de notre problème est illustrée dans le tableau suivant, où u_{i1}, u_{i2} , etc sont des sont les déformations pour chaque i =Step (ou simulation).

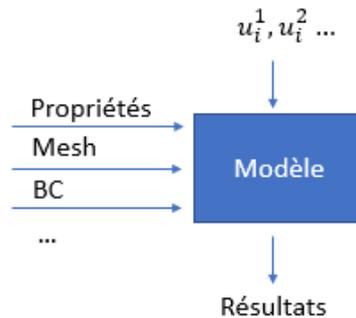


FIGURE 44 – Entrée-sortie Abaqus

Dans la figure suivante, nous pouvons voir un exemple des données Catman exportées que nous pouvons facilement regrouper dans un fichier texte ou dans des fichiers Excel en indiquant la position et la valeur de la déformation. La première colonne fait référence au numéro de Step ou de simulation.

Timestamp	Position	Valeur (mm)
1	BAVHA	0.0000789
1	BAVHB	-3.05977e-01
1	BAVHC	-2.70601e+00
1	BAVHD	2.52861e-01
1	BAVHE	-5.91029e+00
1	BAVHF	-4.69489e+00
...
40	BAVBD	4.37055e+00
40	BAVBE	1.47311e+00
40	BAVBF	7.62914e-01
40	BAVBG	5.09847e-01
40	BAVBH	3.94521e-01
40	BAVBI	2.93226e-01
40	BAVBJ	3.01104e-01
40	BAVBK	7.02782e-02
40	BAVBL	1.49189e-01

FIGURE 45 – Données exportées

La fonction suivante a été programmée dans Anaconda pour créer un dictionnaire avec chaque groupe de données à un moment donné. Pandas est une boîte à outils populaire d'analyse de données basée sur Python qui peut être importée à l'aide de `import pandas pd`. Il présente une gamme variée d'utilitaires, allant de l'analyse de plusieurs formats de fichiers à la conversion d'un tableau de données entier en un tableau matriciel NumPy. Le dictionnaire est composé de deux paires de données : d'une part la position de la donnée et d'autre part sa valeur. Le dossier plus complet est joint en annexe 1.

```

1
2 >>> import pandas as pd
3 >>> pd.read_excel('Valeurs.xlsx')
4 >>> df = nessie.read_excel('Valeurs.xlsx';sheetname='Feil1')
5 >>> df.loc['pos', 'val']
6 >>> df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
7 { 'BAVHA': 0.0000789, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
    0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
    'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
    1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, nan: nan, ... }
8 >>> pos = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
9 >>> pos
10 { 'BAVHA': nan, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
    0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
    'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
    1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, nan: nan, ... }
11 >>> pos= df[['pos', 'val']].set_index('val').to_dict()
12 >>> pos= df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()
    
```

Depuis ABAQUS, une fois le modèle créé (avec son matériau, son maillage, ses conditions limites, etc), nous pouvons exporter le fichier python en cliquant sur -> File Abaqus PDE. Après avoir vérifié que cela fonctionne en Anaconda, la fonction suivante est ajoutée au script Phyton d'Abaqus. L'annexe 2 montre la programmation plus détaillée, en tenant compte du fait que seule la partie relative aux conditions aux limites, spécifiquement la BC de déplacement est montrée, car le fichier entier est trop long.

```

1
2 def set_boundaries(BAVHA,BAVHB, BAVHC, BAVHD, BAVHE, BAVHF,BAVHG, ...
    BAVHH, BAVHI, BAVHJ,BAVHK,BAVHL,...):
3     mdb.Model(name='Def-FLEXION', objectToCopy=mdb.models['Model-1'])
4     mdb.models['Def-FLEXION'].materials['Material-1'].density.setValues
5     (table=((
6         0.0077, ), ))
7     mdb.models['Def-FLEXION'].materials['Material-1'].elastic.setValues
8     (table=((
9         60.0, 0.3), ), type=ISOTROPIC)
10    del mdb.models['Def-FLEXION'].parts['COQUE'].compositeLayups
11    ['CompositeLayup-1']
12    del mdb.models['Def-FLEXION'].parts['COQUE'].materialOrientations[0]
13
14    mdb.models['Def-FLEXION'].rootAssembly.regenerate()
15    mdb.models['Def-FLEXION'].boundaryConditions['BAVHA'].setValues
16    (u1=dict_of_bound['BAVHA'])
17    mdb.models['Def-FLEXION'].boundaryConditions['BAVHB'].setValues
18    (u1=dict_of_bound['BAVHB'])
19    mdb.models['Def-FLEXION'].boundaryConditions['BAVHC'].setValues
20    (u1=dict_of_bound['BAVHC'])
21
    
```

```

22  {Pour tout les BC}
23
24  ...
25
26  importation valeurs
27  creation of valeurs dictionary
28  import pandas as pd
29  dict_of_steps = {}
30
31  df = pd.read_excel(r'C:\Users\olopezah\Desktop\NESSIE\LANA\Valeurs.
32  xlsx', sheet_name='Feuil2')
33
34  step1 = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
35  dict_of_steps['pos'] = pos
36
37  step2 = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
38  dict_of_steps['fibre'] = pos
39
40  ...  {pour toutes les Ã©tapes ou analyses souhaitÃ©es ; nous pouvons ...
        crÃ©er diffÃ©rents didacticiels qui seront introduits dans les ...
        diffÃ©rentes BC.}
41
42  for all step in dict_of_steps:
43      mdb.models['Def-Flexion'].boundarweConditions = ...
        set_boundaries(dict_of_bound)
44      mdb.Job(atTime=None, contactPrint=OFF, description='', echoPrint=OFF,
45      explicitPrecision=SINGLE, getMemoryFromAnalysis=True, ...
        historyPrint=OFF,
46      memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, model='Def-FLEXION', ...
        modelPrint=OFF,
47      multiprocessingMode=DEFAULT, name='Def-FLEXION_'+str(step), ...
        nodalOutputPrecision=
48      SINGLE, numCpus=1, numGPUs=0, queue=None, resultsFormat=ODB, ...
        scratch='',
49      type=ANALYSIS, userSubroutine='', waitHours=0, waitMinutes=0)
50      mdb.jobs['Def-FLEXION'].submit(consistencyChecking=OFF)
    
```

3 Tâche 2 : Nouveau design du capot de protection de la fibre optique

Le vide dans le moule est une étape critique et la fibre optique est violemment comprimée, ce qui provoque une forte flexion jusqu'à la rupture éventuelle. A cela s'ajoutent les problèmes créés par la résine, sa diffusion à travers la préforme entraînant la contamination des extrémités des fibres optiques. En outre, à l'air libre, les fibres optiques sont soumises à des contraintes de fatigue qui provoquent des ruptures à long terme. Sur la base de ces résultats, un bouclier CAO a été conçu pour protéger la fibre optique aux points d'extraction. Il est constitué d'un boîtier dans lequel est logée la fibre optique. La protection est bloquée par un joint de mastic pour éviter toute intrusion de résine dans la fibre optique. L'assemblage se trouve sous le couvercle au moment de la infusion de la demi-coque. Cette protection sera collée sur le matériau composite au niveau du point d'extraction de la fibre optique.

Malgré de multiples manipulations que l'on peut qualifier de rudes, la fibre optique n'a pas été cassée lors de son installation. Cette observation est réconfortante sur la résistance mécanique des fibres optiques, qui, bien qu'elles ne soient composée que de verre, n'en restent pas moins robustes.

La figure 46 montre une petite simulation de la façon dont le capot de protection est installé sur le matériau pour fixer la sortie de la fibre optique au câble qui est connecté à l'ordinateur pour extraire les données.

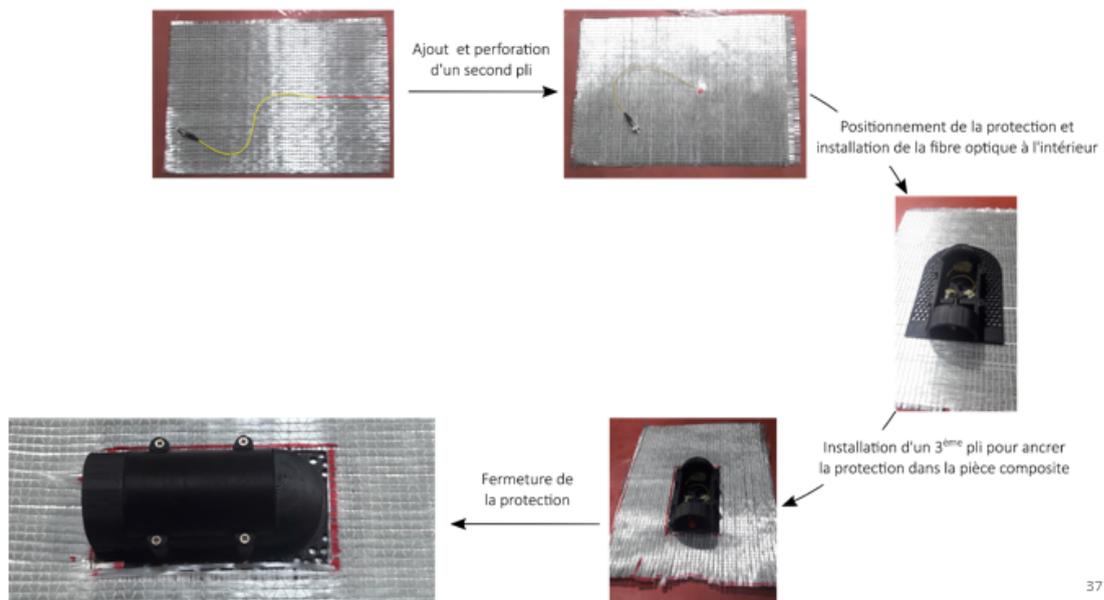


FIGURE 46 – Installation de la protection sur le stratifié

Quant au dernier modèle de capot de protection, les remplissages ont une épaisseur va-

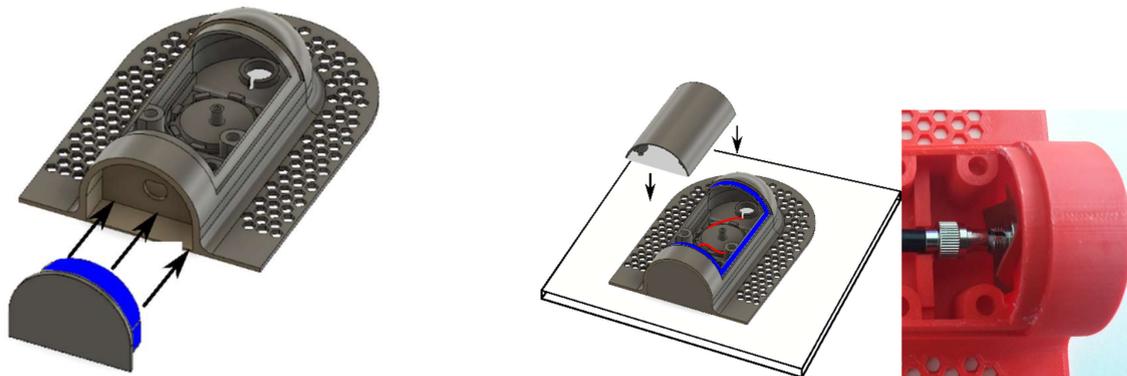


FIGURE 47 – Capot de protection - pistes d'amélioration

riable pour améliorer l'intégration dans le matériau composite. Le périmètre de la surface de la base est texturé pour permettre un écoulement plus rapide de la résine. En dessous se trouve un bouchon qui permet le passage de la fibre optique. Un manchon en PTFE a été ajouté pour permettre l'étanchéité du bouchon inférieur avant son installation sur la préforme composite et éliminer tout problème de contamination ou de séchage du mastic. En outre, il dispose d'un système d'enroulement des fibres optiques pour récupérer les fibres excédentaires.

Cependant, plusieurs problèmes ont été rencontrés et une nouvelle conception est nécessaire (voir l'annexe 4 pour le nouveau design du capot de protection).

- **Problème n°1** : Il est difficile d'insérer la fibre optique dans la protection, notamment lorsque l'on utilise une gaine semi-rigide pour protéger la fibre optique au niveau de son point d'extraction du composite. Autre point important, la gaine protectrice doit arriver à ras le plancher dans la protection pour faciliter le comblement de l'espace vacant entre la fibre optique et la gaine.

Correction à apporter La gaine rigide doit être installée sur la protection en amont de telle sorte qu'elle soit solidaire à la protection ABS.

Du point de vue de la conception, nous avons augmenté les dimensions globales afin de faciliter la manipulation, tant lors de l'enfilage de la fibre que lors de son passage dans les différents trous. Cela permettra de réduire la courbure de la fibre afin qu'elle ne présente pas de risque de rupture.

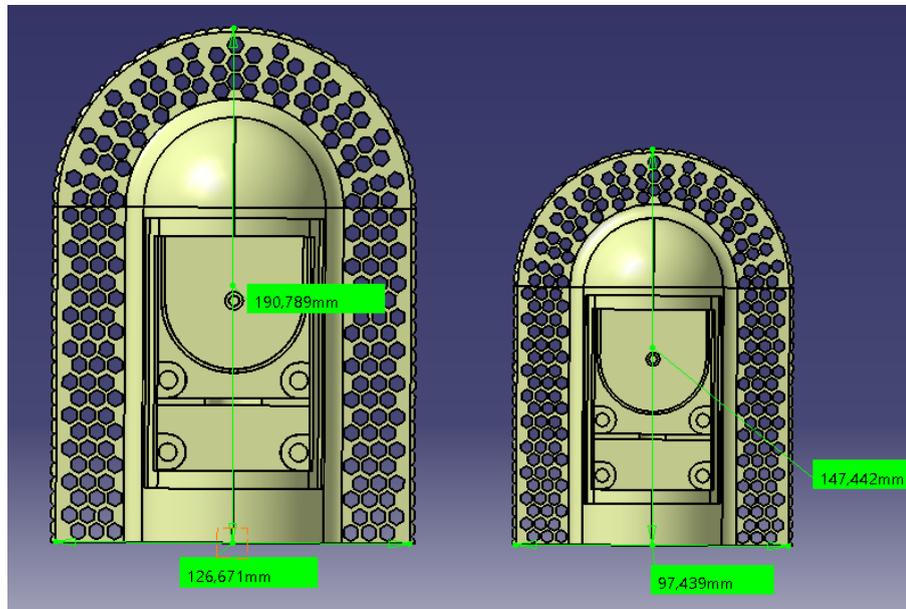


FIGURE 48 – Comparaison du nouveau design (à gauche) avec l'ancien.

Afin d'améliorer la tangence des côtés, les surfaces courbes ont été dotées d'un plus grand rayon de sorte que, lorsqu'elles sont scellées avec la couche de stratifié composite, elles sont hermétiques, comme le montre la figure suivante.

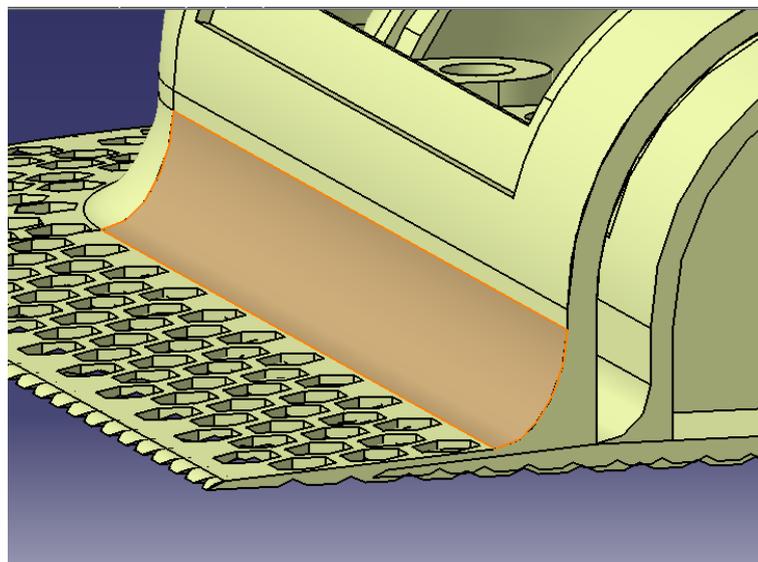


FIGURE 49 – Installation de la protection sur le stratifié

— **Problème n°2** : A l'intérieur de la protection la fibre optique est courbée sévèrement. Un diamètre de courbure de 1 cm est constaté.

Correction à apporter : L'angle de pénétration de la fibre optique dans la protection doit être plus aigu afin que la fibre optique pénètre tangentiellement dans la protection.

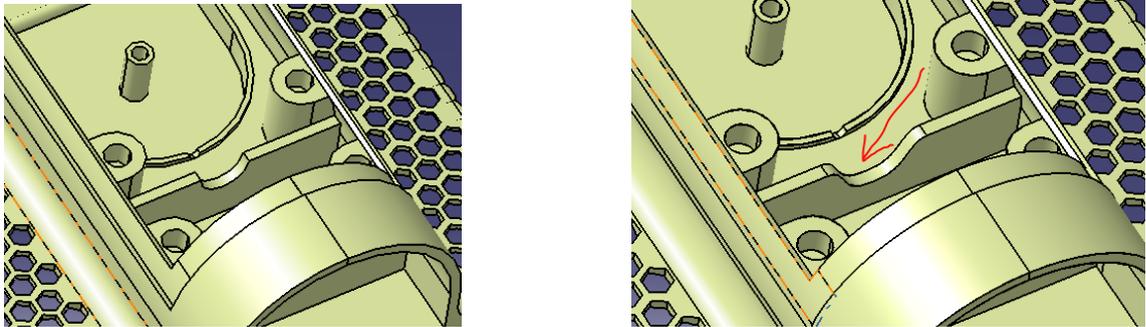


FIGURE 50 – Modification (en rouge) de la courbure du pas de la fibre optique afin que l'écart ne soit pas aussi serré.

- **Problème n°3** : La fibre optique fait une courbure prononcée lors de sa pénétration dans la protection. Cette courbure occasionne des pertes qui dégradent considérablement le signal optique jusqu'à sa quasi extinction.

Correction à apporter : Faire passer la fibre optique dans la protection avec un angle quasi nul.

Pour résoudre ce problème, le trou de l'entrée du câble de fibre optique a été retravaillé et un trou plus petit a été réalisé. De plus, il y aura maintenant une plus grande surface de contact pour le coller au mastic afin d'éviter toute entrée de la résine dans le capot de protection.

Une fois la protection redessinée numériquement, plusieurs spécimens 3D devront être produits. L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) a été choisi comme matériau d'impression 3D en raison de sa bonne résistance aux chocs et de sa compatibilité avec la résine polyester.

La résine utilisée dans l'infusion est extrêmement fluide pour permettre une bonne imprégnation des fibres, elle doit, en effet, pouvoir pénétrer dans les espaces entre deux filaments.

4 Conclusion et perspectives

4.1 Interprétation des résultats

Il est important de comprendre le comportement de la structure afin de savoir si les résultats sont cohérents, et si les conditions appliquées représentent les contraintes auxquelles un navire pourrait être soumis ou non. Cette section vise à expliquer comment les différents types de charge peuvent être traduits en déformations, pour voir si cela nous aiderait à imposer des conditions aux limites.

Une série de graphiques montrant les déformations le long de l'axe x pour les trois cas de charge proposés (flexion, torsion et pression normale) sera également présentée. Ceci peut être utilisé pour relier directement un cas de charge aux valeurs déterminantes de la déformation en fonction de la position des réseaux de Bragg.

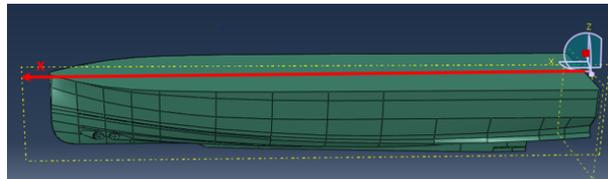


FIGURE 51 – Axe X de la navire (pour la représentation des déformations)

4.1.1 Cas Flexion

Pour le Hogging et le Sagging, on suppose que la plus grande déformation se produit aux extrémités du bateau, le centre du bateau ayant été construit pour maintenir une plus grande rigidité. Cela se reflète dans une certaine mesure dans notre modélisation (figure 31). Cependant, on observe un changement radical de la déformation dans la zone de l'arc, et les éléments passent de la compression à la traction. Le même devrait être vu à l'arrière de manière plus ou moins symétrique, le navire ayant été traité comme une poutre soutenue et encastrée.

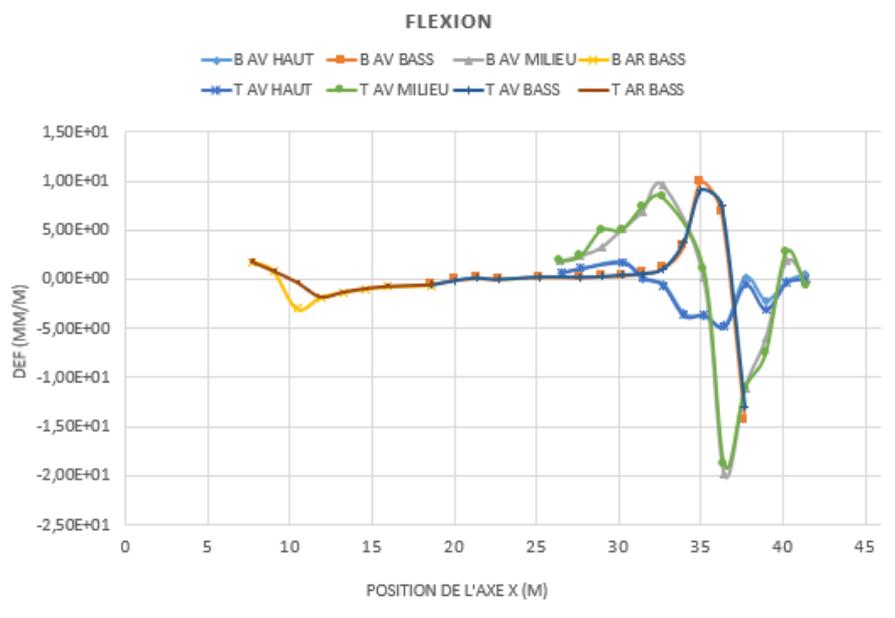


FIGURE 52 – La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques en Flexion

4.1.2 Cas Torsion

Dans le cas de la torsion, la déformation est très similaire à la flexion, nous pouvons donc conclure en disant que nous ne sommes pas en mesure de différencier le type de contrainte auquel notre navire est soumis uniquement en fonction des déformations, du moins avec ces BC.

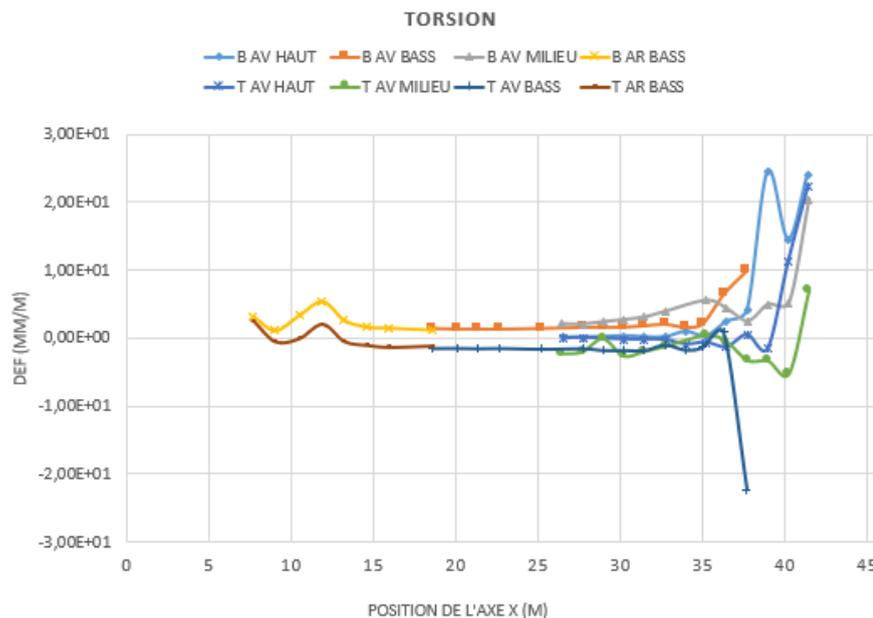


FIGURE 53 – La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques en Torsion

4.1.3 Cas pression hydrostatique de l'eau

Ce dernier cas représente un peu mieux la réalité car nous pouvons observer une pression plus élevée et donc un déplacement plus important dans la partie inférieure du navire et cela diminue progressivement lorsque nous nous rapprochons de la ligne de flottabilité.

Ce qui est clair, c'est que la position des fibres optiques supérieures, les plus hautes, donne des informations sur la flexion du bateau (hogging et sagging) et les deux plus basses sur le comportement des vagues. Puisque les deux premiers sont au-dessus de la ligne de flottaison. Ce serait un point de référence pour l'interprétation des déformations.

Nous pouvons également obtenir des informations sur la directionnalité de la force des vagues par rapport au plan de déflexion du navire selon que les mesures de déformation sont symétriques (par rapport au signe) ou asymétriques.

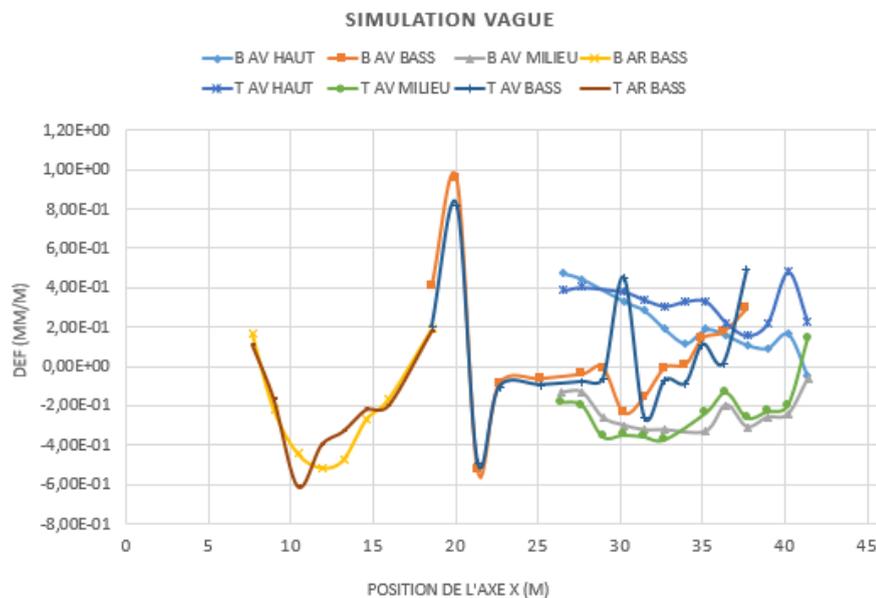


FIGURE 54 – La déformation sur l'axe pour les 8 fibres optiques pour la pression normale

En regardant ce graphique et en le comparant au cas en flexion et en torsion, nous pouvons conclure en disant que seulement pour une pression distribuée normale (simulation de la force de l'eau sur le bateau) nous pouvons voir une réaction dans les fibres du capot.

Tant en flexion qu'en torsion, les fibres optiques arrière ne présentent pratiquement presque aucune déformation. Cela pourrait être dû au fait que la dernière fibre optique la plus proche de la poupe est très proche de la quille principale, un élément très rigide qui affecte principalement le matériau qui lui est le plus proche. En revanche, la fibre supérieure est proche de la surface supérieure où la rigidité est beaucoup plus faible. Le bateau a été recouvert d'une surface qui l'empêche de se déformer librement, mais qui

n'offre pratiquement aucune rigidité. D'où la grande importance de pouvoir vérifier à nouveau ces résultats avec le modèle avec raidisseurs.

4.2 Améliorations futures

Nous pouvons conclure en soulignant que les fibres optiques à résonance de Bragg (dont seulement 5 fonctionnent) ne sont pas suffisantes pour obtenir des informations sur la déformation globale du navire. Ils ne nous donnent des informations que pour une zone très localisée. Toutefois, il peut être intéressant d'installer ces fibres dans les zones où l'on sait que le navire présente un risque plus élevé de déformation ou de fissure, afin d'économiser d'importants coûts d'installation de fibres optiques.

En raison des contraintes de temps et de la situation d'incertitude actuelle, il n'a pas été possible de se rendre à La Ciotat, près de Marseille, avant la dernière semaine de stage pour prendre des données du navire in situ, et je n'ai donc pas pu inclure les données réelles dans les simulations.

Le moment de flexion est toujours maximal au milieu du navire. C'est en raison de cet effet que la contrainte de flexion atteint toujours un maximum au niveau du milieu du navire, quelles que soient les conditions de chargement. Les amplitudes peuvent varier, mais cette nature se retrouve dans toutes les conditions de chargement que le navire rencontre au cours de sa vie. Pour cette raison, il serait judicieux d'installer quelques autres FBG dans la partie centrale.

Concernant le traitement des données il faudra réfléchir à la façon dont nous pouvons traiter les données reçues (traitement des données locales, même si nous ne disposons pas d'un modèle global). Par exemple, regardez si les pics d'amplitude maximale, le déplacement maximal, coïncident avec les pics de fréquence. On pourrait également observer si la fréquence de l'échantillonnage est liée à la fréquence des vagues, etc.

4.3 Erreurs de calcul possibles

Voici une liste d'approximations ou de simplifications qui peuvent créer des divergences avec le modèle réel :

- Les déplacements n'ont pas été imposés sur le côté intérieur du navire mais sur le côté extérieur en raison de leur mise en œuvre plus facile dans le logiciel EF.
- Comme indique ci-dessus, il faudrait mettre plusieurs fibres pour avoir la déformée complète du bateau. Nous n'avons des informations que sur 8 points, et seuls 5 /8 fonctionnent. De plus, nous n'aurons pas d'informations symétriques (bâbord vs tribord)
- Le réseau du Bragg n'est pas calibré dans le composite.

- La déformation due au changement de température et à la photoélasticité (déformation transversale) n'a pas été prise en compte, seule la déformation longitudinale a été prise en compte.

4.4 Conclusions

En conclusion, j'ai eu l'occasion de travailler sur un projet de recherche sur les capteurs de Bragg insérés dans les fibres optiques et cela m'a permis d'apprendre une nouvelle technologie pour détecter et caractériser la déformation et les contraintes d'un navire.

Bien qu'il s'agisse d'un travail complexe, puisque la structure est un navire et non un avion comme nous l'avons analysé dans plusieurs sujets de mes études cette année à l'ISAE, il m'a donné l'occasion de mettre en pratique et de manière autonome des logiciels de modélisation CAO tels que Catia et Abaqus qui sont indispensables pour la conception et l'analyse de presque toutes les structures, qu'il s'agisse d'un navire, d'un avion, de n'importe quelle pièce ou même de bâtiments.

Cela m'a également permis de voir comment se structure et fonctionne un groupe de recherche dans une école en France, et de voir comment sont envisagés les futurs doctorants pour mener à bien leurs travaux.

Ce travail a comporté de nombreuses difficultés et beaucoup d'essais et d'erreurs car la ligne à suivre n'était pas tout à fait droite, mais cela m'a permis de faire face à une situation plus réelle où les données initiales ou les directives initiales ne nous sont pas très familières. Enfin, elle m'a permis de réaffirmer et de définir ce que je souhaite faire dans mon futur travail d'ingénieur.

Annexes

Annexe 1 : Programme de calcul des dictionnaires de données

```

1 (base) C:\Users\olopezah>cd C:\Users\olopezah\Desktop\NESSIE\LANA\
2
3 (base) C:\Users\olopezah\Desktop\NESSIE\LANA>python
4 Python 3.7.3 (default, Mar 27 2019, 17:13:21) [MSC v.1915 64 bit ...
   (AMD64)] :: Anaconda, Inc. on win32
5 Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
6
7 >>> import pandas
8 >>> import pandas as pd
9 >>> pd.read_excel('Valeurs.xlsx')
10 >>> df = nessie.read_excel('Valeurs.xlsx';sheetname='Feil2')
11 >>> df.loc['fibrel', 'f1']
12 >>> df[['fibrel', 'f1']].set_index('fibrel').to_dict()['f1']
13 {'BAVHA': 0.0000789, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
   0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
   'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
   1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, nan: nan}
14 >>> fibrel = df[['fibrel', 'f1']].set_index('fibrel').to_dict()['f1']
15 >>> fibrel
16 {'BAVHA': nan, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
   0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
   'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
   1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, nan: nan}
17
18
19
20 >>> fibrel = df[['pos', 'val']].set_index('fibrel').to_dict()
21 >>> fibrel = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()
22 >>> fibrel = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
23 >>> fibrel
24 {'BAVHA': nan, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
   0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
   'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
   1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, 'BAVMA': 0.0847778, 'BAVMB': ...
   2.2831099999999998, 'BAVMC': -7.63638, 'BAVMD': -14.0088, 'BAVME': ...
   -25.1531, 'BAVMF': 0.1418, 'BAVMG': 12.139, 'BAVMH': ...
   8.764389999999999, 'BAVMI': 6.41573, 'BAVMJ': 4.1224, 'BAVMK': ...
   3.05723, 'BAVML': 2.34456, 'BAVBA': -18.2787, 'BAVBB': ...
   8.602139999999999, 'BAVBC': 12.6674, 'BAVBD': 4.37055, 'BAVBE': ...
   1.4731100000000001, 'BAVBF': 0.762914, 'BAVBG': 0.509847, 'BAVBH': ...
   0.394521, 'BAVBI': 0.29322600000000004, 'BAVBJ': 0.301104, ...
   'BAVBK': 0.0702782, 'BAVBL': 0.14918900000000002, 'BAVBM': ...
   -0.102625, 'BARBA': -0.766045, 'BARBB': -0.9657979999999999, ...
   'BARBC': -1.24365, 'BARBD': -1.70993, 'BARBE': -2.30639, 'BARBF': ...
   -3.77909, 'BARBG': 1.0929799999999998, 'BARBH': 2.26815}

```

```

25
26
27
28 >>> df = nessie.read_excel('Valeurs.xlsx',sheet_name='Feuil3')
29 >>> df
30      Timestamp      pos      val
31 0             1  BAVHA  0.009000
32 1             1  BAVHB -0.305977
33 2             1  BAVHC -2.706010
34 3             1  BAVHD  0.252861
35 4             1  BAVHE -5.910290
36 5             1  BAVHF -4.694890
37 6             1  BAVHG -4.382840
38 7             1  BAVHH -0.679461
39 8             1  BAVHI  0.034664
40 9             1  BAVHJ  2.208990
41 10            1  BAVHK  1.338570
42 11            1  BAVHL  0.829180
43 ..          ...     ...     ...
44 88            2  BARBG  1.092980
45 89            2  BARBH  2.268150
46
47
48
49 >>> df = df[df['Timestamp']==2]
50 >>> df
51      Timestamp      pos      val
52 45            2  BAVHA      NaN
53 46            2  BAVHB -0.305977
54 47            2  BAVHC -2.706010
55 48            2  BAVHD  0.252861
56 ...
57
58 87            2  BARBF -3.779090
59 88            2  BARBG  1.092980
60 89            2  BARBH  2.268150
61 >>> fibre2 = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
62 >>> fibre2
63 { 'BAVHA': nan, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
    0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
    'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
    1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, 'BAVMA': 0.0847778, 'BAVMB': ...
    2.2831099999999998, 'BAVMC': -7.63638, 'BAVMD': -14.0088, 'BAVME': ...
    -25.1531, 'BAVMF': 0.1418, 'BAVMG': 12.139, 'BAVMH': ...
    8.764389999999999, 'BAVMI': 6.41573, 'BAVMJ': 4.1224, 'BAVMK': ...
    3.05723, 'BAVML': 2.34456, 'BAVBA': -18.2787, 'BAVBB': ...
    8.602139999999999, 'BAVBC': 12.6674, 'BAVBD': 4.37055, 'BAVBE': ...
    1.4731100000000001, 'BAVBF': 0.762914, 'BAVBG': 0.509847, 'BAVBH': ...
    0.394521, 'BAVBI': 0.29322600000000004, 'BAVBJ': 0.301104, ...
    'BAVBK': 0.0702782, 'BAVBL': 0.14918900000000002, 'BAVBM': ...
    -0.102625, 'BARBA': -0.766045, 'BARBB': -0.9657979999999999, ...

```

```

        'BARBC': -1.24365, 'BARBD': -1.70993, 'BARBE': -2.30639, 'BARBF': ...
        -3.77909, 'BARBG': 1.0929799999999998, 'BARBH': 2.26815}
64 >>> step2 = df[['pos', 'val']].set_index('pos').to_dict()['val']
65 >>> step2
66 { 'BAVHA': nan, 'BAVHB': -0.305977, 'BAVHC': -2.70601, 'BAVHD': ...
    0.252861, 'BAVHE': -5.91029, 'BAVHF': -4.69489, 'BAVHG': -4.38284, ...
    'BAVHH': -0.679461, 'BAVHI': 0.0346642, 'BAVHJ': 2.20899, 'BAVHK': ...
    1.33857, 'BAVHL': 0.8291799999999999, 'BAVMA': 0.0847778, 'BAVMB': ...
    2.2831099999999998, 'BAVMC': -7.63638, 'BAVMD': -14.0088, 'BAVME': ...
    -25.1531, 'BAVMF': 0.1418, 'BAVMG': 12.139, 'BAVMH': ...
    8.7643899999999999, 'BAVMI': 6.41573, 'BAVMJ': 4.1224, 'BAVMK': ...
    3.05723, 'BAVML': 2.34456, 'BAVBA': -18.2787, 'BAVBB': ...
    8.6021399999999999, 'BAVBC': 12.6674, 'BAVBD': 4.37055, 'BAVBE': ...
    1.47311000000000001, 'BAVBF': 0.762914, 'BAVBG': 0.509847, 'BAVBH': ...
    0.394521, 'BAVBI': 0.293226000000000004, 'BAVBJ': 0.301104, ...
    'BAVBK': 0.0702782, 'BAVBL': 0.1491890000000000002, 'BAVBM': ...
    -0.102625, 'BARBA': -0.766045, 'BARBB': -0.9657979999999999, ...
    'BARBC': -1.24365, 'BARBD': -1.70993, 'BARBE': -2.30639, 'BARBF': ...
    -3.77909, 'BARBG': 1.0929799999999998, 'BARBH': 2.26815}
67 >>> lolo.read_excel('Valeurs.xlsx',sheet_name='Feuil3')
68      Timestamp      pos      val
69 0              1  BAVHA  0.009000
70 1              1  BAVHB -0.305977
71 2              1  BAVHC -2.706010
72 3              1  BAVHD  0.252861
73 4              1  BAVHE -5.910290
74 5              1  BAVHF -4.694890
75 6              1  BAVHG -4.382840
76 7              1  BAVHH -0.679461
77 8              1  BAVHI  0.034664
78 9              1  BAVHJ  2.208990
79 10             1  BAVHK  1.338570
80 11             1  BAVHL  0.829180
81 12             1  BAVMA  0.084778
82 13             1  BAVMB  2.283110
83
84 ..             ...      ...
85
86 88             2  BARBG  1.092980
87 89             2  BARBH  2.268150

```

Annexe 2 : Python script to implement the automation of data reading in Abaqus.

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Wed Sep 22 22:05:08 2021
4
5  @author: olopezah
6  """
7
8  from part import *
9  from material import *
10 from section import *
11 from assembly import *
12 from step import *
13 from interaction import *
14 from load import *
15 from mesh import *
16 from optimization import *
17 from job import *
18 from sketch import *
19 from visualization import *
20 from connectorBehavior import *
21
22 def set_boundaries(BAVHA,BAVHB, BAVHC, BAVHD, BAVHE, BAVHF,BAVHG, ...
    BAVHH, BAVHI, BAVHJ,BAVHK,BAVHL,...) :
23     mdb.Model(name='Def-FLEXION', objectToCopy=mdb.models[ 'Model-1' ])
24     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].materials[ 'Material-1' ].density.setValues
25     (table=(( 0.0077, ), ), )
26     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].materials[ 'Material-1' ].elastic.setValues
27     (table=((60.0, 0.3), ), type=ISOTROPIC)
28     del mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].parts[ 'COQUE' ].compositeLayups
29     [ 'CompositeLayup-1' ]
30     del mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].parts[ 'COQUE' ].materialOrientations[0]
31     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].rootAssembly.regenerate()
32     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR1' ].setValues
33     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHA' ])
34     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR2' ].setValues
35     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHB' ])
36     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR3' ].setValues
37     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHC' ])
38     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR4' ].setValues
39     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHD' ])
40     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR5' ].setValues
41     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHE' ])
42     mdb.models[ 'Def-FLEXION' ].boundaryConditions[ 'BAR6' ].setValues
43     (u1=dict_of_bound[ 'BAVHF' ])
44     ...
45

```

```

46     return mdb.models[ 'Def-Flexion' ].boundarweConditions
47 # Save by olopezah on 2021_08_24-16.27.48; build 2021 ...
    2020_03_06-15.50.37 167380
48 from part import *
49 from material import *
50 from section import *
51 from assembly import *
52 from step import *
53 from interaction import *
54 from load import *
55 from mesh import *
56 from optimization import *
57 from job import *
58 from sketch import *
59 from visualization import *
60 from connectorBehavior import *
61
62 importation valeurs
63 creation of valeurs dictionary
64 import pandas as pd
65 dict_of_steps = {}
66
67 df = pd.read_excel(r 'C:\Users\olopezah\Desktop\NESSIE\LANA\Valeurs.xlsx' ,
68 sheet_name='Feuil2')
69 step1 = df[ ['fibre1' , 'f1' ]].set_index('fibre1').to_dict()[ 'f1' ]
70 dict_of_steps[ 'fibre1' ] = fibre1
71
72 for step in dict_of_steps:
73     mdb.models[ 'Def-Flexion' ].boundarweConditions = ...
        set_boundaries(dict_of_bound)
74     mdb.Job(atTime=None, contactPrint=OFF, description='', echoPrint=OFF,
75     explicitPrecision=SINGLE, getMemoryFromAnalysis=True, ...
        historyPrint=OFF,
76     memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, model='Def-FLEXION' , ...
        modelPrint=OFF,
77     multiprocessingMode=DEFAULT, name='Def-FLEXION_'+str(step) , ...
        nodalOutputPrecision=
78     SINGLE, numCpus=1, numGPUs=0, queue=None, resultsFormat=ODB, ...
        scratch='',
79     type=ANALYSIS, userSubroutine='', waitHours=0, waitMinutes=0)
80     mdb.jobs[ 'Def-FLEXION' ].submit(consistencyChecking=OFF)

```

Annexe 3 : Spécifications du produit



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code: IXC-SEN-11-OPP-28589

Parameter	Typical Specification	Units
1 Wavelength grid (WL separation for FBG1-FBG2 and FBG10-FBG11= 7.2nm. WL separation for others = 9.2nm)	1506*, 1513.2, 1522.4 ..., 1577.6, 1586.8, 1594	nm
2 Wavelength tolerance	+/- 1	nm
3 Peak reflectivity	> 50	%
4 Reflection Bandwidth at -3dB (FWHM)**	0.2 to 0.3	nm
5 FBG proof test	50	kpsi
6 FBG length	< 10	mm
7 Distance between 2 consecutive FBG (D _{1,2} ... D _{N-1,N})	127 +/- 5	cm
8 Number of FBG (N)	11	

* 1506nm correspond to the first FBG
 **target 0.2 to 0.25nm

Design Parameter	Specification	Units
9 Single mode fiber, silica/ acrylate coating diameter	125 / 160	µm
10 Grating protection, diameter	acrylate recoat, 180µm	
11 Input / Output pigtail length	10 / 10 (+/- 1)	m
12 Optical connectors	None	

Colour code: first FBG → green mark, last FBG → red, other FBG → **black** mark



Effective date of this document: 15/10/2019
 Document : IXC-SEN-11-OPP-28589_edB.pdf

Specifications are subject to change without notice

PSD-L-Q-E-086-I

IXblue S.A.S.
 IXblue Photonics – Specialty Fibers Division
 Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 08 94 50
 www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 897 €
 R.C.S. Versailles 433 185 121 - SIRET 433 185 121 00061
 Code APE 2651B - N° TVA Intra. FR 09 433 185 121



Industrial confidentiality

PRODUCT SPECIFICATION

Product code:

IXC-SEN-12-OPP-28589

	Parameter	Typical Specification	Units
1	Wavelength grid (WL separation for FBG1-FBG2 and FBG10-FBG11= 6.2nm. WL separation for others = 8.4nm)	1506*, 1512.2, 1520.6, ...,1579.4, 1587.8, 1594	nm
2	Wavelength tolerance	+/- 1	nm
3	Peak reflectivity	> 50	%
4	Reflection Bandwidth at -3dB (FWHM)**	0.2 to 0.3	nm
5	FBG proof test	50	kpsi
6	FBG length	< 10	mm
7	Distance between 2 consecutive FBG (D _{1,2} ... D _{N-1,N})	126 +/- 5	cm
8	Number of FBG (N)	12	

* 1506nm correspond to the first FBG

** target 0.2 to 0.25nm

	Design Parameter	Specification	Units
9	Single mode fiber, silica/ acrylate coating diameter	125 / 160	µm
10	Grating protection, diameter	acrylate recoat, 180µm	
11	Input / Output pigtail length	15 / 15 (+/- 1)	m
12	Optical connectors	None	

Colour code: first FBG → green mark, last FBG → red, other FBG → **black** mark



Effective date of this document: 15/10/2019

Document : IXC-SEN-12-OPP-28589_edB.pdf

Specifications are subject to change without notice

PSD-L-Q-E-086-I

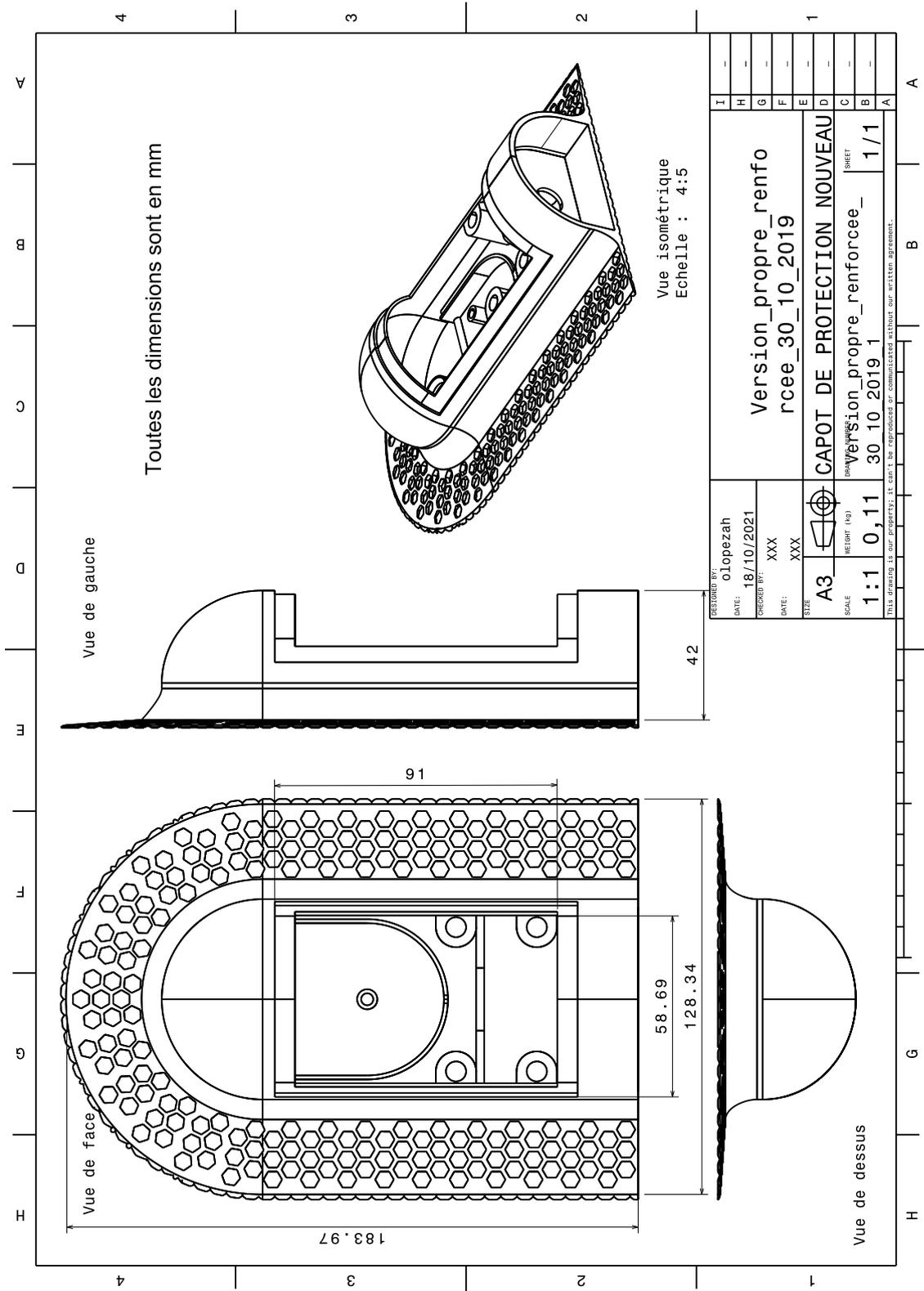


ixblue S.A.S.
ixblue Photonics – Specialty Fibers Division
Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

T. : +33 1 30 08 94 50
www.photonics.ixblue.com

Société par Actions Simplifiée au capital de 11 442 897 €
R.C.S. Versailles 433 185 121 - SIRET 433 185 121 00061
Code APE 2651B - N° TVA Intra. FR 09 433 185 121

Annexe 4 : Dessin de conception d'une nouvelle pièce



Références

- [1] Abaqus Scripting User's Guide. page 324.
- [2] Mechanical properties assessment of specimen subjected to random non-uniform general corrosion and tensile load. In Carlos Guedes Soares, Y. Garbatov, S. Sutulo, and T.A. Santos, editors, *Maritime Engineering and Technology*, pages 307–314. CRC Press, 0 edition, November 2012.
- [3] *Alfred Merlin* (bateau), August 2021. Page Version ID : 185740581.
- [4] Pierre Ferdinand, Sylvain Magne, Véronique Dewynter-Marty, Stéphane Rougeault, and Laurent Maurin. Applications of Fiber Bragg Grating Sensors in the Composite Industry. *MRS Bulletin*, 27(5) :400–407, May 2002.
- [5] Javid Iqbal and Zhu Shifan. Modeling and Simulation of Ship Structures Using Finite Element Method. 12(7) :7, 2018.
- [6] A. E. Jensen, J. Taby, K. Pran, G. Sagvolden, and G. Wang. Measurement of Global Loads on a Full-Scale SES Vessel Using Networks of Fiber Optic Sensors. *Journal of Ship Research*, 45(03) :205–215, September 2001.
- [7] Damien Kinet, Patrice Mégret, Keith Goossen, Liang Qiu, Dirk Heider, and Christophe Caucheteur. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials : Challenges and Solutions. *Sensors*, 14(4) :7394–7419, April 2014.
- [8] Manfred Kreuzer. Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors. page 11.
- [9] Vincent Lanticq. Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil. page 171.
- [10] M. Muzibur Rahman, Rajia Sultana Kamol, and Reyana Islam. Structural analysis of a ship on global aspect using ANSYS. page 020008, Dhaka, Bangladesh, 2017.
- [11] Jörg Rörup, Bartosz Maciolowski, and Ionel Darie. FE-based strength analysis of ship structures for a more advanced class approval. page 9.