



Normandie Université



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE

Projet en Master

Etude de l'impact des vagues monochromatiques sur un mat d'éolienne (SolidWorks Flow)

UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES

Rédigé par :
SAI Khalid Hicham

2020/2021
Encadrant : Nizar ABCHA

Contents

1	Introduction	2
1.1	Éoliennes offshore à fondation fixe :	3
1.2	Théorie des houles d’Airy	4
1.2.1	Solution pour une onde monochromatique progressive :	6
2	Étude expérimentale :	7
2.1	Procédure expérimentale :	7
3	Conception numérique :	8
3.1	Composants d’Assemblage :	8
4	Simulation CFD :	10
4.1	Définition du projet :	12
4.2	Ecoulements :	14
4.2.1	Résultats :	14
4.2.2	Profil de vitesse :	14
4.2.3	Tourbillons :	15
4.3	Vagues monochromatiques :	17
4.3.1	Pour $k = 5$:	18
4.3.2	Pour $k = 3$:	20
4.4	Combinaison vague + écoulement :	22
4.4.1	Résultats :	23
5	Etude Statique :	24
5.1	Définition de projet :	24
5.2	Résultats :	25
5.2.1	Modes propres :	25
6	Conclusion :	26
7	Références :	27

Présentation :

Ce travail est l'enchaînement du travail effectué par MADJOUR A. pour son stage en M2, ou on a simulé l'effet d'un écoulement à des différentes vitesses sur un mat d'éolienne. Pour ce travail, on a simulé aussi les effets des vagues d'après la théorie d'Airy et leurs effets sur le mat, et on est arrivé aussi à combiner ces vagues avec un écoulement.

1 Introduction

L'énergie éolienne **offshore** est l'utilisation de parcs éoliens construits dans des plans d'eau, généralement dans l'océan, pour récolter l'énergie éolienne afin de produire de l'électricité. Des vitesses de vent plus élevées sont disponibles en mer par rapport à la terre, de sorte que la production d'électricité de l'énergie éolienne en mer est plus élevée par quantité de capacité installée.

Contrairement à l'utilisation typique du terme **offshore** dans l'industrie maritime, l'énergie éolienne offshore comprend les zones d'eau côtière telles que les lacs et les zones côtières abritées ainsi que les zones d'eau plus profonde. La plupart des parcs éoliens offshore utilisent des éoliennes à fondation fixe dans des eaux relativement peu profondes.

Le coût de l'énergie éolienne offshore a historiquement été plus élevé que celui de la production éolienne terrestre, mais les coûts ont rapidement diminué ces dernières années pour atteindre 64 euros / MWh en 2019. L'énergie éolienne offshore en Europe est compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles depuis 2017. La production éolienne en mer a augmenté de plus de 30% par an au cours des 10 dernières années.

Les coûts d'exploitation et de maintenance représentent généralement 53% des dépenses opérationnelles et 25% à 30% du coût total du cycle de vie des parcs éoliens offshore. Les O&M sont considérés comme l'un des principaux obstacles au développement ultérieur de cette ressource.



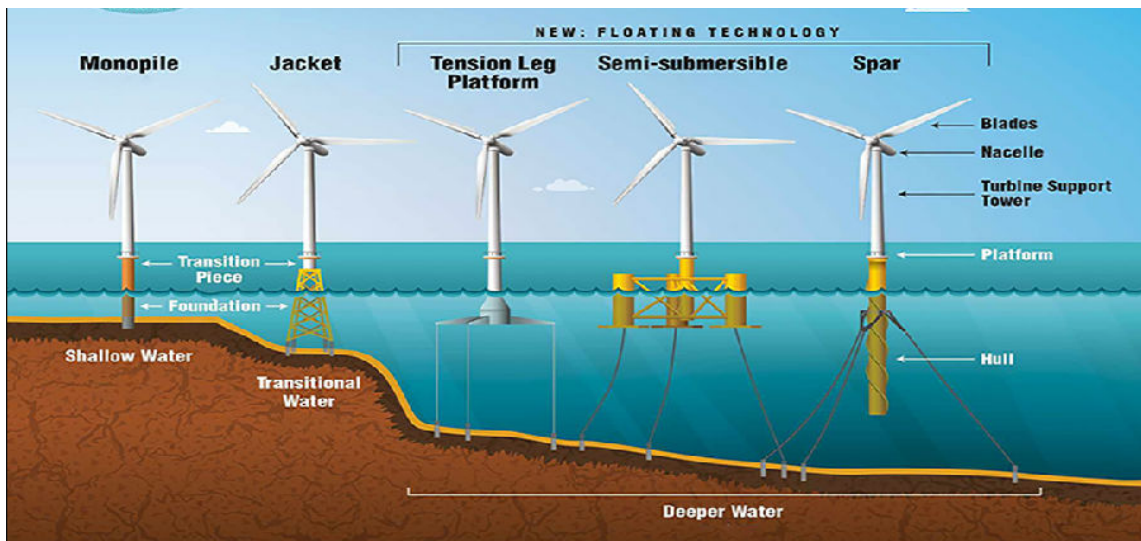
Parc des éoliennes offshore

1.1 Éoliennes offshore à fondation fixe :

Presque tous les parcs éoliens offshore actuellement en exploitation utilisent des turbines à fondation fixe, à l'exception de quelques projets pilotes. Les éoliennes offshore à fondation fixe ont des fondations fixes sous l'eau et sont installées dans des eaux relativement peu profondes allant jusqu'à 50 à 60 mètres.

Les turbines offshore nécessitent différents types de bases pour la stabilité, en fonction de la profondeur de l'eau. À ce jour, plusieurs solutions existent :

- La plupart des fondations sont **monopieu** (une seule colonne) de base, de six mètres de diamètre, est utilisé dans les eaux jusqu'à 30 mètres de profondeur.
- **Structures de chemise en acier conventionnelles**, telles qu'utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière, dans une eau de 20 à 80 mètres (70 à 260 pieds) de profondeur.
- **Structures à base gravitaire**, à utiliser sur les sites exposés dans de l'eau de 20 à 80 m de profondeur.
- **Structures empilées sur trépied**, dans une eau de 20 à 80 m de profondeur.
- Structures de caissons d'aspiration tripodes, dans l'eau de 20 à 80 m de profondeur.



Types des bases des éoliennes offshore.

1.2 Théorie des houles d'Airy

La théorie des houles d'Airy [3] est une théorie des ondes linéarisée basée sur l'écoulement irrotationnel d'un fluide incompressible non visqueux. La linéarisation est obtenue en supposant que la hauteur de vague a est petite par rapport à la longueur d'onde λ et à la profondeur de l'eau stagnante. On suppose également que le fluide a une profondeur uniforme (c'est-à-dire que le fond est plat).

Puisque nous avons un écoulement irrotationnel, il existe un potentiel d'écoulement, ϕ obéir;

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

et en donnant les vitesses des particules fluides comme

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

Supposons qu'il existe une énergie potentielle par unité de masse, G , (dans ce cas associée au champ de gravité). Alors, l'équilibre est donné par

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot v \right] = -\rho \frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

où ρ est la densité du fluide et p est la pression. En remplaçant l'équation 2 dans l'équation 3, on obtient :

$$\rho \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial t \partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot v \right] = -\rho \frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x}$$

Cette équation peut être intégrée par rapport à la position pour donner :

$$\rho \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v \cdot v \right] = -\rho G - (p - p_0) + F(t) \quad (4)$$

puisque le fluide est supposé incompressible ; Donc, ρ est constant. Ici F est une fonction arbitraire de t , et p_0 est la pression dans l'air juste au-dessus de la surface libre. Pour plus de commodité, nous choisissons $F(t) = 0$

le terme $\frac{1}{2} v \cdot v$ peut être négligé par rapport aux autres termes (cela peut être montré, à partir de la solution résultante, pour être cohérent avec l'ordre d'approximation selon lequel la hauteur d'onde est petite par rapport à la longueur d'onde). En choisissant la coordonnée z pour pointer verticalement vers le haut, le potentiel de gravité est choisi comme

$$G = g(z - z_s)$$

ou z_s est le niveau de surface non perturbé. L'équation 4 devient alors;

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho g(z - z_s) + p - p_0 = 0 \quad (5)$$

A partir de cette équation, la pression totale en un point au-dessous de la surface instantanée du fluide est

$$p = p_0 + \rho g(z_s - z) +$$

Par conséquent, la pression totale est la pression atmosphérique plus la pression hydrostatique plus la pression dynamique, p_{dyn} , où p_{dyn} est donné par

$$p_{dyn} = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

soit η l'élévation de la surface du fluide à l'instant t , en appliquant certaines hypothèses, l'équation 5 fournit le terme au limite;

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (6)$$

La deuxième condition aux limites sur la surface libre provient de la cinématique de la surface libre. Soit la surface libre donnée par;

$$f(x_1, x_2, z, t) = \eta(x_1, x_2, t) - (z - z_s) = 0$$

La vitesse du fluide normale à la surface doit être égale à la vitesse de la surface normale à elle-même. Différencier cette expression par rapport au temps donne;

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

Si nous supposons que la hauteur des vagues est petite par rapport à la longueur d'onde ($\eta_{max} \ll \lambda$), alors on peut approximer $\frac{\partial z}{\partial t}$ par la vitesse v_z , de sorte que;

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - v_z = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{qd } z = z_s \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (7.5)$$

L'élimination de η entre l'équation 6 et l'équation 7 donne :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{qd } z = z_s \quad (8)$$

La condition aux limites en bas, $z = z_b$ est

$$v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{qd} \quad z = z_s \quad (9)$$

et la théorie du potentiel peut être utilisée pour décrire l'écoulement. Le potentiel de vitesse $\phi(x, z, t)$ est lié aux composantes de vitesse d'écoulement u_x et u_z dans les directions horizontale (x) et verticale (z) par :

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{et} \quad u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Alors, en raison de l'équation de continuité pour un écoulement incompressible, le potentiel ϕ doit satisfaire l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

1.2.1 Solution pour une onde monochromatique progressive :

Pour notre étude on s'intéresse en une vague **monochromatique** qui se propageant d'une seule fréquence, l'élévation de la surface est de la forme :

$$\eta = a \cos(kx - \omega t)$$

Le potentiel de vitesse associé, satisfaisant l'équation de Laplace (8) à l'intérieur du fluide, ainsi que les conditions aux limites cinématiques à la surface libre (9) et au fond (7), est :

$$\phi = \frac{\omega}{k} a \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \sin(\omega t - kx)$$

Donc les composantes de vitesse d'écoulement u_x et u_z , s'écrivent :

$$V_x = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(\omega t - kx)$$

$$V_z = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(\omega t - kx)$$

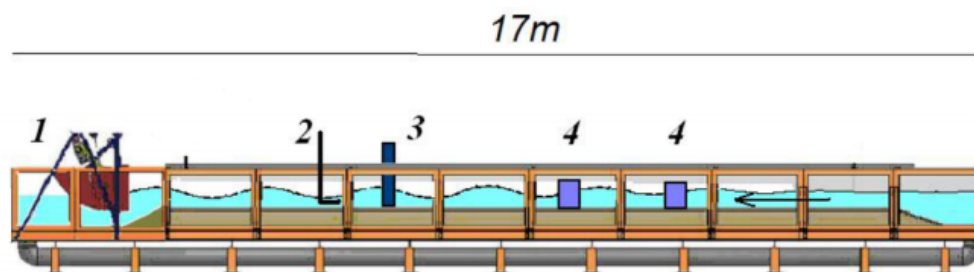
2 Étude expérimentale :

Des expériences sur les **Allées de tourbillons de Karman**[2] démontrent que le phénomène de vortex effaçant la résonance et le verrouillage de fréquence est observé lorsqu'un cylindre est placé dans un écoulement moyen avec une composante périodique de temps superposée, ou lorsqu'un cylindre profilé oscille harmonieusement. Dans ces cas, la perte de tourbillon présente une influence particulièrement forte des perturbations externes apportant une modification des caractéristiques de sillage. Les influences des oscillations transversales du cylindre ont été étudiées pour une fréquence de séparation f_{sh} proche de la fréquence de forçage externe f_e . on a constaté que la composante périodique temporelle superposée à l'écoulement moyen à un certain degré équivaut aux oscillations longitudinales du cylindre profilé.

aussi, cloutant des tourbillons autour d'un cylindre oscillant ou d'un cylindre fixe en flux pulsé, le même mode de "shedding" correspondant à la génération de quatre tourbillons par période a été observé. Pendant ce temps, dans de nombreux cas, l'allée de tourbillon derrière le cylindre se produit dans l'écoulement d'eau avec une surface libre. Il convient de noter que, la rue Karman derrière le cylindre vertical est étudiée dans un écoulement d'eau peu profond avec une surface libre.

2.1 Procédure expérimentale :

L'expérience [2] est menée dans le canal à houle (17m x 0,5m) du Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, à Caen. tandis que la profondeur de l'eau entre 0 et 0,4 m. les ondes de surface de différents spectres et amplitudes sont générées à l'aide d'un générateur d'ondes commandé par ordinateur.



le canal a houle

1. Générateur des vagues
2. Velocimeter ; Un instrument qui mesure les vitesses (V_x, V_y, V_z) d'un liquide ou d'un gaz qui s'écoule.
3. les mats (en forme des cylindres)
4. nid d'abeilles

les ondes se propageant de gauche à droite, sont générées par une palette motorisée, et pour réduire l'intensité des fluctuations turbulentes et de la réflexion des ondes, deux nids d'abeilles (10 cm d'épaisseur) sont installés dans le canal, pour cette expérience, deux cylindres ronds avec différents diamètres d'un diamètre d de $d_1 = 4$ cm et $d_2 = 10$ cm sont utilisés comme modèles de mâts, qui sont placés verticalement sur l'axe du canal. avec profondeur d'écoulement spécifique H pour chaque cylindre, également pour le nombre de Froude $Fr_{1,2} = \frac{U_{1,2}}{(g_{1,2})^{1/2}}$ et le nombre de Reynolds $Re_{1,2} = \frac{U_{1,2}d_{1,2}}{\nu}$

3 Conception numérique :

Pour vérifier les résultats obtenus au canal au laboratoire de M2C a Caen, le modèle sur **Solidworks** doit être identique en dimensions aux celles du canal utilisé dans l'expérimental.

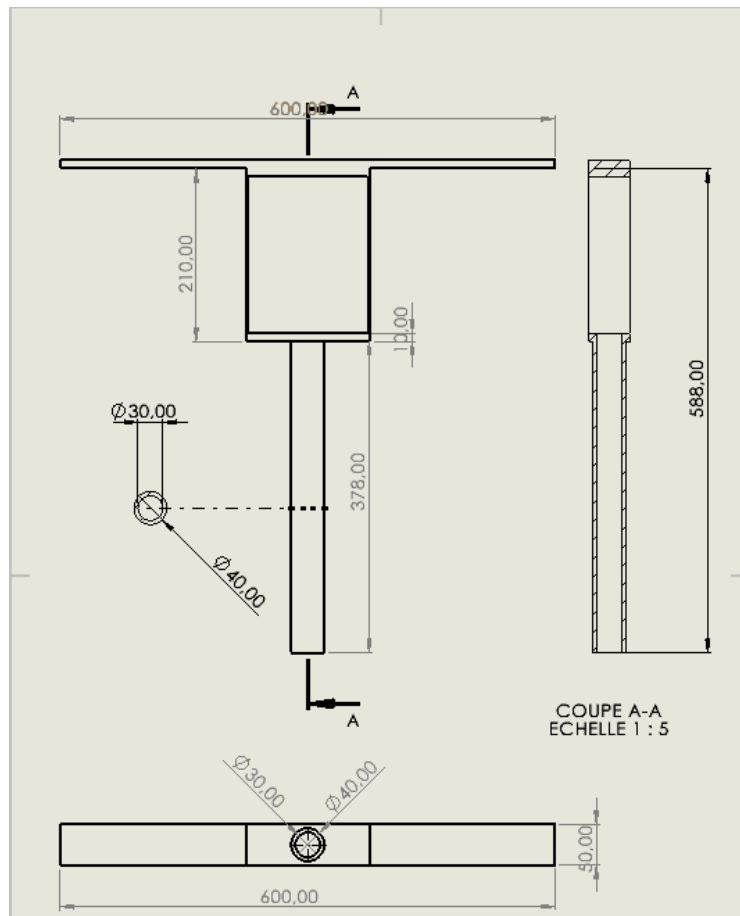
3.1 Composants d'Assemblage :

le dispositif va être modéliser en forme d'un assemblage composé de plusieurs éléments :

L'éolienne :

l'éolienne est composée du :

- le mat : qu'on va le modéliser comme un cylindre creux de 378 mm de longueur.
- structure supplémentaire qui représente le hub d'éolienne.
- une barre qui sert à attacher l'éolienne au canal; et de même largeur du canal.



mise en plan d'éolienne conçue.

Le canal :

pour alléger le calcul, on utilise qu'une partie du canal, en prenant une longueur de 3m, largeur de 0.06m et la profondeur de 0.06m.

l'assemblage :

L'éolienne est placée dans le canal, avec le cylindre creux qui représente le mat est orienté vers le bas, en laissant un espacement de 0.02m, pour éliminer l'interaction sol-structure, et les seuls points d'accroche sont les deux bouts de la pièce qui fait 0.6 m de largeur.

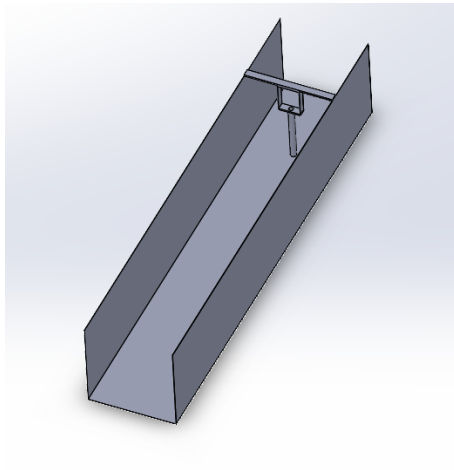
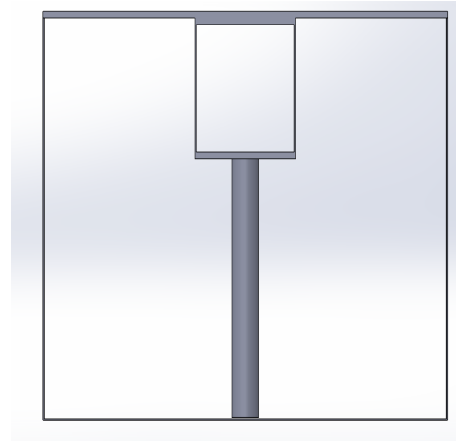


Figure 1: assemblage canal + éolienne



vue de droite de l'assemblage

Matériau utilisé :

Le matériau utilisé est de la famille des plastiques. Le dispositif est conçu à partir du produit Lexan 9030™, marque déposée de la société General Electric. et l'on introduit sur la bibliothèque des matériaux sur solidworks :

Propriété	Valeur	Unités
Module d'élasticité	2300000000	N/m ²
Coefficient de Poisson	0.38	S.O.
Module de cisaillement	318900000	N/m ²
Masse volumique	1200	kg/m ³
Limite de traction	30000000	N/m ²

4 Simulation CFD :

SOLIDWORKS Flow Simulation [1] est une classe de logiciels d'analyse CFD (Computational Fluid Dynamic, calcul de la mécanique des fluides) entièrement intégrée dans l'environnement de conception mécanique, pour toutes application d'ingénierie. Il inclut une représentation des équations de Navier-Stokes et des modèles de turbulences. Ce logiciel permet donc des capacités de simulation CFD dans un système de CAO mécanique, utilisant directement la géométrie CAO native sans modification, comme point de départ du processus CFD. Contrairement à ce qui est traditionnellement fait (le développement de la CFD était indépendant et son interaction avec la CAO se limitait au simple échange de

données), le logiciel CFD Flow Simulation est un complément SOLIDWORKS entièrement intégré et son approche est basée sur deux principes majeurs :

- l'utilisation de la CAO native comme source d'information géométrique ;
- la combinaison de la modélisation CFD 3D complète avec des méthodes d'ingénierie plus simples dans le cas où la résolution du maillage est insuffisante pour une simulation 3D complète

Tâches gérées par ce module :

- gestion des données importées du CAO
- génération du maillage fluide-structure
- les solveurs CFD
- les technologies de modélisation d'ingénierie
- le traitement des résultats.

Maillage :

SOLIDWORKS Flow Simulation utilise l'approche des volumes finis. Avec cette méthodologie, la taille et la forme du modèle 3D et de l'espace fluide restent constantes, mais le maillage lui-même (dans ce cas une grille cartésienne) peut changer et se mettre à jour au cours de la simulation. Cela permet une technologie appelée maillage adaptatif à la solution, où le solveur peut affiner et améliorer le maillage pendant le calcul sans avoir à repartir de zéro, augmentant considérablement la précision de vos résultats en peu de temps. le mailleur sur le Flow a certains avantages :

- la simplicité, la vitesse génération du maillage.
- la minimisation des lacunes.
- bonne adaptation des cellules fluides-structures.

4.1 Définition du projet :

Après la conception de la pièce, on lance Flow Simulation, et passer par l'Assistant :

1 - Pour la première étape, on choisit le Type d'analyse, entre **Externe** et **Interne**. On sélectionne les caractéristiques Physique suivantes :

- **Transitoire** : Pour le rendre non-permanent ??
- **Gravité**
- **Surface Libre** : pour mélanger l'air et l'eau ??

2 - Dans la deuxième étape, on introduit **l'Air et l'Eau**, deux fluides immiscibles, et aussi le type d'écoulement comme **laminaire et turbulent**

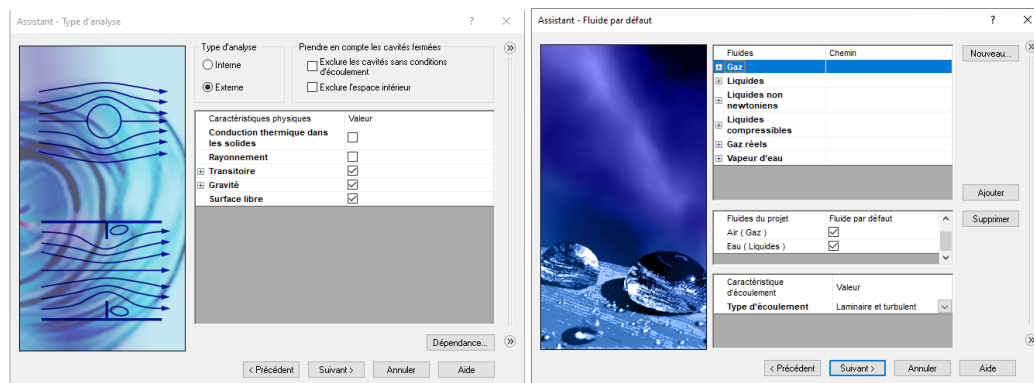
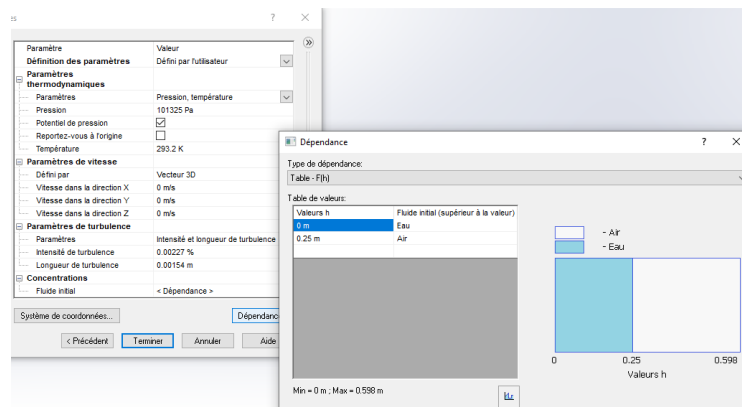


Figure 2: Type d'analyse (1)

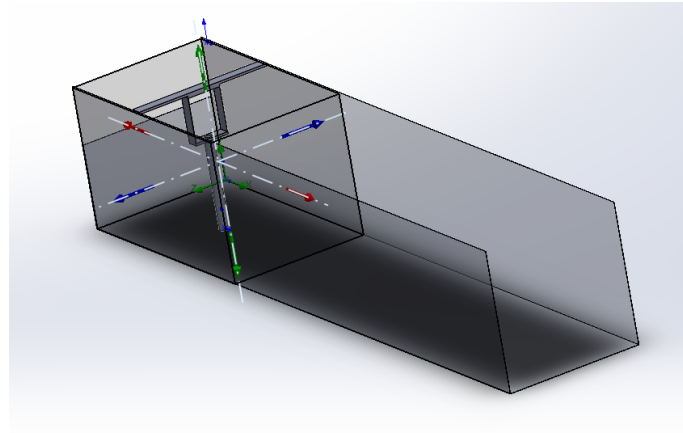
Fluides du projet (2)

3 - sur la dernière fenêtre de l'assistant, dans **les conditions initiales et ambiantes**, on introduit ;



la concentration des fluides initiaux, sous forme de dépendance de $F(y)$

Domaine de Calcul : Le domaine de calcul est de forme d'un parallélépipède, sa longueur et hauteur sont relativement réduites afin d'alléger le calcul mais ce n'est pas l'unique raison. En effet, après avoir initialisé les données d'entrée, celles-ci s'appliquent partout et instantanément dans le domaine à $t = 0$ et évoluent selon l'équation de la vitesse d'écoulement.



domaine de calcul 3D.

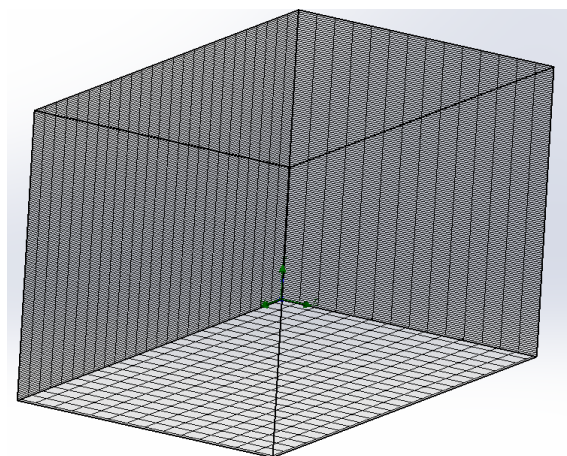
Maillage :

Solidworks offre des possibilités de maillage assez sophistiquées avec choix de taille des mailles, par des dévisions sur les trois direction, ou l'imposition des tailles spécifiques en (x, y, z) . Il donne également la possibilité de réaliser des maillages locaux à appliquer dans les zones qui nous intéressent le plus. Nous nous sommes satisfaits (suite aux résultats obtenus) d'un maillage conciliant la qualité et la rapidité de calcul. Toutefois, nous avons appliqué un raffinement supplémentaire au niveau des cellules à la limite fluide/solide, ou le logiciel cherche automatiquement les zones à raffiner.

Le maillage du domaine fluide qui a été retenu pour effectuer les simulations est représenté ci-contre.

Les cellules font la taille suivante:

$$\begin{cases} x = 0.04m \\ y = 0.004m \\ z = 0.4m \end{cases}$$



4.2 Ecoulements :

Pour simuler un écoulement dans le canal suivant la direction x , On introduit une V_x en forme de dépendance, pour que l'écoulement soit dans l'eau seulement, et pour créer le mouvement des vagues, on injecte les equations V_x et V_y d'après le modèle d'houle d'Airy dans la dépendance.

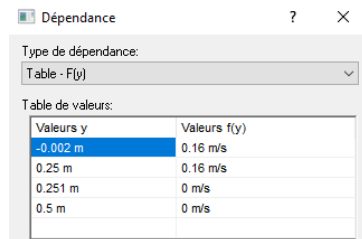


Table de valeurs:	
Valeurs y	Valeurs f(y)
-0.002 m	0.16 m/s
0.25 m	0.16 m/s
0.251 m	0 m/s
0.5 m	0 m/s

Figure 3: Vitesse $V_x = 0.16m/s$

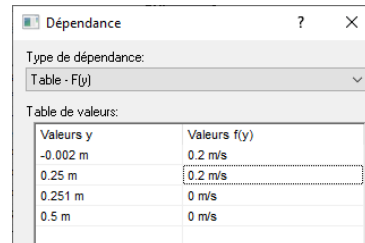


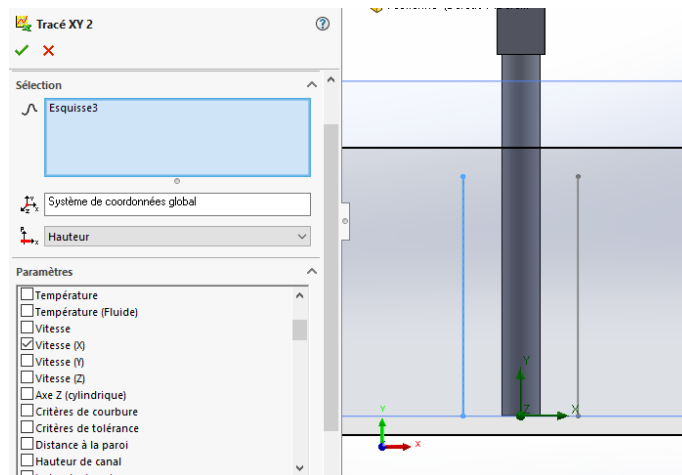
Table de valeurs:	
Valeurs y	Valeurs f(y)
-0.002 m	0.2 m/s
0.25 m	0.2 m/s
0.251 m	0 m/s
0.5 m	0 m/s

Vitesse $V_x = 0.20m/s$

4.2.1 Résultats :

4.2.2 Profil de vitesse :

Pour tracer les profils de vitesses, on trace des lignes perpendiculaire a la direction d'écoulement, a 1D en amont et en aval du cylindre, et inserer ensuite des **tracé XY** en sélectionnant ces ligne.



tracé XY

Pour une vitesse de 0.16 m/s :

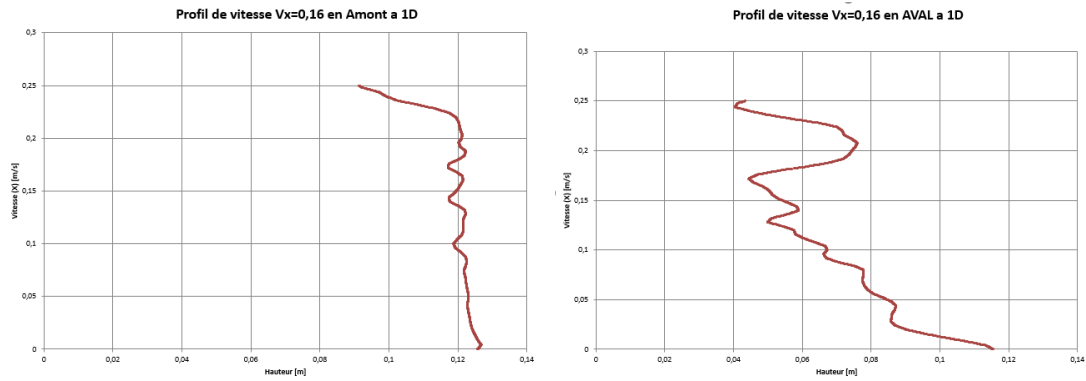


Figure 4: Profil de Vitesse en Amont

et en Aval a 1D

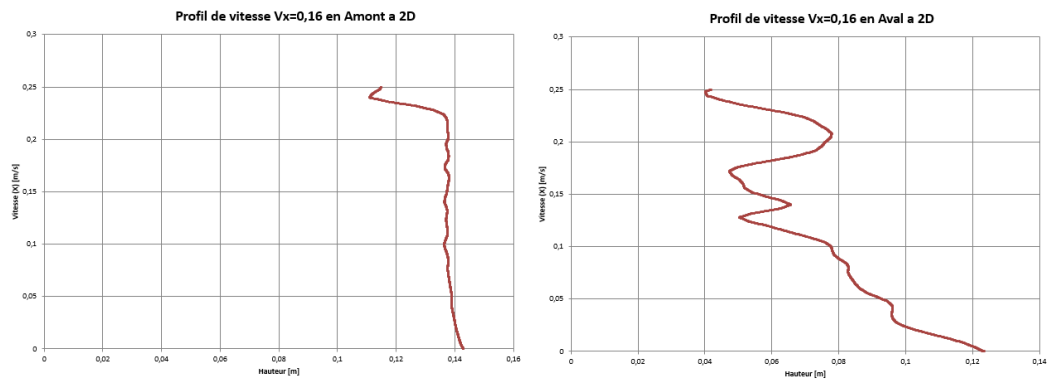


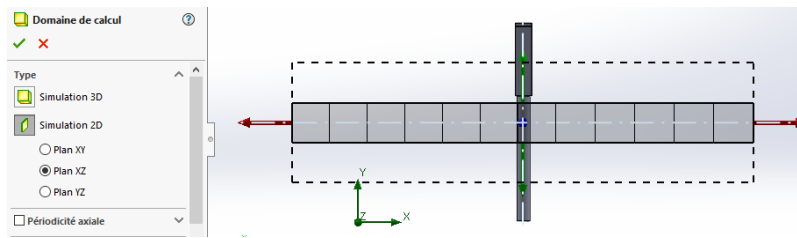
Figure 5: Profil de Vitesse en Amont

et en Aval a 2D

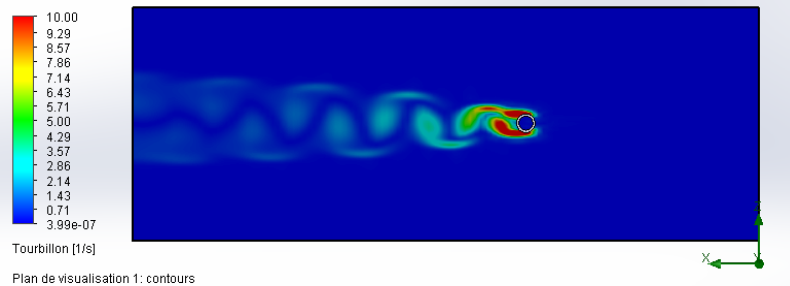
4.2.3 Tourbillons :

Pour tester la sensibilité des résultats à la modélisation de la turbulence en effectuant une **simulation 2D** de l'écoulement

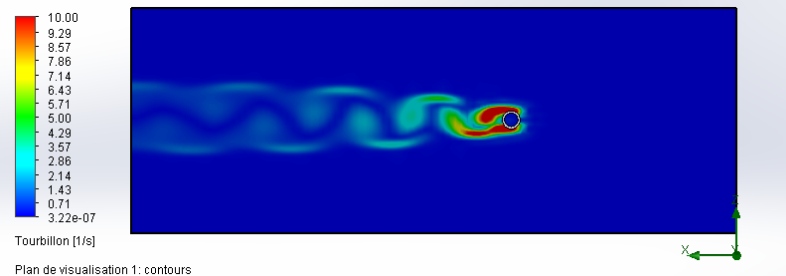
dans la fenêtre **domaine de calcul**, on choisi le calcul 2D sur le plan XZ, en gardant les mêmes caractéristiques.



Initialisation d'un calcul 2D



Tourbillon a $V_x = 0.16$ m/s



Tourbillon a $V_x = 0.2$ m/s

Nous remarquons que l'intensité des tourbillons augmente avec la vitesse et atteint son maximum au niveau de la zone du détachement tourbillonnaire.

Les différentes valeurs du nombre de Reynolds sont énumérées dans le tableau suivant:

Vitesse	Nombre de Reynolds
$V_x = 0.16 \text{ m/s}$	6379
$V_x = 0.16 \text{ m/s}$	7974

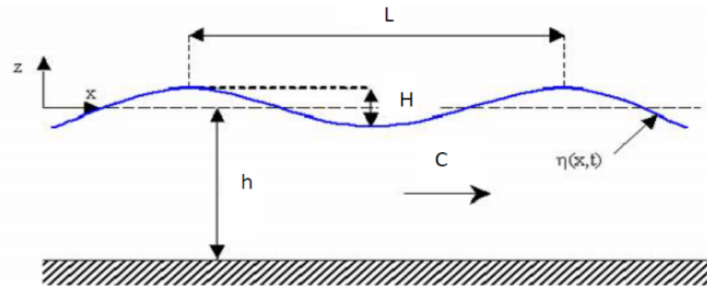
$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{0.04 * 0.16}{1.003245 * 10^{-6}} = 6379$$

Avec :

- U : la vitesse V_x
- D : le diamètre (0.04 mm)
- $\nu = 1.003245 * 10^{-6} m^2/s$

4.3 Vagues monochromatiques :

Une onde monochromatique, ou onde harmonique est une onde qui peut être décrite par une fonction sinusoïdale du temps. Sa densité spectrale d'énergie ne présente qu'une seule fréquence, qu'une seule longueur d'onde.



Tourbillon a $V_x = 0.2 \text{ m/s}$

- L : longueur d'onde (entre deux crêtes/ou creux) (m)
- k : nombre d'ondes
- T : période (entre deux crêtes/ou creux) (s)
- H : Hauteur d'onde (m)
- h : profondeur d'eau (m)
- ω : pulsation (rad/s)

d'après la Théorie des Houles d'Airy ; les composantes de vitesse d'écoulement u_x et u_z , s'écrivent :

$$V_x = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(\omega t - kx)$$

$$V_z = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cos(\omega t - kx)$$

4.3.1 Pour $k = 5$:

Pour un hauteur d'eau : $h = 0.25m$

et une fréquence : $f = 1s^{-1}$

la période vaut alors : $T = \frac{1}{f=1s^{-1}} = 1s$ la pulsation :

$$\omega = \frac{2 * \pi}{T} = \frac{2\pi}{1s} = 6.283rad/s$$

ensuite, après l'expression d' ω , on peut trouver **k : nombre d'ondes**.

$$w = \sqrt{gk \tanh(kh)}$$

on déduit

$$k = 5$$

donc la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{2\pi}{k=5} = 1.26m$$

$$\frac{\pi H}{T} = \frac{\pi * 0.02}{1} = 0.06283$$

$$\frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} = \frac{\frac{\exp^{(5(0.25+z))} + \exp^{-(5(0.25+z))}}{2}}{\cosh(5 * 0.25)} = (\exp^{(5(0.25+z))} + \exp^{-(5(0.25+z))}) * 0.2647$$

$$V_x = 0.06283 * 0.2647 * (\exp^{(5(0.25+z))} + \exp^{-(5(0.25+z))}) * \sin(5 * x - 6.283 * t)$$

$$V_x = 0.01663 * (\exp^{(5(0.25+z))} + \exp^{-(5(0.25+z))}) * \sin(5 * x - 6.283 * t)$$

$$\frac{\sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} = \frac{\frac{\exp^{(5(0.25+z))} - \exp^{-(5(0.25+z))}}{2}}{\cosh(5 * 0.25)} = (\exp^{(5(0.25+z))} - \exp^{-(5(0.25+z))}) * 0.2647$$

$$V_z = 0.01663 * (\exp^{(5(0.25+z))} - \exp^{-(5(0.25+z))}) * \cos(5 * x - 6.283 * t)$$

on introduit ces expression en forme de dépendance dans les paramètres généraux, pour V_x et V_y

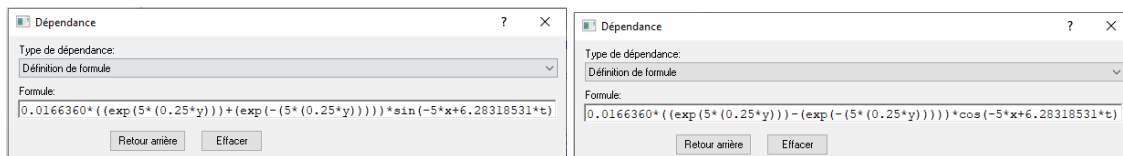


Figure 6: Introduction des expressions des vitesses dans le solveur

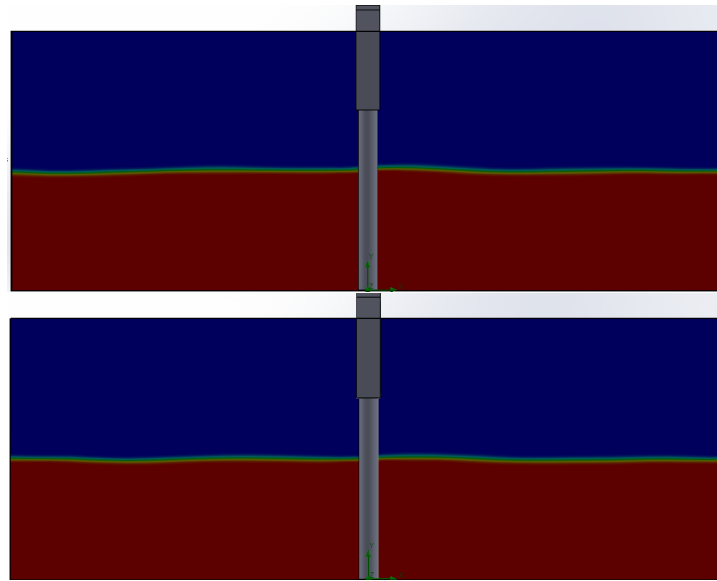


Figure 7: les vagues a $T=3s$ et à $T=8s$

Résultats :

après le calcul, on peut lancer l'**exportateur de transitoires**, pour animer le mouvement des vagues :

Profil de vitesse :

Pour une houle, on peut avoir plusieurs Profils a des differents instants. on a choisi un instant au hasard pour afficher les profils a 1D du Mat :

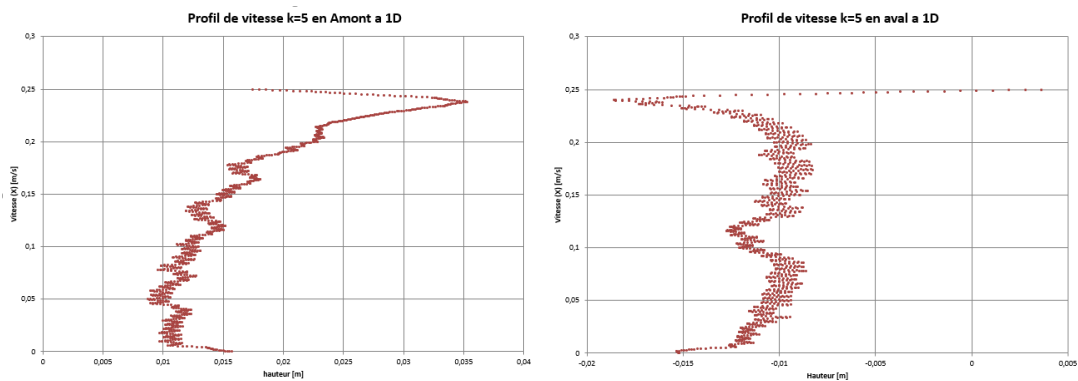


Figure 8: Profil de Vitesse en Amont

et en Aval a 2D

4.3.2 Pour $k = 3$:

Pour un hauteur d'eau : $h = 0.25m$

et une fréquence : $f = 0.7s^{-1}$

la période vaut $T = \frac{1}{f=0.694s^{-1}} = 1.44s$

la pulsation :

$$\omega = \frac{2 * \pi}{T} = \frac{2\pi}{1.44s} = 4.363rad/s$$

ensuite, après l'expression d' ω , on peut trouver **k : nombre d'ondes**.

$$w = \sqrt{g k \tanh(kh)}$$

on déduit $k = 3$

donc la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{2\pi}{k=3} = 2.09m$$

Après l'application numérique sur les expressions des vitesses, on les introduit en forme de dépendance dans les paramètres généraux, pour V_x et V_y

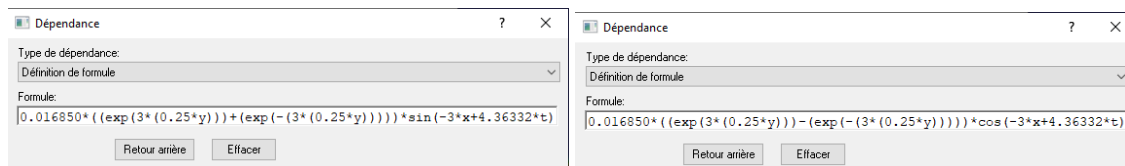
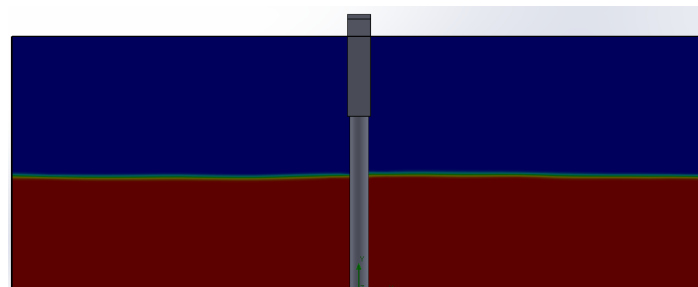


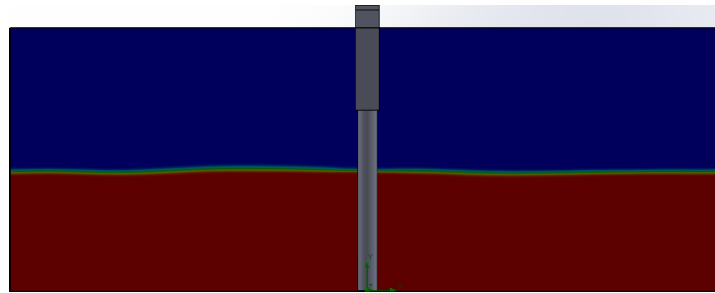
Figure 9: Introduction des expressions des vitesses dans le solveur

Résultats :

après le calcul, on peut lancer l'**exportateur de transitoires**, pour animer le mouvement des vagues :



les vagues a $T=3s$



les vagues à $T=8s$

Profil de vitesse :

Pour une houle, on peut avoir plusieurs Profils a des differents instants. on a choisi un instant au hasard pour afficher les profils a 1D du Mat :

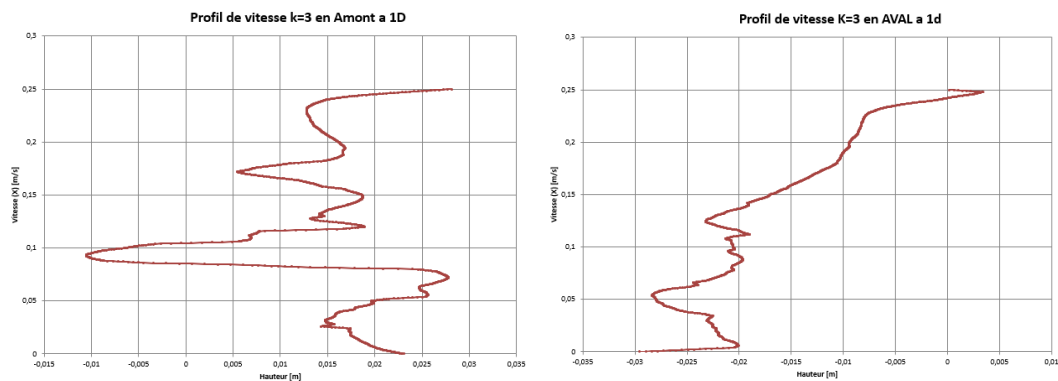


Figure 10: Profil de Vitesse en Amont

et en Aval a 2D

4.4 Combinaison vague + écoulement :

Dans cette partie, on combine la houle créée avec un écoulement dans la direction x, pour l'obtenir, on rajoute un mur latéral à l'entrée du canal, et on injecte un condition initiale de forme de vitesse d'entrée : dépendance de y; $V_x = 0.16m/s$ entre 0 et 0.25 m.

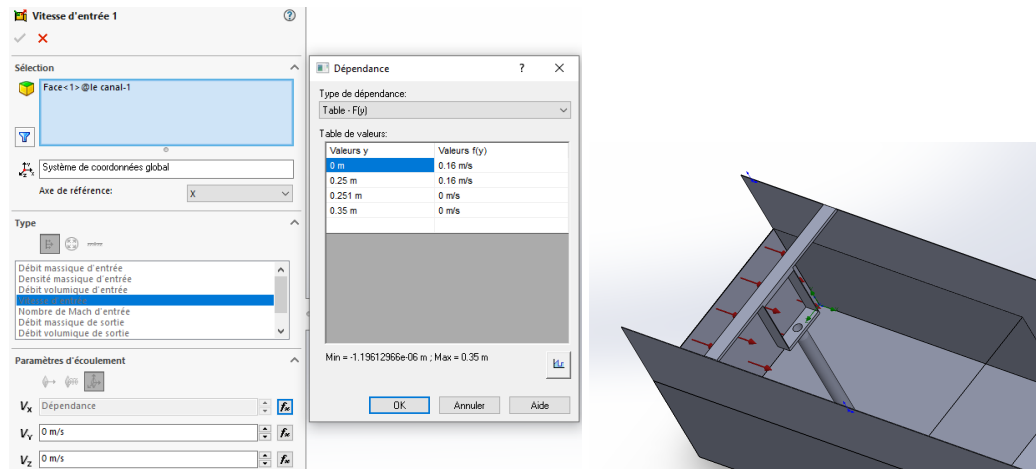
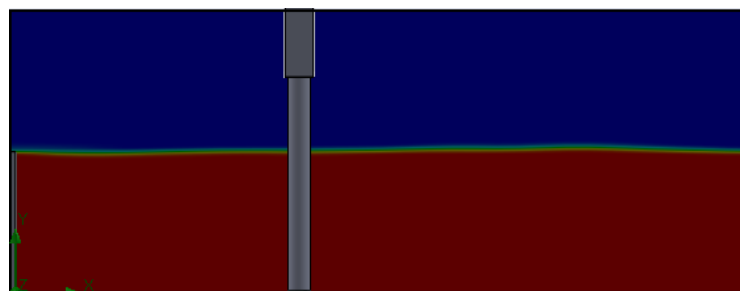
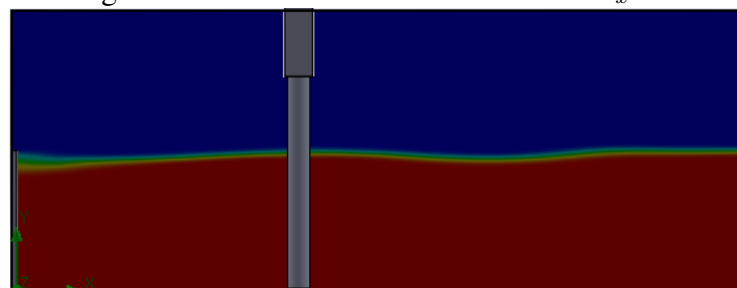


Figure 11: Injection d'un écoulement sur le mur latéral du canal



les vagues K=3 combinées avec écoulement $V_x = 0.16$

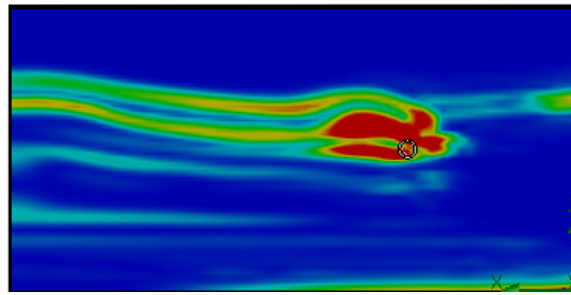


les vagues K=5 combinées avec écoulement $V_x = 0.16$

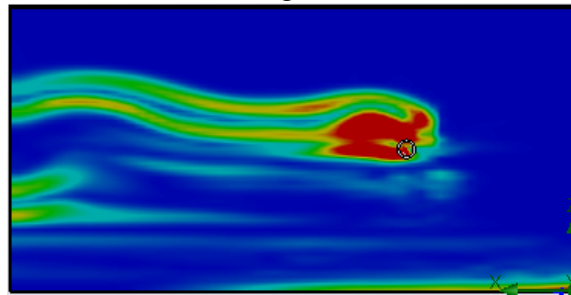
4.4.1 Résultats :

Tourbillons :

en effectuant une étude 2D, on peut obtenir des tourbillons :



Tourbillon dans le cas d'une vague $k=5$ + écoulement $V_x = 0.16$



Tourbillon dans le cas d'une vague $k=3$ + écoulement $V_x = 0.16$

Profils de vitesse :

Pour une houle de $k=3$, on peut avoir plusieurs Profils a des differents instants. on a choisi un instant au hasard pour afficher les profils a 1D du Mat :

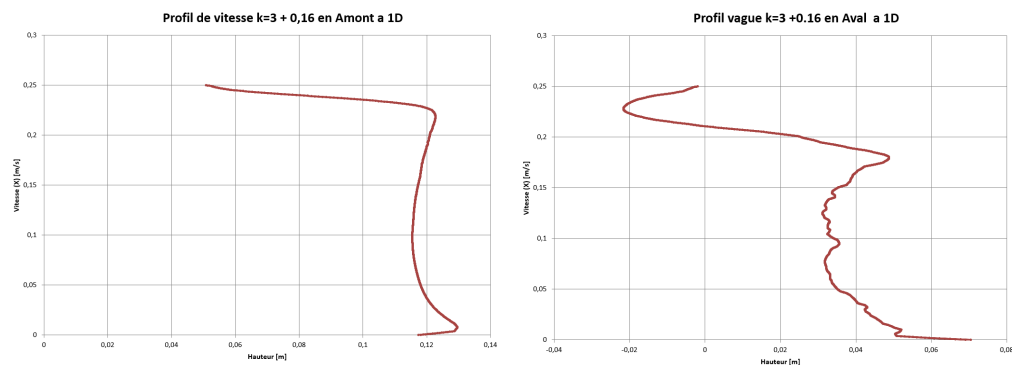


Figure 12: Profil de Vitesse en Amont

et en Aval a 2D

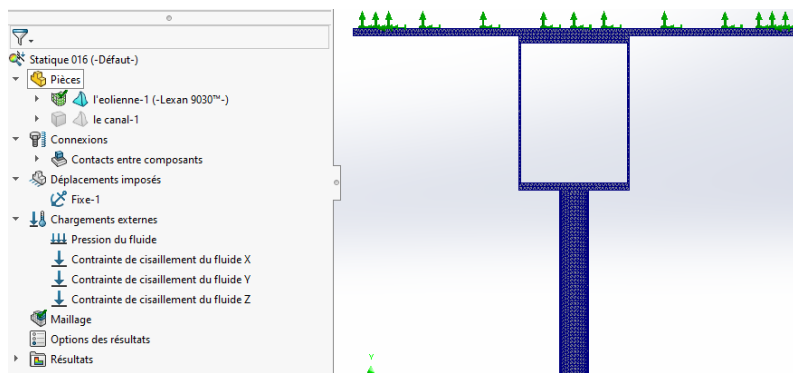
5 Etude Statique :

5.1 Définition de projet :

Après avoir fini avec les trois types de simulation fluide, le second objectif de ce travail consiste à étudier l'effet d'écoulement sur la structure.

les aspects principaux qu'on doit prendre en compte sont :

- Exclure le canal de la simulation statique, car l'effet de l'écoulement sur le canal nous intéresse pas.
- choisir un maillage très fin pour la éolienne car la section du cylindre creux est fine.
- encastrer la plaque de fixation en choisissant **fixe** dans la boîte des déplacements imposés.
- introduire la gravité et les données des écoulements dans la boîte des **chargements externes**.



Maillage et encastrement de la structure.

Pour un maillage automatiquement raffiné, on obtient les détails suivantes :

Maillage	Très fin
Taille Globale	4 mm
Nombre de Noeuds	139592
Nombre d'éléments	82810

5.2 Résultats :

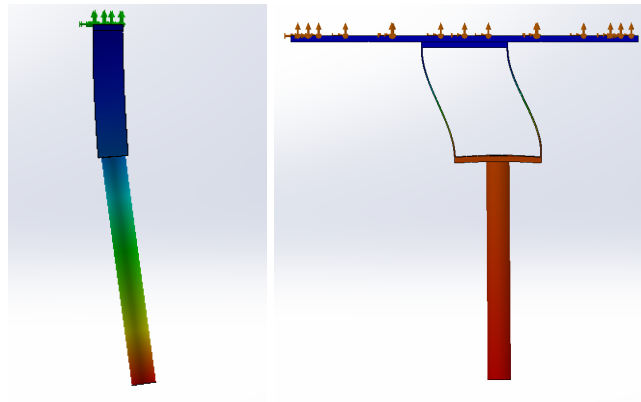


Figure 13: les déplacements observés sur le mat

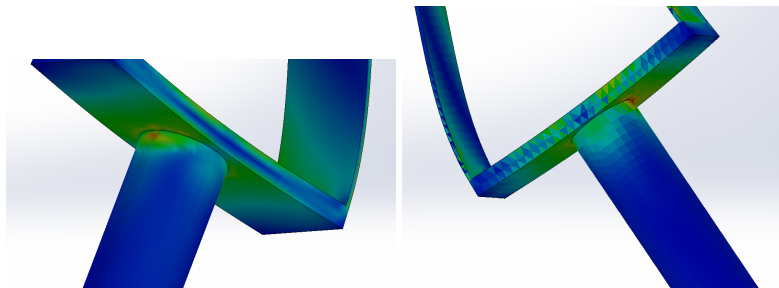


Figure 14: les contraintes et déformations observés sur le mat

la figure 14 montre les zones dangereuses sur le mat d'une éolienne qui subit les houles.

5.2.1 Modes propres :

On exécute un étude **fréquence**, et en gardant le meme maillage, on aura les fréquences de résonance :

Numéro de mode	Fréquence(Rad/sec)	Fréquence(Hertz)	Période(secondes)
1	28,357	4,5131	0,22158
2	105,06	16,72	0,059808
3	339,75	54,073	0,018494
4	501,1	79,753	0,012539
5	520,33	82,814	0,012075

dans le tableau suivant, on compare les effets des différents cas d'écoulements qu'on a simulé :

Cas	$V_x = 0.16m/s$	Houle K=5	Houle K=3	Houle K=5 $V_x = 0.16m/s$	Houle K=3 $V_x = 0.16m/s$
Contraintes σ_{max} (Pa)	8,285e+04	8.260e+04	7.166e+04	1.795e+06	4.206e+06
Déformations ϵ_{max} (%)	3e-05	2.796e-05	2.421e-05	5.843e-04	1.327e-03
Déplacements (UX) (mm)	4,481e-02	2,783e-02	4,754e-02	3.545	5.955
Déplacement maximal (mm)	1,183e-01	2.999e-02	4,885e-02	3.795	7.283

On remarque que l'effet des houles seules, quel que soit à K=5 ou à K=7, est moins important qu'un écoulement à une vitesse $V_x = 0.16m/s$, mais en combinant les deux, l'effet devient très important, et le déplacement du mat dans la direction x, très apparent.

6 Conclusion :

Cette étude nous a permis d'employer les notions théoriques, qu'on a appris durant les deux semestres, et mettre en pratique le logiciel SOLIDWORKS, et ses différents solveurs, pour un sujet d'étude en interactions fluides-structures.

Malgré l'utilisation intensive du matériel, **Solidworks** offre des solutions pour concevoir une géométrie, exécuter des simulations CFD rapidement et les injecter facilement dans une étude IFS.

Le maillage développé préalablement par Mr.MADJOUR sur son travail [1] convient pour les simulations sur les écoulements, mais pour notre travail sur les houles, les résultats finaux sont à discuter.

La suite de ce travail consistera à développer un autre maillage convenable pour les simulations sur les houles, la combinaison des houles et les écoulements, et simuler un paquet de vagues à des différentes amplitudes.

7 Références :

1 - Stabilité d'un mat d'éolienne : impact de l'action du courant par approche numérique (SolidWorks) - Arezki MADJOUR

2 - Frequency lock-in and phase synchronization of vortex shedding behind circular cylinder due to surface waves H. Gunnoo, N. Abcha , A.B. Ezersky

**3 - Airy Wave Theory -
<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAETHERefMap/simathe-c-airywave.htm>**

4 - Hydrodynamique du littoral - N.Abcha

5 - Base numérique de la CFD intégrée à la CAO - Dr A. Sobachkin, Dr G. Dumnov, Dr A. Sobachkin

**6 - An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2019 - John E. Matsson
- SDC Publications**