



Le génie pour l'industrie

MEC791  
Projet spécial  
H2019

# ÉTUDE INERTIELLE ET HYDRODYNAMIQUE D'UN SOUS-MARIN AUTONOME POUR L'INTÉGRATION D'UN MODÈLE DE CONTRÔLE

Présenté à:

**LOUIS LAMARCHE**

Par :

**Félix AUBIN-PERRON,**

**Louis-Guillaume LEMAY,**

Montréal, le 12 avril 2019

## SOMMAIRE

---

Dans ce travail, nous avons réalisé la caractérisation du sous-marin de SONIA AUV, dans le but d'améliorer son asservissement. Nous avons commencé par définir la convention des deux systèmes de référence d'axes que nous utilisons. Par après, nous avons analysé la répartition de la masse à l'aide du logiciel SolidWorks, tout en vérifiant que les valeurs théoriques obtenues étaient cohérentes avec les valeurs expérimentales. Effectivement, nous obtenons un poids théorique de 429 N avec 0.23% d'erreur. À l'aide du même logiciel, nous avons évalué la poussée d'Archimède à 440 N.

Parallèlement, nous avons réalisé une étude hydrodynamique du sous-marin à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT. Nous avons utilisé 6 études, soit 300 points de calcul avec un maillage de 4000 éléments. Une fois nos données amassées, nous avons compilé les matrices de contrôle avec les calculs à partir des plages de données, soit la matrice des masses et de la gravité. Pour ce qui est de la matrice d'amortissement, les termes de la matrice seront calculés par l'équipe logicielle du club.

Sur un autre volet, puisque nous avons fait la démarche et les analyses hydrodynamiques, nous avons étudié la possibilité de concevoir une pièce qui réduirait la traînée sur le sous-marin actuel. Cependant, cette pièce ne permit pas de réduire la traînée comme souhaité. De plus, nous en avons profité pour réaliser l'étude sur un concept de sous-marin sur lequel nous travaillons présentement dans SONIA, soit AUV8. Nous avons ensuite comparé ce dernier au sous-marin actuel, et avons conclu que nous pouvions réduire la masse de 12kg, mais la traînée n'était pas améliorée.

Mots clés :

*ANSYS FLUENT, SolidWorks, sous-marin autonome, force de traînée, SONIA AUV*

## **Table des matières**

1. INTRODUCTION .....	1
2. DÉFINITION DU PROBLÈME .....	2
3. CONVENTION DES AXES.....	3
3.1. Axe utilisé dans le contrôle .....	3
3.2. Axe utilisé dans les logiciels.....	4
4. ÉTUDE DE L'INERTIE ET DU VOLUME D'AUV7 .....	5
4.1. Analyse de la masse et de l'inertie .....	5
4.2. Analyse du centre de flottaison .....	7
5. ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE D'AUV7 .....	9
5.1. Modèle numérique .....	9
5.2. Maillage.....	13
5.3. Propulseurs.....	14
5.4. Analyse de convergence.....	15
5.5. Résultats d'analyses .....	16
6. INTÉGRATION AU CONTRÔLE .....	19
6.1. Modèle dynamique (Lavoie & Chennouf, 2018) (Fossen, 1994) .....	19
6.2. Matrice M .....	20
6.3. Matrice D.....	21
6.4. Matrice de gravité.....	22
7. RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE HYDRODYNAMIQUE .....	23
7.1. Analyses des résultats .....	26
8. ÉVALUATION CONCEPTUELLE D'UN NOUVEAU ROBOT .....	29
8.1. Étude de la masse .....	30
8.2. Paramètre hydrodynamique.....	31
8.3. Placement des propulseurs.....	32
9. CONCLUSION.....	33
10. Bibliographie.....	34
1. ANNEXE I – Résultats : Sous-marin actuel .....	i
2. ANNEXE II – Résultats : Sous-marin hydrodynamique .....	vii
3. ANNEXE III – Comparaison des analyses.....	i
4. Annexe IV – Résultats préliminaires A2018.....	i

## **Liste des figures**

Figure 1 - Rendu de AUV7 .....	1
Figure 2 - Convention marine (Fossen, 1994) .....	3
Figure 3 - Modèle du sous-marin .....	4
Figure 4 – Démontage.....	5
Figure 5 – Centre de flottaison sur SolidWorks .....	8
Figure 6 - Angle de contrôle .....	9
Figure 7 - Volume de contrôle .....	10
Figure 8 - Rotation axe Y .....	10
Figure 9 - Rotation axe X .....	10
Figure 10 - Petit volume .....	11
Figure 11 - Grand volume .....	11
Figure 12 - Division de l'espace - A1 .....	12
Figure 13 - Division de l'espace - A5.....	12
Figure 14 - Courbe de convergence.....	13
Figure 15 - Division des arrêtes .....	13
Figure 16 - Influence des moteurs.....	14
Figure 17 - Graphique A1.1 .....	17
Figure 18 - Graphique A1.2.....	17
Figure 19 – Graphique A5 .....	18
Figure 20 - Écoulement autour du dôme .....	23
Figure 21 - Écoulement à l'arrière .....	23
Figure 22 - Turbulence dans le creux moteur.....	24
Figure 23 - Vue de coupe moteur, points d'intérêts.....	24
Figure 24 - Vue isométrique de haut et de bas .....	25
Figure 25 - Vue normale.....	25
Figure 26 - Comparaison avec la pièce l'hydrodynamique .....	26
Figure 27 - Vue de coupe éloignée du centre .....	28
Figure 28 - Vue de coupe rapprochée du centre .....	28
Figure 29 - concept d'AUV8 .....	29
Figure 30 - Modèle simplifié pour ANSYS .....	30
Figure 31 - Maillage AUV8 avec la traînée.....	31
Figure 32 - Remous des moteurs.....	32

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 - Démontage.....	6
Tableau 2 - Résultats de l'étude d'inertie .....	7
Tableau 3 - Étude de convergence .....	15
Tableau 4 - Exemple de résultat Fluent.....	16
Tableau 5 - Amélioration avec la pièce ajoutée.....	27

## 1. INTRODUCTION

---

Le club SONIA AUV est un regroupement scientifique de plus d'une vingtaine d'étudiants de plusieurs domaines. Basé ici même à l'École de technologie supérieure, le club SONIA AUV conçoit, fabrique et programme des sous-marins autonomes depuis qu'il a été fondé en 1999. Le but principal du club est de participer à la compétition internationale ROBOSUB, de l'organisation ROBONATION. Celle-ci organise de nombreux événements de robotique. La compétition ROBOSUB est une compétition internationale annuelle qui se passe dans une piscine de recherche militaire à San Diego, en Californie aux États-Unis. Les sous-marins autonomes doivent effectuer des tâches précises de façon autonome à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle. L'édition 2018 a accueilli plus de 47 équipes universitaires et collégiales de partout dans le monde, et le club SONIA AUV a remporté le troisième prix, après National University of Singapore et Harbin Engineering University. (RoboNation)

Puisque l'équipe veut améliorer sa performance, elle veut améliorer la méthode de déplacement du sous-marin, soit l'algorithme de contrôle. Ce sera donc le but ultime du projet. Nous prévoyons aussi analyser le sous-marin pour le comparer à d'autres plateformes, puisque nous sommes en pleine phase de conception d'un nouveau sous-marin. Cela nous aidera à faire des choix judicieux de conception.



*Figure 1 - Rendu de AUV7*

## 2. DÉFINITION DU PROBLÈME

---

Le but du projet est de caractériser le sous-marin pour obtenir un modèle dynamique théorique. Le contrôle actuel est la plus grande faiblesse du système, et ce depuis de nombreuses années. En ce moment, le sous-marin est asservi par un système de PID. Malgré des améliorations par essai erreur et la récolte de données expérimentales, le sous-marin reste très lent, et nous empêche de réaliser les tâches dans le temps imparti par la compétition. L'équipe a donc décidé de prioriser ce problème en développant un système de contrôle non linéaire qui permettra une bonne maîtrise du sous-marin actuel, AUV7. Ce dernier est basé sur la résolution de l'équation matricielle suivante :

$M\ddot{x} + C(\dot{x})\dot{x} + D(\dot{x})\dot{x} + g(x) = \tau$	
M	Matrice de masse et d'inertie
x	Position
C	Matrice de Coriolis
D	Matrice d'amortissement
g	Vecteur de gravité
t	Vecteur d'entrée de contrôle

Nous analyserons cette équation plus en détail dans une autre section du rapport. Ce qui est important pour l'instant, c'est de se concentrer sur les matrices d'inertie, d'amortissement et gravitationnelle. La première est basée sur la masse du sous-marin et du centre de gravité. La seconde est basée sur la résistance de l'eau pour la friction et la traînée. La dernière est basée sur la gravité et la poussée d'Archimède.

Nous avons donc besoin de réaliser une étude de la masse du sous-marin, ainsi qu'une étude de mécanique des fluides par éléments finis. Nous ne nous occupons pas ici de réaliser le système de contrôle, mais bien de récolter les données nécessaires à ce projet.

De plus, nous nous servirons de ces données à des fins de conception d'une nouvelle plateforme AUV8, projet qui est présentement en cours.

### 3. CONVENTION DES AXES

Avant de s'attaquer au problème, il faut faire attention de bien se retrouver dans les différents systèmes d'axes utilisés pour représenter le sous-marin et les analyses. Sans faire cela, il est facile de se mélanger et de ne pas faire les bonnes déductions quant aux résultats obtenus. Nous avons décidé de travailler avec deux systèmes de coordonnées à cause des logiciels et des différences entre les habitudes de travail des différents départements dans le club. Les logiciels représentent les valeurs différemment selon le contexte.

#### 3.1. Axe utilisé dans le contrôle

Lorsqu'il est question du contrôle logiciel, le sous-marin est positionné dans un axe particulier. En effet, celui-ci est basé sur la convention des véhicules océaniques. L'avant est nommé  $+X$ , et la profondeur dans l'eau est alignée avec  $+Z$ .

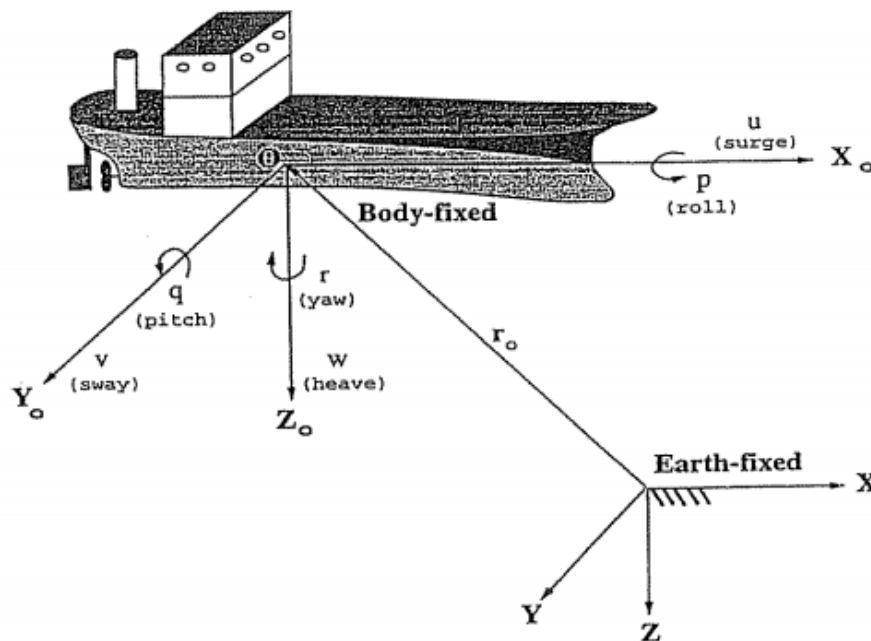


Figure 2.1: Body-fixed and earth-fixed reference frames.

Figure 2 - Convention marine (Fossen, 1994)

Dans le rapport, il sera le référentiel de base, utilisé avec l'indice *abs*. ( $X_{abs}$ ,  $Y_{abs}$ ,  $Z_{abs}$ )



### 3.2. Axe utilisé dans les logiciels

Cependant, les logiciels de modélisation 3D qu'on utilise n'ont pas le même référentiel, ils utilisent une logique plus cartésienne avec le plan X et Y aligné au plan de face. À des fins de simplifications, nous n'avons pas converti les axes lorsqu'on utilise les logiciels mécaniques. Donc, nous utilisons le référentiel du logiciel SolidWorks et ANSYS, soit :



*Figure 3 - Modèle du sous-marin*

Étant donné qu'on travaille principalement avec les logiciels mécaniques pour ce rapport et que ce sont les résultats calculés à partir de ce référentiel, il sera noté sans indice dans le rapport pour alléger le texte. (X,Y,Z)

## 4. ÉTUDE DE L'INERTIE ET DU VOLUME D'AUV7

---

Notre équipe utilise le logiciel SolidWorks pour tous ses besoins de conception mécanique. C'est donc l'outil logique pour réaliser l'étude de l'inertie et du volume.

### 4.1. Analyse de la masse et de l'inertie

Tout d'abord, le logiciel SolidWorks fournit toutes les données dont nous avons besoin concernant l'inertie et le volume. Le problème consiste à modéliser un sous-marin qui soit quantitativement près de la réalité. Comme SolidWorks est utilisé par l'équipe pour la conception des pièces et des assemblages, les ressources sont directement utilisables. L'équipe SONIA AUV fabrique la plupart de ses pièces elle-même, mais doit tout de même acheter les pièces standards et les instruments. Ces modèles sont retrouvés fournis par les distributeurs de ces produits.

Pour prouver que le modèle SolidWorks peut être utilisé pour évaluer l'inertie et le volume, nous commençons par évaluer la masse du sous-marin en mesurant le poids de tous les composants séparément.



*Figure 4 – Démontage*

Le processus de désassemblage complet sert aussi à faire le service des pièces corrodées et des joints d'étanchéité secs ou usés. C'est principalement pour cette raison qu'on a pu mesurer chaque pièce individuelle.

Le tableau suivant présente la liste des composants du sous-marin pesés :

*Tableau 1 - Démontage*

Description	Qté	Masse (g)	Description	Qté	Masse (g)
Coque en fibre	1	1639	Poignée braquet	8	27
Plaque serrage extrusion	4	134	Dôme dessous	1	46
Rack power supply	2	560	Anneau dessous ext.	1	107
Plaque Seacon	8	209	Serre base dôme	1	22
Anneau serrage dôme	4	85	Serre dôme ext	1	53
Vitre plate	2	132	Assem. hydro	1	195
O-ring cap	4	17	Droppers	1	262
O-ring vitre	4	6	Torpille	1	649
Cap PS	2	590	Stop torpille	1	149
Cap avant	1	615	Plaque kill switch	1	290
Dôme avant	1	102	Caméra dessous	1	215
Extrusion PS	3	2538	Backplane PC	1	106
Stack PS	1	2374	Circuit kill switch	1	23
Stack front	1	3088	Rack PC	1	1587
Stack PS	1	2574	Circuit IO	1	32
Gasket DVL	2	15	ESC	8	37
Anneau DVL int.	2	105	Batterie LiPO	2	1580
Vis de renfort	4	153	Extrusion PC	1	2374
Patte	4	135	IMU	1	102
DVL	1	2100	Fils en vrac	1	744
Plaque laiton	3	1028	Propulseur	8	360
Protecteur de dôme	1	78	Rack front	1	545

On obtient donc une masse totale du sous-marin de 43,84 kg. Cette masse servira de cible à atteindre pour la modélisation. On estimera qu'une différence de 1% entre la masse réelle et la masse théorique est acceptable. La procédure à suivre est de préciser les poids des différentes sections dans les modèles des sous-assemblages respectifs. Nous considérons que la position des pièces et des sous-assemblages dans le modèle est juste. L'outil d'évaluation de la masse est utilisé sur l'assemblage complet du sous-marin. La référence du centre absolu de l'assemblage est en plein milieu symétrique de la coque, la pièce en fibre de carbone au centre. On note que ces résultats sont bel et bien dans les axes du contrôle.

Tableau 2 - Résultats de l'étude d'inertie

Masse expérimentale (kg)	43.839	Tenseur des moments d'inertie (kg*m²)	
Masse théorique (kg)	43.738		
Force gravité (N)	429.07		
Erreur	0,23%	$I_{xx}$	1.6596
Centre de masse (m)		$I_{xy}$	-0.0046
X	0.0049	$I_{xz}$	0.0356
Y	0.0014	$I_{yx}$	-0.0046
Z	0.0240	$I_{yy}$	1.6074
		$I_{yz}$	0.0051
		$I_{zx}$	0.0356
		$I_{zy}$	0.0051
		$I_{zz}$	2.9030

On constate que le poids est assez élevé pour la compétition. En effet, la limite maximale pour le poids d'un sous-marin est de 56.7 kg. Des points sont alloués pour une masse sous la barre des 38 kg, alors que des points sont retranchés pour une masse excédant 38 kg. Les formules de points en lien à la masse sont les suivantes :

$$bonus = 80 + 2.2 \times (38 - masse)$$

$$pénalité = 250 + 11 \times (masse - 56.7)$$

(RoboNation)

Ainsi, le sous-marin incomberait une perte de 108 points. Comme mesure, il est à noter que SONIA AUV a gagné le troisième prix avec un pointage total de 4011.

#### **4.2. Analyse du centre de flottaison**

Nous faisons l'étude du volume du sous-marin autonome AUV7 afin de déterminer le centre de flottaison du sous-marin. La flottabilité du sous-marin est déterminée par la poussée d'Archimède. Ce phénomène en lien avec le volume de fluide déplacé et la force générée contre l'objet dans le fluide. Pour la déterminer, nous modélisons les surfaces extérieures du sous-marin pour en faire un volume plein. En effet, le logiciel ne prend pas en compte le volume vide à l'intérieur de la coque étanche. Ce volume est attiré à de l'eau. Ainsi, nous déterminons le volume, le centre du volume et la masse d'eau. La force servira dans l'équation matricielle du contrôle.

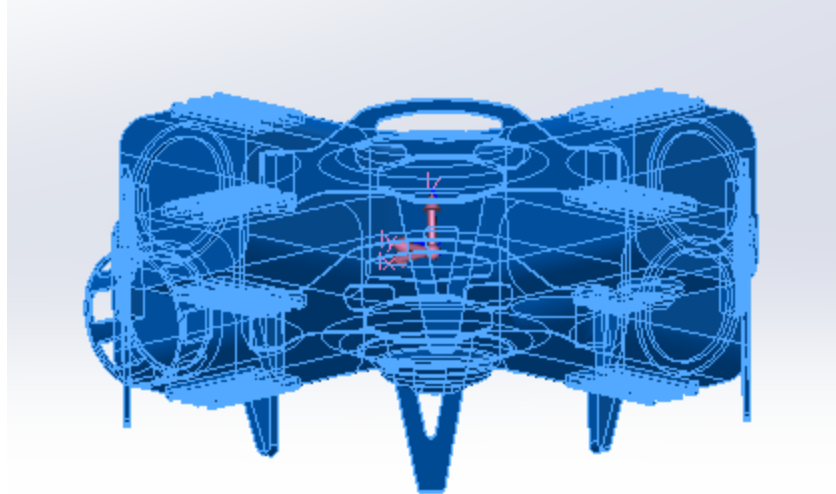


Figure 5 – Centre de flottaison sur SolidWorks

Nous avons maintenant les données du volume d'eau déplacé par le sous-marin. Nous calculons la force exercée par le fluide sur le sous-marin à l'aide de l'équation suivante :

$$F = \rho \times V \times g$$

On connaît la masse volumique de l'eau à 20°C, 997kg/m³, et la gravité, 9.81 m/s².

Coordonnées du centre de volume (m)	(0.000; -0.002; 0.004)
Volume (m³)	0.04503
Masse (kg)	44.89
Force Archimède (N)	440.42

Nous en profitons également pour calculer la flottabilité pour s'assurer que sa valeur respecte les règles de la compétition, soit 0.5%. Pour ce faire, nous calculons la masse volumique du sous-marin :

$$D \text{ [kg/m}^3\text{]} = m \text{ [kg]} / V \text{ [m}^3\text{]}$$

$$D = 973.55 \text{ kg/m}^3$$

Nous voyons donc que la flottabilité du sous-marin est de 2.35%, amplement suffisante, mais assez faible pour ne pas mettre trop de charge sur les propulseurs qui maintiennent le sous-marin sous l'eau. Cette force est toutefois non négligeable.

La première partie de l'analyse du sous-marin actuel est complétée, on passe à la partie hydrodynamique pour la matrice d'amortissement.

## 5. ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE D'AUV7

Deuxièmement, pour l'analyse du sous-marin actuel, on étudie l'hydrodynamisme, soit le comportement du sous-marin dans l'eau. On utilise le logiciel ANSYS et le calculateur numérique Fluent pour réaliser cette étude.

### 5.1. Modèle numérique

L'objectif est d'obtenir un maximum de données sur les forces agissant sur le sous-marin selon différents angles d'attaque du sous-marin. Cependant c'est l'eau qui se déplace dans notre analyse et non pas le sous-marin, le vecteur vitesse est donc inversé pour les paramètres d'ANSYS. Le vecteur vitesse est pointé vers le centre du sous-marin. À l'aide de la fonction de paramétrage, on peut calculer à partir d'une même analyse pour une grande quantité de vecteurs de vitesses différentes.

Par la suite, à l'aide du logiciel Fluent de ANSYS, on sera en mesure d'obtenir les forces et les moments sur le sous-marin en fonction du vecteur vitesse. Selon un système de coordonnées polaires, on définit deux angles de rotation et la norme du vecteur vitesse comme paramètres, voir figure ci-dessous :

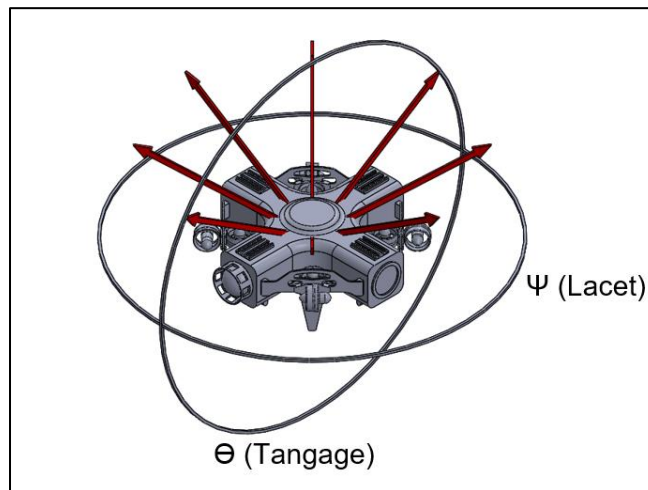


Figure 6 - Angle de contrôle

Étant donné qu'on modélise le fluide comme un élément solide auquel on soustrait le volume du sous-marin, il faut choisir une forme appropriée pour notre volume de contrôle. D'un côté, on veut utiliser les capacités de ANSYS à faire des itérations paramétriques sans avoir besoin de définir chaque simulation avec un vecteur différent. Cependant, il faut tout de même réduire le temps de calcul, donc limiter le nombre de nœuds dans le maillage sans perdre trop de précision.

Premièrement, la forme est choisie pour minimiser le volume inutile tout en évitant les effets des murs. Le but est de simuler un sous-marin complètement submergé. La forme choisie est inspirée d'un exercice d'apprentissage d'ANSYS (Mullen, 2014).

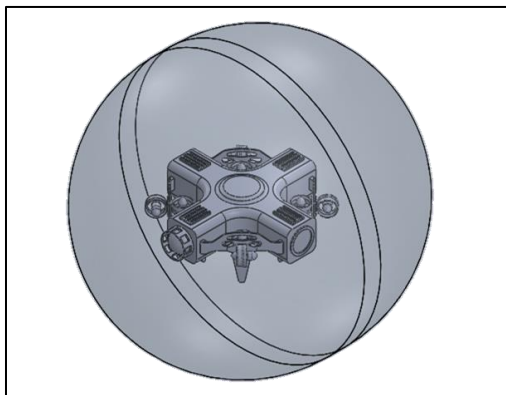


Figure 7 - Volume de contrôle

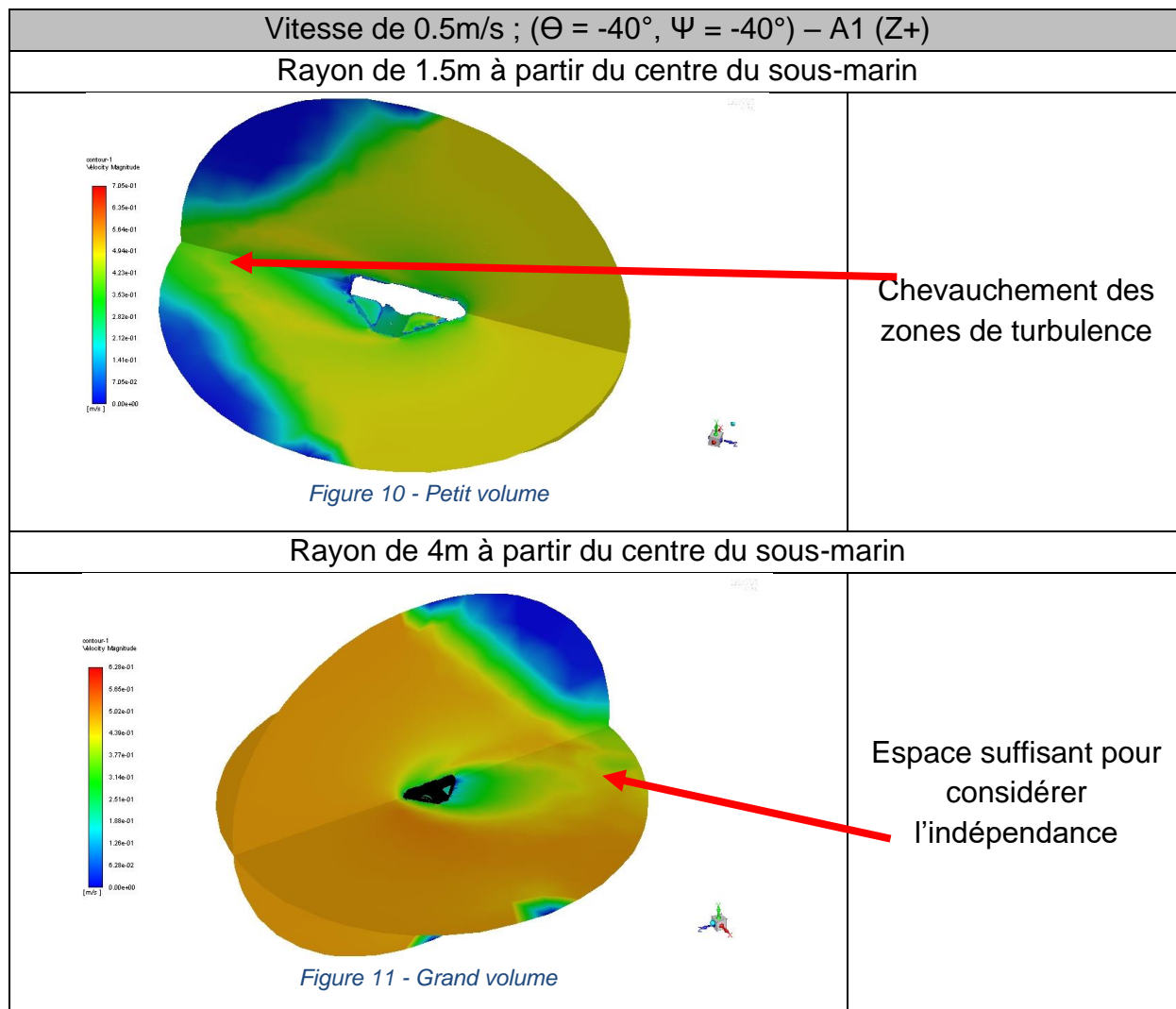
Dans cet exemple, la forme 2D du volume englobant est recommandée pour une analyse sur une surface d'aéronef avec plusieurs angles d'attaque, ce qui ressemble à notre but d'analyse. La forme sphérique centrée à l'origine du sous-marin permet de distribuer uniformément l'écoulement d'entrée autour du sous-marin malgré les variations d'angles.

Si l'on avait utilisé une boîte rectangulaire pour le fluide, la face d'entrée devrait être très large pour éviter les effets des murs. Avec la demi-sphère, on peut facilement itérer jusqu'à  $\pm 45^\circ$  pour les deux angles polaires tout en réduisant le volume de contrôle. Pour des angles supérieurs à  $45^\circ$ , on fera la rotation du volume de contrôle de  $90^\circ$ . Comme le sous-marin n'est pas symétrique, on doit construire six analyses pour couvrir tous les angles de déplacement possible.

Analyse A1 à A4		Analyse A5 et A6	
Rotation axe Y ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ )		Rotation axe X ( $-90^\circ, +90^\circ$ )	
Figure 8 - Rotation axe Y		Figure 9 - Rotation axe X	



On applique le même principe pour la sortie du fluide, une demi-sphère à l'arrière permet de réduire le volume où l'écoulement n'est pas affecté par le sous-marin. (SIMUTRAIN, 2018) La demi-sphère de sortie n'est pas centrée. La distance de recul est minimale, pour réduire le volume et pour différencier les deux surfaces dans le logiciel. Le paramètre du rayon est plus important, car on veut séparer les turbulences causées par le mur pour ne pas influencer le sous-marin, voir ci-dessous dans le pire cas d'analyse :



La première analyse avec le sous-marin a pour but de trouver les dimensions minimales pour conserver l'hypothèse où le sous-marin est complètement submergé. La taille retenue est la suivante :

Rayon	4m
Distance de recul	0.1m



Par la suite, on décide la manière de répartir les différents vecteurs vitesse pour couvrir l'ensemble du volume de contrôle tout en restant dans les limites de validité imposée à la section précédente.

Pour les quatre premières analyses, soit celles où la direction est sur le plan horizontal, on divise l'espace comme suit :

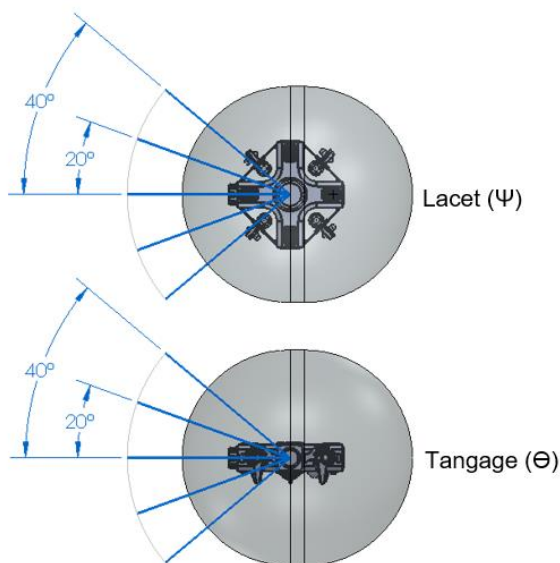


Figure 12 - Division de l'espace - A1

Analyse A1

Direction principale : +Z (+X<sub>abs</sub>)

Pour les analyses 5 et 6, où le sous-marin se déplace à la verticale, plutôt que de changer les références des axes, on utilise les divisions suivantes :

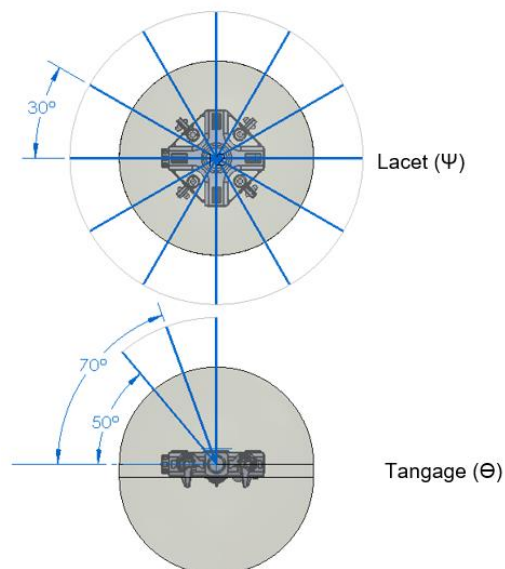


Figure 13 - Division de l'espace - A5

Analyse A5

Direction principale : +Y (-Z<sub>abs</sub>)

Au final, les deux méthodes produisent 25 vecteurs par analyse, ce qui est pratique pour le tableau de paramétrisation de ANSYS.

## 5.2. Maillage

Deuxièmement, le maillage est généré. Il est important pour obtenir la précision voulue tout en gardant un temps de calcul raisonnable. On fait donc une analyse, pour vérifier la convergence du maillage. C'est aussi à cette étape qu'on vérifie dans Fluent le nombre d'itérations de calcul requis pour la précision nécessaire. Dans la figure ci-dessous, l'erreur en fonction du nombre d'itérations pour un calcul avec le maillage fin. On utilisera 25 itérations pour nos études puisque les résultats ne varient presque pas après 25 calculs, on ne devient pas plus précis en continuant les calculs.

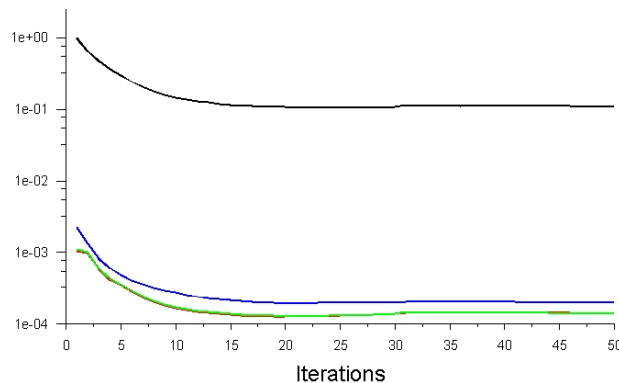


Figure 14 - Courbe de convergence

Au niveau du contrôle du maillage, la technique qui donne de meilleurs résultats et un meilleur contrôle sur la précision consiste à diviser les arêtes et les faces principales du sous-marin. On choisit particulièrement les surfaces normales au flux, les surfaces courbées sur les bords d'attaque ainsi que les arrêtes tangentes à ces surfaces importantes pour diriger le raffinement du maillage. (ANSYS inc., 2013) Cependant, le modèle est très complexe donc le maillage reste volumineux. Un exemple de contraintes appliquées sur des arrêtes :

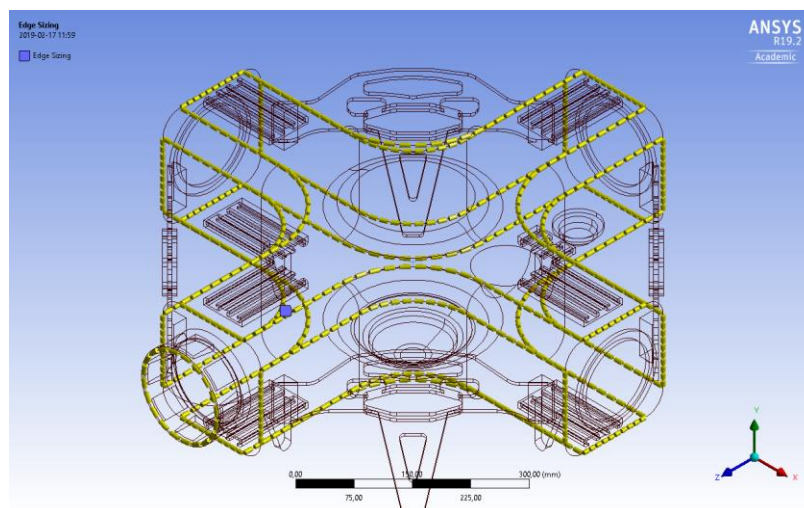


Figure 15 - Division des arrêtes

### 5.3. Propulseurs

Une caractéristique importante de notre sous-marin est le fait que les propulseurs sont toujours en rotation, même lorsque celui-ci ne se déplace pas. Comme discuté précédemment, le sous-marin doit flotter, les propulseurs verticaux sont donc toujours en action et ont une grande influence sur le déplacement de l'eau lors des mouvements.

Afin de les modéliser dans ANSYS, on doit fermer les propulseurs avec une surface d'entrée et de sortie. (SIMUTRAIN, 2018) Cependant, comme on modélise le fluide et non pas le sous-marin, l'entrée du propulseur devient une sortie pour le fluide et vice-versa, voir figure ci-dessous :

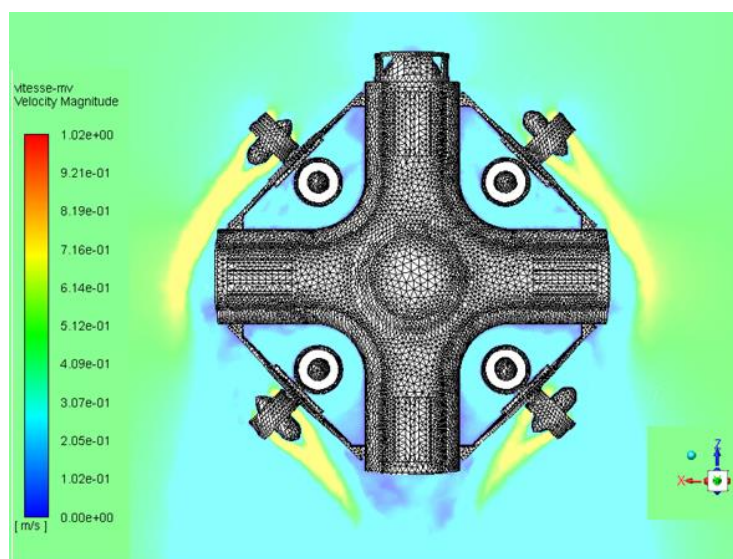


Figure 16 - Influence des moteurs

Les deux surfaces des moteurs ont la même aire et la même vitesse, pour que la conservation du débit soit respectée. Par contre, pour les 6 analyses différentes, les surfaces d'entrée et de sortie des propulseurs horizontaux sont redéfinies, de sorte que les directions principales de déplacement soient cohérentes avec les flux des propulseurs.

### 5.4. Analyse de convergence

Étant donné qu'on cherche les forces appliquées sur le sous-marin, on utilise ces résultats pour vérifier la convergence du maillage. Dans le tableau ci-dessous, on compare les écarts entre les forces en fonction du maillage. Toutes les contraintes sur le sous-marin sont deux fois plus petites entre chaque maillage. Cependant, les éléments de la surface d'entrée et de sortie sont constants. On cherche un critère de convergence de moins de 1% :

Tableau 3 - Étude de convergence

Vitesse de 0.5m/s, ( $\Theta = 0^\circ$ , $\Psi = 0^\circ$ )								
Maillage	Force X		Force Y		Force Z		Nœud	Élément
	[N]		[N]		[N]		$10^3$	$10^3$
		% err.		% err.		% err.		
Grossier	0.526	-	0.195	-	-13.79	-	121	671
Moyen	0.091	474%	1.363	-85.7%	-14.43	-4.4%	236	1 305
Fin	-0.059	54.7%	1.734	-21.4%	-14.00	3.0%	445	2 463
Extra-fin	0.060	-1.5%	1.768	-1.9%	-13.97	0.3%	721	3 988
Vitesse de 0.5m/s, ( $\Theta = -40^\circ$ , $\Psi = -40^\circ$ )								
Moyen	5.78	-	-14.82	-	-6.41	-	236	1 305
Fin	5.40	7.1%	-13.18	12.4%	-5.72	12.1%	445	2 463
Extra-fin	5.35	1.0%	-13.13	0.4%	-5.67	0.9%	721	3 988

Il s'agit ici de données moyennes, car le sous-marin est très complexe. Malgré le paramétrage du maillage, les résultats de force semblent varier d'un calcul à l'autre sous les mêmes conditions. Cette première analyse est faite avec une vitesse selon l'axe Z négatif, la force importante ici est surtout celle dans cet axe. On accepte donc le maillage fin, car même si le critère de 1% n'est pas respecté pour la force selon les axes X et Y, on est proche du 1%.

### 5.5. Résultats d'analyses

Après les calculs sur Fluent, on obtient des couples de données comme cet exemple :

Tableau 4 - Exemple de résultat Fluent

A1 – +Z : Vitesse de 0.3m/s										
	Angle		Vecteur déplacement			Force				
	Tangage	Lacet	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
10	-40	0	0	-0.64	-0.77	0.01	-6.75	-4.52	-7.80	8.13
11	-20	0	0	-0.34	-0.94	0.01	-4.22	-5.36	-6.48	6.83
12	0	0	0	0	-1	-0.03	-1.00	-5.74	-5.74	5.83
13	20	0	0	0.34	-0.94	-0.06	1.97	-5.40	-5.75	5.75
14	40	0	0	0.64	-0.77	-0.16	4.67	-4.52	-6.47	6.50

Les paramètres d'entrée sont la norme de la vitesse, les composants du vecteur vitesse et la vitesse des propulseurs. Les paramètres retournés sont les composants de la force appliquée sur les surfaces du sous-marin.

La force de trainée est la composante de la force totale, alignée sur le vecteur de déplacement. Étant donné qu'on connaît le vecteur unitaire du déplacement et les composants individuels de la force, on peut simplement faire le produit scalaire, ce qui revient à utiliser la formule suivante :

$$F_{trainée} = \vec{u}_x * \vec{F}_x + \vec{u}_y * \vec{F}_y + \vec{u}_z * \vec{F}_z$$

La norme totale de la force est obtenue par le calcul suivant :  $F_{totale} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$

On remarque que la différence entre les deux normes est assez minime, à cause que la force totale est relativement bien alignée avec le sens de déplacement.

Le reste des résultats des six analyses est présenté à l'[ANNEXE I – Résultats : Sous-marin actuel](#). Tous les tableaux seront utilisés pour la partie contrôle de l'analyse, présentée plus tard dans le rapport. Cependant, on peut analyser les différences entre les forces résultantes pour déterminer les axes de déplacements les plus efficaces.

La figure suivante représente la norme de la force de traînée sur l'enveloppe du sous-marin dans l'analyse frontale (A1). La direction de déplacement principale est selon l'axe Z positif. Les axes de rotation sont sur des échelles relatives par rapport à la direction principale, soit de  $-40^\circ$  à  $+40^\circ$  pour les deux angles.

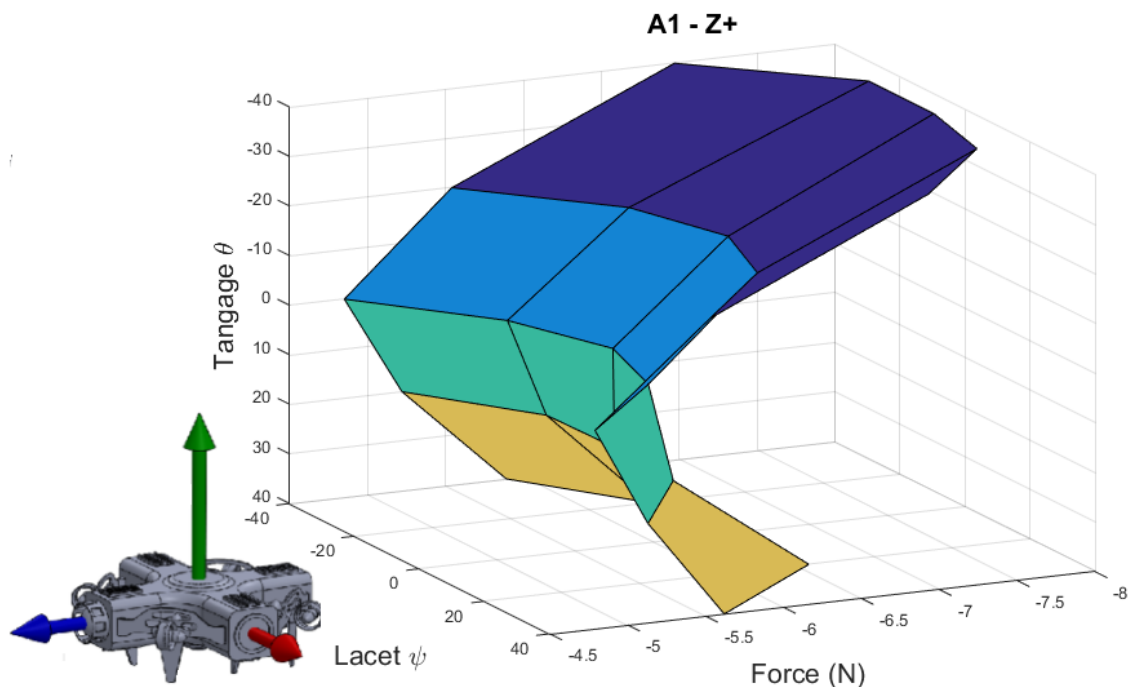


Figure 17 - Graphique A1.1

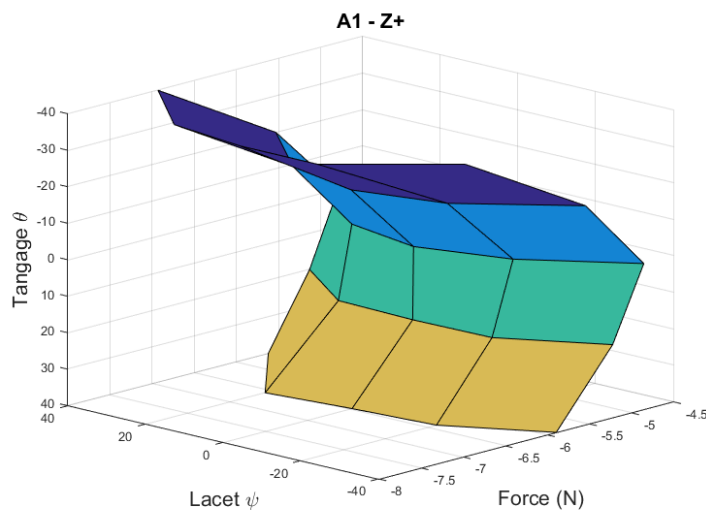


Figure 18 - Graphique A1.2

Ci-dessus, le même graphique, vu de l'arrière. Pour l'interprétation de cette figure, on sait que si le sous-marin était sphérique, soit une résistance égale dans tous les axes, le graphique serait un plan vertical, car toutes les forces seraient égales.

On remarque tout d'abord que lorsque le sous-marin se dirige avec un angle de tangage prononcé, il rencontre beaucoup plus de résistance. C'est normal puisque l'aire normale à la direction est plus grande. Cependant, lorsque cet angle est négatif, la résistance est plus grande à cause de l'effet des propulseurs. Puisque le sous-marin utilise ses propulseurs pour couler et rester sous l'eau, le flot d'eau constant qui sort vers le haut crée plus de résistance si le sous-marin cherche à remonter que lorsqu'il a un angle de tangage positif.

De plus, on réalise que la direction principale ( $\Theta = 0^\circ$ ,  $\Psi = 0^\circ$ ) n'est pas la plus efficace. C'est lorsque le sous-marin se déplace en diagonale que la force de traînée est minimale. Cependant, si on compare la différence lorsque l'angle de tangage est constant, on trouve moins de 1N de différence entre la direction principale et un déplacement à  $40^\circ$  sur le côté. Les mêmes constats peuvent être faits pour les analyses A1 à A4, étant donné que le sous-marin est pratiquement symétrique, il se comporte relativement de la même manière.

Lorsqu'il se déplace uniquement sur l'axe vertical, les propulseurs transversaux ne sont pas actifs, ce qui change le comportement du sous-marin et la résistance dans l'eau. Cependant les analyses A5 et A6 n'apportent pas de grande surprise :

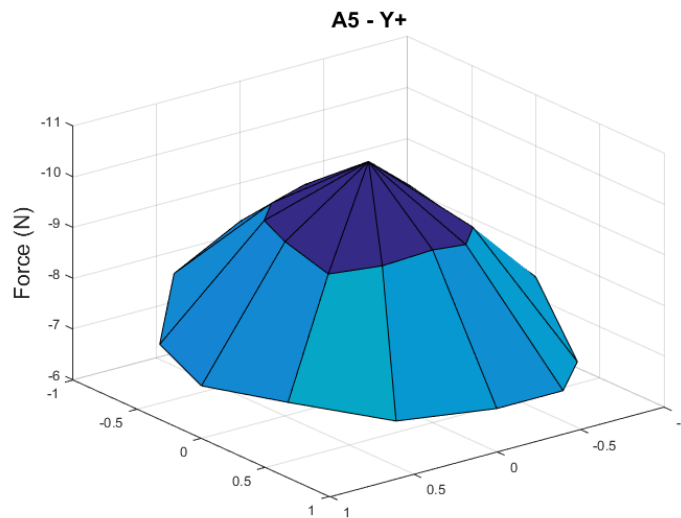


Figure 19 – Graphique A5

Selon le graphique, la force de traînée est maximale lorsque le sous-marin se déplace à la verticale et est réduite si le sous-marin se dirige en angle. Évidemment, puisque l'aire projetée diminue lorsque l'angle de tangage augmente, on s'attend à ce que la traînée diminue. Dans cette figure, étant donné que le domaine d'étude n'est pas divisé comme les 4 premières études, les échelles ne sont pas pareil. Ici si toutes les forces étaient égales, on obtiendrait un disque.

## 6. INTÉGRATION AU CONTRÔLE

---

L'objectif principal de notre démarche est de permettre au sous-marin de se déplacer de façon précise et rapide dans l'eau. Notre équipe compte sur un contrôle optimal du sous-marin pour réaliser les différentes tâches requises par la compétition. Puisque c'est un robot autonome, nous ne pouvons pas contrôler manuellement le robot. Cette tâche incombe au système de contrôle. Récemment, un nouveau modèle a été développé par l'équipe logiciel lors de la session d'automne 2018. Celui-ci est dynamique et non-linéaire. Dans cette section, on utilise le repère. ( $X_{abs}$ ,  $Y_{abs}$ ,  $Z_{abs}$ )

### 6.1. Modèle dynamique (Lavoie & Chennouf, 2018) (Fossen, 1994)

Voici l'équation générale de la dynamique du sous-marin, mentionnée plus haut :

$M\ddot{x} + C(\dot{x})\dot{x} + D(\dot{x})\dot{x} + g(x) = \tau$	
M	Matrice de masse et d'inertie
x	Position et orientation
C	Matrice de Coriolis
D	Matrice d'amortissement
g	Vecteur de gravité
t	Vecteur d'entrée de contrôle

Nous considérons la matrice de Coriolis nulle, puisque le robot ne se déplace qu'à de petites vitesses. De plus, nous n'avons pas à déterminer le vecteur d'entrée de contrôle.



## 6.2. Matrice M

Cette première matrice représente l'effet de l'inertie du sous-marin, soit sa résistance comme corps à changer son déplacement. Elle est constante dans le temps; donc, elle ne dépend pas de la position ou de la vitesse. Cela veut dire que nous sommes en mesure de la présenter ici avec les données récoltées. La matrice de masse et d'inertie est en kilogrammes et en kilogrammes mètres carrés :

$$M = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m \times z_g & -m \times y_g \\ 0 & m & 0 & -m \times z_g & 0 & m \times x_g \\ 0 & 0 & m & m \times y_g & -m \times x_g & 0 \\ 0 & -m \times z_g & m \times y_g & I_{xx} & -I_{yx} & -I_{zx} \\ m \times z_g & 0 & -m \times x_g & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{zy} \\ -m \times y_g & m \times x_g & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix}$$

Les valeurs nécessaires sont la masse, le centre de masse et les produits des moments d'inertie. Les produits d'inerties sont utilisés, car ils tiennent compte de la distribution de masse en fonction de la position par rapport à l'origine, on compense si le sous-marin n'est pas symétrique. (Chegg Study, n.d.) C'était une des simplifications faites dans le passé, que tous les produits d'inerties sont nuls, donc le sous-marin est parfaitement symétrique. Ayant fait les analyses appropriées, nous remplaçons les termes par leurs valeurs respectives pour le sous-marin AUV7 :

$$M = \begin{pmatrix} 43.839 & 0 & 0 & 0 & 1.0521 & -0.0614 \\ 0 & 43.839 & 0 & -1.0521 & 0 & 0.2148 \\ 0 & 0 & 43.839 & 0.0614 & -0.2148 & 0 \\ 0 & -1.0521 & 0.0614 & 1.6596 & 0.0046 & -0.0356 \\ 1.0521 & 0 & -0.2148 & 0.0046 & 1.6074 & -0.0051 \\ -0.0614 & 0.2148 & 0 & -0.0356 & -0.0051 & 2.9030 \end{pmatrix}$$

Lors de la conception du modèle non linéaire précédent, la matrice n'était qu'une diagonale à cause des simplifications de symétrie et les valeurs étaient assez différentes de celles-ci.

### 6.3. Matrice D

La matrice d'amortissement représente la résistance dans un fluide. Normalement elle se décompose en sous-sections, comme la friction de la coque, la résistance des vagues et la force de traînée. Cette partie est dynamique. Cela veut dire qu'elle variera selon la vitesse et la position du sous-marin par rapport à la direction de déplacement. Dans le système de contrôle du sous-marin, cette matrice sera calculée en temps réel. Voici à quoi elle ressemble lorsque l'on conserve les variables :

$$D(\dot{x}) = \text{diag}\{D_L + D_Q|\dot{x}|\}, \text{ où}$$

$$D_L = \text{diag}\{X_u \ Y_v \ Z_w \ K_p \ M_q \ N_r \}$$

$$D_L = \text{diag}\{X_{u|u|} \ Y_{v|v|} \ Z_{w|w|} \ K_{p|p|} \ M_{q|q|} \ N_{r|r|} \}$$

Ici, selon la nomenclature de Fossen, la lettre majuscule représente la force ou le moment dans son axe respectif, en fonction de l'indice, soit la vitesse linéaire ou angulaire du sous-marin dans le même axe.  $X_{u|u|}$  représente la force en  $X_{\text{abs}}$  en fonction du carré de la vitesse. Le sens de la vitesse est important, d'où la notation  $u^*_{\text{abs}}(u)$ .

Cependant, comme nous ne sommes pas en mesure de caractériser chaque sous-matrice individuellement, avec nos points d'analyse, nous serons en mesure de faire une surface d'interpolation. C'est la raison pour laquelle il est important d'obtenir le plus de résultats possible, afin d'avoir la surface la plus représentative possible. Les résultats que nous obtenons lors de nos analyses seront intégrés par l'équipe logicielle, en dehors du cadre de ce travail.

#### 6.4. Matrice de gravité

La matrice de gravité aussi est dynamique, mais elle la seule variable est l'orientation relative du sous-marin par rapport à la Terre. Évidemment la gravité ne change pas d'orientation, cependant, si le point de flottaison et le point de masse ne sont plus alignés, le comportement du sous-marin n'est plus pareil. Comme un bateau qui chavire s'il roule trop, le sous-marin peut devenir instable. (Cimbala, 2018) Cette matrice est la représentation des forces hydrostatiques et des moments en fonction de l'orientation par rapport à  $(X_{abs}, Y_{abs}, Z_{abs})$  du sous-marin. Elle se présente comme suit:

$$g(x) = \begin{pmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\Psi \\ -(W - B)c\theta c\Psi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\Psi + (z_G W - z_B B)c\theta s\Psi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\Psi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\Psi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{pmatrix}$$

$W$  est le poids du sous-marin, soit la masse fois l'accélération gravitationnelle, et  $B$  est la force d'Archimède. Nous insérons les données que nous avons récoltées lors de notre analyse de la masse et de la flottaison. Ceci est le résultat :

$$g(x) = \begin{pmatrix} -11.35 s\theta \\ 11.35 c\theta s\Psi \\ 11.35 c\theta c\Psi \\ 0.28 c\theta c\Psi + 8.54 c\theta s\Psi \\ 8.54 s\theta + 2.10 c\theta c\Psi \\ -2.10 c\theta s\Psi + 0.28 s\theta \end{pmatrix}$$

Finalement, ces matrices devront être implémentées dans le logiciel opéré par le sous-marin. Les résultats obtenus dans ce chapitre sont très différents de ce qui avait été estimé précédemment par l'équipe logicielle. Voir l'annexe 4.

## 7. RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE HYDRODYNAMIQUE

Puisque la majorité des déplacements du sous-marin se font vers l'avant et le côté, nous étudions l'effet d'ajouter une pièce conçue pour réduire la résistance de l'eau dans ces directions.

On remarque que le protecteur du dôme frontal, la couronne à l'avant, a déjà été fait en fonction de limiter la résistance. Les larges ouvertures permettent à l'eau de s'écouler et non pas de créer une zone d'eau stagnante dans le cône du protecteur.

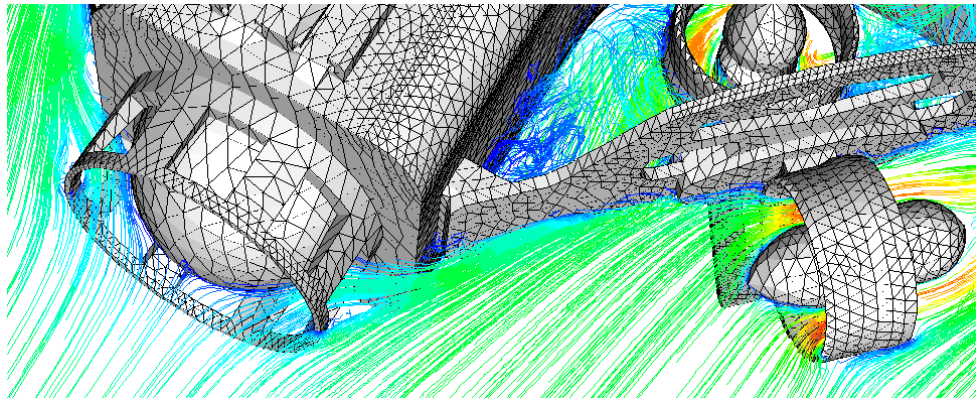


Figure 20 - Écoulement autour du dôme

Une zone de perte, commune à tous les types de véhicules est la turbulence créée par la surface arrière qui finit abruptement plutôt que de se prolonger et réunir les flux du dessus et du dessous. On remarque aussi des zones de remous sous le sous-marin, entre le dôme de la caméra et le dôme central.

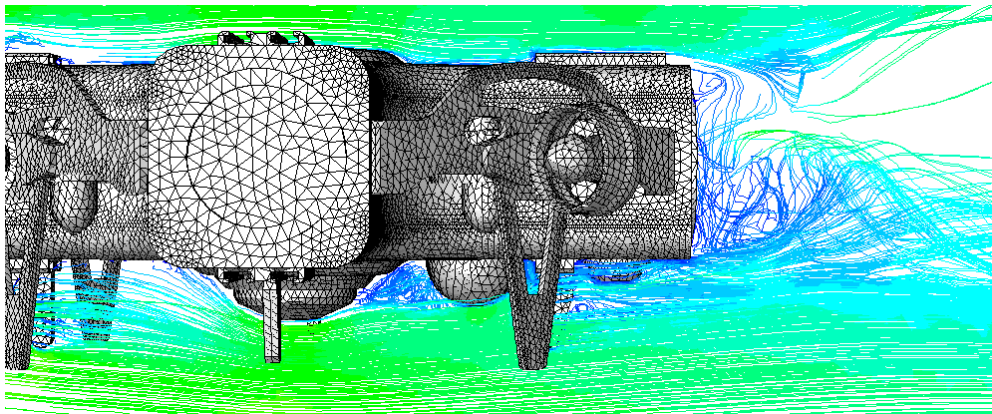


Figure 21 - Écoulement à l'arrière

Cependant, si on veut corriger le problème de manière efficace, la solution devrait être appliquée sur chaque côté et le sous-marin est déjà proche des limites de taille imposée par la compétition. Il faut choisir une autre manière de procéder.

Un autre point d'intérêt est l'espace moteur. Derrière les traverses de support moteur, il y a un grand vide où l'eau est stagnante (bleue), vois figure ci-dessous :

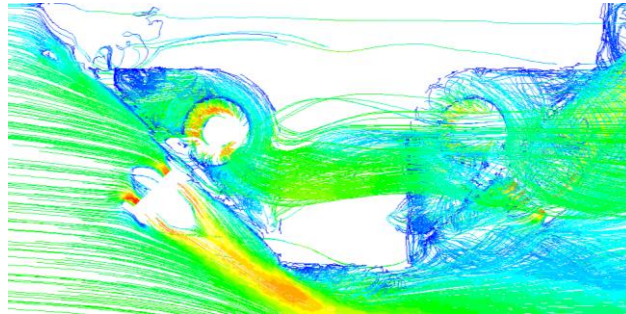


Figure 22 - Turbulence dans le creux moteur

Les points d'eau stagnante en C et en D sur la figure ci-dessous. On remarque aussi des turbulences en A et B, où l'eau a de la difficulté à se séparer en deux flots pour passer en haut et en bas de l'extrusion du sous-marin. On remarque aussi au point B que le moteur et le manque de séparation amplifient le problème. L'eau crée une boucle où elle entre en bas du moteur, pour sortir en haut pour retourner dans l'espace mort en C et recommencer le cycle dans le moteur. Étant donné que le moteur est efficace lorsqu'il déplace de l'eau du bas vers le haut pour faire couler le sous-marin, cette boucle créée par la basse pression en C nuit à son fonctionnement et son efficacité.

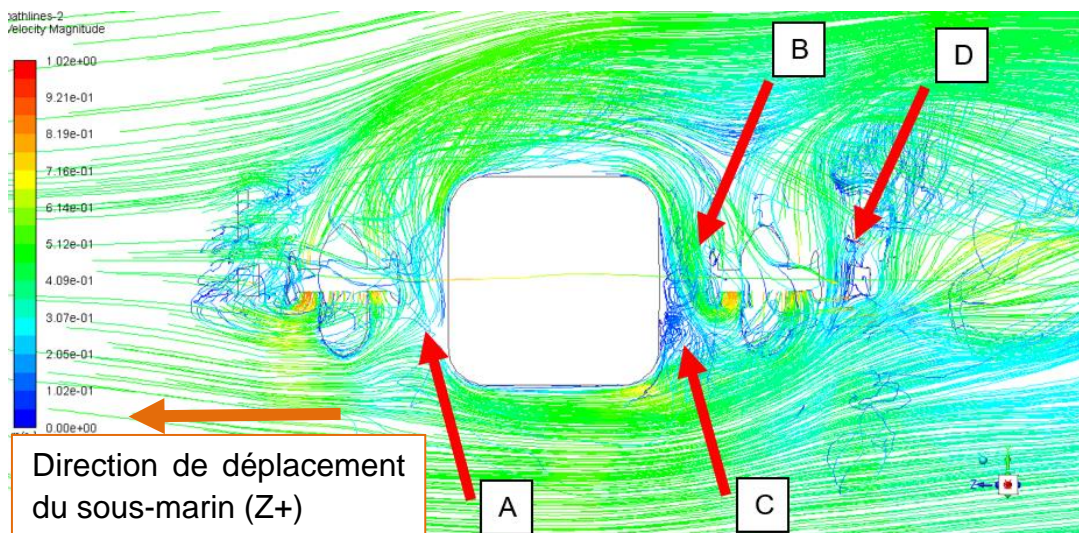


Figure 23 - Vue de coupe moteur, points d'intérêts

L'objectif de l'amélioration est donc de séparer efficacement les flux du dessus et du dessous pour que le sous-marin perce plus facilement dans l'eau. On cherche aussi à éliminer les zones mortes (C-D) où l'eau tourne en rond plutôt que de s'écouler. Finalement, en séparant les deux zones distinctes en haut et en bas du sous-marin, on souhaite améliorer l'efficacité du moteur.



Au final, pour rediriger les flux d'eau autant que possible vers le bas et le haut du sous-marin, on décide de faire une forme de mousse rigide. Cette forme doit être relativement simple, mais la mousse est choisie justement, car elle se travaille facilement avec une découpe au fil chaud. On peut donc la tailler relativement facilement.

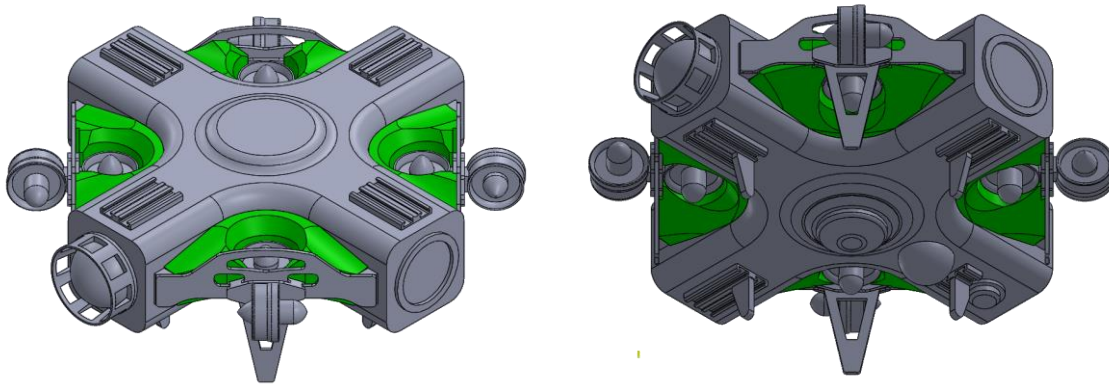


Figure 24 - Vue isométrique de haut et de bas

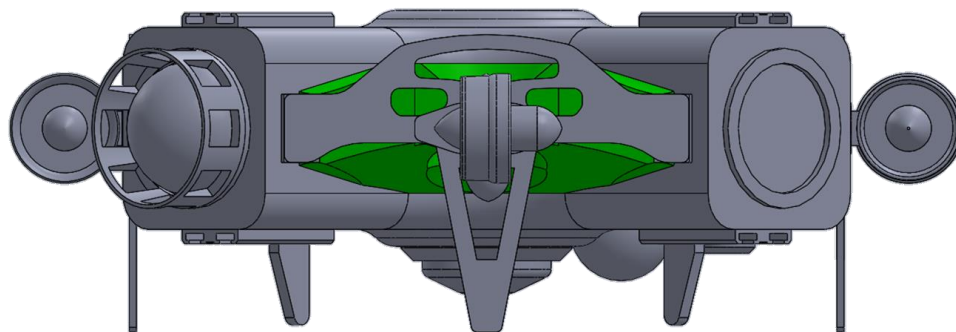


Figure 25 - Vue normale

La pièce, représentée en vert dans les rendus, est symétrique pour obtenir le même effet dans toutes les directions principales de déplacement ( $Z^+$ ,  $X^+$ ,  $Z^-$ ,  $X^-$ ).

### 7.1. Analyse des résultats

Si on superpose la surface des résultats pour l'analyse A1 faite sans et avec la pièce hydrodynamique, on obtient la figure suivante :

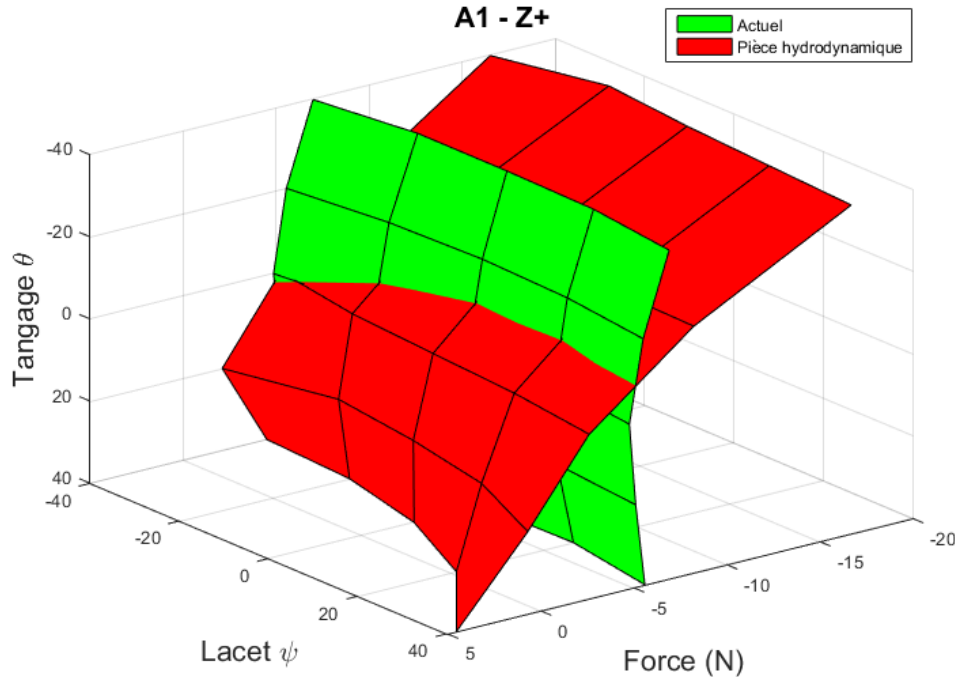


Figure 26 - Comparaison avec la pièce l'hydrodynamique

On obtient des résultats partagés. Premièrement, lorsque l'angle de tangage est négatif et que le sous-marin se dirige vers le haut, on augmente significativement la résistance, ce qui est l'opposé du résultat souhaité.

Si on diminue l'angle à zéro, donc lors des déplacements sur le plan horizontal, on a réduit la trainée, donc atteint notre objectif.

Cependant, lorsqu'on augmente l'angle de tangage et que le sous-marin pic du nez, la force de trainée diminue jusqu'à devenir positive. Si la trainée devient positive, le sous-marin est donc tiré dans la direction de déplacement plutôt que freiné. Ce comportement serait très dangereux pour notre sous-marin car on travaille tout le temps en piscine. Si le sous-marin passe un point où il est freiné à un état où il est entraîné, il pourrait heurter le fond ou les murs de la piscine.

Le tableau suivant est un extrait du tableau complet présenté à l'[ANNEXE III – Comparaison des analyses](#), on retrouve ici les points qui nous intéressent, soit lorsque l'angle de tangage est nul.

Tableau 5 - Amélioration avec la pièce ajoutée

Comparaison des forces selon les axes						
	Angle		Différence ( $F_{hydro} - F_{actuel}$ )/ $F_{actuel}$			
	Tangage	Lacet	Y	Z	Trainée	Totale
2	0°	320°	1000%	-55%	8%	84%
7	0°	340°	711%	-39%	-22%	69%
12	0°	0°	742%	-33%	-33%	61%
17	0°	20°	928%	-38%	-39%	66%
22	0°	40°	1203%	-56%	-45%	93%

On constate rapidement que la pièce hydrodynamique a eu l'effet recherché, soit de diminuer la trainée, et dans ces cinq cas particuliers, la résistance selon l'axe Z. On note de réduction d'au moins 30% de la trainée selon l'axe voulu.

Cependant, la force selon l'axe Y est beaucoup plus élevée. Il faut se rappeler qu'auparavant, la force était très petite, donc une augmentation de 1200% correspond à une force absolue de 9.6N pour le modèle hydrodynamique. C'est donc la composante en Y qui cause l'augmentation de la norme de la vitesse. Étant donné que cet axe ne fait pas partie de la trainée car il est normal au plan de déplacement, on ne le remarque pas dans le graphique.

Cette augmentation marquée de la vitesse en Y s'explique par la forme de la pièce de mousse. Pour suivre le contour des supports de propulseurs, la pièce est asymétrique selon le plan horizontal, mais la coque elle est symétrique. Le dessus de la mousse est donc relativement plat alors que le dessous a une forme qui rappelle une aile d'avion. A peu de chose près, on peut dire que l'ajout de cette forme de mousse crée de la portance. Le sous-marin est en mesure de compenser cette force avec les propulseurs, mais puisque la résistance est supérieure à ce qu'elle était avant, cette solution n'est pas gagnante. De plus, comme la force est dépendante de la vitesse, on complexifie le contrôle, ce qui est totalement opposé à l'objectif du projet.



En regardant les images de synthèse sur ANSYS, on constate qu'on a partiellement atteint notre but.



Figure 27 - Vue de coupe éloignée du centre

L'ajout de la pièce n'élimine pas complètement les remous lorsque l'eau frappe sur l'extrusion (A), particulièrement aux extrémités du sous-marin (figure ci-dessus). Il y a encore beaucoup de turbulence de l'autre côté aussi (B-C). Cependant l'effet est plus efficace proche du centre du sous-marin (figure ci-dessous). La forme des flux est presque parfaite, les déviations visibles sont attribuables aux moteurs verticaux.

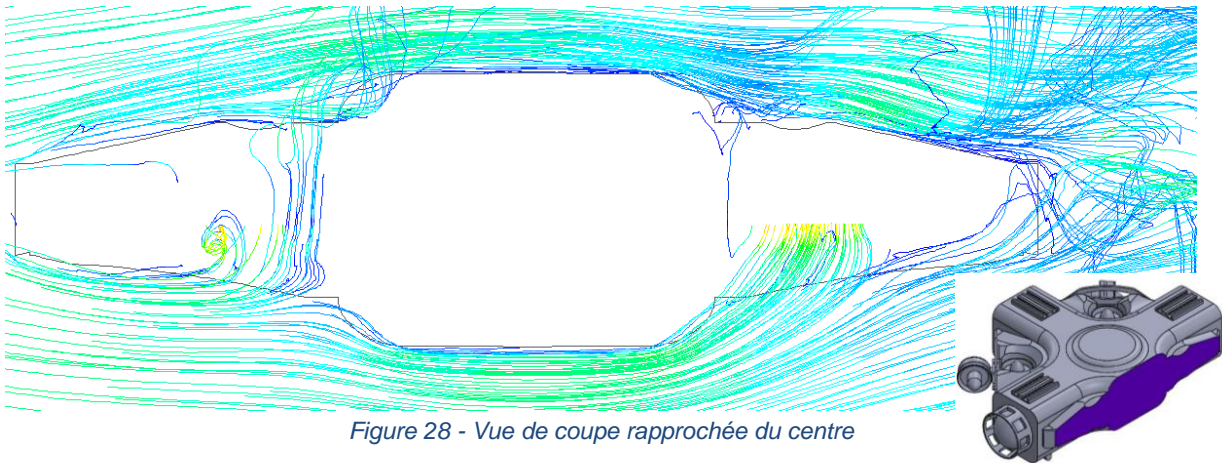


Figure 28 - Vue de coupe rapprochée du centre

La hauteur de la pièce est l'épaisseur maximale qu'on peut commander la mousse en un seul bloc. Pour la faire plus épaisse, il faudrait coller d'autres morceaux, mais ça semble nécessaire pour les résultats souhaités. Avec plus de temps, nous pourrions essayer plusieurs formes différentes pour réduire la traînée sans créer de portance, mais cette itération ne semble pas être une addition judicieuse à notre prototype. Il vaut mieux garder le sous-marin actuel que de rajouter cette pièce.

## 8. ÉVALUATION CONCEPTUELLE D'UN NOUVEAU ROBOT

Pour le club, il commence à être temps de remplacer la plateforme existante, car elle se fait vieillissante. Un des grands avantages de réaliser la caractérisation du sous-marin AUV7, c'est qu'il permet d'établir des points de référence pour ce qui est de l'inertie et de la résistance dans l'eau. De telles données sont très précieuses pour notre club, car nous avons amorcé la conception d'une toute nouvelle plateforme autonome, AUV8. Nous pouvons ainsi faire des comparaisons très utiles pour le développement de notre nouveau sous-marin.

Il y a plusieurs objectifs qui doivent être remplis par le nouveau sous-marin, puisque beaucoup de points négatifs ont été relevés sur la plateforme AUV7 actuelle. Puisque l'équipe a déjà conçu et travaillé sur nombre systèmes électriques et logiciels, notre équipe s'occupe de prévoir une toute nouvelle façon d'arranger ces systèmes dans la plateforme. Au moment de la conception d'AUV7, ces derniers n'étaient pas encore conçus, ce qui fit que la plateforme AUV7 n'était pas optimisée. Maintenant, nous savons exactement ce qui sera utilisé dans le sous-marin, ce qui nous permet de faire un arrangement très optimisé des composantes. On voit à droite la différence de taille entre le sous-marin actuel et le concept de la nouvelle plateforme.

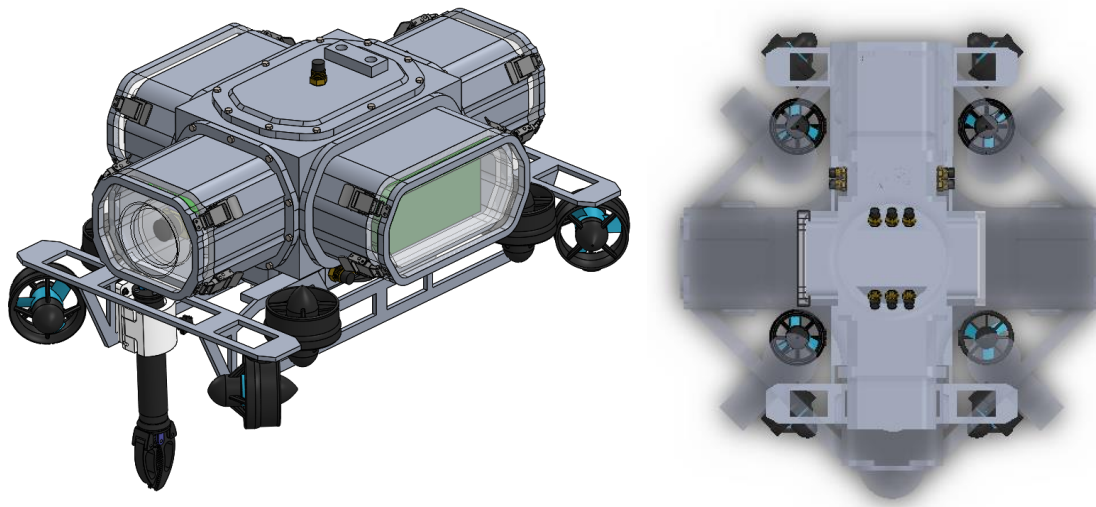


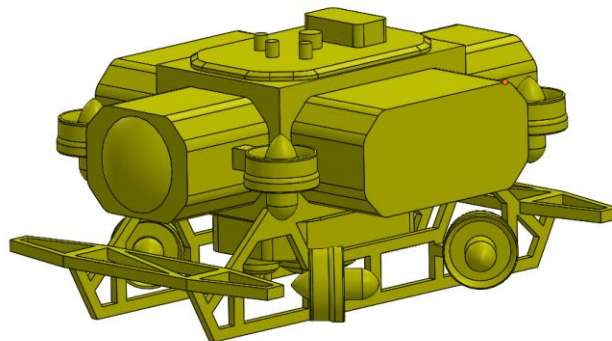
Figure 29 - concept d'AUV8

### 8.1. Étude de la masse

Premièrement, un des objectifs de conception du nouveau sous-marin est de réduire la masse totale de 25%, ce qui donne environ 35kg. La modélisation devra donc atteindre cette valeur de masse lorsque tous les composants auront été placés. Après, nous vérifierons le volume total occupé par le sous-marin pour déduire la flottabilité de celui-ci. Nous comparerons les poids pour décider si nous continuons avec ce concept. Par exemple, le sous-marin pourrait être très léger, mais déplacer un grand volume d'eau, ce qui nous obligerait à ajouter une grande quantité de lest, un compromis indésirable.

Premièrement, on dessine l'assemblage complet du robot. Nous obtenons alors une masse totale de 33.764 kg. Ensuite, on dessine un modèle simplifié de l'assemblage étanche. Encore une fois, le logiciel ne prend pas en compte le volume vide à l'intérieur de la coque, mais ce volume déplace tout de même de l'eau. En prenant en compte l'entièreté du modèle, nous obtenons un volume total de 0.03777 m<sup>3</sup>. Nous obtenons donc une densité totale de 893.9 kg/m<sup>3</sup>. Donc, la flottabilité est de 10.34%.

Bref, le poids du nouveau concept atteint notre cible, mais la flottabilité est plus grande qu'espérée, ce qui augmenterait la consommation des propulseurs qui permettent au robot de rester sous l'eau. Toutefois, au point où nous sommes dans le développement de la plateforme, cela veut simplement dire que nous pouvons continuer en faisant attention à ce facteur, et que nous pouvons nous permettre des épaisseurs plus grandes pour notre coque étanche, et une plus grande marge de manœuvre pour ajouter du lest qui servira à balancer le sous-marin.



*Figure 30 - Modèle simplifié pour ANSYS*

## 8.2. Paramètre hydrodynamique

Deuxièmement, nous reproduisons l'analyse faite plus haut pour le sous-marin AUV7, la seule modification étant au niveau de la modélisation du maillage. Ce faisant, nous obtiendrons les données nécessaires pour comparer l'hydrodynamisme des deux robots. Ce point est majeur considérant que cela évaluera directement la forme que nous donnons au sous-marin. Nous récoltons certaines données comme précédemment, soit les forces résultantes de l'eau sur le robot selon différents angles d'attaque et différentes vitesses. Toutefois, ce ne sera que pour un seul angle, comme si le robot avançait tout droit.

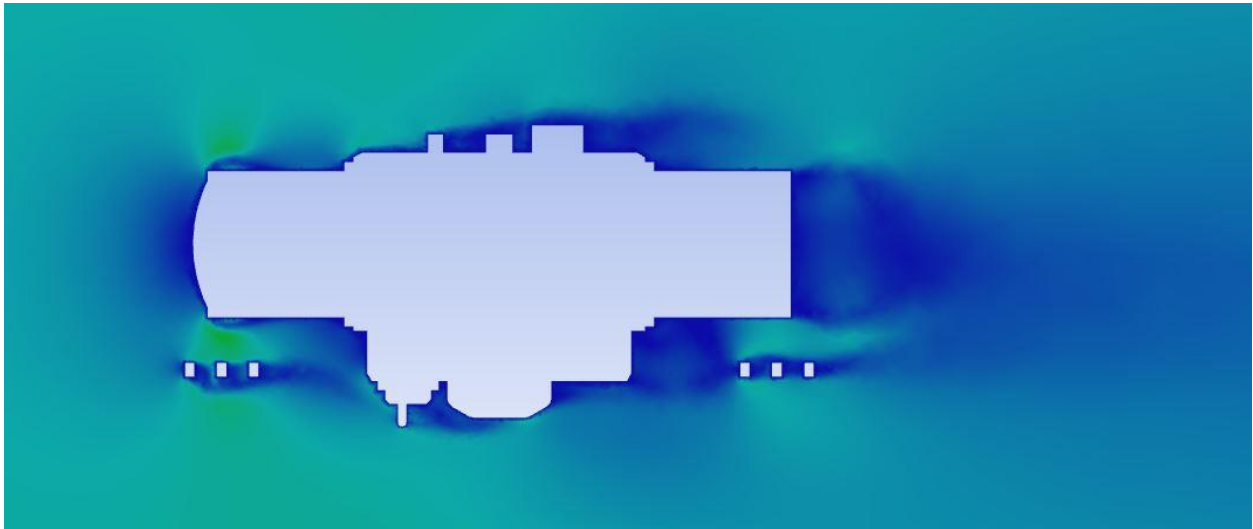


Figure 31 - Maillage AUV8 avec la traînée

En réalisant l'analyse d'ANSYS FLUENT avec une vitesse du fluide de 0.3 m/s et un angle de 0 pour le lacet et le tangage, on obtient les résultats suivants :

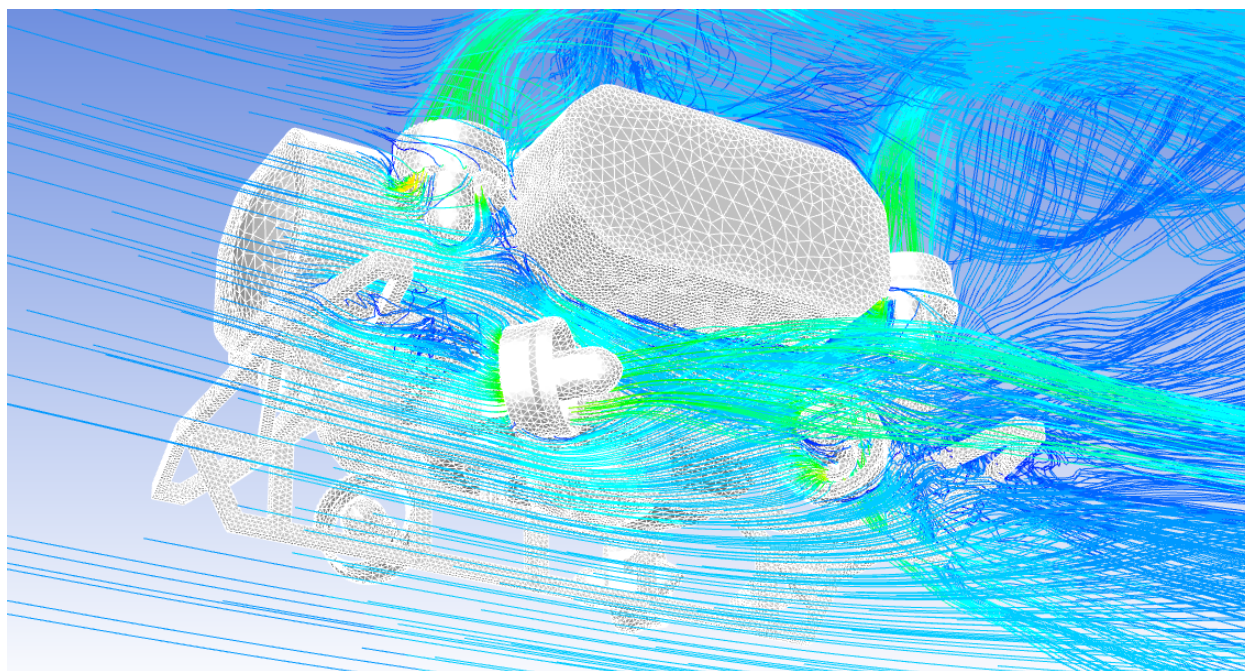
$F_z = -7.137 \text{ N}$	$F_x = -0.032 \text{ N}$	$F_y = -4.653 \text{ N}$
$M_x = 0.993 \text{ Nm}$	$M_y = 0.0334 \text{ Nm}$	$M_z = 0.017 \text{ Nm}$

On déduit donc que la forme devrait être améliorée, puisque la force de résistance est plus grande par rapport à AUV7 pour une même vitesse et angle du fluide. Cela pourrait être en partie dû à l'ajout d'un châssis sous la coque. Ce dernier est très utile pour installer les moteurs et les modules tels qu'un sonar ou un manipulateur, mais occupe une grande surface. Cela changera à mesure que nous améliorons le concept d'AUV8, et en ayant des dessins plus détaillés.



### 8.3. Placement des propulseurs

Troisièmement, une autre utilité de l'analyse par éléments finis des fluides est d'optimiser l'efficacité des propulseurs. En effet, il vaut mieux que ces derniers ne s'influencent pas entre eux, ce qui réduirait la précision du modèle de contrôle. Ce dernier se base sur plusieurs hypothèses, par exemple que la force générée par chaque propulseur est indépendante de l'état des autres propulseurs. En se servant de notre analyse effectuée sur ANSYS FLUENT, nous pouvons observer le comportement du fluide dans les régions des propulseurs.



*Figure 32 - Remous des moteurs*

On voit que les propulseurs qui servent à modifier la profondeur du sous-marin sont stratégiquement placés et qu'ils ont une allure raisonnable. Cependant, on voit que les propulseurs du dessous sont couplés dans le sens où ceux à l'arrière sont impactés par ceux à l'avant, ce qui déstabiliserait la poussée et l'efficacité. Une fois observée, une correction sera nécessaire dans le contrôle.

Un autre facteur auquel il faut penser, c'est que 4 des propulseurs sont tous en bas de la coque, ce qui crée un couple par rapport au centre de masse. Ainsi, le sous-marin aurait tendance à lever le nez. Or, comme on l'a vu dans les résultats de l'analyse, il y a un contre-balancement du couple  $M_x$ . Ainsi, nous pouvons poser l'hypothèse que le sous-marin aura une meilleure trajectoire. Nous avons observé lors d'un des derniers tests en piscine que le sous-marin AUV7 avait tendance à faire un mouvement de vague, soit que la profondeur et le tangage variaient beaucoup, possiblement à cause de la résistance créée par les modules sous le sous-marin.

## 9. CONCLUSION

---

Finalement, nous avons tenté de résoudre la problématique que nous avons définie. Nous avons vu qu'améliorer le contrôle permettrait au sous-marin d'augmenter considérablement sa performance. Or, faire cette étude permet d'approfondir notre connaissance sur d'autres points. Nous avons commencé par définir la convention des axes que nous utilisons. Par après, nous avons analysé la répartition de la masse à l'aide du logiciel SolidWorks, tout en vérifiant que les valeurs théoriques obtenues étaient cohérentes avec celles obtenues expérimentalement. À l'aide du même logiciel, nous avons étudié la flottabilité. Parallèlement, nous avons réalisé une étude hydrodynamique du sous-marin à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT, pour une grande diversité de points de calcul. Une fois nos données amassées, nous avons compilé les matrices que nous étions en mesure de compléter, soit la matrice des masses et de la gravité. Pour ce qui est de la matrice d'amortissement, les données devront être intégrées par l'équipe logicielle du club.

Bien sûr, puisque nous étions en mesure de le faire avec les analyses et méthodes que nous avons montées, nous avons étudié la possibilité de concevoir une pièce qui réduirait la traînée. De plus, nous en avons profité pour réaliser l'étude sur un concept de sous-marin sur lequel nous travaillons présentement dans SONIA, soit AUV8. Nous avons ensuite comparé ce dernier au sous-marin actuel.

Bref, nous pourrions augmenter la fiabilité de nos résultats en réalisant un modèle et une analyse encore plus précise, mais cela n'en valait pas la peine, puisque les calculs prennent des jours à compléter. Prochainement, nous travaillerons à l'implémentation elle-même, ainsi qu'à concevoir un modèle plus détaillé du nouveau sous-marin AUV8.

## 10. Bibliographie

---

ANSYS inc. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*.

Chegg Study. (s.d.). *Chegg Study - Product Of Inertia Of A Mass*. Récupéré sur <https://www.chegg.com/homework-help/definitions/product-of-inertia-of-a-mass-5>

Cimbala, Ç. &. (2018). *Fluid Mecahnnics - Fundementals and Applications*. New York: McDraw Hill.

Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester: John Wiley & Sons.

Lavoie, O., & Chennouf, R. (2018). *Contrôle pour sous-marin autonome*. Montréal: ÉTS, Université du Québec.

Mullen, B. (2014, 02). Récupéré sur Sim Cafe - Cornell University: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Flow+over+an+Airfoil>

RoboNation. (s.d.). *2018 Robosub Mission and Scoring v1.50*. Récupéré sur RoboNation: [https://www.robonation.org/sites/default/files/2018%20RoboSub\\_2018%20Mission%20and%20Scoring\\_v01.50.pdf](https://www.robonation.org/sites/default/files/2018%20RoboSub_2018%20Mission%20and%20Scoring_v01.50.pdf)

RoboNation. (s.d.). *RoboSub*. Récupéré sur RoboSub - RoboNation: <https://www.robonation.org/competition/robosub>

SIMUTRAIN. (2018). *Leçon 3 : Pompe et turbine*.

SIMUTRAIN. (2018). *Leçon 6 : Fluent Modélisation de turbulence*.

## 1. ANNEXE I – Résultats : Sous-marin actuel

A1 – Z+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	320	0.49	-0.64	-0.59	1.25	-6.47	-3.74	-6.97	7.58
1	-20	320	0.60	-0.34	-0.72	1.60	-3.97	-4.48	-5.54	6.19
2	0	320	0.64	0	-0.77	1.72	-0.69	-4.89	-4.85	5.23
3	20	320	0.60	0.34	-0.72	1.69	2.54	-4.63	-5.22	5.54
4	40	320	0.49	0.64	-0.59	1.22	4.52	-4.05	-5.89	6.19
5	-40	340	0.26	-0.64	-0.72	0.73	-7.12	-4.20	-7.80	8.30
6	-20	340	0.32	-0.34	-0.88	0.91	-4.20	-5.13	-6.26	6.69
7	0	340	0.34	0.00	-0.94	0.98	-1.02	-5.47	-5.48	5.65
8	20	340	0.32	0.34	-0.88	0.92	2.37	-5.23	-5.73	5.82
9	40	340	0.26	0.64	-0.72	0.65	4.73	-4.42	-6.39	6.51
10	-40	0	0	-0.64	-0.77	0.01	-6.75	-4.52	-7.80	8.13
11	-20	0	0	-0.34	-0.94	0.01	-4.22	-5.36	-6.48	6.83
12	0	0	0	0	-1	-0.03	-1.00	-5.74	-5.74	5.83
13	20	0	0	0.34	-0.94	-0.06	1.97	-5.40	-5.75	5.75
14	40	0	0	0.64	-0.77	-0.16	4.67	-4.52	-6.47	6.50
15	-40	20	-0.26	-0.64	-0.72	-0.77	-6.72	-4.35	-7.66	8.05
16	-20	20	-0.32	-0.34	-0.88	-0.89	-4.04	-5.19	-6.25	6.63
17	0	20	-0.34	0.00	-0.94	-1.03	-0.86	-5.53	-5.55	5.70
18	20	20	-0.32	0.34	-0.88	-0.95	2.21	-5.27	-5.71	5.79
19	40	20	-0.26	0.64	-0.72	-0.72	5.00	-4.42	-6.58	6.71
20	-40	40	-0.49	-0.64	-0.59	-1.24	-6.19	-4.00	-6.93	7.47
21	-20	40	-0.60	-0.34	-0.72	-1.57	-3.81	-4.55	-5.53	6.14
22	0	40	-0.64	0	-0.77	-1.68	-0.74	-4.85	-4.79	5.19
23	20	40	-0.60	0.34	-0.72	-1.60	2.37	-4.66	-5.13	5.47
24	40	40	-0.49	0.64	-0.59	-1.08	4.27	-4.00	-5.62	5.95



## A2 – X+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	90	0.77	0.64	0.00	-8.44	-7.21	-0.20	-11.10	11.10
1	-20	90	0.94	0.34	0.00	-9.63	-4.49	-0.13	-10.58	10.63
2	0	90	1.00	0.00	0.00	-10.05	-0.40	-0.09	-10.05	10.06
3	20	90	0.94	-0.34	0.00	-9.72	3.52	-0.09	-10.33	10.33
4	40	90	0.77	-0.64	0.00	-8.70	7.12	-0.09	-11.25	11.25
5	-40	60	0.66	0.64	0.38	-7.70	-7.66	-1.17	-10.48	10.92
6	-20	60	0.81	0.34	0.47	-9.19	-4.46	-1.50	-9.71	10.32
7	0	60	0.87	0.00	0.50	-9.62	-0.36	-1.61	-9.13	9.76
8	20	60	0.81	-0.34	0.47	-9.17	4.01	-1.43	-9.51	10.11
9	40	60	0.66	-0.64	0.38	-8.72	5.32	-0.85	-9.53	10.25
10	-40	80	0.75	0.64	0.13	-8.25	-7.87	-0.51	-11.35	11.41
11	-20	80	0.93	0.34	0.16	-9.47	-5.11	-0.64	-10.61	10.78
12	0	80	0.98	0.00	0.17	-9.96	-0.43	-0.61	-9.92	9.99
13	20	80	0.93	-0.34	0.16	-9.69	3.67	-0.52	-10.31	10.37
14	40	80	0.75	-0.64	0.13	-8.63	7.29	-0.46	-11.26	11.31
15	-40	100	0.75	0.64	-0.13	-8.10	-7.77	0.56	-11.18	11.24
16	-20	100	0.93	0.34	-0.16	-9.61	-4.49	0.34	-10.49	10.62
17	0	100	0.98	0.00	-0.17	-9.97	-0.39	0.42	-9.89	9.98
18	20	100	0.93	-0.34	-0.16	-9.63	3.67	0.36	-10.23	10.32
19	40	100	0.75	-0.64	-0.13	-8.55	7.07	0.30	-11.04	11.10
20	-40	120	0.66	0.64	-0.38	-7.80	-7.26	0.87	-10.18	10.69
21	-20	120	0.81	0.34	-0.47	-9.22	-4.21	1.32	-9.56	10.22
22	0	120	0.87	0.00	-0.50	-9.62	-0.04	1.31	-8.99	9.71
23	20	120	0.81	-0.34	-0.47	-9.20	3.85	1.19	-9.37	10.05
24	40	120	0.66	-0.64	-0.38	-8.12	6.75	0.91	-10.08	10.60

## A3 – Z-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	140	0.49	0.64	-0.59	-1.26	-6.29	7.38	-9.00	9.78
1	-20	140	0.60	0.34	-0.72	-2.00	-4.43	8.15	-8.59	9.49
2	0	140	0.64	0.00	-0.77	-2.00	-0.53	8.57	-7.85	8.81
3	20	140	0.60	-0.34	-0.72	-1.86	3.17	8.36	-8.23	9.14
4	40	140	0.49	-0.64	-0.59	-1.32	5.53	7.57	-8.65	9.47
5	-40	160	0.26	0.64	-0.72	-0.93	-7.88	7.75	-10.89	11.09
6	-20	160	0.32	0.34	-0.88	-1.17	-4.37	8.95	-9.77	10.03
7	0	160	0.34	0.00	-0.94	-1.15	-0.47	9.35	-9.18	9.43
8	20	160	0.32	-0.34	-0.88	-1.32	3.20	9.12	-9.58	9.76
9	40	160	0.26	-0.64	-0.72	-0.83	6.46	8.02	-10.15	10.34
10	-40	180	0.00	0.64	-0.77	-0.11	-8.02	8.07	-11.34	11.38
11	-20	180	0.00	0.34	-0.94	-0.08	-4.46	9.20	-10.17	10.23
12	0	180	0.00	0.00	-1.00	-0.09	-0.65	9.50	-9.50	9.52
13	20	180	0.00	-0.34	-0.94	-0.07	3.26	9.26	-9.82	9.82
14	40	180	0.00	-0.64	-0.77	-0.06	6.57	8.24	-10.53	10.54
15	-40	200	-0.26	0.64	-0.72	0.71	-7.77	7.94	-10.90	11.13
16	-20	200	-0.32	0.34	-0.88	0.94	-4.47	9.00	-9.78	10.10
17	0	200	-0.34	0.00	-0.94	1.05	-0.51	9.38	-9.18	9.46
18	20	200	-0.32	-0.34	-0.88	0.87	3.37	9.04	-9.41	9.68
19	40	200	-0.26	-0.64	-0.72	0.70	6.22	8.41	-10.23	10.48
20	-40	220	-0.49	0.64	-0.59	1.19	-7.11	7.32	-9.45	10.27
21	-20	220	-0.60	0.34	-0.72	1.70	-4.34	8.24	-8.44	9.47
22	0	220	-0.64	0.00	-0.77	1.76	-0.35	8.81	-7.88	8.99
23	20	220	-0.60	-0.34	-0.72	1.56	3.50	8.62	-8.35	9.43
24	40	220	-0.49	-0.64	-0.59	1.21	5.60	7.51	-8.60	9.45

## A4 – X-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	270	-0.77	0.64	0.00	8.79	-6.98	-0.02	-11.22	11.23
1	-20	270	-0.94	0.34	0.00	9.56	-4.60	-0.01	-10.56	10.61
2	0	270	-1.00	0.00	0.00	10.06	-0.60	-0.03	-10.06	10.08
3	20	270	-0.94	-0.34	0.00	9.72	3.36	0.00	-10.28	10.28
4	40	270	-0.77	-0.64	0.00	8.73	6.89	-0.04	-11.11	11.12
5	-40	240	-0.66	0.64	-0.38	7.61	-7.95	1.13	-10.59	11.06
6	-20	240	-0.81	0.34	-0.47	9.13	-4.32	1.39	-9.56	10.19
7	0	240	-0.87	0.00	-0.50	9.49	-0.28	1.46	-8.95	9.60
8	20	240	-0.81	-0.34	-0.47	9.61	3.96	1.28	-9.78	10.48
9	40	240	-0.66	-0.64	-0.38	8.28	6.41	1.04	-10.01	10.52
10	-40	260	-0.75	0.64	-0.13	8.04	-8.52	0.41	-11.60	11.72
11	-20	260	-0.93	0.34	-0.16	9.47	-4.72	0.48	-10.45	10.59
12	0	260	-0.98	0.00	-0.17	9.93	-0.60	0.46	-9.86	9.96
13	20	260	-0.93	-0.34	-0.16	9.59	3.36	0.44	-10.10	10.17
14	40	260	-0.75	-0.64	-0.13	8.56	6.66	0.39	-10.79	10.85
15	-40	280	-0.75	0.64	0.13	8.18	-8.32	-0.41	-11.58	11.68
16	-20	280	-0.93	0.34	0.16	9.58	-4.58	-0.49	-10.51	10.63
17	0	280	-0.98	0.00	0.17	9.95	-0.53	-0.50	-9.89	9.98
18	20	280	-0.93	-0.34	0.16	9.65	3.45	-0.50	-10.19	10.26
19	40	280	-0.75	-0.64	0.13	8.87	6.37	-0.38	-10.83	10.92
20	-40	300	-0.66	0.64	0.38	7.74	-7.83	-1.12	-10.60	11.07
21	-20	300	-0.81	0.34	0.47	9.10	-4.47	-1.41	-9.59	10.23
22	0	300	-0.87	0.00	0.50	9.53	-0.19	-1.48	-9.00	9.65
23	20	300	-0.81	-0.34	0.47	9.42	3.71	-1.23	-9.51	10.20
24	40	300	-0.66	-0.64	0.38	8.89	5.63	-0.42	-9.67	10.53

v

A5 – Y+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-90	0	0.00	1.00	0.00	0.14	-10.57	-0.21	-10.57	10.58
1	-70	0	0.00	0.94	0.34	0.19	-9.23	-2.22	-9.43	9.49
3	-70	30	0.17	0.94	0.30	-1.03	-8.77	-2.03	-9.02	9.06
5	-70	60	0.30	0.94	0.17	-1.86	-9.01	-1.24	-9.23	9.28
7	-70	90	0.34	0.94	0.00	-2.17	-9.22	-0.21	-9.40	9.47
9	-70	120	0.30	0.94	-0.17	-1.79	-9.08	0.83	-9.21	9.29
11	-70	150	0.17	0.94	-0.30	-0.98	-9.10	1.59	-9.18	9.29
13	-70	180	0.00	0.94	-0.34	0.13	-9.00	1.80	-9.08	9.18
15	-70	210	-0.17	0.94	-0.30	1.26	-9.33	1.54	-9.44	9.54
17	-70	240	-0.30	0.94	-0.17	2.17	-9.18	0.79	-9.40	9.46
19	-70	270	-0.34	0.94	0.00	2.41	-9.28	-0.20	-9.54	9.59
21	-70	300	-0.30	0.94	0.17	2.13	-9.18	-1.24	-9.47	9.51
23	-70	330	-0.17	0.94	0.30	1.27	-9.27	-1.91	-9.50	9.55
2	-50	0	0.00	0.77	0.64	0.10	-6.08	-3.69	-7.03	7.12
4	-50	30	0.32	0.77	0.56	-1.90	-6.14	-3.31	-7.16	7.23
6	-50	60	0.56	0.77	0.32	-3.21	-5.81	-2.02	-6.89	6.94
8	-50	90	0.64	0.77	0.00	-3.77	-5.77	-0.20	-6.85	6.90
10	-50	120	0.56	0.77	-0.32	-3.30	-5.55	1.63	-6.61	6.66
12	-50	150	0.32	0.77	-0.56	-1.79	-5.39	3.12	-6.44	6.48
14	-50	180	0.00	0.77	-0.64	0.11	-6.99	3.22	-7.42	7.70
16	-50	210	-0.32	0.77	-0.56	2.04	-6.32	2.90	-7.12	7.25
18	-50	240	-0.56	0.77	-0.32	3.77	-5.92	1.70	-7.18	7.22
20	-50	270	-0.64	0.77	0.00	4.02	-7.39	-0.37	-8.25	8.43
22	-50	300	-0.56	0.77	0.32	3.76	-6.63	-1.98	-7.81	7.87
24	-50	330	-0.32	0.77	0.56	2.10	-6.19	-3.14	-7.16	7.25

## A6 – Y-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	90	0	0.00	-1.00	0.00	0.04	11.09	0.01	-11.09	11.09
2	70	0	0.00	-0.94	0.34	0.06	10.17	-1.63	-10.12	10.30
4	70	30	0.17	-0.94	0.30	-0.91	9.82	-1.40	-9.79	9.96
6	70	60	0.30	-0.94	0.17	-1.58	9.74	-0.79	-9.76	9.90
8	70	90	0.34	-0.94	0.00	-1.76	9.83	0.03	-9.84	9.98
10	70	120	0.30	-0.94	-0.17	-1.49	9.90	0.83	-9.89	10.05
12	70	150	0.17	-0.94	-0.30	-0.84	10.00	1.44	-9.97	10.14
14	70	180	0.00	-0.94	-0.34	0.07	9.69	1.73	-9.69	9.84
16	70	210	-0.17	-0.94	-0.30	0.97	9.81	1.51	-9.83	9.97
18	70	240	-0.30	-0.94	-0.17	1.63	9.80	0.87	-9.85	9.98
20	70	270	-0.34	-0.94	0.00	1.90	9.90	0.03	-9.95	10.08
22	70	300	-0.30	-0.94	0.17	1.74	10.00	-0.85	-10.06	10.19
24	70	330	-0.17	-0.94	0.30	0.98	9.90	-1.41	-9.89	10.05
1	50	0	0.00	-0.77	0.64	0.06	6.98	-2.92	-7.23	7.57
3	50	30	0.32	-0.77	0.56	-1.83	7.08	-2.55	-7.43	7.75
5	50	60	0.56	-0.77	0.32	-3.01	6.81	-1.42	-7.35	7.58
7	50	90	0.64	-0.77	0.00	-3.35	7.85	0.06	-8.16	8.53
9	50	120	0.56	-0.77	-0.32	-2.86	6.97	1.69	-7.48	7.72
11	50	150	0.32	-0.77	-0.56	-1.69	7.09	2.79	-7.53	7.81
13	50	180	0.00	-0.77	-0.64	-0.08	6.79	3.15	-7.23	7.49
15	50	210	-0.32	-0.77	-0.56	1.77	7.07	2.90	-7.60	7.84
17	50	240	-0.56	-0.77	-0.32	3.06	6.59	1.77	-7.32	7.48
19	50	270	-0.64	-0.77	0.00	3.44	6.41	0.10	-7.13	7.28
21	50	300	-0.56	-0.77	0.32	3.09	6.83	-1.45	-7.42	7.63
23	50	330	-0.32	-0.77	0.56	1.74	7.65	-2.40	-7.76	8.21

## 2. ANNEXE II – Résultats : Sous-marin hydrodynamique

A1 – Z+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	320	0.49	-0.64	-0.59	2.91	-20.71	-2.99	-16.50	21.12
1	-20	320	0.60	-0.34	-0.72	5.58	-18.16	-0.75	-10.12	19.02
2	0	320	0.64	0	-0.77	5.52	-7.56	-2.20	-5.23	9.61
3	20	320	0.60	0.34	-0.72	4.58	-6.58	-2.19	-2.09	8.31
4	40	320	0.49	0.64	-0.59	3.12	3.43	-1.27	-4.49	4.81
5	-40	340	0.26	-0.64	-0.72	1.96	-28.10	0.71	-18.07	28.18
6	-20	340	0.32	-0.34	-0.88	3.16	-18.10	-2.22	-9.17	18.51
7	0	340	0.34	0.00	-0.94	3.35	-8.29	-3.35	-4.29	9.55
8	20	340	0.32	0.34	-0.88	2.90	-0.42	-3.13	-3.55	4.28
9	40	340	0.26	0.64	-0.72	2.30	3.33	-1.94	-4.14	4.49
10	-40	0	0	-0.64	-0.77	-0.23	-27.21	-0.01	-17.49	27.21
11	-20	0	0	-0.34	-0.94	0.82	-17.36	-2.78	-8.55	17.60
12	0	0	0	0	-1	1.31	-8.46	-3.83	-3.83	9.38
13	20	0	0	0.34	-0.94	1.38	-1.45	-3.48	-2.77	4.01
14	40	0	0	0.64	-0.77	1.36	1.90	-2.06	-2.81	3.12
15	-40	20	-0.26	-0.64	-0.72	-2.25	-25.73	0.05	-17.09	25.83
16	-20	20	-0.32	-0.34	-0.88	-1.23	-16.96	-2.53	-8.43	17.19
17	0	20	-0.34	0.00	-0.94	-0.47	-8.81	-3.45	-3.40	9.47
18	20	20	-0.32	0.34	-0.88	0.10	-2.89	-3.02	-1.64	4.18
19	40	20	-0.26	0.64	-0.72	0.67	-1.15	-1.68	-0.29	2.14
20	-40	40	-0.49	-0.64	-0.59	-3.87	-23.62	0.64	-16.71	23.94
21	-20	40	-0.60	-0.34	-0.72	-2.78	-15.79	-1.63	-8.25	16.11
22	0	40	-0.64	0	-0.77	-1.54	-9.65	-2.15	-2.63	10.00
23	20	40	-0.60	0.34	-0.72	-0.33	-6.12	-1.70	0.67	6.36
24	40	40	-0.49	0.64	-0.59	1.42	-7.06	-1.26	4.50	7.31

## A2 – X+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	90	0.77	0.64	0.00	-2.78	-22.84	0.08	-16.81	23.01
1	-20	90	0.94	0.34	0.00	-3.84	-18.36	0.05	-9.89	18.75
2	0	90	1.00	0.00	0.00	-5.35	-8.00	0.13	-5.35	9.63
3	20	90	0.94	-0.34	0.00	-4.96	-0.19	0.10	-4.60	4.97
4	40	90	0.77	-0.64	0.00	-3.44	3.20	0.06	-4.69	4.70
5	-40	60	0.66	0.64	0.38	0.97	-27.38	-3.36	-18.24	27.61
6	-20	60	0.81	0.34	0.47	-2.75	-18.02	-3.34	-9.97	18.53
7	0	60	0.87	0.00	0.50	-4.27	-8.15	-2.79	-5.09	9.61
8	20	60	0.81	-0.34	0.47	-4.05	-0.46	-2.25	-4.20	4.65
9	40	60	0.66	-0.64	0.38	-2.62	1.34	-1.28	-3.09	3.21
10	-40	80	0.75	0.64	0.13	0.09	-28.28	-1.23	-18.28	28.31
11	-20	80	0.93	0.34	0.16	-3.71	-18.33	-1.09	-9.88	18.73
12	0	80	0.98	0.00	0.17	-5.20	-8.15	-0.90	-5.28	9.71
13	20	80	0.93	-0.34	0.16	-4.89	-0.15	-0.72	-4.59	4.94
14	40	80	0.75	-0.64	0.13	-3.33	2.85	-0.46	-4.41	4.41
15	-40	100	0.75	0.64	-0.13	0.12	-28.36	0.99	-18.27	28.38
16	-20	100	0.93	0.34	-0.16	-3.72	-18.37	1.21	-9.92	18.78
17	0	100	0.98	0.00	-0.17	-5.23	-8.22	1.15	-5.35	9.81
18	20	100	0.93	-0.34	-0.16	-4.90	-0.13	0.93	-4.64	4.99
19	40	100	0.75	-0.64	-0.13	-3.44	2.79	0.64	-4.47	4.48
20	-40	120	0.66	0.64	-0.38	1.04	-27.72	3.17	-18.34	27.92
21	-20	120	0.81	0.34	-0.47	-2.64	-18.52	3.49	-10.12	19.03
22	0	120	0.87	0.00	-0.50	-4.29	-8.78	3.11	-5.27	10.25
23	20	120	0.81	-0.34	-0.47	-4.19	-0.90	2.53	-4.29	4.98
24	40	120	0.66	-0.64	-0.38	-2.77	1.37	1.56	-3.31	3.46

## A3 – Z-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	140	0.49	0.64	-0.59	-2.388	-19.991	1.854	-15.11	20.22
1	-20	140	0.60	0.34	-0.72	-4.985	-18.008	0.594	-9.60	18.69
2	0	140	0.64	0.00	-0.77	-5.196	-7.659	2.054	-4.91	9.48
3	20	140	0.60	-0.34	-0.72	-4.409	0.572	2.117	-4.38	4.92
4	40	140	0.49	-0.64	-0.59	-3.066	3.943	1.209	-4.75	5.14
5	-40	160	0.26	0.64	-0.72	-1.310	-27.594	-0.942	-17.40	27.64
6	-20	160	0.32	0.34	-0.88	-2.695	-17.764	2.171	-8.86	18.10
7	0	160	0.34	0.00	-0.94	-3.104	-7.679	3.377	-4.23	8.94
8	20	160	0.32	-0.34	-0.88	-2.748	0.306	3.231	-3.84	4.25
9	40	160	0.26	-0.64	-0.72	-2.136	4.367	1.934	-4.76	5.23
10	-40	180	0.00	0.64	-0.77	0.847	-26.734	-0.169	-17.05	26.75
11	-20	180	0.00	0.34	-0.94	-0.279	-16.875	2.782	-8.39	17.10
12	0	180	0.00	0.00	-1.00	-0.957	-7.619	3.866	-3.87	8.60
13	20	180	0.00	-0.34	-0.94	-1.052	-0.089	3.604	-3.36	3.76
14	40	180	0.00	-0.64	-0.77	-1.082	2.895	2.142	-3.50	3.76
15	-40	200	-0.26	0.64	-0.72	2.854	-25.473	-0.281	-16.92	25.63
16	-20	200	-0.32	0.34	-0.88	1.690	-16.229	2.494	-8.30	16.51
17	0	200	-0.34	0.00	-0.94	0.797	-7.474	3.466	-3.53	8.28
18	20	200	-0.32	-0.34	-0.88	0.337	-1.023	3.187	-2.57	3.36
19	40	200	-0.26	-0.64	-0.72	-0.390	-0.151	1.693	-1.02	1.74
20	-40	220	-0.49	0.64	-0.59	4.303	-23.471	-1.003	-16.62	23.88
21	-20	220	-0.60	0.34	-0.72	3.095	-15.850	1.401	-8.30	16.21
22	0	220	-0.64	0.00	-0.77	1.847	-8.582	2.263	-2.92	9.07
23	20	220	-0.60	-0.34	-0.72	0.658	-4.097	1.728	-0.24	4.50
24	40	220	-0.49	-0.64	-0.59	-0.799	-4.823	0.827	3.01	4.96



x

A4 – X-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-40	270	-0.77	0.64	0.00	2.74	-22.99	0.15	-16.88	23.15
1	-20	270	-0.94	0.34	0.00	4.19	-17.96	0.04	-10.08	18.44
2	0	270	-1.00	0.00	0.00	5.60	-7.87	0.01	-5.60	9.66
3	20	270	-0.94	-0.34	0.00	5.32	0.38	0.00	-5.13	5.33
4	40	270	-0.77	-0.64	0.00	3.75	2.90	0.07	-4.74	4.75
5	-40	240	-0.66	0.64	-0.38	-0.72	-27.15	3.46	-18.30	27.38
6	-20	240	-0.81	0.34	-0.47	2.97	-17.78	3.75	-10.26	18.41
7	0	240	-0.87	0.00	-0.50	4.47	-8.24	3.27	-5.51	9.93
8	20	240	-0.81	-0.34	-0.47	4.34	-1.33	2.62	-4.31	5.24
9	40	240	-0.66	-0.64	-0.38	3.07	0.94	1.60	-3.25	3.59
10	-40	260	-0.75	0.64	-0.13	0.26	-27.95	1.17	-18.31	27.97
11	-20	260	-0.93	0.34	-0.16	4.05	-17.82	1.25	-10.04	18.32
12	0	260	-0.98	0.00	-0.17	5.45	-8.00	1.11	-5.56	9.74
13	20	260	-0.93	-0.34	-0.16	5.14	-0.36	0.91	-4.78	5.23
14	40	260	-0.75	-0.64	-0.13	3.71	2.46	0.69	-4.48	4.51
15	-40	280	-0.75	0.64	0.13	0.30	-28.07	-1.25	-18.43	28.10
16	-20	280	-0.93	0.34	0.16	4.10	-18.00	-1.18	-10.15	18.50
17	0	280	-0.98	0.00	0.17	5.49	-7.69	-1.07	-5.60	9.51
18	20	280	-0.93	-0.34	0.16	5.22	0.29	-0.83	-5.06	5.29
19	40	280	-0.75	-0.64	0.13	3.65	2.61	-0.55	-4.50	4.52
20	-40	300	-0.66	0.64	0.38	-0.57	-27.42	-3.44	-18.56	27.64
21	-20	300	-0.81	0.34	0.47	3.14	-17.80	-3.51	-10.29	18.41
22	0	300	-0.87	0.00	0.50	4.57	-7.52	-2.90	-5.41	9.27
23	20	300	-0.81	-0.34	0.47	4.33	-0.16	-2.35	-4.57	4.93
24	40	300	-0.66	-0.64	0.38	3.00	1.19	-1.43	-3.31	3.53

## A5 – Y+

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	-90	0	0.00	1.00	0.00	-0.47	-24.48	-0.50	-24.48	24.49
1	-70	0	0.00	0.94	0.34	-1.12	-18.61	-3.60	-18.72	18.99
3	-70	30	0.17	0.94	0.30	-2.63	-18.35	-3.27	-18.66	18.83
5	-70	60	0.30	0.94	0.17	-3.71	-18.25	-2.27	-18.63	18.76
7	-70	90	0.34	0.94	0.00	-4.02	-18.26	-0.83	-18.53	18.72
9	-70	120	0.30	0.94	-0.17	-3.58	-18.37	0.69	-18.44	18.73
11	-70	150	0.17	0.94	-0.30	-2.44	-18.58	1.80	-18.41	18.83
13	-70	180	0.00	0.94	-0.34	-0.87	-18.77	2.23	-18.40	18.92
15	-70	210	-0.17	0.94	-0.30	0.65	-18.82	1.82	-18.33	18.92
17	-70	240	-0.30	0.94	-0.17	1.80	-18.93	0.80	-18.46	19.03
19	-70	270	-0.34	0.94	0.00	2.22	-18.67	-0.65	-18.30	18.81
21	-70	300	-0.30	0.94	0.17	1.73	-18.70	-2.12	-18.45	18.90
23	-70	330	-0.17	0.94	0.30	0.49	-18.57	-3.22	-18.49	18.85
2	-50	0	0.00	0.77	0.64	-1.03	-12.35	-5.61	-13.07	13.61
4	-50	30	0.32	0.77	0.56	-3.87	-11.85	-5.04	-13.13	13.45
6	-50	60	0.56	0.77	0.32	-5.59	-11.63	-3.27	-13.07	13.31
8	-50	90	0.64	0.77	0.00	-6.15	-12.03	-0.67	-13.17	13.52
10	-50	120	0.56	0.77	-0.32	-5.48	-11.92	2.09	-12.85	13.28
12	-50	150	0.32	0.77	-0.56	-3.48	-12.52	4.07	-12.97	13.62
14	-50	180	0.00	0.77	-0.64	-0.61	-13.06	4.70	-13.03	13.90
16	-50	210	-0.32	0.77	-0.56	2.21	-12.82	4.14	-12.83	13.65
18	-50	240	-0.56	0.77	-0.32	4.23	-12.75	2.23	-12.84	13.62
20	-50	270	-0.64	0.77	0.00	5.08	-12.83	-0.56	-13.09	13.81
22	-50	300	-0.56	0.77	0.32	4.28	-12.58	-3.21	-13.05	13.67
24	-50	330	-0.32	0.77	0.56	2.03	-12.42	-5.08	-12.99	13.57

## A6 – Y-

	Angle		Vecteur vitesse			Force				
	$\Theta$	$\Psi$	X	Y	Z	X	Y	Z	Trainée	Totale
	°	°				N	N	N	N	N
0	90	0	0.00	-1.00	0.00	0.02	24.60	-0.95	-24.60	24.62
2	70	0	0.00	-0.94	0.34	0.17	17.12	-3.60	-17.32	17.50
4	70	30	0.17	-0.94	0.30	-0.98	17.20	-3.25	-17.30	17.53
6	70	60	0.30	-0.94	0.17	-1.91	17.82	-2.40	-17.72	18.08
8	70	90	0.34	-0.94	0.00	-2.27	18.19	-1.33	-17.87	18.38
10	70	120	0.30	-0.94	-0.17	-2.01	18.63	-0.22	-18.07	18.74
12	70	150	0.17	-0.94	-0.30	-1.12	18.79	0.67	-18.05	18.83
14	70	180	0.00	-0.94	-0.34	0.03	18.69	1.04	-17.92	18.72
16	70	210	-0.17	-0.94	-0.30	1.15	18.35	0.70	-17.64	18.39
18	70	240	-0.30	-0.94	-0.17	2.01	18.15	-0.18	-17.62	18.26
20	70	270	-0.34	-0.94	0.00	2.37	17.64	-1.30	-17.38	17.84
22	70	300	-0.30	-0.94	0.17	2.05	17.23	-2.43	-17.21	17.52
24	70	330	-0.17	-0.94	0.30	1.27	17.03	-3.28	-17.19	17.39
1	50	0	0.00	-0.77	0.64	0.28	11.81	-4.94	-12.22	12.80
3	50	30	0.32	-0.77	0.56	-2.00	12.24	-4.45	-12.50	13.18
5	50	60	0.56	-0.77	0.32	-3.76	13.05	-3.11	-13.09	13.93
7	50	90	0.64	-0.77	0.00	-4.36	13.65	-1.03	-13.26	14.36
9	50	120	0.56	-0.77	-0.32	-3.71	14.07	1.04	-13.17	14.58
11	50	150	0.32	-0.77	-0.56	-2.07	14.74	2.70	-13.46	15.13
13	50	180	0.00	-0.77	-0.64	0.04	14.91	3.43	-13.63	15.30
15	50	210	-0.32	-0.77	-0.56	2.08	14.68	2.66	-13.39	15.06
17	50	240	-0.56	-0.77	-0.32	3.67	13.93	0.90	-13.00	14.44
19	50	270	-0.64	-0.77	0.00	4.22	12.90	-1.09	-12.59	13.62
21	50	300	-0.56	-0.77	0.32	3.81	12.35	-3.02	-12.55	13.27
23	50	330	-0.32	-0.77	0.56	2.20	11.24	-4.50	-11.82	12.31

### 3. ANNEXE III – Comparaison des analyses

	Angle		Actuel			Hydrodynamisme			Différence		
	Tangage	Lacet	Force Y	Force Z	Norme	Force Y	Force Z	Norme	Y	Z	Norme
0	-40	320	-6.47	-3.74	7.58	-20.71	-2.99	21.12	220%	-20%	179%
5	-40	340	-7.12	-4.20	8.30	-28.10	0.71	28.18	295%	-117%	239%
10	-40	0	-6.75	-4.52	8.13	-27.21	-0.01	27.21	303%	-100%	235%
15	-40	20	-6.72	-4.35	8.05	-25.73	0.05	25.83	283%	-101%	221%
20	-40	40	-6.19	-4.00	7.47	-23.62	0.64	23.94	282%	-116%	220%
1	-20	320	-3.97	-4.48	6.19	-18.16	-0.75	19.02	358%	-83%	207%
6	-20	340	-4.20	-5.13	6.69	-18.10	-2.22	18.51	331%	-57%	177%
11	-20	0	-4.22	-5.36	6.83	-17.36	-2.78	17.60	311%	-48%	158%
16	-20	20	-4.04	-5.19	6.63	-16.96	-2.53	17.19	320%	-51%	159%
21	-20	40	-3.81	-4.55	6.14	-15.79	-1.63	16.11	314%	-64%	162%
2	0	320	-0.69	-4.89	5.23	-7.56	-2.20	9.61	1000%	-55%	84%
7	0	340	-1.02	-5.47	5.65	-8.29	-3.35	9.55	711%	-39%	69%
12	0	0	-1.00	-5.74	5.83	-8.46	-3.83	9.38	742%	-33%	61%
17	0	20	-0.86	-5.53	5.70	-8.81	-3.45	9.47	928%	-38%	66%
22	0	40	-0.74	-4.85	5.19	-9.65	-2.15	10.00	1203%	-56%	93%
3	20	320	2.54	-4.63	5.54	3.58	-2.19	5.08	41%	-53%	-8%
8	20	340	2.37	-5.23	5.82	-0.42	-3.13	4.28	-118%	-40%	-26%
13	20	0	1.97	-5.40	5.75	-1.45	-3.48	4.01	-174%	-36%	-30%
18	20	20	2.21	-5.27	5.79	-2.89	-3.02	4.18	-231%	-43%	-28%
23	20	40	2.37	-4.66	5.47	-6.12	-1.70	6.36	-358%	-64%	16%
4	40	320	4.52	-4.05	6.19	3.43	-1.27	4.81	-24%	-69%	-22%
9	40	340	4.73	-4.42	6.51	3.33	-1.94	4.49	-30%	-56%	-31%
14	40	0	4.67	-4.52	6.50	1.90	-2.06	3.12	-59%	-54%	-52%
19	40	20	5.00	-4.42	6.71	-1.15	-1.68	2.14	-123%	-62%	-68%
24	40	40	4.27	-4.00	5.95	-7.06	-1.26	7.31	-265%	-69%	23%

## 4. Annexe IV – Résultats préliminaires A2018

---

### 4.1.7 Résultat

Des données expérimentales ont été récoltées en piscine. Étant donné un manque de stabilité en régime permanent des axes Z, Roll et Pitch seulement les axes X, Y et Yaw on pu êtres analysées.

Voici les résultats obtenus avec la méthode des moindres carrée et solidwork :

Masse :

Axe	X	Y	Z
m (kg)	49.5	49.5	49.5

TABLE 2 – Masse du robot

Inertie :

Axe	Roll	Pitch	Yaw
I (kg.m <sup>2</sup> )	2.14	2.14	4.28

TABLE 3 – Inertie du robot

Amortissement :

Axe	X	Y	Yaw
$D_L$	232.2987	156.8075	181.2252
$D_Q$	-56.8839	157.6699	-289.4712

TABLE 4 – Facteur d'amortissement du robot

Volume :

Axe	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
V (m <sup>3</sup> )	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055

TABLE 5 – Volume du robot