

Simulation numérique bidimensionnelle de l'interaction fluide-structure

Par : A. BEZZOUZA & I. HECHACHENA / Dirigé par : Dr. Laïd MESSAOUDI

27 juin 2017

DÉDICACE

Nous dédions ce travail

à nos parents ;

à nos familles ;

et à tous nos ami(e)s.

Abderraouf BEZZOUZA et Imed eddine HACHACHNA.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions le Bon Dieu Miséricordieux et Clément, qui nous a guidés dans la bonne voie des sciences et de la connaissance.

Nous tenons à remercier nos promoteur Dr : Laïd MESSAOUDI qui nos fait profiter de son expérience et de ses précieux conseils tout au long de ce travail et dans le domaine de la recherche scientifique. Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner nos grande reconnaissance et nos profonde estime.

Nous tenons aussi à remercier, à l'avance, les membres du jury qui seront désignés pour évaluer ce travail.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants ayant contribué à notre formation depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.

Abderraouf BEZZOUZA et Imed eddine HACHACHNA.

SOMMAIRE

Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Nomenclature	i
Introduction générale et position du problème	1
1 Couplage Fluide-Structure	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralité sur le couplage	3
1.3 Stratégies de couplage	5
1.4 Techniques et algorithmes de couplage	6
1.4.1 Couplage faible	6
1.4.2 Couplage fort	7
1.5 Équations principales	8
1.5.1 Équations pour le fluide	8
1.5.2 Équations de dynamique du corps solide	9
1.5.3 Équations de couplage	10
1.6 Méthode de discrétisation	10
1.7 Description du problème	11
1.8 Conclusion	13
2 Simulation avec ANSYS	14
2.1 Introduction	14
2.2 Conception	15
2.3 Maillage	15
2.4 Simulation	16

2.5	Résultats	18
2.6	Conclusion	23
3	Simulation avec COMSOL	24
3.1	Introduction	24
3.2	Conception	24
3.3	Maillage	25
3.4	Simulation	26
3.5	Résultats	27
3.6	Conclusion	34
	Conclusion générale et perspectives	35
	Bibliographie	37
A	Simulation avec ANSYS	39
B	Simulation avec COMSOL	49

LISTE DES FIGURES

1.1	<i>Couplage fluide-structure.</i>	5
1.2	<i>Principe du couplage faible.</i>	7
1.3	<i>Principe du couplage fort.</i>	8
1.4	<i>Domaine d'étude [1].</i>	11
1.5	<i>Surfaces utilisées pour le calcul des forces.</i>	12
2.1	<i>Conception du domaine de calcul.</i>	15
2.2	<i>Maillage du domaine de calcul.</i>	16
2.3	<i>Codes des deux UDF.</i>	17
2.4	<i>Contours de vitesse et pression. Cas CFD1.</i>	18
2.5	<i>Contours de vitesse et pression. Cas CFD2.</i>	19
2.6	<i>Contours de vitesse et pression pour différents pas de temps. Cas CFD3.</i>	21
2.7	<i>Forces aérodynamiques sur la structure. Cas CFD3.</i>	22
3.1	<i>Conception du domaine de calcul.</i>	25
3.2	<i>Maillage du domaine de calcul et de la structure.</i>	25
3.3	<i>Détails du maillage autour de la structure.</i>	26
3.4	<i>Pas de temps avec Comsol.</i>	27
3.5	<i>Contours de vitesse et pression. Cas IFS1.</i>	28
3.6	<i>Contours de vitesse et pression. Cas IFS2.</i>	29
3.7	<i>Forces aérodynamiques. Cas IFS2.</i>	30
3.8	<i>Déplacements du point A. Cas IFS2.</i>	30
3.9	<i>Contours de vitesse et pression. Cas IFS3.</i>	32
3.10	<i>Forces aérodynamiques. Cas IFS3.</i>	33
3.11	<i>Déplacements du point A. Cas IFS3.</i>	33
3.12	<i>Déformation du maillage.</i>	34

LISTE DES TABLEAUX

1.1	<i>Différentes stratégies de couplage.</i>	6
1.2	<i>Méthodes de discrétisation.</i>	10
2.1	<i>Configurations pour les tests CFD [1].</i>	16
2.2	<i>Forces aérodynamiques. Cas CFD2.</i>	19
2.3	<i>Forces aérodynamiques. Cas CFD2.</i>	20
2.4	<i>Forces aérodynamiques. Cas CFD2 avec $\Delta t = 0.01$ s.</i>	22
3.1	<i>Configurations pour les tests IFS.</i>	26
3.2	<i>Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS1.</i>	28
3.3	<i>Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS2 avec $\Delta t = 0.002$ s.</i>	31
3.4	<i>Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS3 avec $\Delta t = 0.001$ s.</i>	34

NOMENCLATURE

ρ^f	Masse volumique du fluide	$[\frac{kg}{m^3}]$
ρ^s	Masse volumique du solide	$[\frac{kg}{m^3}]$
ν^f	Champs de vitesse du fluide	$[\frac{m}{s}]$
ν^s	Champs de vitesse du solide	$[\frac{m}{s}]$
u^s	Déplacement du solide	$[m]$
μ^f	Viscosité dynamique du fluide	$[\frac{m^2}{s}]$
μ^s	Viscosité dynamique du solide	$[\frac{m^2}{s}]$
σ^f	Contrainte du fluide	$[Pa]$
σ^s	Contrainte du solide	$[Pa]$
\bar{U}	Vitesse moyenne du fluide	$[\frac{m}{s}]$
g	Accélération du gravité	$[\frac{m}{s^2}]$
S	Surface	$[m^2]$
P	Pression	$[Pa]$
E	Module du Young	$[Pa]$
Re	Nombre de Reynolds	
J	Matrice Jacobienne	
F	Tenseur de gradient de la déformation	

ALE	Arbitraire Lagrangienne Eulerienne
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
FEA	Finit Element Analyse
CFD	Computational Fluide Dynamique
IFS	Interaction Fluide Structure

INTRODUCTION GÉNÉRALE ET POSITION DU PROBLÈME

La mécanique des interactions fluide-structure est née d'un besoin, d'une nécessité de compréhension des phénomènes complexes faisant intervenir plusieurs disciplines scientifiques. En mécanique des solides, les fluides sont considérés comme ayant une influence négligeable ou alors modélisés de manière très grossière, tandis qu'en mécanique des fluides, les solides sont vus uniquement comme des frontières d'analyse. L'expérience a prouvé que ces approximations étaient parfaitement valides dans de nombreux cas, mais elle a montré aussi que dans certaines situations cette vision ne suffit plus : les interactions entre solides et fluides doivent être prises en compte. Il est nécessaire d'utiliser conjointement la mécanique des solides et la mécanique des fluides pour obtenir une modélisation correcte de la réalité. On parle alors de couplage, car l'évolution de chacun des deux éléments dépend de celle de l'autre. Cette rencontre de plusieurs domaines de la mécanique n'a été possible que grâce à l'essor technologique de ces dernières décennies. Il a permis à la mécanique des interactions fluide-structure (IFS) d'intégrer un nouveau domaine scientifique, celui du calcul numérique. En effet, durant les quarante dernières années, les outils numériques et informatiques n'ont cessé de progresser. Avec la révolution qu'ont connue les ordinateurs dans la seconde moitié du XXème siècle, les chercheurs peuvent maintenant avoir accès à des moyens de résolution et de visualisation de problèmes complexes. Le monde du calcul numérique connaît ainsi un développement sans précédent. Avec le calcul parallèle, les limites sont repoussées toujours plus loin. Les IFS interviennent actuellement dans le domaine industrielle (tubes d'échangeurs de chaleur), en Génie civile (action du vent sur les structures), en industrie maritime et navale, dans le domaine biomédical (écoulements sanguins dans les artères)... etc.

Cette étude a pour objectifs la compréhension de la modélisation de l'interaction entre un fluide en écoulement et une structure déformable, des difficultés d'un tel couplage de phénomènes ainsi que la compréhension des phénomènes qui n'apparaissent pas dans le cas sans couplage où la structure est considérée comme rigide. Cette étude est basé sur un exemple test (Benchmark) largement détaillé dans la littérature et qui nous servira de validation pour nos simulations numériques en utilisant les logiciels «*ANSYS*» et «*COMSOL*» qui permettent de coupler divers phénomènes physiques. Afin de simplifier notre étude, nous considérons l'écoulement comme bidimensionnel, instationnaire, incompressible et laminaire.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Nous commençons, dans le premier chapitre, par donner les détails nécessaires à la compréhension de l'Interaction Fluide-Structure (IFS) à travers les différents types de couplage ainsi que de leurs modélisation. Ce chapitre se termine par la description détaillée de notre problème à étudier. Dans le second chapitre, nous donnons en détaille les étapes de la conception, maillage, simulation et résultats avec le logiciel «*ANSYS*». Le dernier chapitre englobe les étapes détaillées avec le logiciel «*COMSOL*» depuis la conception jusqu'au résultats du couplage IFS. Ce manuscrit est clôturé par une conclusion générale et perspectives ainsi que d'une annexe contenant tous les détails nécessaires pour mener à bien les simulations avec les deux logiciels suscités.

CHAPITRE 1

COUPLAGE FLUIDE-STRUCTURE

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par définir le couplage fluide-structure (IFS) ainsi que la manière de le faire à travers les différentes stratégies de modélisation, les algorithmes de résolution correspondants et les méthodes de discrétisation. Ce chapitre se termine par une description détaillée du problème que nous allons traiter.

1.2 Généralité sur le couplage

Nous pouvons dire qu'on est en présence d'un cas d'interactions fluide-structure si par exemple un fluide s'écoule autour d'un solide mobile ou immobile, rigide ou déformable. Le comportement dynamique de la structure peut subir des changements considérables et peut affecter la stabilité dynamique du système. L'interaction fluide-structure est un phénomène qui traduit les effets réciproques de deux milieux continus, fluide et solide. Le couplage des deux milieux est imposé par un ensemble de conditions qui contraignent leurs mouvements relatifs de telle sorte que l'évolution de chaque milieu dépend de celle de l'autre. Il est donc nécessaire de simuler numériquement l'évolution du fluide et de la structure. Le développement et/ou l'utilisation d'un code numérique est nécessaire. De nombreuses stratégies sont possibles pour ces développements. Le choix de la meilleure stratégie dépend de l'existence ou non de codes fluide et/ou structure mais aussi du problème à traiter.

Dans ce contexte, la formulation du problème couplé est typiquement basée sur la description suivante des sous-problèmes fluide et structure :

- le problème fluide est formulé en pression/vitesse : il s'agit de résoudre les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, et de déterminer les

champs de pression p et de vitesse u^f dans le domaine fluide.

- le problème structure est formulé en déplacement : il s'agit de résoudre les équations du mouvement et de déterminer les champs de déplacement u^s , de déformations et de contraintes dans le domaine structure.

Au niveau de l'interface, les grandeurs échangées sont :

- les efforts du fluide vers la structure ;
- les déplacements de la structure vers le fluide.

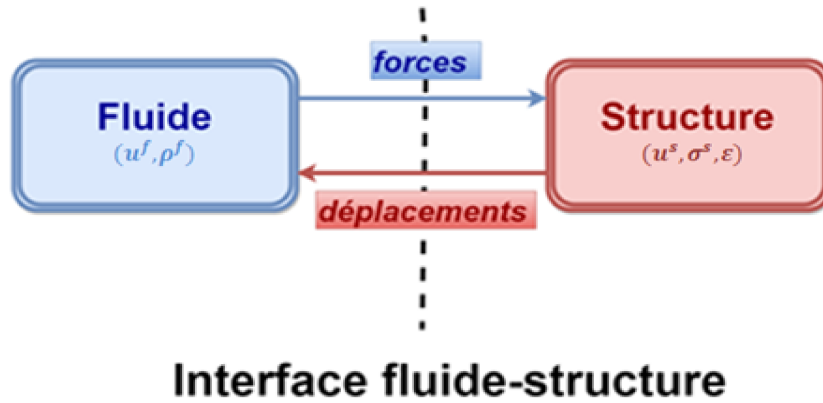
De façon générale, la simulation numérique de problèmes couplés fluide/structure utilisera les éléments suivants :

Un code de dynamique des structures qui permet de résoudre le sous-problème structure, en discrétisent les équations aux dérivées partielles du modèle choisi pour la structure. Plus précisément, ce code doit être capable de recevoir les informations représentant les forces exercées par le fluide sur l'interface fluide/structure. Ces informations sont reçues dans un certain format et doivent être exprimées dans la formulation adoptée par le code de structure.

Un code de dynamique des fluides en domaine mobile qui permet de résoudre le sous-problème fluide en discrétisant les équations aux dérivées partielles du modèle choisi pour le fluide. Plus précisément, ce code doit être capable de recevoir les informations représentant les déplacements d'une partie de sa frontière ; avancer en temps le problème fluide en domaine déformable, le plus souvent en maillage mobile ; la formulation du problème utilise pour cela le plus généralement des méthodes de type ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) qui permettent de réécrire les équations du fluide dans un repère mobile, lié au point considéré. Ceci permet d'adopter une approche plutôt lagrangienne près de la structure (le maillage fluide suit la structure) et plutôt eulérienne loin de celle-ci ; transférer des forces exercées sur l'interface fluide-structure au code structure, dans un format défini à l'avance, lié à la formulation adoptée par celui-ci.

Une interface de couplage en espace qui assure la traduction des forces et des déplacements mentionnés ci-dessus.

Une interface de couplage en temps qui organise l'échange des informations dans le temps et rend effectif le couplage entre les codes fluide et structure (Fig.1.1).

Fig. 1.1: *Couplage fluide-structure.*

1.3 Stratégies de couplage

Le couplage fluide-structure peut être réalisé de deux manières différentes :

La procédure la plus basique consiste en un couplage partitionné totalement explicite avec un échange entre les solveurs fluide et structure alternativement à chaque instance au niveau des conditions aux limites. Cette technique présente l'intérêt d'être aisée du point de vue de la mise en œuvre mais ne garantit pas de bonnes propriétés en terme de stabilité des schémas.

A l'inverse, une procédure de couplage monolithique totalement implicite permet d'envisager la résolution couplée de toutes les inconnues des problèmes fluide et structure simultanément aux mêmes instances. L'assurance de la convergence vers la solution est optimale, mais de nombreuses modifications structurelles doivent être apportées au niveau des solveurs (Tab.1.1).

À ses débuts les numériciens de l'interaction fluide-structure avaient une préférence pour le couplage monolithique, car celui-ci est très fort et assure donc une meilleure convergence. Mais de par sa nature il est très lourd et très difficile à réaliser, voir totalement impossible pour des problèmes complexes. Le couplage monolithique demande des développements spécifiques qui rendent difficile la construction d'un code fluide-structure généralisé. La seconde approche est plus souple, puisque les deux systèmes fluide et structure sont résolus de manière plus ou moins couplée. La fréquence des échanges entre le fluide et la structure détermine le degré de force du couplage. Ce couplage permet l'utilisation de codes déjà existants et la possibilité d'utiliser aussi les dernières versions de ces programmes. Le code fluide-structure a ainsi la capacité d'évoluer au fil des mises à jour de ses sous-programmes et de s'adapter à de nouveaux problèmes. Les échanges de variables sont faits directement entre les deux codes ou alors

par l'intermédiaire d'un coupleur prévu à cet effet. Ces communications correspondent aux forces d'action, de réaction de la physique et aux déplacements structurels.

	Partitionné	Monolithique
Avantages	Plus rapide Modulable et souple	Couplage fort Meilleure convergence
Inconvénients	Couplage faible à priori Contraintes et déplacements discontinus Problème de convergence	Gourmand en mémoire Formulation peu souple Gestion des interfaces en mouvement difficile à coder

Tab. 1.1: *Différentes stratégies de couplage.*

Dans la pratique, une stratégie intermédiaire est adoptée pour combiner les avantages (et éviter les inconvénients) de ces deux cas extrêmes. Une technique possible consiste à partir d'un algorithme partitionné explicite et à le rendre plus robuste et moins restrictif vis-à-vis des critères de pas de temps, grâce à une implicitation via un algorithme itératif de type prédicteur – correcteur.

1.4 Techniques et algorithmes de couplage

La résolution du problème couplé est alors conduite en échangeant les informations entre les deux sous-problèmes. Il existe une grande variété de stratégies de couplage, qui dépendent en particulier des modélisations retenues pour les deux milieux et des techniques de discrétisation employées pour résoudre chacun des deux problèmes. Le couplage réalisé entre les deux sous-problèmes peut être plus ou moins fort.

1.4.1 Couplage faible

On appelle couplage faible un couplage tel que les conditions de continuité à l'interface fluide-structure ne sont pas assurées exactement à chaque pas de temps.

Dans un couplage faible les équations décrivant les deux milieux sont résolues simultanément ou alternativement, mais les échanges d'énergie ne vérifient pas strictement le principe d'action/réaction : le couplage obtenu est par conséquent non conservatif ; il s'agira alors de limiter ou compenser les pertes d'énergie, en adoptant une stratégie de couplage adaptée au problème posé. Cette méthode est plus générale que la précédente, mais moins robuste.

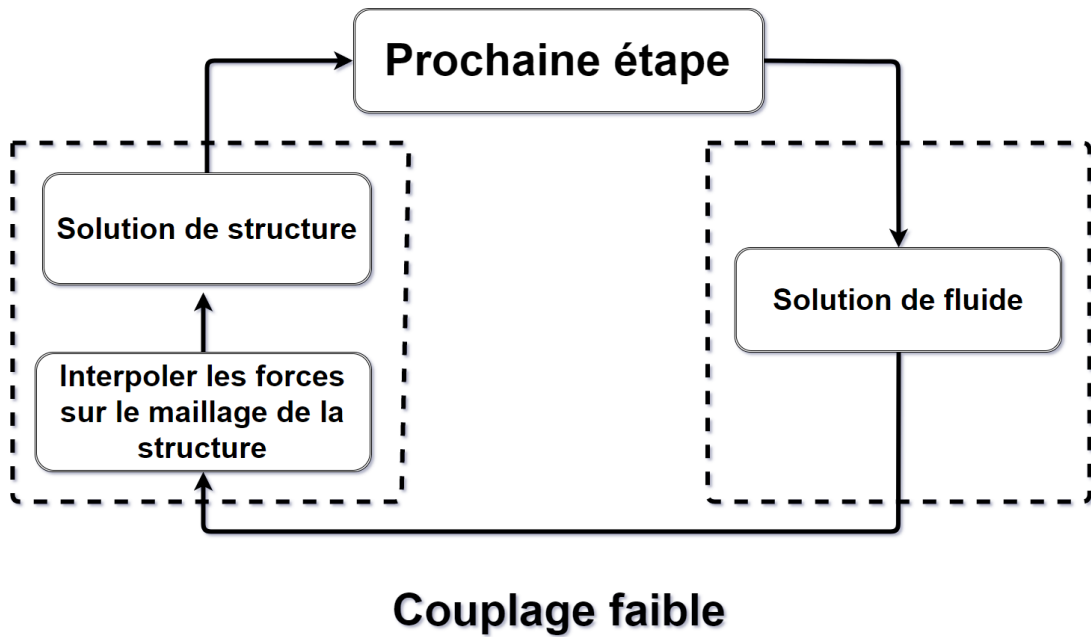


Fig. 1.2: Principe du couplage faible.

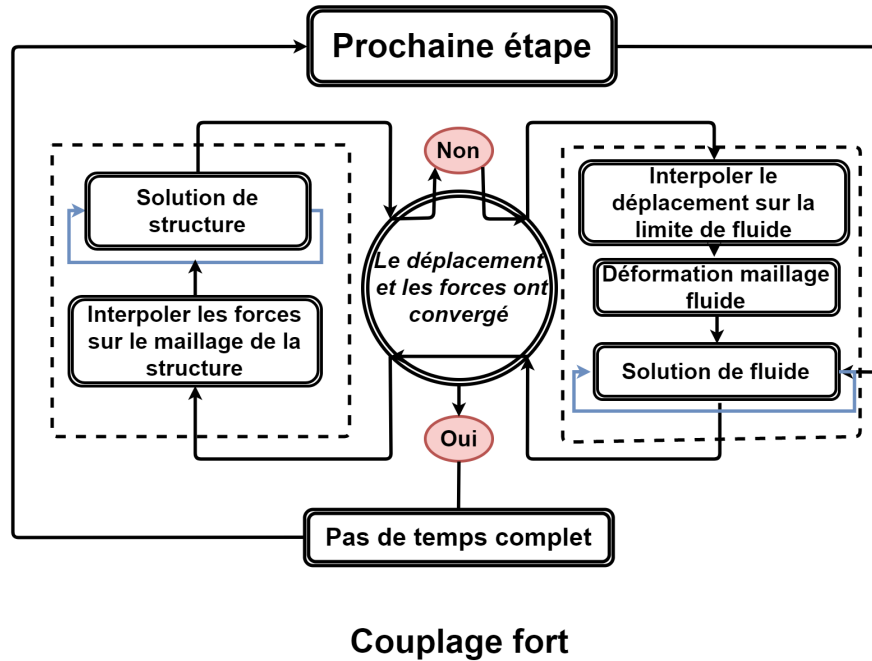
La résolution est donc séquentielle c-à-d que les deux simulations sont réalisées l'une après l'autre, dans un ordre donné. Le processus de simulation est schématisé sur la figure (Fig.1.2) ; le chaînage des calculs peut être réalisé manuellement par l'ingénieur, ou automatisé à l'aide d'un script.

1.4.2 Couplage fort

Dans un couplage fort, les équations décrivant les deux milieux sont résolues simultanément, et les échanges d'énergies entre les deux systèmes vérifient de façon exacte le principe d'action/réaction : le couplage obtenu est numériquement conservatif. Cette technique est facilement applicable pour des domaines de calcul fixes, elle l'est moins dans un cas plus général où les équations à résoudre sont non linéaires et les domaines fluide et/ou structure varient dans le temps. Des travaux récents, encore limités à des cas académiques proposent une méthode de résolution fortement couplée. Ces méthodes sont basées sur une représentation similaire des deux problèmes, par exemple en adoptant une formulation en pression/vitesse pour le solide.

Le cas du couplage fort est plus complexe : chacune des deux physiques dépend de l'autre, et aucune simulation ne peut être menée à bien indépendamment. Il est donc nécessaire d'échanger des résultats entre les deux solveurs, dans les deux sens, afin d'assurer le couplage. Pour ce faire, la technique la plus courante consiste à effectuer ces échanges à intervalles de temps réguliers. En effet, la plupart des simulations sont (ou peuvent être écrites comme) des problèmes d'évolution, posés sur un certain intervalle

de temps. Cet intervalle de temps est divisé en petits intervalles élémentaires appelés «pas de temps», et la simulation est réalisée en «avançant» d'un pas de temps à l'autre à partir des conditions initiales du problème (Fig.1.3).



Couplage fort

Fig. 1.3: *Principe du couplage fort.*

1.5 Équations principales

Dans cette partie, nous présentons les différentes équations qui peuvent décrire le déplacement d'un solide vibrant et le mouvement du fluide qui l'entoure.

1.5.1 Équations pour le fluide

Il est gouverné par l'équation de conservation de la masse et le bilan de quantité de mouvement. La première est exprimée par l'équation (1.1) :

$$\frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho^f \vec{v}^f) = 0 \quad (1.1)$$

Pour le bilan de quantité de mouvement, nous avons plusieurs possibilités selon les propriétés du fluide et de l'écoulement. Les équations d'Euler (1.2) sont adaptées à l'étude d'un écoulement très confiné, sous l'hypothèse de petites amplitudes d'oscillation. Dans ce cas, aucun effet de la dissipation dans le fluide ne peut apparaître tandis que les effets inertiels sont sensibles.

$$\rho^f \frac{\partial \vec{v}^f}{\partial t} = -\vec{\nabla} p \quad (1.2)$$

Le terme convectif est retenu dans les équations d'Euler (1.3) pour un écoulement très confiné et de grandes amplitudes d'oscillation. Ce terme peut introduire un déphasage entre la force imposée par le fluide sur la structure et la vitesse du solide.

$$\rho^f \frac{\partial \vec{v}^f}{\partial t} + \left(\rho^f \cdot \vec{v}^f \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{v}^f = -\vec{\nabla} p \quad (1.3)$$

Les effets dissipatifs sont pris en compte par le terme visqueux des équations de Navier-Stokes. Elles sont adaptées à la représentation d'un écoulement de fluide visqueux induit par de faibles mouvements de la structure (1.4). De la même manière que pour les équations d'Euler, nous pouvons manipuler l'expression de la force fluide afin de repérer deux termes, un en quadrature avec l'autre. La différence est que, dans les équations d'Euler, l'amortissement dépend du terme convectif, tandis que dans les équations de Stokes, il dépend de la viscosité.

$$\rho^f \frac{\partial \vec{v}^f}{\partial t} = -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \vec{v}^f \right) \quad (1.4)$$

Pour l'écoulement d'un fluide visqueux et de grands déplacements de la structure, nous devons utiliser les équations de Navier-Stokes complètes (1.5).

$$\rho^f \frac{\partial \vec{v}^f}{\partial t} + \rho^f \left(\vec{v}^f \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{v}^f = -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \vec{v}^f \right) \quad (1.5)$$

L'écoulement est considéré comme bidimensionnel, instationnaire, laminaire, avec le fluide est incompressible, l'effet de la gravité est négligeable a puisque la direction de l'écoulement est horizontale.

1.5.2 Équations de dynamique du corps solide

L'oscillation du solide est décrite par l'équation de la dynamique d'un corps élastique et compressible (déformable). sa déformation est décrite par le déplacement u^s , avec le champ de vitesse $v^s = \frac{\partial u^s}{\partial t}$, les équations de conservation sont :

$$\rho^s \frac{\partial \vec{v}^s}{\partial t} + \rho^s (\nabla \cdot \vec{v}^s) \vec{v}^s = \text{div}(\vec{\sigma}^s) + \rho^s \vec{g} \quad (1.6)$$

Écrit dans la description Lagrangienne plus commune, c'est-à-dire par rapport à un état de référence fixe (initial), nous avons dans le domaine du solide :

$$\rho^s \frac{\partial^2 \vec{u}^s}{\partial t^2} = \text{div}(\vec{J} \vec{\sigma}^s \vec{F}^{-T}) + \rho^s \vec{g} \quad (1.7)$$

avec $\vec{F} = \vec{T} + \nabla \vec{u}^s$ est le tenseur de gradient de la déformation.

1.5.3 Équations de couplage

Les conditions limites sur l'interface fluide-solide sont supposées être (1.8) et (1.9) :

$$\vec{\sigma}^f \vec{n} = \vec{\sigma}^s \vec{n} \quad (1.8)$$

$$\vec{v}^f = \vec{v}^s \quad (1.9)$$

Où n est un vecteur unitaire normal à l'interface. Cela implique une condition d'adhérence pour le fluide (égalité des vitesses), et que les forces sur l'interface sont conservées (égalité des contraintes σ).

1.6 Méthode de discrétisation

L'autre point important de l'IFS numérique est le type de discrétisations utilisé. Les méthodes d'éléments finis et de volumes finis se disputent évidemment la première place. La méthode des différences finies est trop simpliste pour des codes de calcul fluide-structure généralistes.

Du côté fluide les deux approches sont aussi possibles. Les solveurs fluides formulés en volumes finis sont très évolués, en particulier dans le domaine de la turbulence. Le couplage fluide-structure peut mixer ces deux approches, sauf dans le cas monolithique. On rencontrera fréquemment des codes monolithiques basés sur les éléments finis et des codes découplés ayant une discrétisation fluide volumes finis et une discrétisation structure éléments finis. Les codes monolithiques volumes finis sont plus récents et plus rares. Les codes découplés ayant pour discrétisation fluide les éléments finis et pour discrétisation solide les volumes finis sont inexistantes. On rencontre aussi des codes découplés qui n'utilisent qu'une formulation : tout "volumes finis" ou tout "éléments finis".

	Volumes finis	Éléments finis
Avantages	Conservative localement et globalement chaque contribution identifiée physiquement Traite les phénomènes non-linéaires	Ordre de précision en espace modulable à volonté Champ d'application universel
Inconvénients	Difficulté de monter en précision	Méthode non-conservative localement

Tab. 1.2: Méthodes de discrétisation.

1.7 Description du problème

Afin de simplifier notre étude, qui s'annonce déjà très difficile, nous avons choisis un cas simple basé sur un exemple test (Benchmark) largement détaillé dans la littérature [1] et qui nous servira de validation pour nos simulations numériques. Le domaine est basé sur la version 2D du benchmark CFD (Fig.1.4). En omettant la barre élastique derrière le cylindre, on peut récupérer exactement la configuration de l'écoulement autour du cylindre ce qui permet la validation de la partie écoulement en comparant les résultats avec ceux de l'article de référence [1].

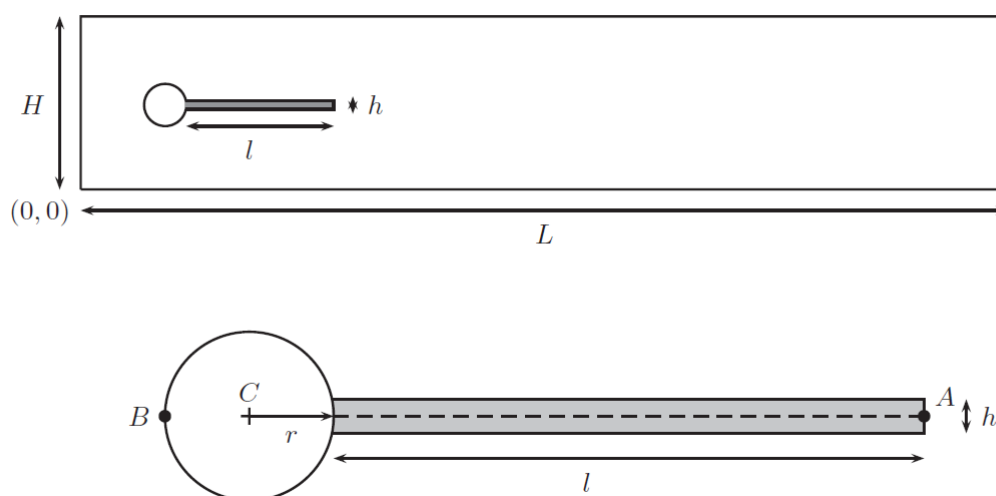


Fig. 1.4: *Domaine d'étude [1].*

Les paramètres géométriques sont donnés comme suit (toutes les valeurs sont en mètre) :

Le domaine a une longueur $L = 2.5$ et une hauteur $H = 0.41$.

Le centre du cercle est positionné à $C = (0.2, 0.2)$ (mesuré à partir du coin bas gauche du canal) et le rayon est $r = 0.05$.

La barre de structure élastique a une longueur $l = 0.35$ et une hauteur $h = 0.02$, le coin bas droit est positionné à $(0.6; 0.19)$, et l'extrémité gauche est complètement attachée au cylindre fixe.

Les points de contrôle sont $A(t)$, attaché à la structure et positionné initialement en $A(0) = (0.6, 0.2)$ et $B(0.15; 0.2)$.

La disposition de l'ensemble est intentionnellement non symétrique pour empêcher la dépendance de l'apparition de toute oscillation possible sur la précision du calcul.

Grandeurs de comparaisons

Selon nos calculs préliminaires, les oscillations périodiques auto induites se développent dans le flux fluide et la structure. La comparaison sera faite pour un flux entièrement développé, et en particulier pour une période complète de l'oscillation par rapport à la position du point $A(t)$. Les quantités d'intérêt suggérées sont les suivantes :

Les déplacements $Y(t)$ et $X(t)$ de la fin de la structure du faisceau au point A.

Les forces exercées par le fluide sur l'ensemble du corps immergé, c'est-à-dire les forces de portance et de traînée agissant sur l'ensemble cylindre et structure.

$$(F_{Traînée}, F_{Portance}) = \int \sigma \vec{n} dS \quad (1.10)$$

avec $S = S_1 \cup S_2$

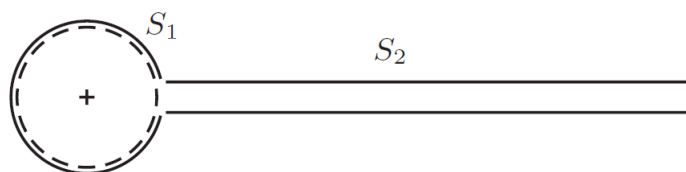


Fig. 1.5: Surfaces utilisées pour le calcul des forces.

Les valeurs dépendant du temps sont représentées par la valeur moyenne, l'amplitude et la fréquence. La valeur moyenne et l'amplitude sont calculées à partir de la dernière période des oscillations en prenant les valeurs maximum et minimum, puis la valeur moyenne est prise comme moyenne des valeurs min/max, et l'amplitude est la différence max/min de la moyenne, c-à-d :

$$Moyenne = \frac{1}{2}(max + min)$$

$$Amplitude = \frac{1}{2}(max - min)$$

$$Fréquence = \frac{1}{T}$$

Conditions limites et initiales

Dans le cas où l'écoulement est stationnaire, on applique à l'entrée le profil de vitesse suivant (condition limite) :

$$v^f(y, 0) = 1.5 \cdot \bar{U} \cdot \frac{y \cdot (H - y)}{\left(\frac{H}{2}\right)^2} \quad (1.11)$$

Dans le cas où l'écoulement est instationnaire, on applique le profile de vitesse suivant a l'entée (condition initiale) :

$$v^f(y, t) = \begin{cases} v^f(y, 0) \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} t\right)}{2} & \text{si } t < 2.0 \text{ s} \\ v^f(y, 0) & \text{si } t \geq 2.0 \text{ s} \end{cases} \quad (1.12)$$

La condition de sortie peut être choisie par l'utilisateur, par exemple sans contrainte ou ne fait rien. La condition de sortie prescrit effectivement une certaine valeur de référence pour la variable de pression. Bien que cette valeur puisse être réglée arbitrairement dans le cas incompressible, dans le cas d'une structure compressible, cela aura une influence sur la contrainte et par conséquent la déformation du solide. Dans notre cas, nous définissons la pression de référence à la sortie pour avoir une valeur moyenne nulle.

La condition d'adhérence (no-slip) est prescrite pour le fluide sur les autres parties limites. C'est-à-dire l'interface de la paroi, du cercle et de la structure fluide supérieure et inférieure.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue quelque définitions et généralités relatifs à l'IFS, les stratégies et techniques de couplage ainsi que les équations régissant ce type problème. Nous avons aussi défini la problématique en explicitant le domaine d'étude ainsi que les conditions aux limites et initiales nécessaires.

Nous allons utiliser un logiciel adapté à ce type de problème et ceci fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2

SIMULATION AVEC ANSYS

2.1 Introduction

ANSYS est un logiciel à usage général, utilisé pour simuler les interactions de toutes les disciplines physiques, structurelles, vibratoires, dynamique des fluides, transfert de chaleur et électromagnétique pour les ingénieurs. Ainsi, il permet de simuler des tests ou des conditions de travail, permet de tester en environnement virtuel avant de fabriquer des prototypes de produits. En outre, la détermination et l'amélioration de points faibles, la vie informatique et la prévision de problèmes probables sont possibles grâce à des simulations 3D en environnement virtuel. Le logiciel *ANSYS* possède une structure modulaire, chaque module correspond à un domaine précis et ils sont tous gérés à travers une interface commune "*Workbench*" qui permet de faire le lien entre les différents modules. *ANSYS* peut fonctionner avec d'autres logiciels d'ingénierie utilisés sur le bureau en ajoutant des modules de connexion CAO et FEA.

La conduite d'une simulation numérique d'un problème d'IFS se fait en utilisant le module "*Design-modeler*" pour la conception de la géométrie, le module "*Ansys-Meshing*" pour le maillage du domaine fluide ainsi que de la structure, le module "*Fluent*" pour simuler l'écoulement du fluide, le module "*Ansys-Structural*" pour simuler le comportement de la structure et enfin "*CFD-Post*" pour la visualisation des résultats des simulations. Le couplage s'effectue au niveau de "*Workbench*" en utilisant le module de couplage dédié à cet effet.

Notre problème 2D décrit dans le chapitre précédent, ne nous a pas permis d'exploiter toute la puissance de "*ANSYS*". En effet, après avoir simulé l'écoulement stationnaire puis instationnaire, nous avons appliqué la procédure de couplage décrite dans le manuel d'aide de "*ANSYS*" mais sans résultat. Le problème se situe au niveau de l'interface entre le fluide et la structure qui doit obligatoirement être une surface et,

de ce fait, le problème doit être tridimensionnel (3D)!. Le cas instationnaire demande beaucoup de ressources informatiques (processeur puissant et RAM) et nous pris un temps de calcul avec un maillage raffiné jusqu'à 18h. C'est pour cette raison que nous avons préféré rester en 2D et minimiser le maillage puis traiter le problème avec un autre logiciel, à savoir "COMSOL" qui fera l'objet du prochain chapitre.

Ce chapitre englobe donc les détails des étapes menées pour simuler l'écoulement stationnaire et instationnaire et, afin de ne pas alourdir inutilement le document, la procédure pas-à-pas utilisée (sans IFS) est décrite en Annexe (A).

2.2 Conception

La conception de la géométrie ainsi que du domaine de calcul est réalisée à l'aide du module "Design-modeler". Sur la figure (Fig.2.1) apparaissent les conditions aux limites telles que stipulées dans l'article de référence [1] et décrites au chapitre précédent.

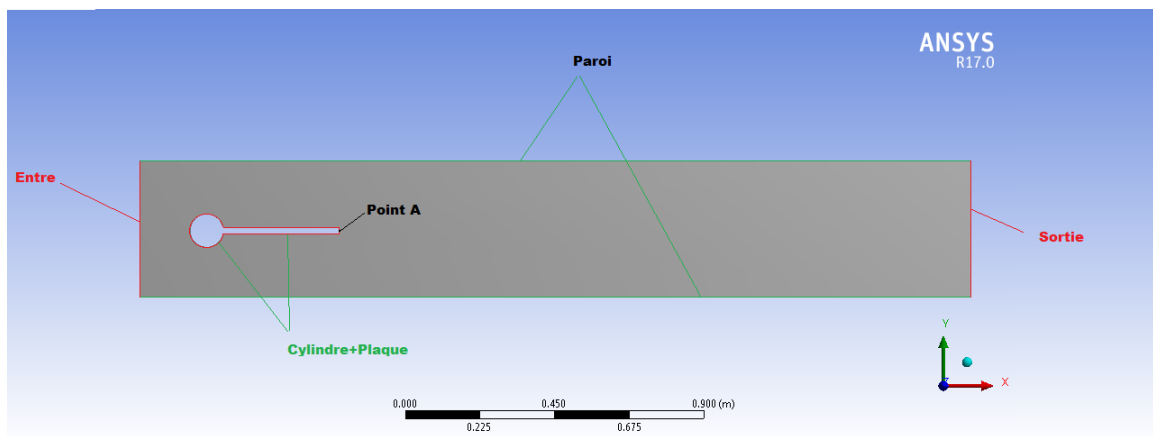


Fig. 2.1: Conception du domaine de calcul.

2.3 Maillage

Le maillage du domaine de calcul est réalisé avec "Ansys-Meshing". Nous avons testé plusieurs maillages structurés et non structurés afin de choisir le maillage optimal avec lequel nous aurons un bon résultat et un temps de calcul pas trop exagéré. Nous avons aboutis à un bon compromis avec un maillage structuré avec 20960 nœuds et 10140 éléments (Fig.2.2).

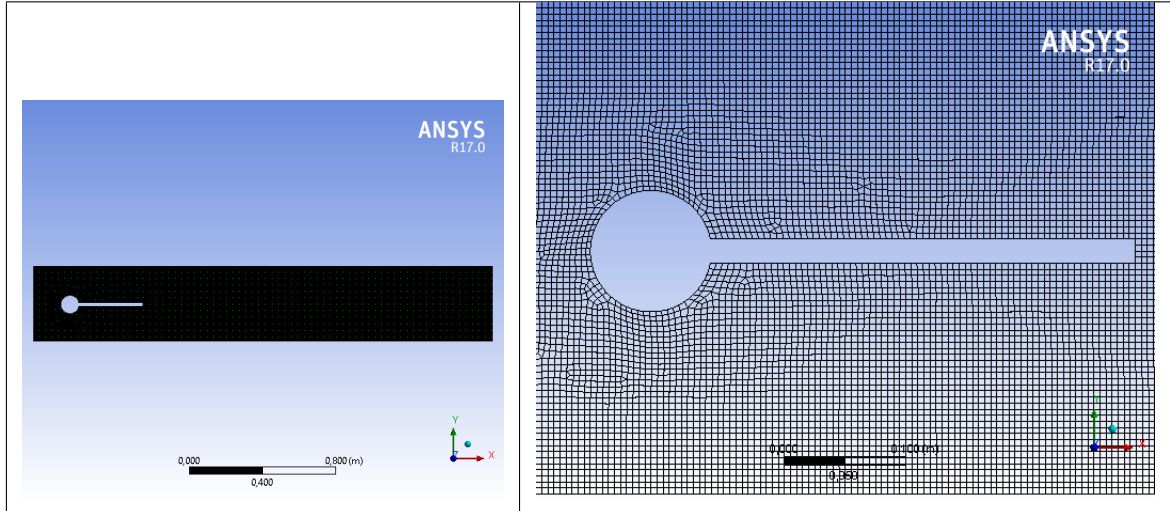


Fig. 2.2: Maillage du domaine de calcul.

2.4 Simulation

Pour nos simulations, nous avons choisis la démarche indiquée par Turek [1] pour les différentes configurations de tests (Tab.2.1). Nous considérons la plaque attachée au cylindre comme un objet rigide en prenant les paramètres structuraux suivant : $\rho^s = 10^6 [\frac{kg}{m^3}]$ et $\mu^s = 10^{12} [\frac{kg}{m \cdot s^2}]$. Ceci nous permettra donc de ne traiter que le problème de l'écoulement du fluide à travers la structure fixe (cylindre + plaque). La condition d'adhérence (non-glissement) est donc appliquée sur toute l'interface de la structure ainsi que sur les parois (haut et bas) du domaine de calcul.

Nous avons utilisé le module “*Fluent*” pour effectuer nos simulations de l'écoulement de fluide considéré comme incompressible et laminaire. Pour les 3 cas de configuration, nous avons choisis une précision de 10^{-4} pour les résidus relatifs à la convergence.

A l'entrée du domaine, nous imposons le profil de vitesse donné par l'équation (1.11) dans le cas stationnaire et par l'équation (1.12) dans le cas instationnaire. La vitesse moyenne correspondant à chaque cas de test est donnée dans le tableau (Tab.2.1).

Paramètres	CFD1	CFD2	CFD3
$\rho^f [10^3 \frac{kg}{m^3}]$	1	1	1
$\nu^f [10^{-3} \frac{m^2}{s}]$	1	1	1
$\bar{U} [\frac{m}{s}]$	0.2	1	2
Paramètre adimensionnel	CFD1	CFD2	CFD3
$Re = \frac{\bar{U} d}{\nu^f}$	20	100	200
Régime d'écoulement	Stationnaire	Stationnaire	Instationnaire

Tab. 2.1: Configurations pour les tests CFD [1].

L'introduction des conditions aux limites à l'entrée du canal dans les deux cas stationnaire et instationnaire doit se faire en utilisant une UDF (*User Defined Function*) dans "*Fluent*". Ceci nous a permis d'écrire en langage C les deux UDF suivantes. La manière de les faire rentrer est décrite en Annexe (A).

<pre>#include "udf.h" DEFINE_PROFILE(inlet, thread, nv) { float x[3]; float y; real h=0.41, vm=U; face_t f; begin_f_loop(f, thread) { F_CENTROID(x,f,thread); y = x[1]; F_PROFILE(f, thread, nv) = (1.5*vm*y*(1-(y/h))/(h/4)); } end_f_loop(f, thread) }</pre>	<pre>#include "udf.h" DEFINE_PROFILE(inlet, thread, nv) { float x[3]; float y; real h=0.41, vm=U, pi=3.1415629; real t = CURRENT_TIME; face_t f; begin_f_loop(f, thread) { if (t < 2.) { F_CENTROID(x,f,thread); y = x[1]; F_PROFILE(f, thread, nv) = (1.5*vm*y*(1-(y/h))/(h/4))*(1-cos(pi*t/2))/2; } else { F_CENTROID(x,f,thread); y = x[1]; F_PROFILE(f, thread, nv) = (1.5*vm*y*(1-(y/h))/(h/4)); } } end_f_loop(f, thread) }</pre>
<i>Cas stationnaire (CFD1+CFD2)</i>	<i>Cas instationnaire (CFD3)</i>

Fig. 2.3: Codes des deux UDF.

Nous présentons ci-dessous certains détails utilisés dans nos simulations :

1. Méthode de résolution : nous avons utilisé des pas de temps (*time steps*) pour résoudre l'écoulement en instationnaire. La méthode *COUPLE* est utilisée pour le couplage vitesse-pression. Pour la discrétisation spatiale, un schéma *standard* pour la pression et *Upwind* de deuxième ordre pour la quantité de mouvement. Afin d'améliorer la précision, nous avons travaillé avec la méthode numérique instationnaire (*second order implicit transient*).
2. Critères de convergence : Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables pression et vitesse du problème entre la présente itération et l'itération précédente pour chaque pas de calcul. On pose leur valeur minimale à 10^{-4} et on les affiche afin de surveiller l'évolution de la solution.
3. Exécution des calculs : Afin de capturer correctement le dégagement des tourbillons, on doit avoir au moins 20 à 25 pas de temps dans le cas *CFD3*. en prenant en compte les valeurs du diamètre du cylindre et de la vitesse initiale (pour chaque R_e étudié), on calcule le pas de temps à chaque simulations comme présenté en dessous. De plus, nous fixons 50 itérations pour chaque pas de temps (*Max Itérations / Time Step*) afin d'assurer la convergence des itérations à chaque pas de temps.

2.5 Résultats

Nous présentons ci-dessous les résultats des différents cas de simulations.

La figure (Fig. 2.4) représente les contours de vitesse et de pression autour de la structure pour un nombre de Reynolds $R_e = 20$. On retrouve bien les résultats bien connus de l'écoulement autour d'un cylindre. Notons que ces résultats ne sont pas parfaitement symétriques, ce qui est bien visible sur les contours de pression, et ceci est parfaitement logique vu le léger décalage de la structure par rapport au domaine de calcul (hauteur 0.41 et non 0.40 qui correspondra à la symétrie parfaite).

Les résultats des forces aérodynamiques de ce premier test sont donnés dans le tableau (Tab.2.2). L'erreur relative sur la force de traînée est très acceptable, par contre celle de la portance pourra éventuellement être améliorée en raffinant le maillage, chose que nous n'avons pas fait puisque notre but n'est pas de chercher une grande précision et donc nous avons gardé le même maillage pour les trois configurations de tests afin d'avoir un temps de calcul acceptable pour le cas *CFD3*.

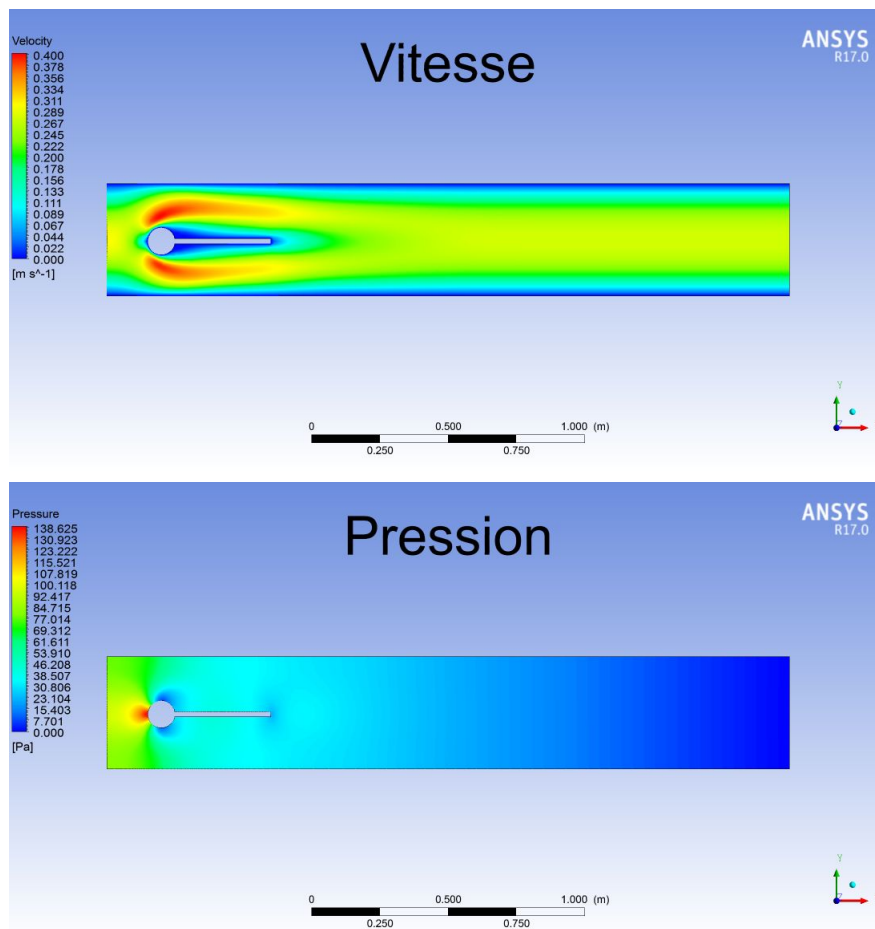


Fig. 2.4: Contours de vitesse et pression. Cas *CFD1*.

Forces	Traînée	Portance
Valeur Numérique	14.11	0.9454
Valeur de Référence [1]	14.29	1.119
Erreur relative (%)	1.26	15.51
Temps de calcul	7 min	

Tab. 2.2: Forces aérodynamiques. Cas CFD2.

La figure (Fig. 2.5) représente les contours de vitesse et de pression autour de la structure pour un nombre de Reynolds $R_e = 100$.

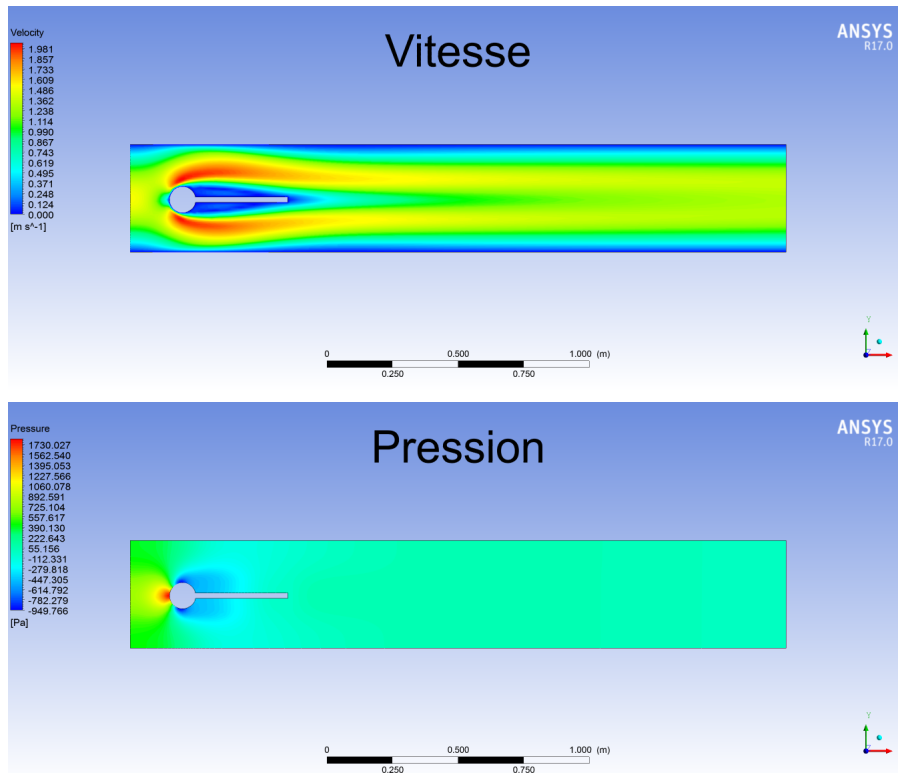


Fig. 2.5: Contours de vitesse et pression. Cas CFD2.

Les résultats de ce second test sont donnés dans le tableau (Tab.2.3). Nous remarquons que, dans ce cas, l'erreur relative commise sur le calcul des forces de traînée et de portance est très acceptable comparées à ceux de la référence [1].

Forces	Trainée	Portance
Valeur Numérique	141.0	10.94
Valeur de référence [1]	136.7	10.53
Erreur relative (%)	3.14	3.89
Temps de calcul	10 <i>min</i>	

Tab. 2.3: *Forces aérodynamiques. Cas CFD2.*

La figure (Fig. 2.6) représente les contours de vitesse et de pression autour de la structure pour un nombre de Reynolds $R_e = 200$ et pour différents pas de temps. L'animation permet, bien sûr, de voir en détail le développement de l'écoulement autour et derrière la structure. C'est à partir de $t = 3 s$ que l'on commence à distinguer les perturbations de l'écoulement.

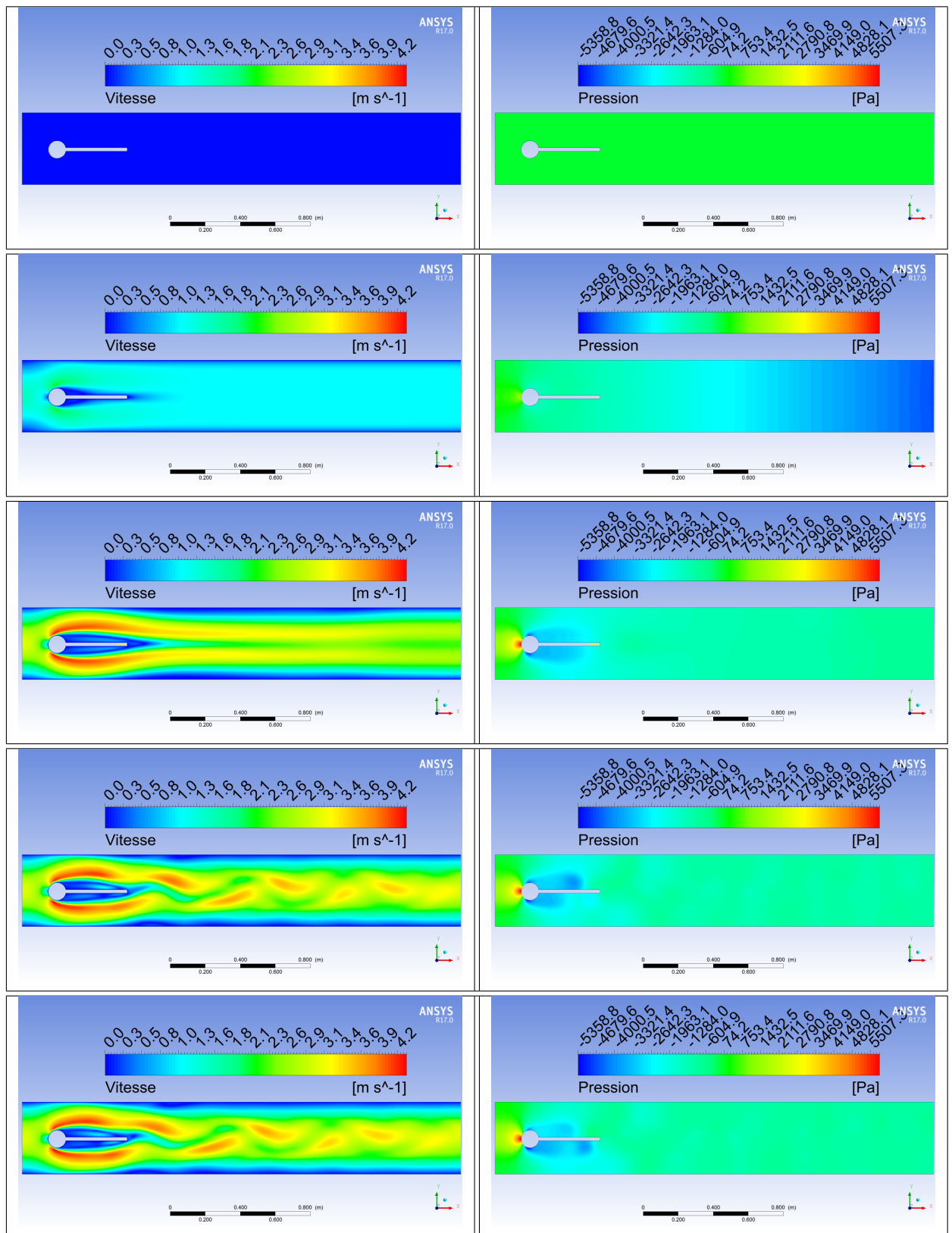


Fig. 2.6: Contours de vitesse et pression pour différents pas de temps. Cas CFD3.

La figure (Fig. 2.7) et le tableau (Tab.2.4) représentent les résultats graphiques et

tabulés des forces aérodynamiques de traînée et de portance sur la structure (cylindre + plaque). Ces résultats sont très comparables à ceux de Turek [1] avec un pas de temps $\Delta t = 0.01 s$ qui nous a pris environ 2 heures de temps. Cette figure est très intéressante puisqu'elle nous permet de situer exactement le commencement des perturbations dans les valeurs de la traînée et de la portance. Ceci correspondra, bien sûr, au commencement de la vibration de la structure si elle n'était pas rigide.

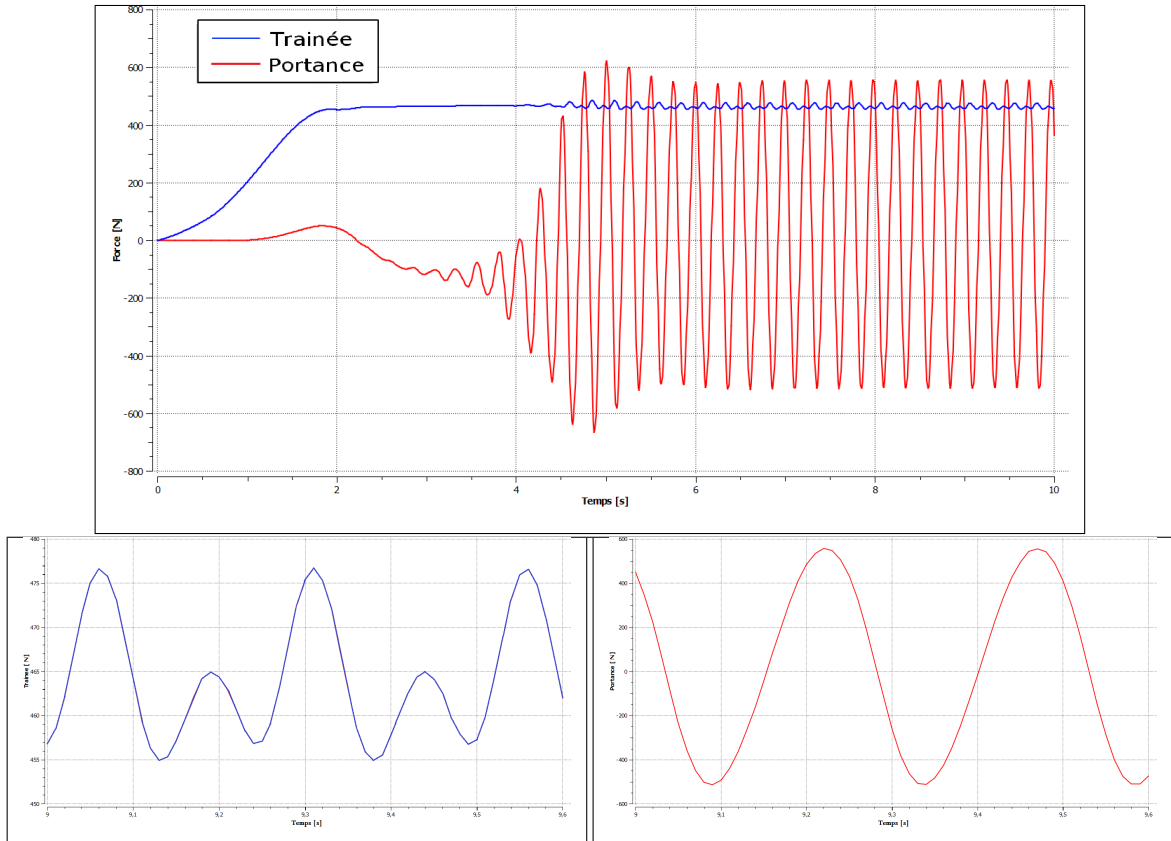


Fig. 2.7: Forces aérodynamiques sur la structure. Cas CFD3.

Forces	Trainée	Portance
Valeur Numérique	465.85 ± 10.92	22.9 ± 534.97
Valeur de Référence	439.45 ± 5.6183	-11.893 ± 437.81
Temps de calcul	$2 h 07 min$	

Tab. 2.4: Forces aérodynamiques. Cas CFD2 avec $\Delta t = 0.01 s$.

2.6 Conclusion

Nous avons mené cette première partie, qui concerne la simulation de l'écoulement stationnaire et instationnaire sans couplage, avec succès vu les résultats que nous avons trouvé et qui sont très comparables à ceux de notre référence [1].

Pour simuler l'IFS en restant en 2D, nous utiliserons, dans le prochain chapitre, le logiciel "*COMSOL*" afin de pallier le problème rencontré sous "*ANSYS*" et qui consiste à traiter le problème tridimensionnel pour faire le couplage.

CHAPITRE 3

SIMULATION AVEC COMSOL

3.1 Introduction

Le logiciel “*COMSOL*” Multiphysics est un outils de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Il permet de simuler de nombreuses applications physiques en ingénierie et, tout particulièrement, les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Les différentes étapes du processus de simulation : définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le ou les phénomènes physiques intervenant, résoudre et afficher les résultats sont intégrées dans une seule interface simple et conviviale.

Puisque “*ANSYS*” ne permet de traiter le problème de couplage fluide-structure qu’en 3D, nous allons donc utiliser, dans ce chapitre, le logiciel “*COMSOL*” afin de poursuivre notre étude en la complétant par l’IFS et en restant en 2D. Ce chapitre englobe donc les détails des étapes menées pour simuler l’écoulement stationnaire et instationnaire et, afin de ne pas alourdir inutilement le document, la procédure pas-à-pas utilisée est décrite en Annexe (B).

3.2 Conception

La conception de la géométrie ainsi que du domaine de calcul est réalisée à l’aide du module de dessin intégré dans la même interface (3.1).

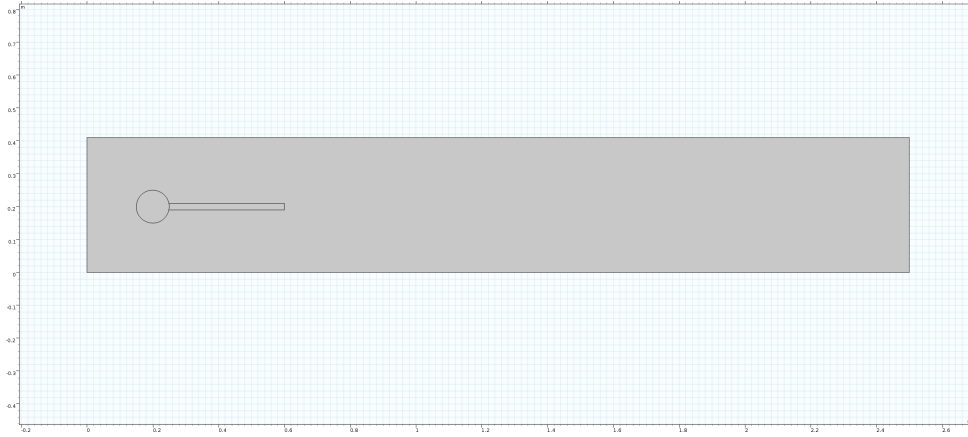


Fig. 3.1: *Conception du domaine de calcul.*

3.3 Maillage

Le maillage du domaine d'étude ainsi que de la structure (cylindre + plaque) est mis en œuvre par le mailleur automatique de "COMSOL". Le maillage est de type non structuré, composé d'éléments triangulaires en 2D, le nombre total de cellules est de 13252 (Fig. 3.2). Le détail du maillage autour de la structure est donné sur la figure (Fig.3.3).

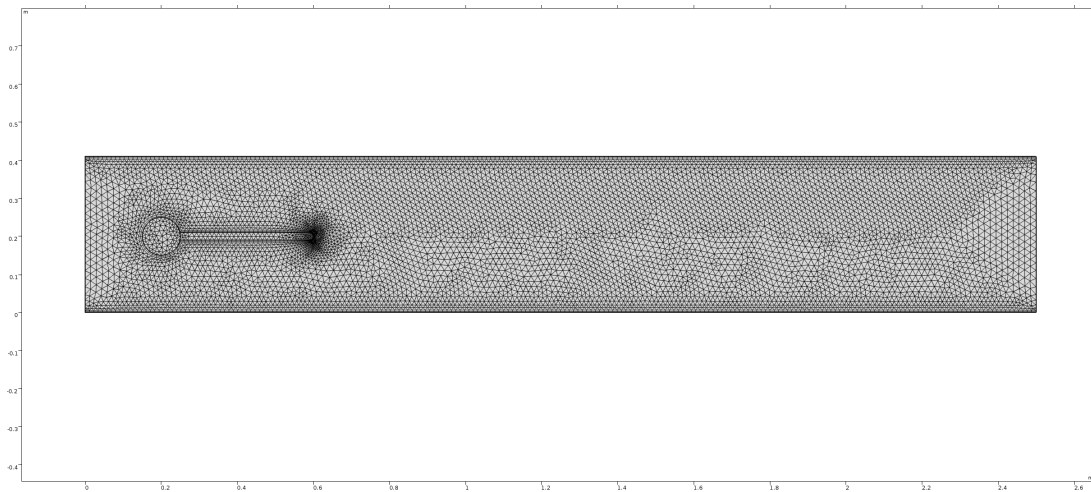


Fig. 3.2: *Maillage du domaine de calcul et de la structure.*

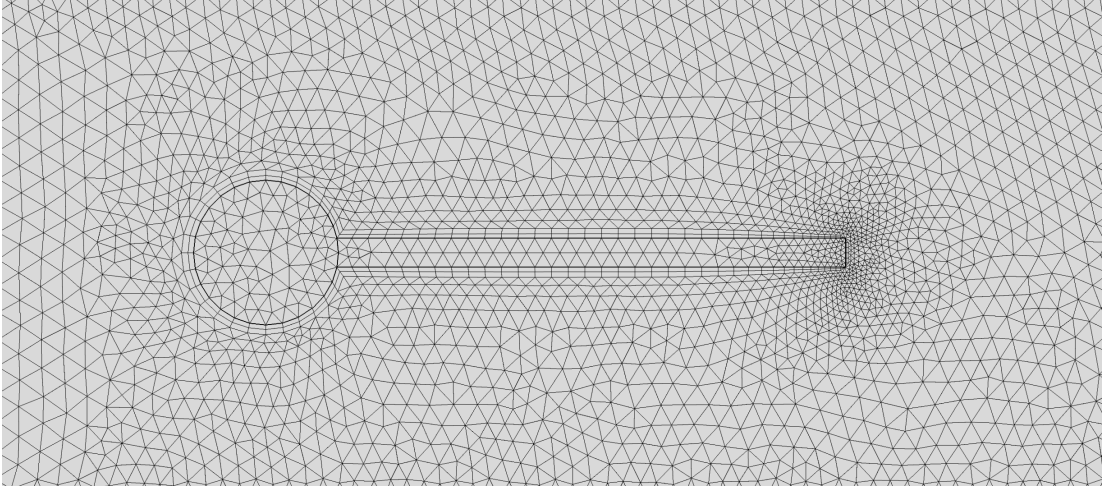


Fig. 3.3: Détails du maillage autour de la structure.

3.4 Simulation

Pour nos simulations, nous avons choisis la même démarche indiquée par Turek [1] pour les différentes configurations de tests relatifs au couplage (Tab.3.1).

Le test *IFS1* est celui du cas stationnaire tandis que les tests *IFS1* et *IFS2* sont effectués pour deux vitesses d'entrée différentes et donnent lieu à des solutions périodiques.

On tiens à signaler que pour la structure, le cylindre est considéré comme rigide et la plaque comme élastique (module de Young E^s et viscosité dynamique μ^s).

Paramètres	IFS1	IFS2	IFS3
$\rho^f [10^3 \frac{kg}{m^3}]$	1	1	1
$\nu^f [10^{-3} \frac{m^2}{s}]$	1	1	1
$\rho^s [10^3 \frac{kg}{m^3}]$	1	10	1
ν^s	0.4	0.4	0.4
$\mu^s [10^6 \frac{kg}{m \cdot s^2}]$	0.5	0.5	2.0
$E^s [10^6 \frac{N}{m^2}]$	0.14	1.4	5.6
Paramètres adimensionnels	IFS1	IFS2	IFS3
$\bar{U} [\frac{m}{s}]$	0.2	1	2
$Re = \frac{\bar{U} d}{\nu^f}$	20	100	200
Régime d'écoulement	Stationnaire	Instationnaire	Instationnaire

Tab. 3.1: Configurations pour les tests *IFS*.

Mise en place de la physique et de la solution avec COMSOL

Condition d'entre : En condition d'entrée, on introduit simplement le profil de vitesse sans avoir à écrire une UDF. Une condition de non-glissement (adhérence) est appliquée aux parois solides dans les trois cas d'étude.

Configuration du solveur : nous avons choisi les paramètres suivants : *Time-Dependent Solver* : Comme on devait utiliser des pas de temps pour résoudre l'écoulement instationnaire, la méthode pour faire entrer le pas de temps sous "COMSOL" se fait comme indiqué ci-dessous (Fig.3.4) :

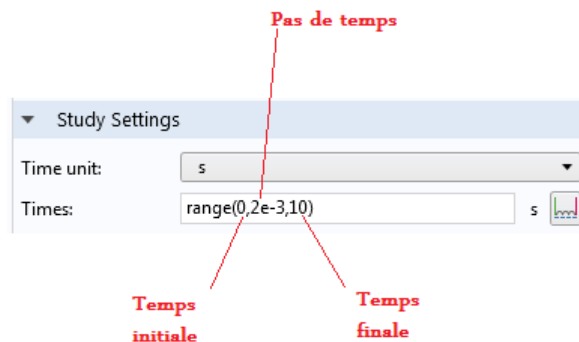


Fig. 3.4: Pas de temps avec Comsol.

Méthodes de solution : on utilise la méthode "Fully Coupled" pour le couplage. Pour la discrétisation spatiale, on utilise "Jacobian update".

Critères de convergence : variation maximale des variables pression, vitesse, déplacement du problème entre la présente itération et l'itération précédente pour chaque pas de calcul :

- Displacement field : On précise cette valeur à $5 \cdot 10^{-2}$.
- Pressure : On précise cette valeur à $1 \cdot 10^4$.
- Velocity field : On précise cette valeur à 5.

3.5 Résultats

Nous présentons ci-dessous les résultats des différents cas de simulations.

La figure (Fig. 3.5) représente les contours de vitesse et de pression pour un nombre de Reynolds $Re = 20$ autour de la structure ainsi que la répartition des contraintes dans la structure pour le cas stationnaire *IFS1*.

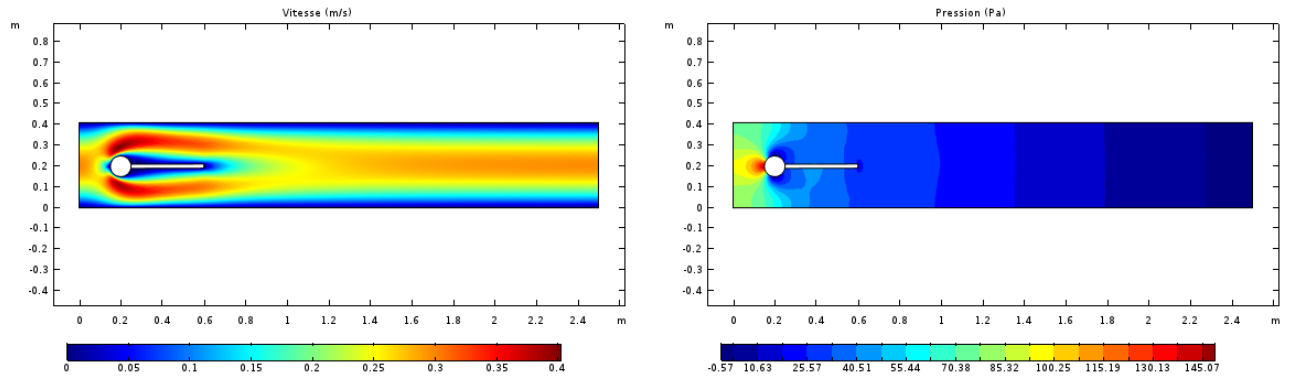


Fig. 3.5: Contours de vitesse et pression. Cas IFS1.

Les résultats des forces aérodynamiques ainsi que des déplacements du point de contrôle A sont donnés dans le tableau (Tab.3.2) et correspondent au cas de test $IFS1$. L'erreur relative sur les forces de traînée et de portance est très acceptable ($< 2.5\%$). Le déplacement du point A suivant Y est de 3.64% par rapport à celui de la référence mais celui suivant X est très grand (121%)!

	Forces		Déplacement	
	Traînée	Portance	U_x de A $\times 10^{-3}$ [m]	U_y de A $\times 10^{-3}$ [m]
Valeur numérique	13.934	0.77939	0.0492	0.7910
Valeur de référence [1]	14.295	0.7638	0.02227	0.8209
Temps de calcul	10 min			

Tab. 3.2: Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS1.

La figure (Fig. 3.6) représente les contours de vitesse et de pression pour un nombre de Reynolds $R_e = 100$ autour de la structure ainsi que la répartition des contraintes dans la structure pour le cas instationnaire $IFS2$.

Les figures (Fig. 3.7 et 3.8) et le tableau (Tab.3.3) représentent les résultats graphiques et tabulés des forces aérodynamiques de traînée et de portance sur la structure (cylindre + plaque). Ces résultats sont très comparables à ceux de Turek [1] avec un pas de temps $\Delta t = 0.002$ s qui nous a pris environ 4 heures 30 mn de temps. Ces figures sont très intéressantes puisqu'elles nous permettent de situer exactement le commencement des perturbations dans les valeurs de la traînée et de la portance. Ceci est confirmé par les déplacements du point de contrôle A .

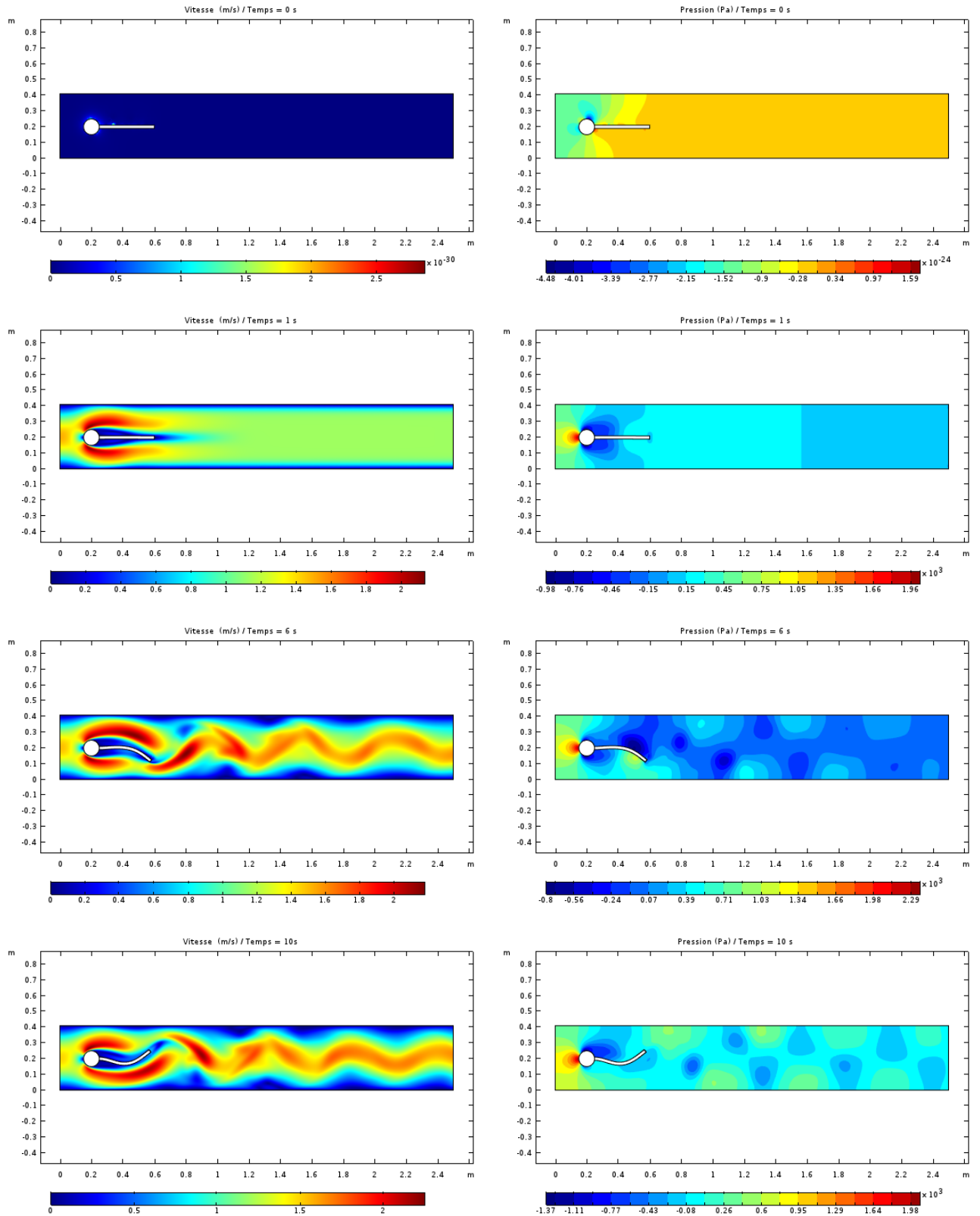


Fig. 3.6: Contours de vitesse et pression. Cas IFS2.

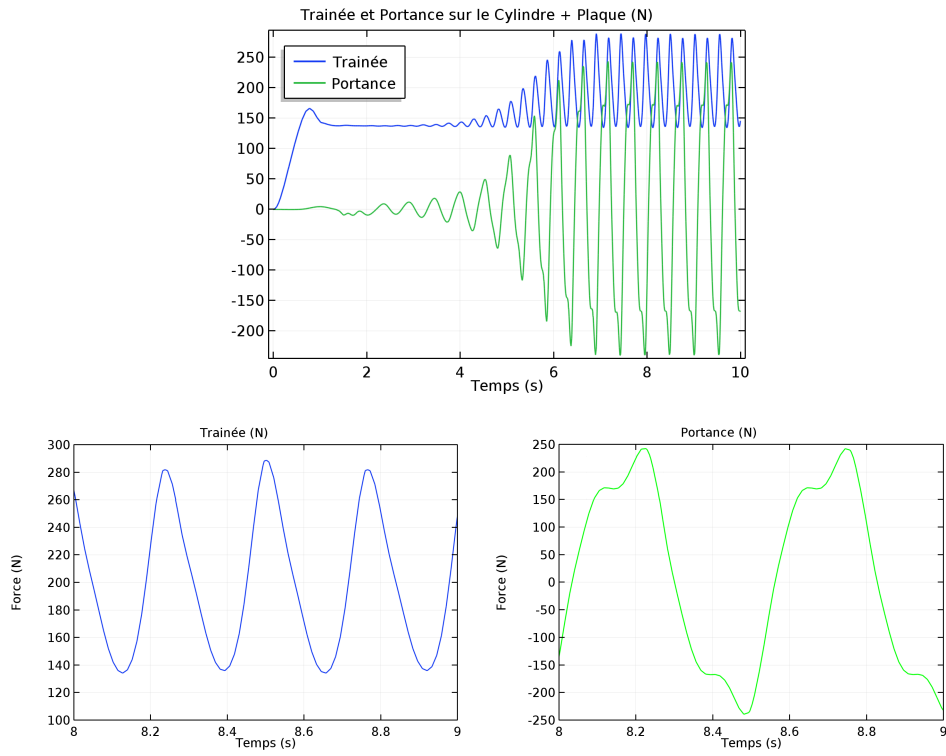


Fig. 3.7: Forces aérodynamiques. Cas IFS2.

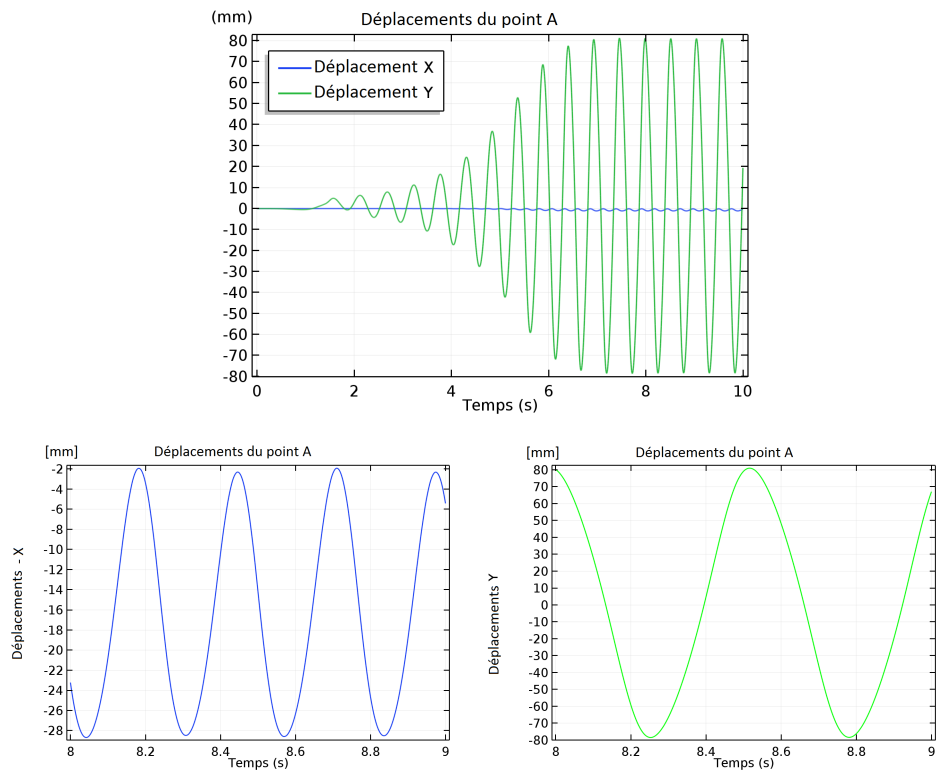


Fig. 3.8: Déplacements du point A. Cas IFS2.

	Forces		Déplacement	
	<i>Traînée</i>	<i>Portance</i>	U_x de A $\times 10^{-3}$ [m]	U_y de A $\times 10^{-3}$ [m]
Numérique	214.72 ± 78.49	1.83 ± 239.4	-15.25 ± 13.25	1.75 ± 80.25
Référence [1]	208.83 ± 73.75	0.88 ± 234.2	-14.58 ± 12.44	1.23 ± 80.06
Temps de calcul	<i>4h 36 min</i>			

Tab. 3.3: Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS2 avec $\Delta t = 0.002$ s.

La figure (Fig.3.9) représente les contours de vitesse et de pression pour un nombre de Reynolds $R_e = 200$ autour de la structure ainsi que la répartition des contraintes dans la structure pour le cas instationnaire IFS3.

Les figures (Fig.3.10 et 3.11) et le tableau (Tab.3.4) représentent les résultats graphiques et tabulés des forces aérodynamiques de traînée et de portance sur la structure (cylindre + plaque). Ces résultats sont très comparables à ceux de Turek [1] avec un pas de temps $\Delta t = 0.001$ s qui nous a pris environ 7 heures de temps. Ces figures nous permettent de situer exactement le commencement des perturbations dans les valeurs de la traînée et de la portance. Ceci est confirmé par les déplacements du point de contrôle A.

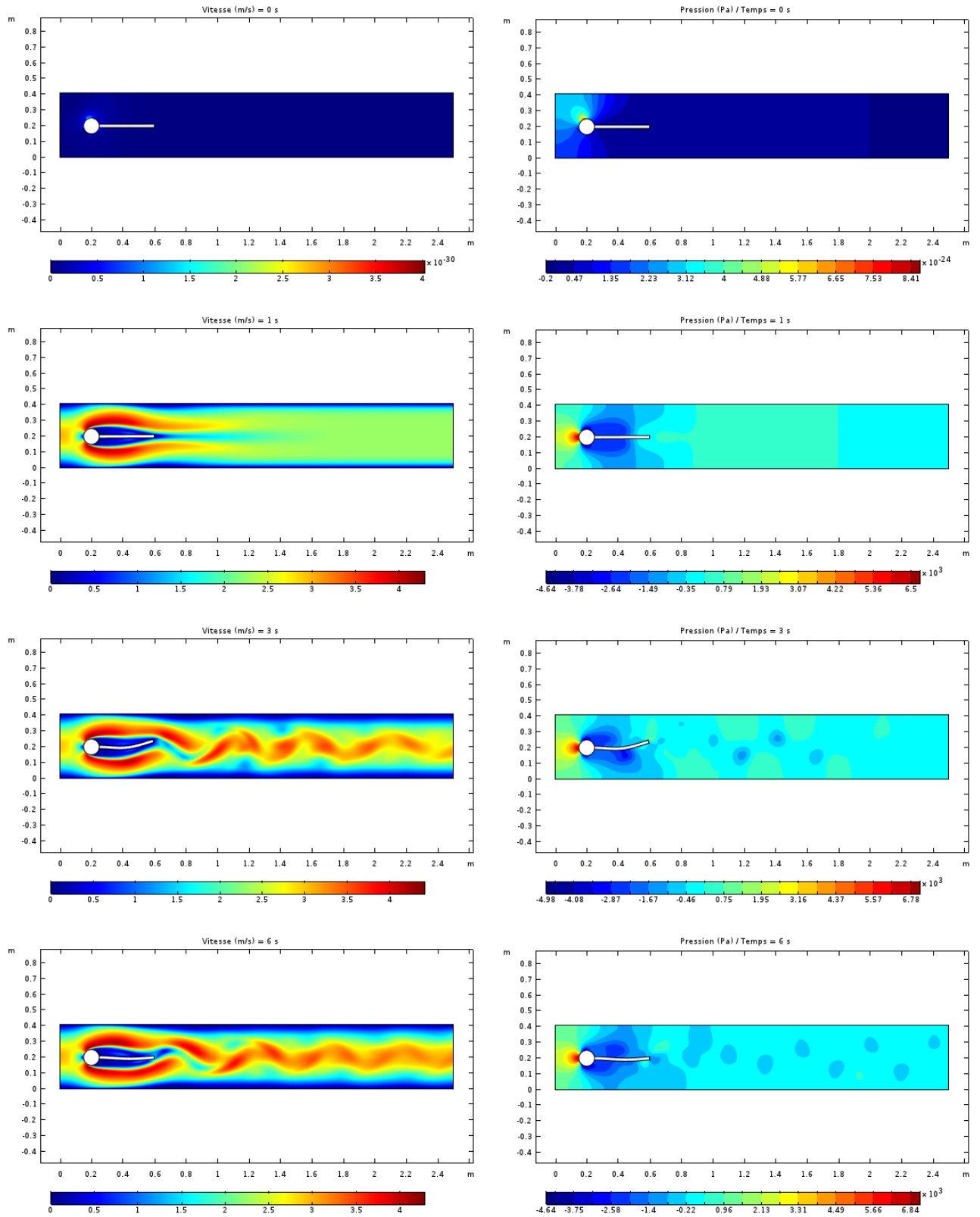


Fig. 3.9: Contours de vitesse et pression. Cas IFS3.

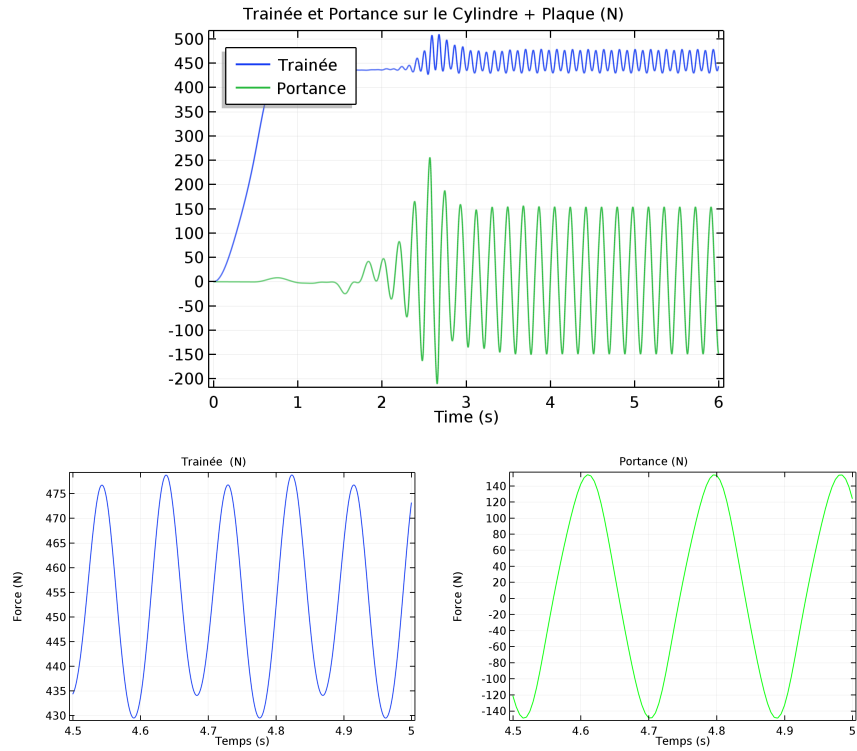


Fig. 3.10: Forces aérodynamiques. Cas IFS3.

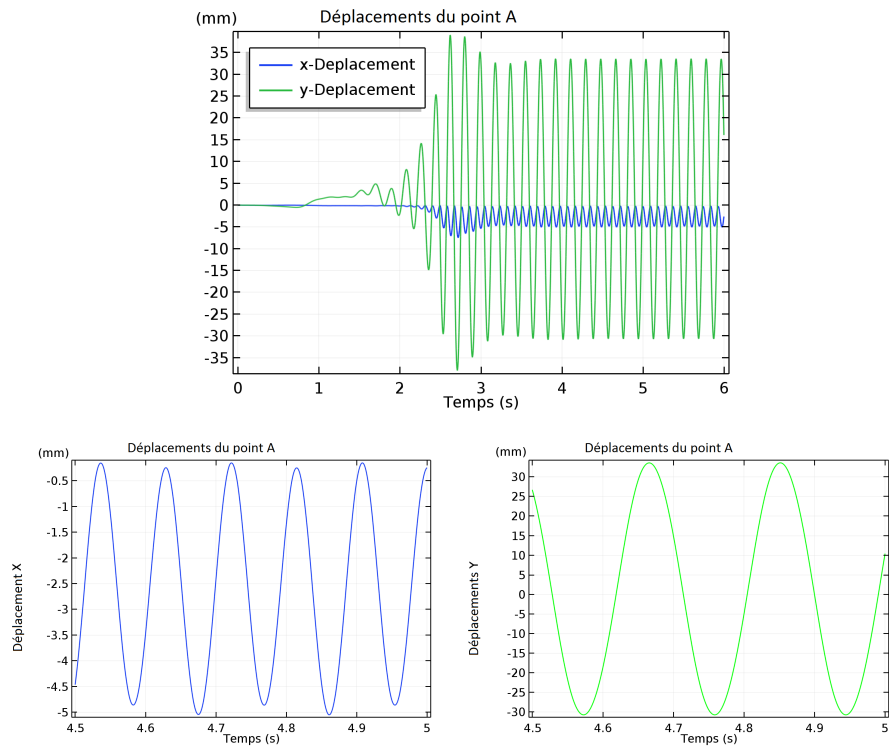


Fig. 3.11: Déplacements du point A. Cas IFS3.

	Forces		Déplacement	
	<i>Traînée</i>	<i>Portance</i>	U_x de $A \times 10^{-3}$ [m]	U_y de $A \times 10^{-3}$ [m]
Numérique	454.2±24.7	2.53±151.9	-2.5±2.3	1.5 ± 32.5
Référence [1]	457.3±22.66	2.22±149.78	-2.69±2.53	1.48 ± 34.38
Temps de calcul	7h 2 min			

Tab. 3.4: *Forces aérodynamiques et déplacements. Cas IFS3 avec $\Delta t = 0.001$ s.*

La figure (Fig.3.12) représente un exemple de la déformation du maillage.

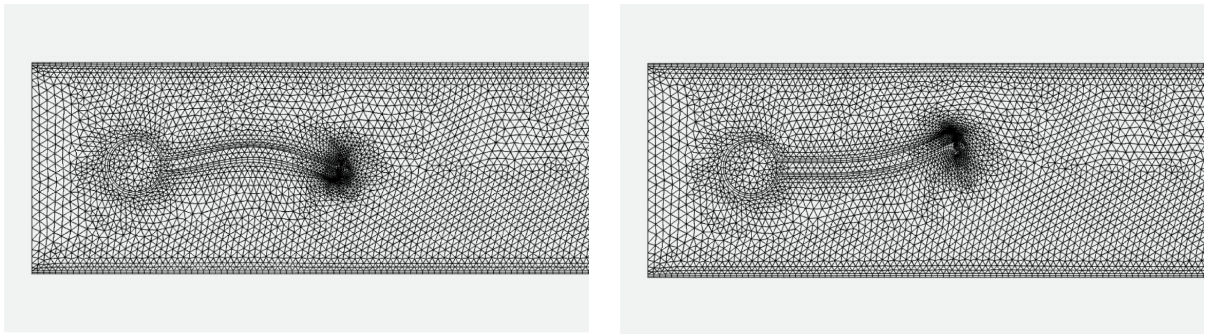


Fig. 3.12: *Déformation du maillage.*

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé l'écoulement stationnaire et instationnaire avec couplage et nous avons trouvé de très bon résultats puisqu'ils sont plus proches que ceux indiqués dans le benchmark de l'article de référence [1]. Le logiciel "COMSOL" nous a donné entière satisfaction quand au traitement des problèmes d'IFS.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

A travers ce modeste travail, nous avons d’abord compris les difficultés à simuler une géométrie complexe dans un domaine d’étude plus ou moins grand. Nous avons bien assimilé les étapes à suivre pour mener à bien une simulation numérique. De ce fait, et vu le temps alloué à ce projet et vu les moyens dont nous disposons, nous pouvons dire que nous avons atteint notre but qui est de savoir comment faire une simulation d’un problème couplé fluide-structure.

Notre objectif primaire était l’utilisation du logiciel “Ansys” dans toutes les étapes de la simulation à savoir : Conception, Maillage, Simulation et Exploitation des résultats. Ce logiciel nous a posé problème lors du couplage puisqu’il exige une interface fluide-structure de type “surface” afin de transmettre les données du fluide à la structure et vice-versa, ce qui ne peut se faire que si le problème est tridimensionnel. Nous avons évité d’aller vers la 3D puisque nous ne disposons pas des ressources nécessaires pour effectuer une telle simulation. Nous avons donc préférés rester en 2D et chercher à faire ce couplage avec un autre logiciel. Notre recherche nous a amené à l’utilisation de “Comsol” qui nous donné entière satisfaction.

La première partie des simulations avec “Ansys” et qui concerne l’écoulement stationnaire et instationnaire sans couplage a été menée avec succès vu que les résultats que nous avons obtenu sont très comparables à ceux de notre référence [1].

La seconde partie des simulations avec “Comsol” et qui concerne l’écoulement stationnaire et instationnaire avec couplage a été aussi menée avec succès puisque nous avons trouvé de très bon résultats plus proches que ceux indiqués dans le benchmark de l’article de référence [1]. Le logiciel “COMSOL” nous a donné entière satisfaction quand au traitement des problèmes d’IFS et grâce à sa facilité d’utilisation basée sur une interface graphique unique qui intègre tous les modules nécessaires.

Comme perspectives à ce travail, nous recommandons d'utiliser des moyens robustes (station de travail) pour pouvoir examiner en détail la structure des tourbillons autour et derrière la structure avec un maillage plus raffiné. En effet, le couplage de phénomènes physiques tels que l'IFS est très gourmand en ressources (vitesse d'exécution et RAM).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Stefan Turek and Jaroslav Hron, “*Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow*”, In H-J. Bungartz and M Schäfer editions, Fluid-Structure Interaction : Modeling, Simulation, Optimisation, LNCSE-53, pages 371-385, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [2] Stefan Turek et al., “*Numerical Benchmarking of Fluid-Structure Interaction : A comparison of different discretization and solution approaches*”, In H-J. Bungartz and M Schäfer, editors, Fluid-Structure Interaction II : Modeling, Simulation, Optimisation, pages 413-424, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [3] M. Schäfer, M. Heck and S. Yigit, “*An implicit partitionned method for the numerical simulation of fluid-structure interaction*”, In H-J. Bungartz and M Schäfer, editors, Fluid-Structure Interaction : Modeling, Simulation, Optimisation, LNCSE-53, pages 171-194, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [4] Lahcen Ait Moudid, “*Couplage Fluide Structure pour la simulation numerique des écoulements fluides dans une conduite à parois rigides ou élastiques, en presence d’obstacles ou non.*”, Université d’Artois, France, 2008.
- [5] Friedrich-Karl Benra, Hans Josef Dohmen, Ji Pei, Sebastian Schuster, and Bo Wan, “*A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions*”, Department of Mechanical Engineering, Turbomachinery, Faculty of Engineering Sciences, University of Duisburg-Essen, Lotharstraße 1, 47048 Duisburg, Germany.
- [6] Guillaume De Nayer, “*Interaction Fluide-Structure pour les corps élancés*”, Ecole Centrale de Nantes, France, 2008.
- [7] Pedro Carrusca Gomes, “*Numerical Study of 2-D Rigid and Deformable Fluid-Structure Interaction Cases*”, Université de Lisbonne, 2010.

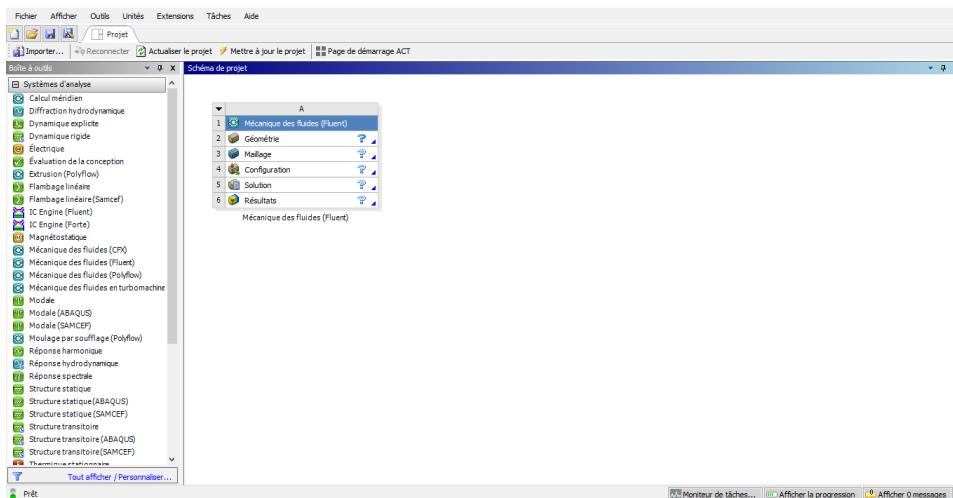
Annexe

ANNEXE A


SIMULATION AVEC ANSYS

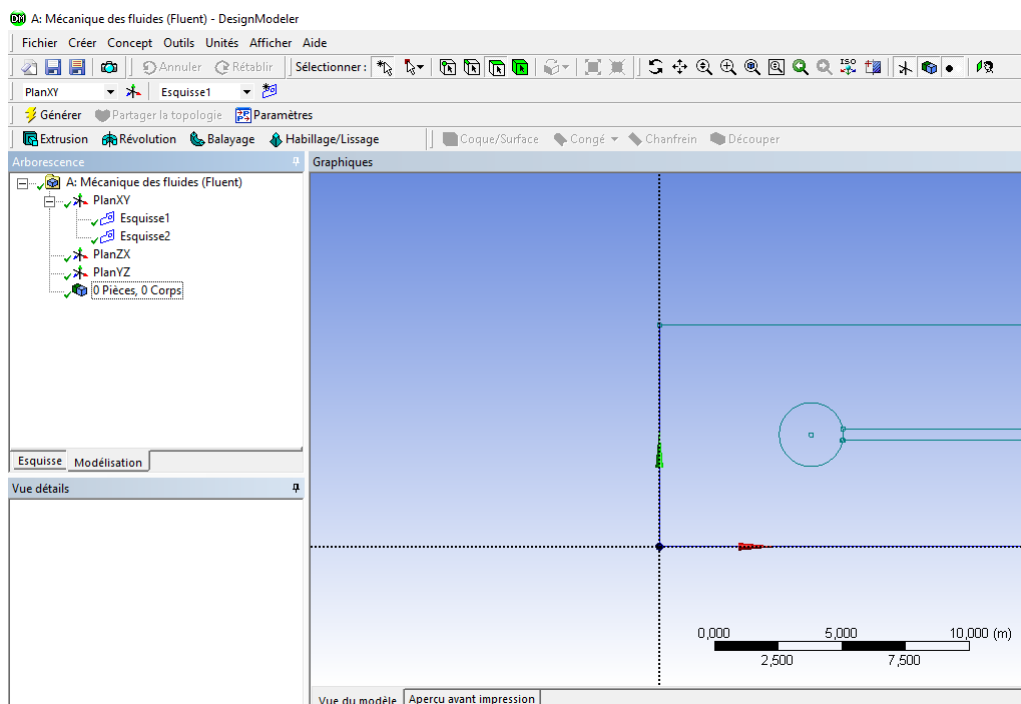
Démarrage d'ANSYS Workbench

- Cliquez à gauche sur l'onglet correspondant à Mécanique des fluides (Fluent) et sans relâcher le bouton de la souris, faites glisser l'icône dans la fenêtre du schéma de projet (grande fenêtre centrale).
- Maintenant, cliquez avec le bouton droit de la souris sur l'onglet Géométrie et sélectionnez l'option Propriétés, Propriétés du schéma La fenêtre s'ouvrira. Modifiez le type d'analyse dans les Options de géométrie avancées de 3D à 2D.
- Retour à la fenêtre du schéma de projet, cliquez deux fois sur l'onglet Géométrie. Cette action lancera ANSYS Design Modeler.

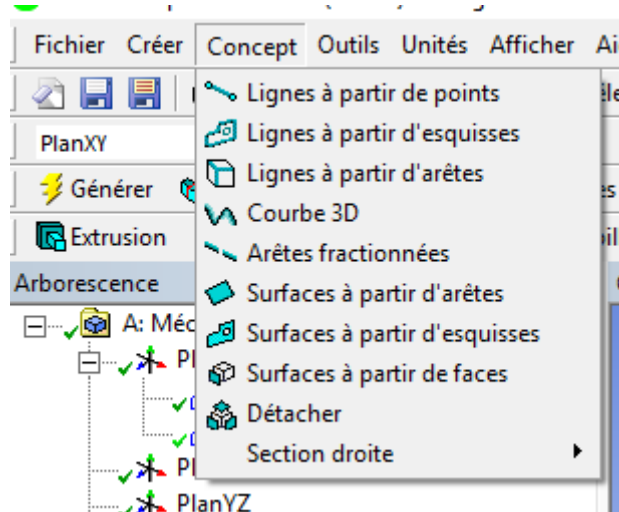


Conception

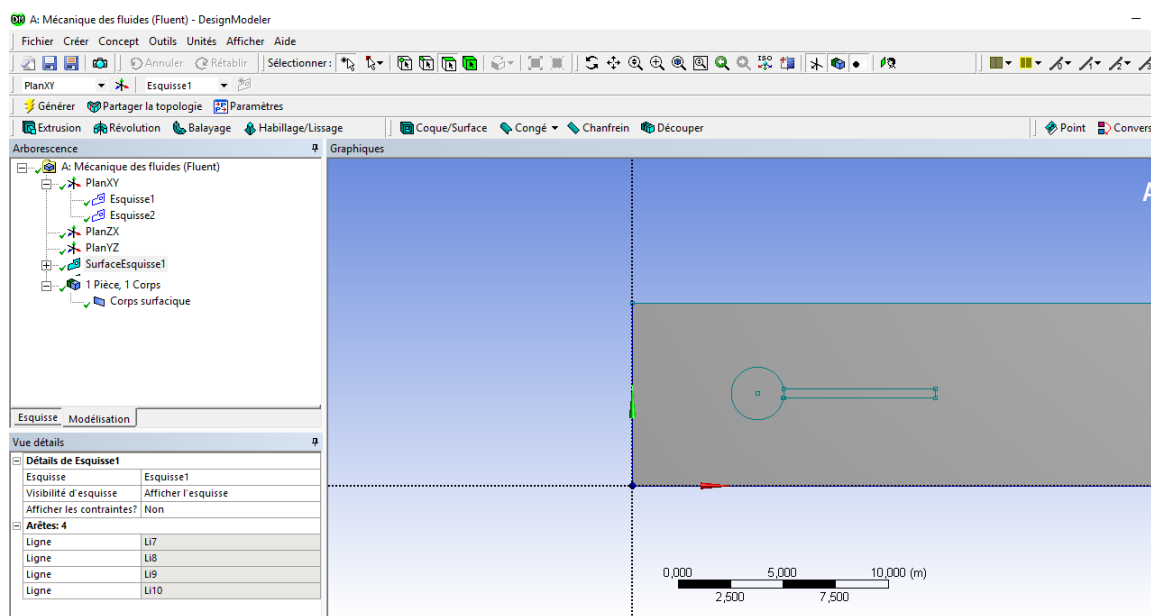
- Réglez les unités sur centimètres (cm) et cliquez sur OK.
- Cliquez avec le bouton droit de la souris sur l'icône correspondant à PlaneXY et sélectionnez regarder.
- En bas de la fenêtre, vous verrez les onglets esquisse et Modélisation. Sélectionnez l'onglet esquisse.
- Cliquez sur l'icône correspondant à nouvelle esquisse  pour créer l'esquisse 1. Cliquez de nouveau sur l'icône pour Créez l'esquisse 2.
- Cliquez sur l'onglet Modélisation et vous remarquerez que vous avez créé l'esquisse 1 et l'esquisse 2.



- Cliquez sur l'esquisse 1, puis cliquez sur l'onglet esquisse.
- Sélectionnez l'onglet Dessiner et choisissez le cercle. Dessinez un cercle avec le centre à l'origine et un rectangle attribué à notre modèle (à ce point, les dimensions ne sont pas importantes, elles seront ajustées à l'étape suivante), puis cliquez sur Générer.
- Une fois que l'esquisse a été créée, sélectionnez l'onglet correspondant à Dimensions et insérez les dimensions du modèle. Générer.
- Sélectionnez maintenant l'esquisse 2 et cliquez sur l'onglet Dessiner. Choisissez Rectangle. Ensuite, créez un rectangle. Cliquez sur Générer pour créer cette entité.
- Accédez maintenant à l'onglet Concept et sélectionnez Surfaces à partir d'esquisse.

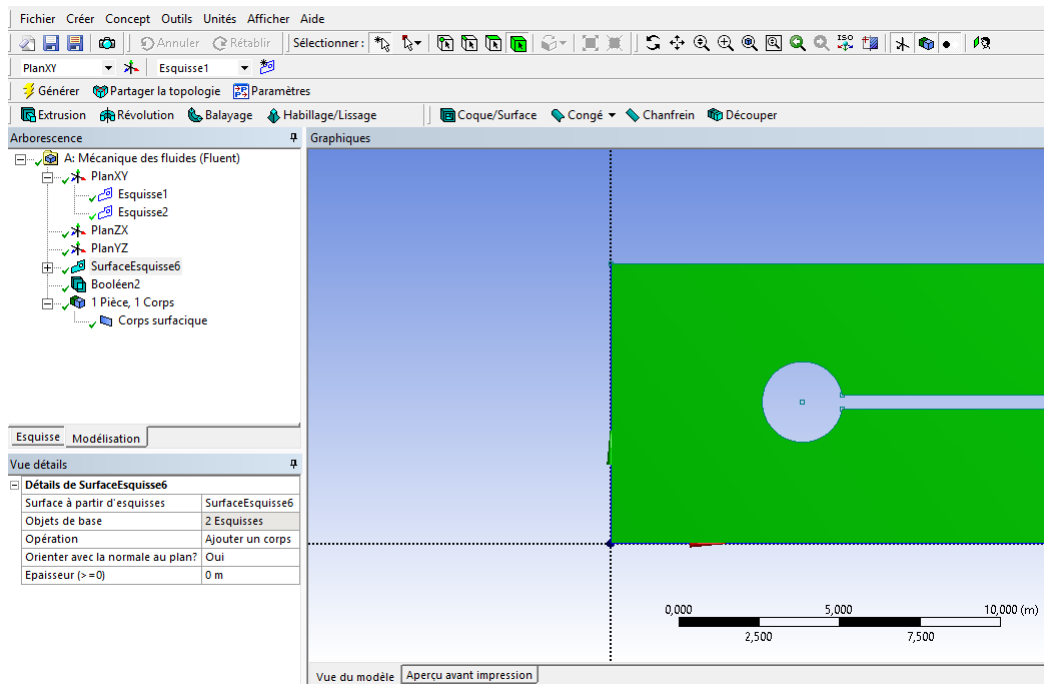


- Utilisez la touche Ctrl pour sélectionner l'esquisse 1 et l'esquisse 2. Le rectangle et le cercle doivent devenir jaunes. Cliquez sur Appliquer dans la fenêtre Détails de la vue. Cliquez sur Générer.

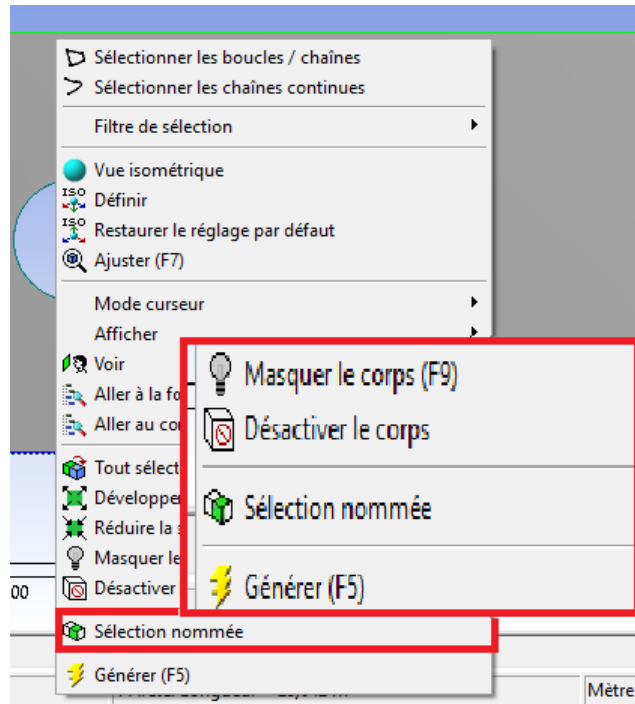


- L'étape suivante consiste à soustraire la structure intérieure du rectangle afin de créer la géométrie que nous utiliserons pour générer notre maillage. Cliquez sur l'onglet Créer et sélectionnez Booléen.

- Dans la fenêtre Détails, sélectionnez l'onglet Opération et choisissez Soustraire. Cliquez sur l'onglet Organes cibles. Retour à la fenêtre de l'arborescence, sous 2 parties, 2 corps. Sélectionnez l'onglet Carré de surface qui met en surbrillance en jaune le rectangle. Ensuite, cliquez sur Appliquer.

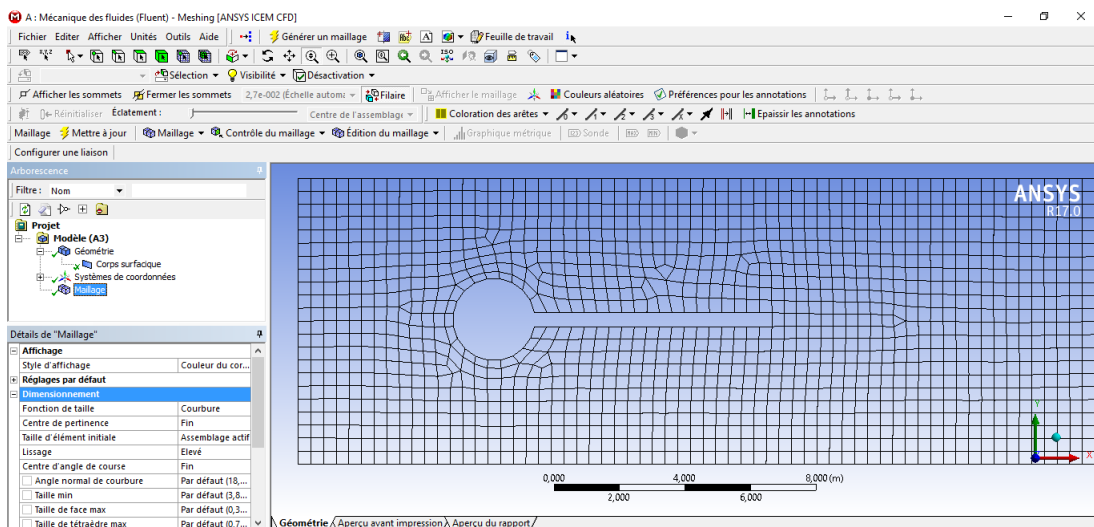


- Maintenant, cliquez sur Organes d'outils, sélectionnez l'onglet Carré de surface qui met en surbrillance en jaune la structure intérieure et cliquez sur Appliquer.
- Cliquez sur Générer. Notre géométrie est presque prête à être maillée. Mais avant cela, nous devons préciser les Entités de notre géométrie, c'est-à-dire l'entrée, la sortie, les parois et le cylindre.
- Sur la barre d'outils supérieure, sélectionnez l'icône correspondant au Filtre de sélection : Bordures.
- Placez la souris près de l'extrémité gauche du rectangle et cliquez gauche pour Mettez-le en surbrillance (vert). Une fois que c'est vert, cliquez avec le bouton droit pour sélectionner Sélection nommée. Ensuite, cliquez sur Appliquer, puis sur Générer. Faites un clic droit sur le nouveau Entité créée, Sélection Nommée, et choisissez Renommer. Tapez Entrée et appuyez sur Entrée.
- Suivez la même procédure pour les autres entités (sortie, wall et structure).



Maillage

- Sur votre Ansys Workbench, double-cliquez sur l'onglet correspondant au maillage.
- Sélectionnez Mesh dans la fenêtre de contour.
- Dans la fenêtre Détails des mailles, cliquez sur le signe plus à côté de dimensionnement pour l'agrandir. De là, nous pouvons contrôler la taille et la forme de la cellule dans le maillage.
- Modifier le Centre de la pertinence sur le Fine.
- Cliquez sur Mettre à jour.



Simulation

1. · Double-cliquez sur l'onglet Configuration, puis cliquez sur OK dans la fenêtre du Lecteur courant.

· Une fois que Fluent s'ouvre, vous verrez le maillage que vous venez de créer affiché sur la fenêtre centrale.

· Sur le côté gauche, vous verrez un menu présentant trois sections principales : Configuration du problème, Solution et Résultats. Commençons par configurer notre problème.

· Sélectionnez l'onglet correspondant aux Unités ... sous Quantités, sélectionnez Longueur et réglez-le en cm. Puis cliquez Fermer.

· En général, assurez-vous de sélectionner stable(stady) ou transitoire(transient) selon nos cas.

· Ensuite, cliquez sur Modèles et assurez-vous que tout dans la fenêtre Modèles est éteint, sauf le troisième Option correspondant à visqueuse, ceci doit être visqueux-laminaire.

· Ensuite, cliquez sur Matériaux, en mettant en surbrillance l'option correspondant à Fluide, cliquez sur Créer / Modifier. Sélectionner Base de données courante sur la fenêtre qui a ouvert. Sélectionnez Water-Liquid (h2o <1>). Cliquez sur Copier, puis Fermer. Fermez également la fenêtre Créer / Modifier des matériaux.

· Cliquez maintenant sur l'onglet Conditions de la zone cellulaire et cliquez sur le bouton Modifier Modifier le nom du matériel De l'air à l'eau-liquide. Cliquez sur OK.

· Ensuite Nous injectons l'UDF en cliquant sur user-defined, puis fonction puis interpreted puis, après avoir trouvé notre Udf, nous avons mis 1000 en stack size puis on clique sur interpret

· Nous entrons maintenant dans les conditions aux limites. Sélectionnez Entrée ,après sélection velocity inlet dans type on cliquez sur Modifier. Nous changeons l'amplitude de la vitesse de la constante à notre UDF

· Sur la sortie assurez-vous que le Type est réglé sur outflow. Cliquez sur OK.

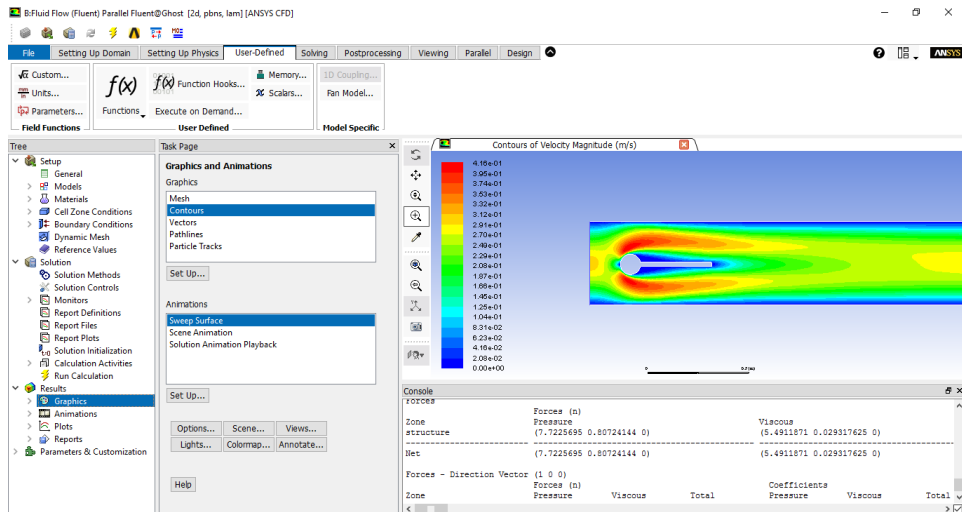
· Assurez-vous que le corps du cylindre et de la surface du mur est défini comme Type mur. Sous Solution, sélectionnez Initialisation de la solution et cliquez sur Initialiser.

· Accédez à Calculer l'exécution, définissez le nombre d'itérations à 1000, Intervalle de rapport à 10 et cliquez sur Calculer.

· Une fois que la solution a convergé, nous procédons à l'examen des résultats. Dans la section Résultats, cliquez sur Graphiques et animations.

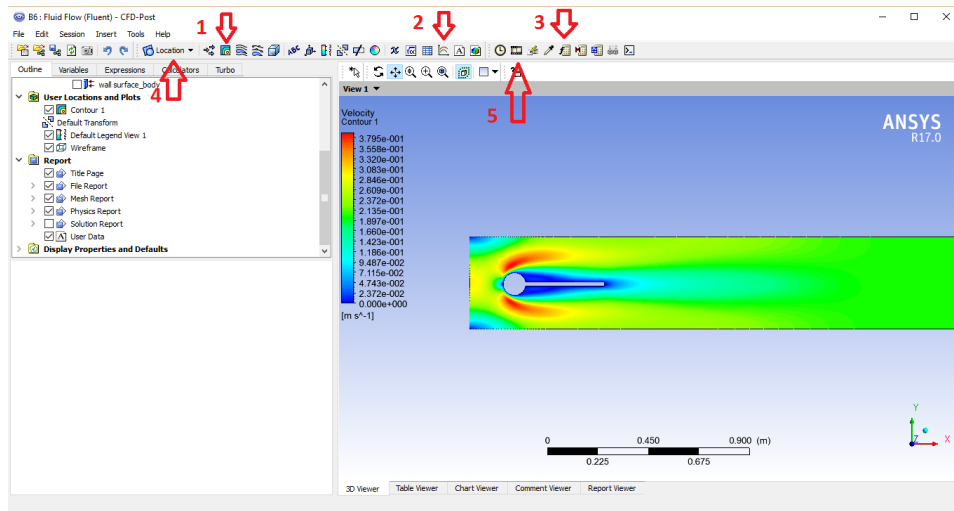
· Sur la fenêtre activée, sélectionnez Contours et Configuration.

· Une nouvelle fenêtre s'ouvre, sélectionnez l'option Rempli et sélectionnez Contours de vitesse avec l'option Magnitude de la vitesse. Ensuite, cliquez sur Affichage.

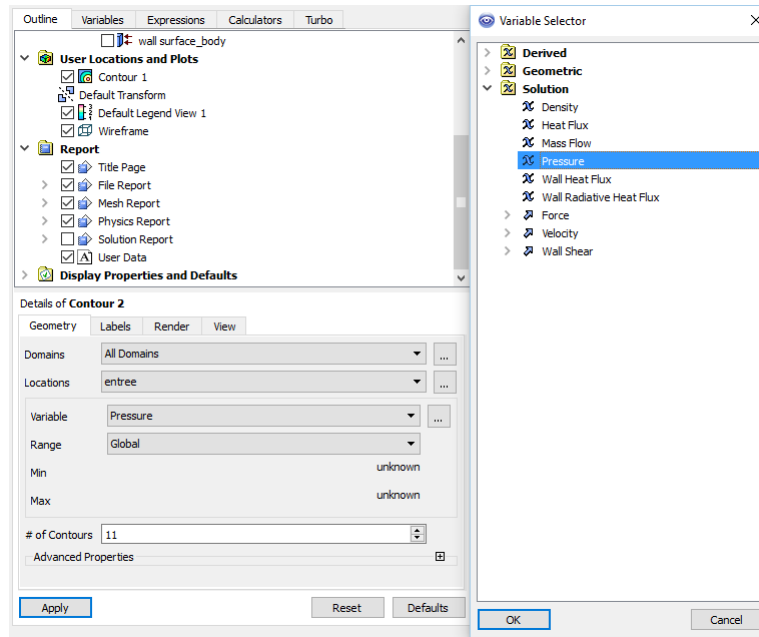


· Un certain nombre de paramètres sont disponibles dans les parcelles de contour, dans notre cas, la pression est également un paramètre pertinent. · Enfin, nous pouvons déterminer la trainée exercée par le fluide sur le cylindre en utilisant la section Rapports sous Résultats. Cliquez sur Rapports, sélectionnez Forces et appuyez sur le bouton Configurer Sélectionnez uniquement la zone murale correspondant à Cylindre en la mettant en surbrillance. Cliquez sur Imprimer. Une impression avec toutes les forces agissant sur le cylindre sera affichée dans la fenêtre de commande.

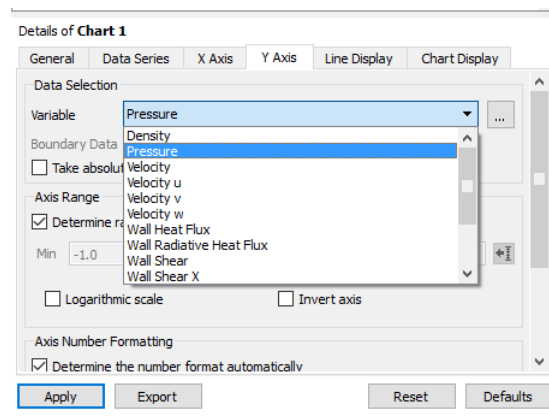
Résultats



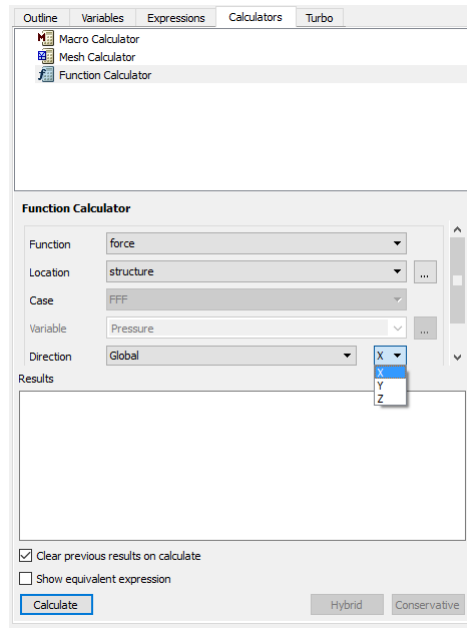
1 contour : pour afficher les différentes propriétés de la solution comme la vitesse et la pression dans l'ensemble du système ou dans une localisation spécifique.



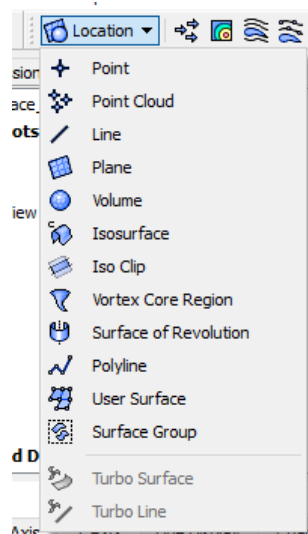
2 .chart : même que le contour, mais il affiche les propriétés d'une manière simple, nous pouvons afficher une propriété ou plus en fonction du déplacement du temps ou d'autres propriétés.



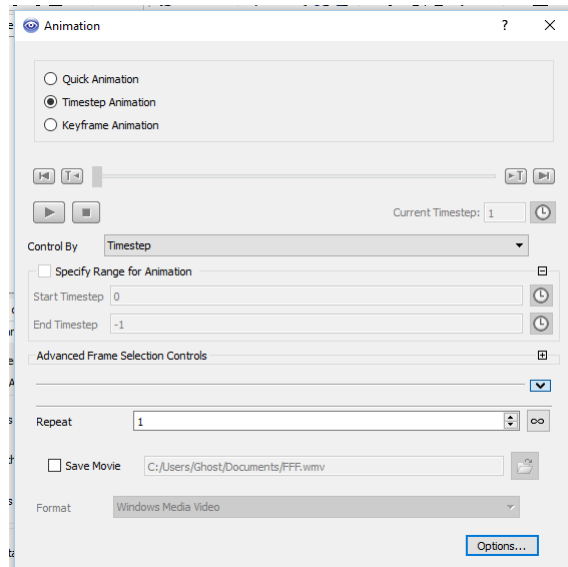
3. calculatrice de fonction : pour calculer toutes sortes de valeurs dans tout le système ou emplacement spécifique.



4. Emplacement : pour manipuler le système et créer une coordonnée sous forme ponctuelle ou autre, pour effectuer un calcul ou un affichage spécifique.



5 animation : pour création des animation a partir des données de la solution.

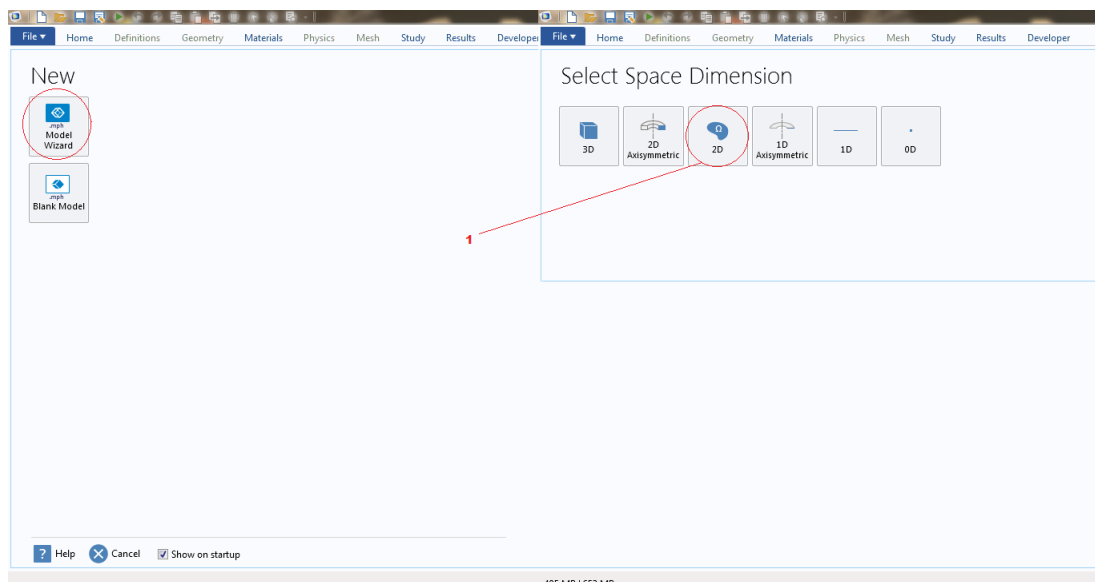


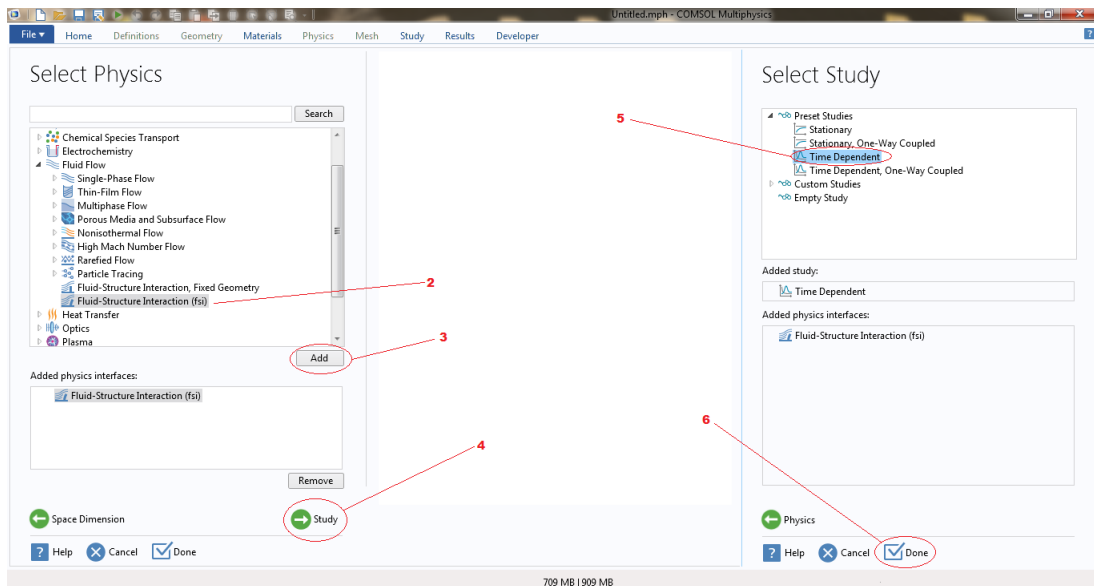
ANNEXE B

SIMULATION AVEC COMSOL

MODEL WIZARD

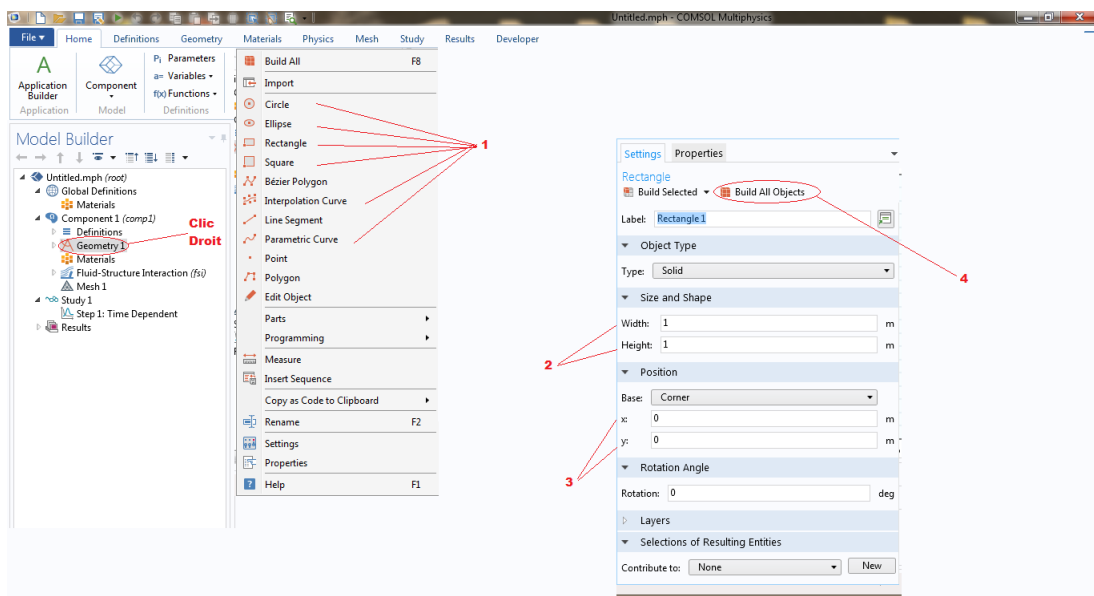
- 1- Dans la fenêtre Model Wizard, clic sur 2D.
- 2- En Select Physics, sélectionné Fluid Flow>Fluid-Structure Interaction (fsi).
- 3- Clic sur Add.
- 4- Clic sur Study.
- 5- Dans Select Study, Clic sur Studies>Time Dependent.
- 6- Clic Done.

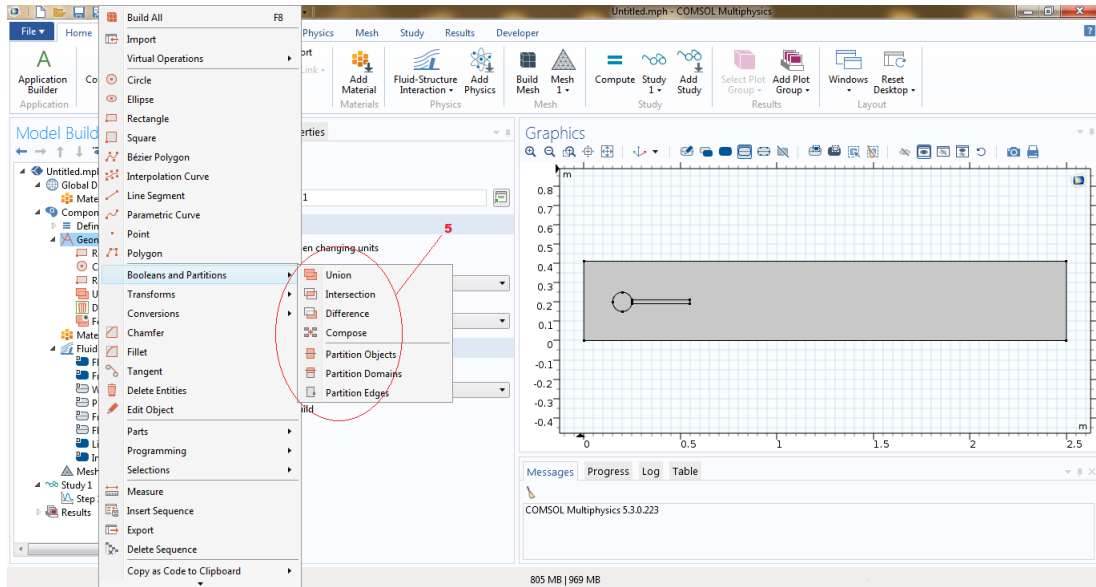




GEOMETRY

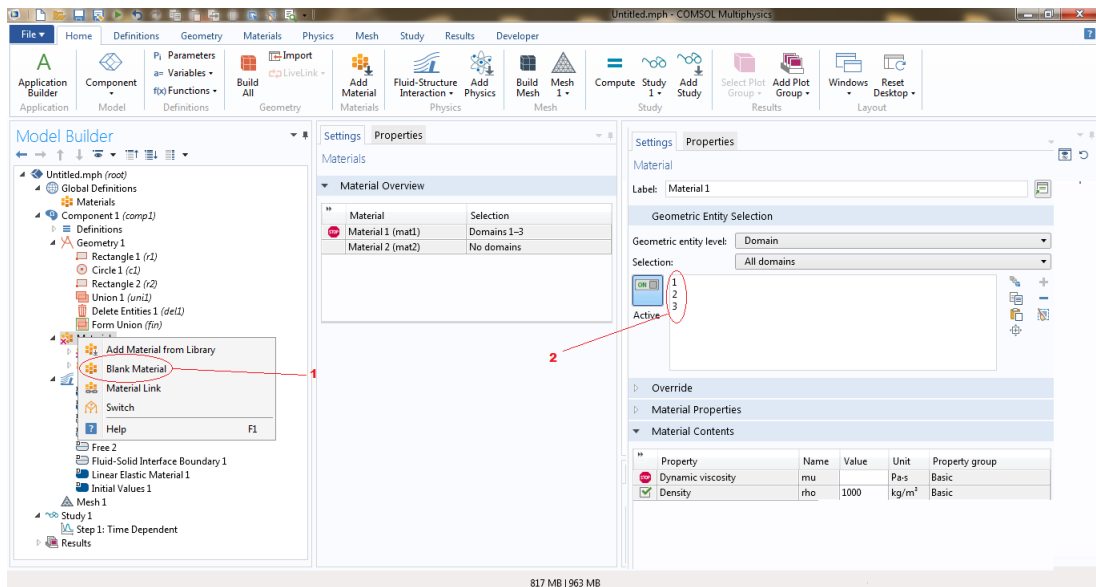
- 1- Dans géométrie, Clic droit et choisie un schéma.
- 2- Les dimension de la géométrie.
- 3- Les dimension par rapport aux centre.
- 4- Build ALL Objects, pour accepté.
- 5- Des options pour désigné les domiane .

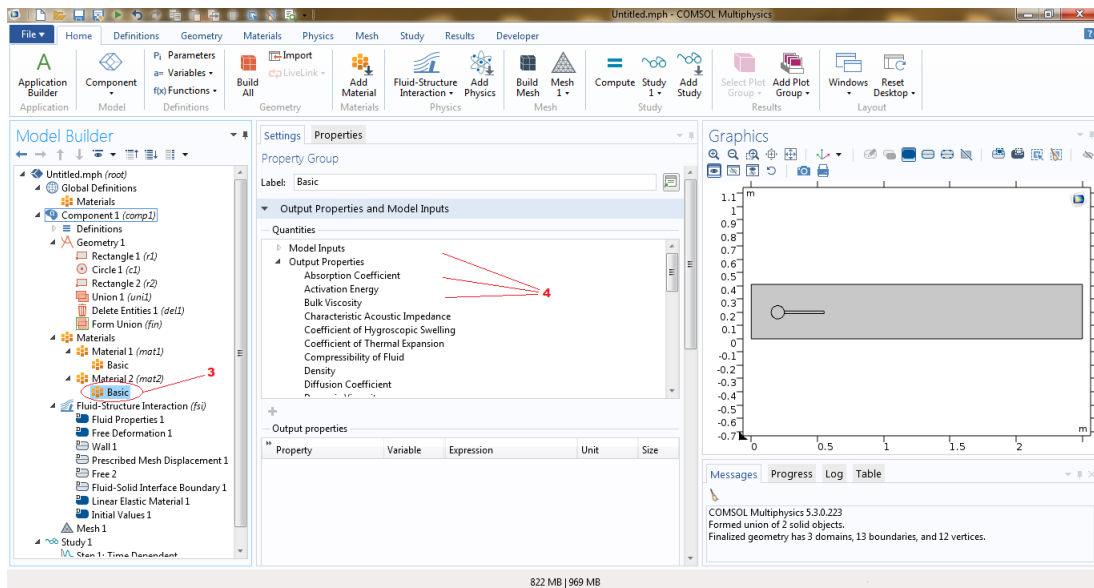




MATERIALS

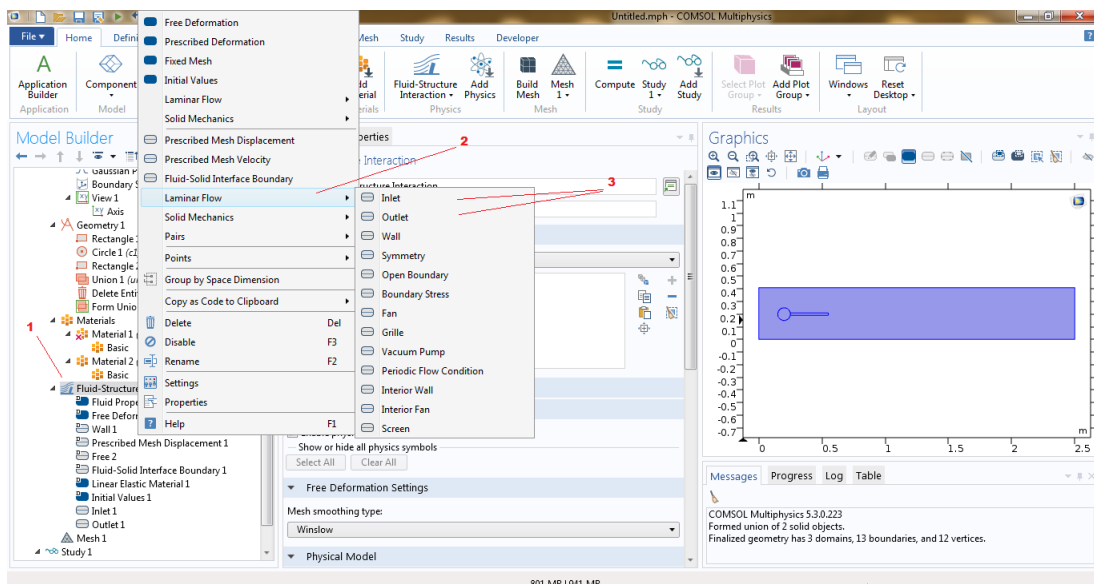
- 1- Blank Material, pour ajoutée un nouveau materiaux.
- 2- Selectionnée le domaine.
- 3- Basic pour ajoutée des propriété.
- 4- Choisie les propriété.

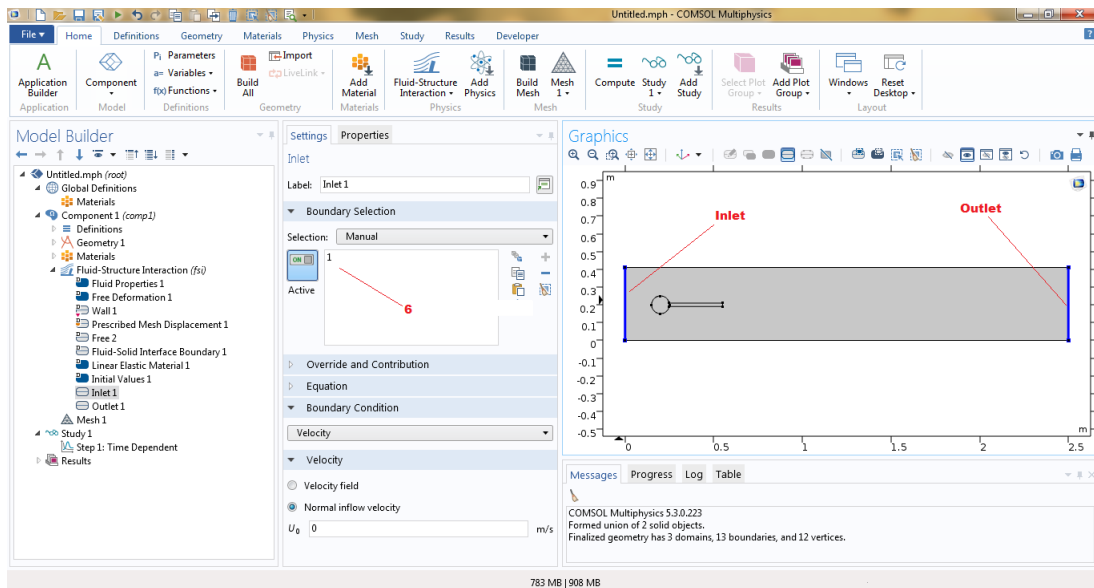




FLUID-STRUCTURE INTERACTION (FSI)

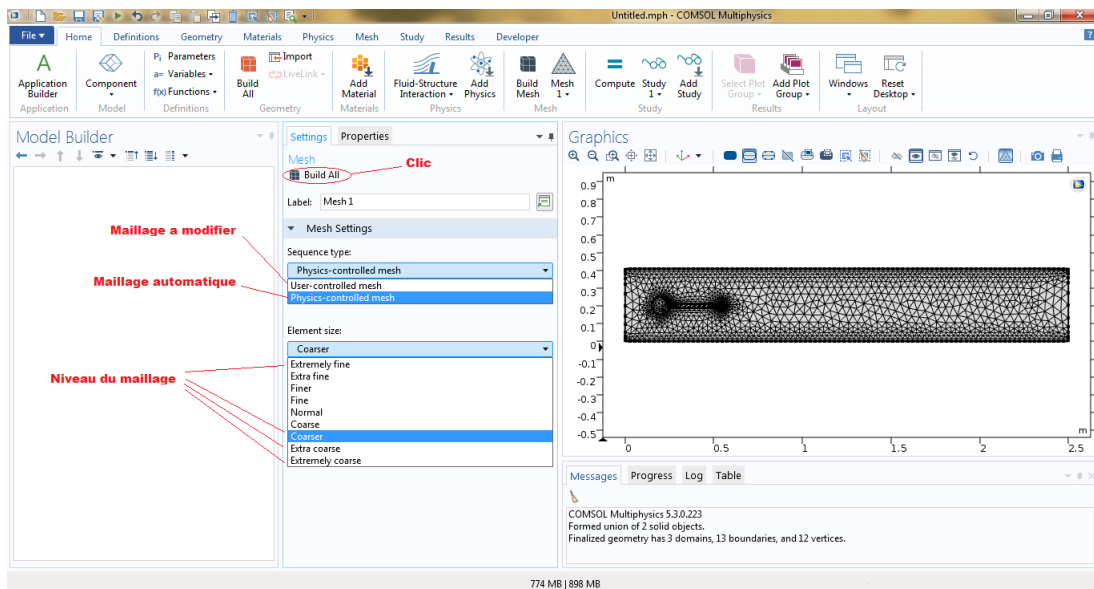
- 1- Clic droit sur Fluid-Structure Interaction.
- 2- Clic sur Laminar Flow.
- 3- Ajoutée Inlet et Outlet.
- 4- Définie l'emplacement de chaqu'un.





MESH

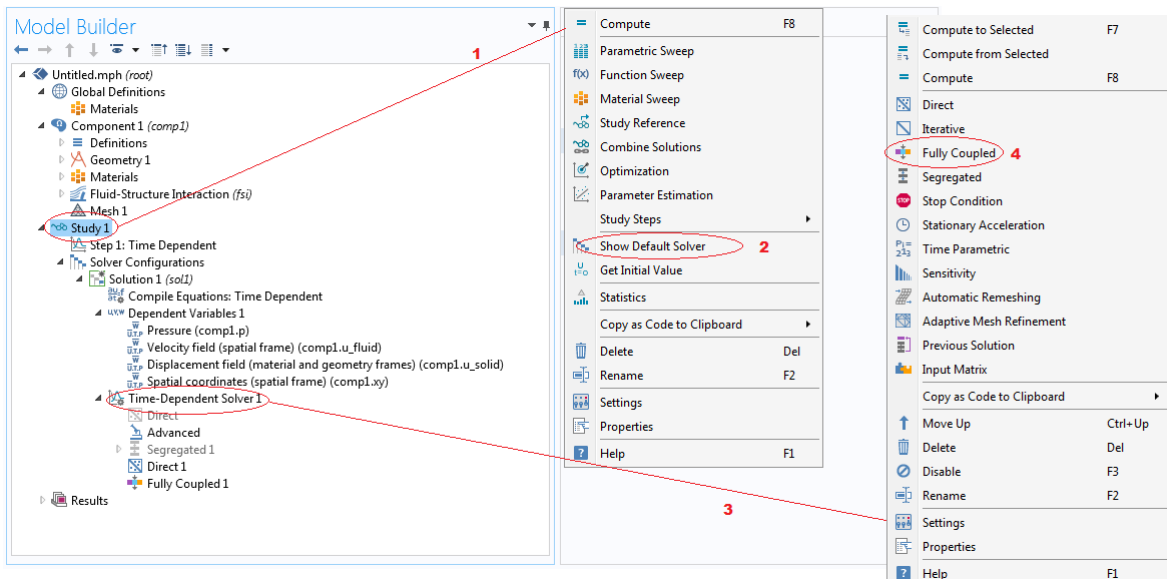
- 1- Sequence type, pour la méthode de maillage (manuelle ou automatique).
- 2- Element size, pour choisir le niveau du maillage.
- 3- Build All, pour construire le maillage.



STUDY

- 1- Clic droit sur Study.

- 2- Ajouté Show Default Solver.
- 3- Clic droit sur Time-Dependent Solver.
- 4- Ajouté Fully Coupled.



RESULTS

- 1- Flow and Stress (fsi), pour afficher la vitesse.
- 2- Presseur, pour afficher la pression.
- 3- Animation.

