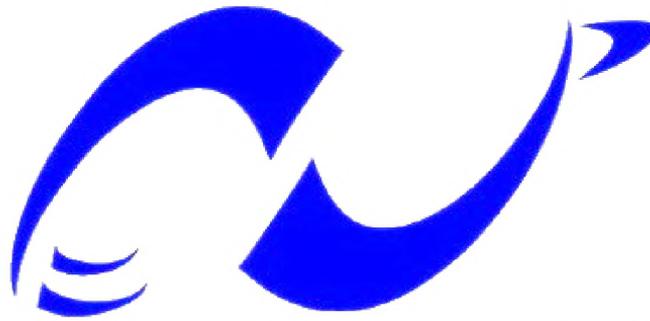


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme du Master en Construction Mécanique

**Simulation numérique de l'interaction fluide-
structure d'une artère en écoulement transitoire**

Réalisé par :

Abderrahman HADDOUCHE

Présenté et soutenu publiquement le 12/07/2016

Composition du Jury :

Président Arezki SMAILI, Professeur ENP Alger

Examineur SaïdRECHAK, Professeur ENP Alger

Promoteur Mohamed BOUBAKEUR, MA-A ENP Alger

Dédicaces

Aux martyrs qui se sont insurgés 60 ans plus tôt pour nous offrir la liberté dont on jouit aujourd'hui.

À ma mère, pour son amour et sacrifice et soutien dans tous les moments importants de ma vie, vous êtes la raison de ce que je fais du bien.

À mon grand-père que le dieu ait son âme dans la paix éternelle.

À Yemma Koukou qui'on a perdu cette semaine, et qui a été un symbole de bonté, de gentillesse, de générosité, et de l'hospitalité, Dieu nous réunit avec elle au paradis.

À Yemma Hadjira pour son humour et amour,

À mes alliées pour la vie, mes chères sœurs Rihanna et Tesnim Nada et mes frères Rahim, Mouadh, El-Bara'a et de Darling Mohammed El-Amine, et mes grands frères Abdallah, Brahim et Yacine.

À mes amis qui ont cru en moi et m'ont soutenue dans les moments de doute, À mes cousins Racuf, Abdeslem, Abdallah et Nabil,

À Kouki qui a été toujours aux services des autres

À mes enseignants qui m'ont formée tout au long mon parcours étudiantin et en tant qu'ingénieure,

À tous ceux qui m'ont forgée en tant que personne,

À tous les fous mécanos de 2016, une famille exceptionnelle

And last but not least to my American fellow the special "Vicky"

Je dédie ce modeste travail comme symbole de mon affection

Silver

Remerciement

Je remercie avant tout Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la motivation pour arriver à ce stade du savoir et de présenter ce modeste travail.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur le Professeur A. SMAILI pour la mise à ma disposition la station du centre de calcul « WORKSTATION ».

Je suis également reconnaissant envers mon promoteur monsieur M. Boubakeur pour son aide précieuse.

Mes remerciements vont aux membres du jury, Mr S. RECHAK et Mr A. Smaili qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je remercie profondément mon frère El-Baraa qui m'a aidé quand j'avais besoin.

Je tiens à remercier ma famille et mes professeurs sans qui, je n'aurai jamais pu atteindre ce stade des études supérieurs.

À mes amis et collègues qui ont cru en moi et m'ont soutenu dans les moments de doute, Et je précise Aissi Brahim, Hamidouche, Hassaine ...

A tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce projet. A tous mes camarades de promotion Génie Mécanique 2013 / 2016.

À tous ces intervenants, Je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص:

المحاكاة العددية لتفاعل سائل-هيكل بطريقة العناصر المحددة درست في إطار معادلات نافير-ستوكس لسائل لزج نيوتوني غير قابل للانضغاط في تفاعل مع مادة صلبة مرنة.

وقد استخدمت معادلة أويلر-لاغرانج العشوائية مع اعتبار شبكة ديناميكية، حيث يتم وصف مادة صلبة بصياغة لاغرانج والسائل عن طريق صياغة أويلرية.

وأجريت حالة اختبار في إطار برنامج أنسيس لعرض وتقييم انبعاجات شريان ناقل للدم وبالتالي خاضع لضغوطات مختلف النبضات.

الكلمات المفتاحية :

الطور الإنتقالي ، السائل ، معادلة نافير ستوكس ، هيكل، طريقة العناصر المحددة، تفاعل سائل-هيكل ، أنسيس، ديناميكيات الموائع الحسابية.

ABSTRACT

The numerical simulation of fluid- structure interaction by the finite element method has been studied in the context of The Navier-Stokes equations for an incompressible Newtonian viscous fluid in interaction with an elastic solid.

The formulation Arbitrary Lagrangian- Eulerian (ALE) was used, by considering a dynamic grid, where the solid is describe d by a Lagrangian formulation and the fluid by a Eulerian formulation.

A test case was done under the ANSYS software to view and assess the deformation of an artery conducting blood and thus undergoing efforts of various pulses

Keywords:

Transitional arrangements, fluid, Navier-Stokes, structure, finite element method, ALE formulation, -structure fluid interaction, ANSYS CFD.

RESUME

La simulation numérique de l'interaction fluide-structure par la méthode des éléments finis a été étudiée dans le cadre des équations de Navier- Stokes pour un fluide visqueux newtonien incompressible en interaction avec un solide élastique.

La formulation Euler-Lagrange Arbitraire (ALE) a été utilisée, en considérant un maillage dynamique, où le solide est décrit par une formulation lagrangienne et le fluide par une formulation eulérienne.

Un cas test a été fait sous le logiciel ANSYS pour visualiser et évaluer les déformations d'une artère conduisant du sang et donc subissant des efforts des différentes pulsations.

Mots-clés :

Régime transitoire, Fluide, Equation de Navier-Stokes, Structure, Méthode des éléments finis, interaction fluide -structure, ANSYS, CFD.

Table des Matières

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Nomenclature

Introduction.....	12
Chapitre 1.....	13
1. Généralités sur les interactions Fluide-Structure (IFS).....	14
1.1 Généralités.....	14
1.2 Domaines d'application.....	14
1.2.1 Genie civil.....	14
1.2.2. Industrie nucléaire.....	16
1.2.3. Domaine maritime et naval.....	17
1.2.4. La biomécanique.....	18
1.2.5. Génie industriel.....	19
1.3. Problèmes D'IFS :.....	20
1.3.2. Cas de fluide incompressible.....	20
1.3.3. Cas de fluide peu compressible.....	21
1.3.4. Cas de fluide compressible.....	21
1.3.5. Problèmes d'IFS et ondes acoustiques.....	22
Chapitre 2.....	23
2. Méthodes de couplage fluide-structure.....	24
2.1 Couplage en temps.....	27
2.1.1 Méthode explicite synchrone.....	28
2.1.2 Méthode explicite asynchrone ou décalée.....	28
2.1.3 Méthode avec sous-cyclage fluide.....	29
2.1.4 Méthode implicite.....	30
2.1.5 Comparaison des méthodes.....	30
2.2 Couplage en espace.....	31
2.2.1 Projection des nœuds.....	31
2.2.2 Détermination des grandeurs aux nœuds.....	32
2.2.3 Méthode General Grid Interface.....	34
2.3 Geometric Conservation Law et formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne.....	35
2.3.1 La formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne.....	35

2.3.2	Loi de conservation géométrique.....	35
2.4	Maillage dynamique.....	37
2.4.1	Analogie des ressorts (Spring Analogy)	37
2.4.2.	Renforcement basé sur la matrice Jacobienne	38
2.4.3.	Modèle élastique	39
2.4.4.	Méthode de remaillage.....	39
2.4.5.	Applications aux corps portants.....	39
2.5.	Formulations et discrétisations.....	40
	Conclusion	42
Chapitre 3.....		43
3.	Exemple d'application sur une artère d'aorte	44
3.1.	Le solveur de dynamique des fluides « FLUENT »:.....	45
	Géométrie.....	45
	Maillage	45
	Configuration:.....	46
3.2.	Lesolveur de dynamique des structures « Mechanical APDL » :	47
	Données relatives aux matériaux	47
	Géométrie.....	47
	Maillage	48
	Transitoire.....	49
	Solution.....	50
	Résultats:.....	51
	Conclusion	52
Conclusion Générale.....		53
Bibliographie.....		54

Liste des Tableaux

Table 2-1:Exemples de résultats obtenus avec les deux méthodes.....	33
Table 2-1: la géométrie du fluide.....	45
Table 3-2 : le maillage du fluide.....	46
Table 4-3 : Elasticité isotrope de l'artère.....	47
Table 5-4 : la géométrie du solide.....	47
Table 6-5 : le maillage du solide.....	48
Table 7-6 : Analyse.....	49
Table 8-7 : Paramètres d'analyse.....	49
Table 9-8 : information sur la solution.....	50
Table 10-9 : Déplacement total.....	51

Liste des Figures

Figure 1-1 : Test en soufflerie d'un modèle du pont de Tacoma de 1940.....	15
Figure 1-2 : Effondrement du pont de Tacoma sous l'action du vent en 1940.....	15
Figure 1-3 : Diverses études numériques de simulation d'écoulement autour de profils de pont.....	16
Figure 1-4 : Simulations numériques et expérimentales autour d'un faisceau de tubes rencontrés dans l'industrie nucléaire.....	17
Figure 1-5 : Variétés des structures sous-marines et off-shore rencontrées dans le domaine de l'industrie maritime.....	18
Figure 1-6 : Simulation numérique de l'écoulement du sang.....	19
Figure 1-7: Simulation numérique du phénomène de sloshing dans des cuves de l'industrie aéro-spatiale.....	19
Figure 1-8 : Modélisation et simulation numérique du phénomène de sloshing dans un camion-citerne.....	20
Figure 1-9 : Diverses études d'ouverture et d'écoulement d'interactions fluide-structure autour de parachutes.....	20
Figure 1-10 : Modélisation et simulation numérique d'un F-16 (maillage de la structure à l'interface.....	21
Figure 1-11 : Impact d'explosion aérienne sur des véhicules terrestres.....	21
Figure 1-12 : Modélisation et simulation numérique de l'acoustique d'une guitare en fonction du pincement initial de la corde.....	22
Figure 2-1 : Exemple de méthodes de résolution d'un problème d'interaction fluide-structure en fonction de la nature de l'écoulement (fluide stagnant ou s'écoulant) et de la force de l'interaction.....	27
Figure 2-2 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite synchrone.....	28
Figure 2-3 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite asynchrone ou décalé.....	29
Figure 2-4 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite synchrone avec sous-cyclage (j itérations du fluide par pas de temps).....	29
Figure 2-5 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel implicite.....	30

Figure 2-6 : Exemple de projection entre deux maillages	32
Figure 2-7 : Exemple de projection avec une méthode buckets	32
Figure 2-8 : Méthode de préservation du profil	33
Figure 2-9 : Méthode de conservation globale	33
Figure 2-10 : Méthode d'échanges du type General Grid Interface (GGI).....	34
Figure 2-11 : Méthode torsional spring avec raideurs linéaires.....	38
Figure 2-12 : Méthode ball-vertex (les raideurs entre les nœuds j et k et leur face opposée ne sont pas représentées).....	38
Figure 3-1 : la modélisation de l'IFS sous le logiciel ANSYS.....	44
Figure 3-2 : le maillage du fluide.....	45
Figure 3-3 : le maillage de l'artère	48
Figure 3-4 : l'interface du couplage après solution	50
Figure 3-5 : le déplacement total de l'artère au cours du temps.....	51
Figure 3-6 : Déplacement total de l'artère.....	52

Nomenclature

B	Envergure du profil	m
C_d	Coefficient de traînée	
C_f	Coefficient de frottement visqueux	
C_l	Coefficient de portance	
C_p	Coefficient de pression	
C_y	Nombre de Cauchy	
E	Module d'Young	
K	Matrice de raideur	
L	Corde du profil	m
M_A	Nombre de masse	
M	Matrice de masse	
R	Terme de changement de phase	
Re	Nombre de Reynolds	
R_b	Rayon de bulle	
R_c	Terme de condensation	
R_e	Terme d'évaporation	
S	Frontière du volume de contrôle	
S	Surface de référence	m ²
V	Volume du volume de contrôle	
V_r	Vitesse réduite	
X	Vecteur des inconnues nodales	
f	Fraction massique	
h	Enthalpie	
k	Energie cinétique de turbulence	
n	Vecteur normal	

p	Pression	Pa
s	Tension superficielle	
u	Vecteur vitesse de la structure	m/s
v	Vecteur vitesse du fluide	m/s
v^*	Vecteur vitesse du maillage	m/s
y	distance à la paroi	m
y^+	Nombre adimensionnel caractérisant le maillage en proche parois	
Ω	Domaine	
Γ	Frontière	
ε	Taux de dissipation turbulente	
μ	Viscosité dynamique	kg/(m.s)
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	kg/(m.s)
ρ	Masse volumique	kg/m ⁻³
α	Angle d'incidence du profil (angle entre l'horizontal et la corde) degrés	
ω	Fréquence propre/d'oscillation	Hz

Indices et exposants

Symbole	Explication
f	se réfère au fluide
l	se réfère au liquide
n	se réfère aux nœuds du maillage
s	se réfère à la structure
vap	se réfère à la vapeur
∞	indique un point de référence généralement pris loin de la zone étudiée

Introduction

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 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 *XX^{ème}* 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.

Chapitre 1

1. Généralités sur les interactions Fluide-Structure (IFS)

La mécanique des interactions fluide-structure est une discipline d'une grande importance industrielle, nombreux sont les travaux dans ce domaine utilisant différentes méthodes numériques. Ce chapitre a pour objectif de présenter une vision générale sur les interactions fluide-structure notées IFS ainsi que les différentes méthodes utilisées dans ce domaine.

1.1 Généralités

Etant une discipline très vaste, la mécanique des interactions fluide-structure (ou simplement interaction fluide-structure « IFS ») est une combinaison entre la mécanique des fluides (MDF) et la mécanique des structures (MDS). Il s'agit donc d'une science très complexe vu le grand nombre de paramètres mis en jeu dans les sciences qu'elle rassemble. Cependant, cette discipline est présente dans un grand nombre de domaines d'applications dans différents domaines, comme l'aéronautique, l'industrie automobile, la marine, le nucléaire, la biomécanique... Toutes ces études mettent en évidence un contact entre une structure mobile rigide ou déformable en contact avec un fluide liquide ou gazeux.

Le grand nombre d'applications dans ce domaine rend très difficile un classement concret des problèmes en IFS. Néanmoins, faire un classement selon plusieurs critères, comme les problèmes stationnaires ou instationnaires, comme on peut faire des distinctions par des équations régissant des sous-systèmes fluides ou structures.

On présentera des modèles détaillés des problèmes classiques en interactions fluides-structures, par une classification selon la nature du fluide (fluide incompressible, fluide compressible, compressible). [1] [2]

1.2 Domaines d'application

Comme on l'a dit précédemment, la mécanique d'interaction fluide-structure est présente dans un grand nombre d'applications, on verra dans cette partie quelques exemples de ces domaines.

1.2.1 Génie civil

Parmi les premiers domaines où l'IFS a été introduite est le génie civil, comme la prise en compte de l'IFS dans la construction des ponts. D'ailleurs de nombreux travaux expérimentaux et numériques ont été réalisés et sont toujours en cours de

Chapitre 1: Généralités sur les interactions Fluide-Structure (IFS)

réalisation dans le but d'éviter les accidents comme l'effondrement du pont de Tacoma Narrows [3] [4] le 7 Novembre 1940 à cause d'une instabilité aéroélectrique de torsion bien que le vent ne fût pas fort (65km/h).

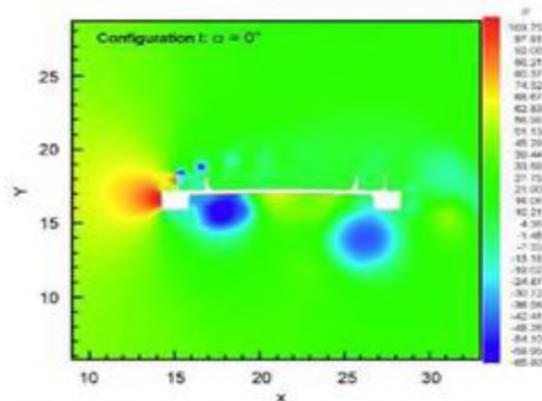
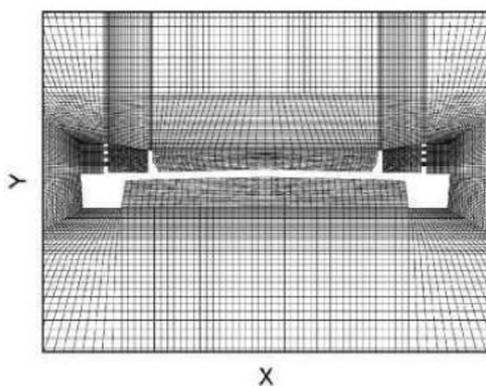


Figure 1-1 : Test en soufflerie d'un modèle du pont de Tacoma de 1940

Les problèmes d'interactions fluide-structure n'interviennent pas seulement sur la structure finie (comme le pont) mais pendant les différentes étapes de la construction. Par conséquent les simulations ne portent pas seulement sur l'ouvrage d'art termine, mais aussi sur les différentes phases de sa réalisation.



Figure 1-2 : Effondrement du pont de Tacoma sous l'action du vent en 1940



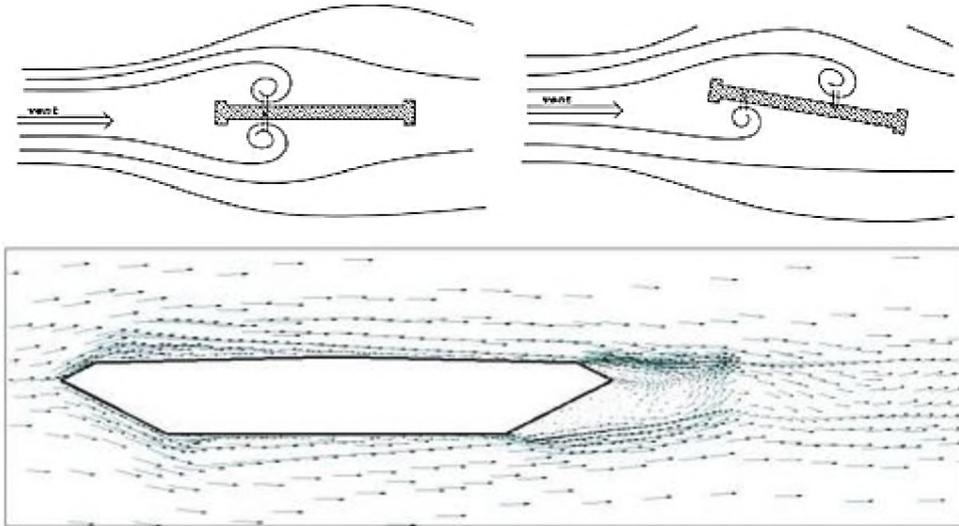


Figure 1-3 : Diverses études numériques de simulation d'écoulement autour de profils de pont

1.2.2. Industrie nucléaire

Un autre secteur où l'IFS est appliquée est le domaine du nucléaire. En effet, dans ce domaine les problèmes liés à l'interaction fluide-structure peuvent venir de la structure de la centrale elle-même (on rejoint alors le domaine du génie civil). [5] [6]

Les centrales possèdent toutes de grands hyperboloïdes de révolution qui ont pour but le refroidissement de la vapeur d'eau. Ces immenses tours génèrent des vortex sous l'action du vent. Si par malheur la direction du vent est défavorable et que sa vitesse entraîne des lâchers de tourbillons de manière périodique sur une autre tour, cela peut avoir des conséquences destructrices si cette dernière entre en résonance.

L'autre problème classique d'interactions fluide-structure dans le domaine nucléaire est celui des vibrations des tubes générateurs de vapeur. [7] Ce faisceau de tubes sert à contrôler la vitesse de la réaction en chaîne et par voie de conséquence la puissance dégagée. Ces tubes sont peu déformables mais sont plongés dans un écoulement très perturbé. Il faut garder une amplitude faible des oscillations des tubes et bien entendu éviter qu'ils ne s'entrechoquent ce qui pourrait entraîner leur rupture.

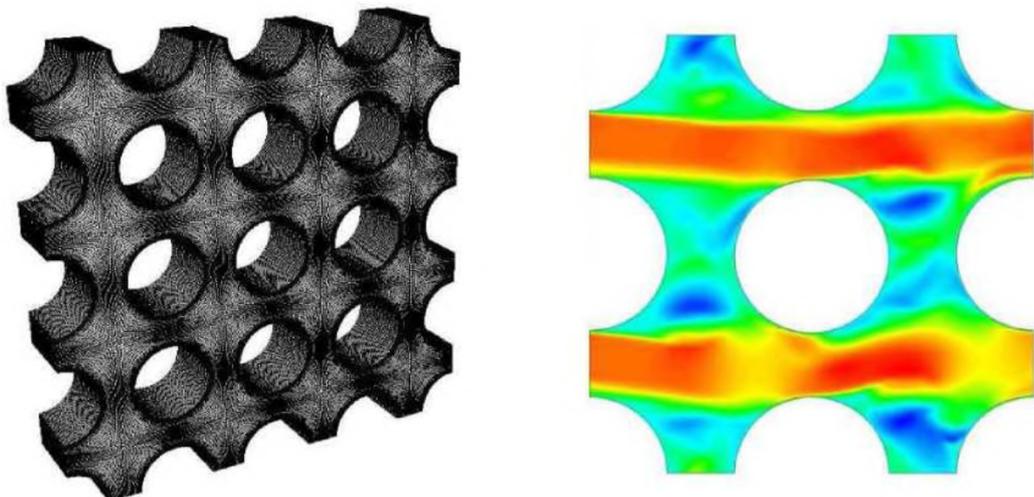




Figure 1-4 : Simulations numériques et expérimentales autour d'un faisceau de tubes rencontrés dans l'industrie nucléaire

1.2.3. Domaine maritime et naval

Plusieurs exemples peuvent être cités dans cette industrie. La houle générée par la mer pose de nombreux cas d'interactions fluide-structure : dans les ports où cette houle doit être minimisée où alors en mer sur les plates-formes off-shore où les infrastructures doivent résister aux impacts de la houle (cf. [8]). L'industrie pétrolière a fait naître de nombreux types d'installations off-shore : des barges flottantes maintenues par des câbles, des pipe-lines verticaux qui remontent le pétrole à la surface. Ces installations doivent résister à la houle qui est un phénomène de surface, mais aussi aux courants marins qui eux aussi ont un effet à ne pas négliger. Dans le cas de corps isolés, on parle de VIV (Vortex Induced Vibrations) : ce sont des instabilités induites par le détachement tourbillonnaire [9] [10].

En hydrodynamique navale, il faut concevoir puis optimiser les coques et appendices des navires [11]. Dans ce cadre, l'interaction fluide-structure peut paraître limitée car la carène d'un bateau peut apparaître comme rigide. Pourtant elle est bien là, les expériences en bassin avec des coques en rotation le prouvent. La résistance à la houle et au déferlement sur les navires [12] est un défi pour les industriels où la mécanique des interactions fluide-structure occupe une place de premier plan.

La nage des poissons intéresse aussi beaucoup les scientifiques [13] [14]. En effet son rendement et les possibilités de virage et d'accélération (jusqu'à 20 fois la gravité) qu'elle apporte, sont exceptionnels. Ces données montrent le fossé qui existe entre les constructions humaines et la nature. Pour rappel une voiture doit ralentir de moitié avant de tourner et le rayon de courbure est de l'ordre de 10 fois sa longueur. Pour tenter de percer les mystères de la nature, les scientifiques s'intéressent donc de près aux poissons. Citons par exemple le programme français qui cherche à développer un robot anguille dans le cadre du projet national pluridisciplinaire anciennement

ROBEA, et actuellement RAAMO¹(projet ANR). De nombreux laboratoires travaillent de concert, tant sur le plan numérique qu'expérimental, pour mener à bien ce projet [15] [16] [17].

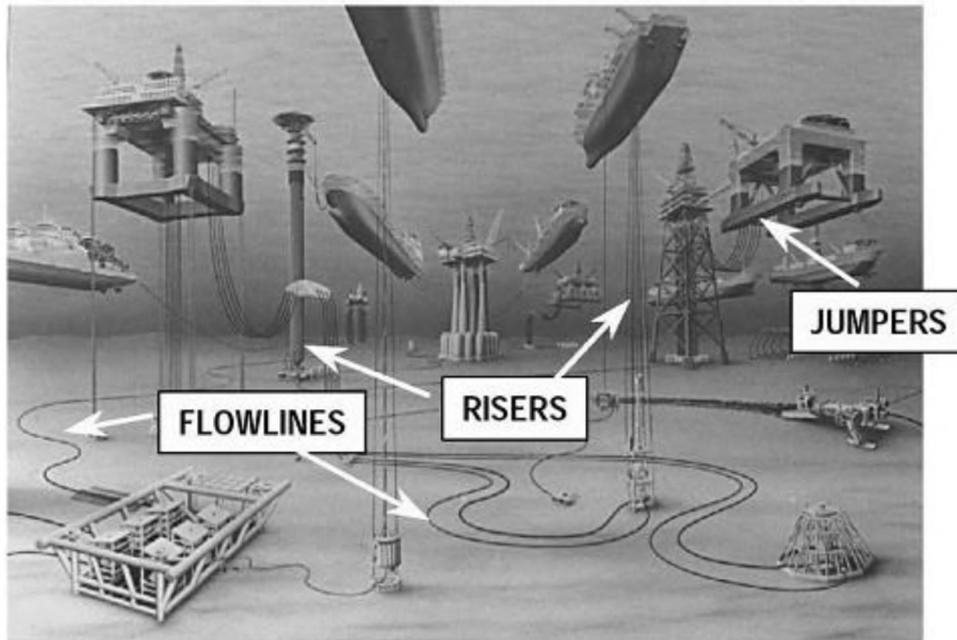
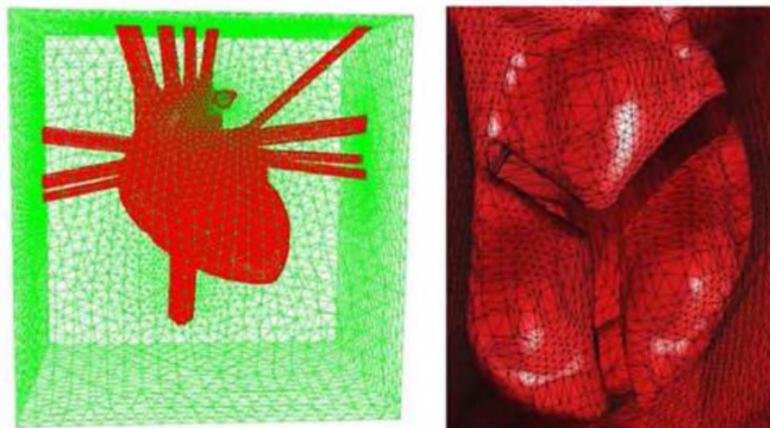


Figure 1-5 : Variétés des structures sous-marines et off-shore rencontrées dans le domaine de l'industrie maritime

1.2.4. La biomécanique

Le génie biomédical s'occupe de la bonne intégration des prothèses ou d'éléments artificiels utilisés à des fins thérapeutiques avec les tissus biologiques. Dans de nombreux cas les fluides du corps humain comme le sang peuvent interagir avec ces tissus [18] [19]. Ces derniers étant déformables, on a affaire à des cas naturels complexes d'interactions fluide-structure : formation de glaucome, rupture d'anévrisme... Bien évidemment les prothèses en engendrent elles-aussi.

Ces problèmes comptent parmi les plus difficiles en interactions fluide-structure. Rien que la modélisation de l'espace est un défi.



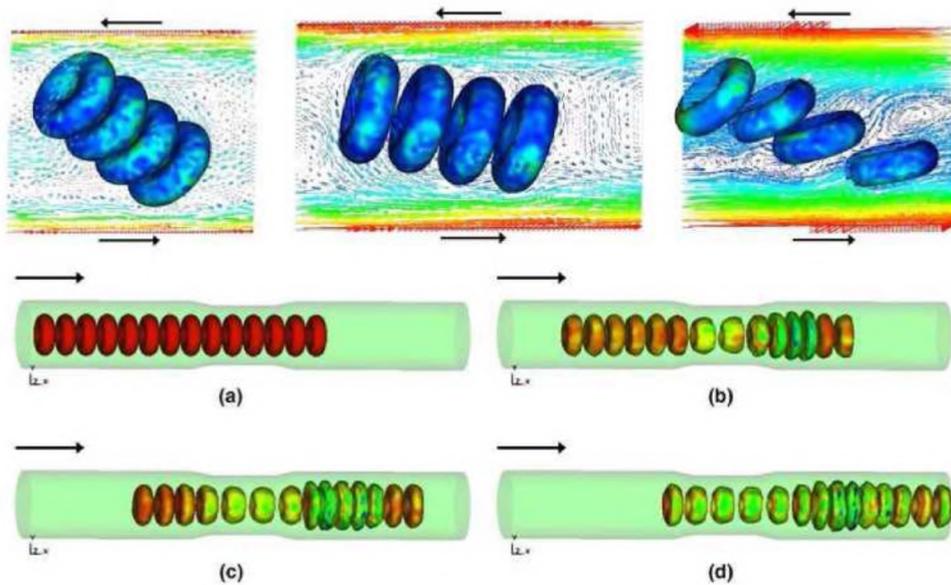


Figure 1-6 : Simulation numérique de l'écoulement du sang

1.2.5. Génie industriel

Dans ce cadre deux grandes familles d'étude peuvent être distinguées : les études sur les réservoirs [20] et les études sur des structures très fines et très élancées (câbles ou encore tubes (risers...)) [21]

Dans le cas des réservoirs, les scientifiques cherchent à prévoir le comportement du fluide lors des déplacements de la structure. On retrouve ce problème dans les tankers [22], les camion-citerne [23] ou encore les lanceurs de fusées. [24]

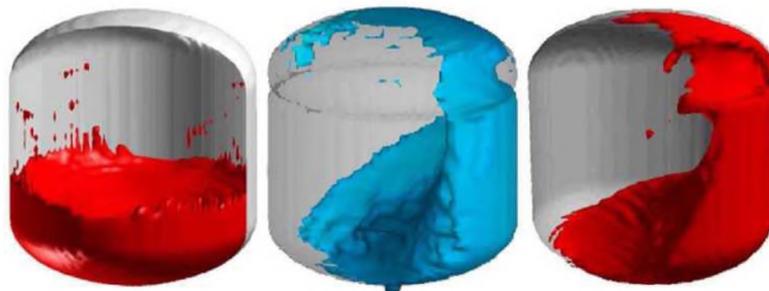


Figure 1-7: Simulation numérique du phénomène de sloshing dans des cuves de l'industrie aérospatiale

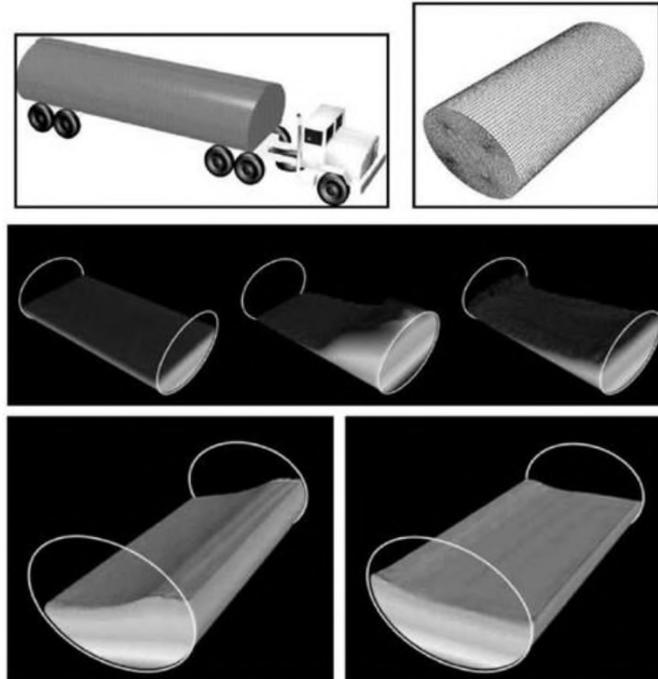


Figure 1-8 : Modélisation et simulation numérique du phénomène de sloshing dans un camion-citerne

1.3. Problèmes D'IFS :

1.3.2. Cas de fluide incompressible

En réalité, tous les fluides sont compressibles. Cependant, on peut faire l'hypothèse d'incompressibilité pour de faibles nombres de Mach, d'ailleurs, les écoulements avec de l'eau comme fluide sont la plupart du temps considérés comme incompressibles. En hydrodynamique l'écoulement est presque toujours incompressible. Dans le cas d'un écoulement avec de l'air il faut faire plus attention. En effet l'air nous entourant peut-être considéré comme incompressible, mais dès que sa vitesse augmente ou qu'il est dans un espace confiné, l'hypothèse d'incompressibilité n'est

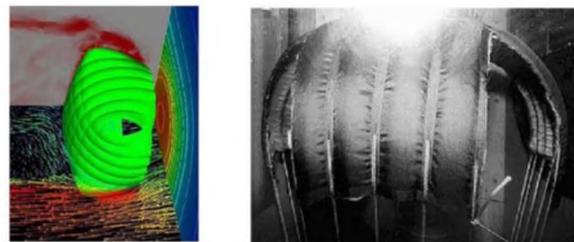
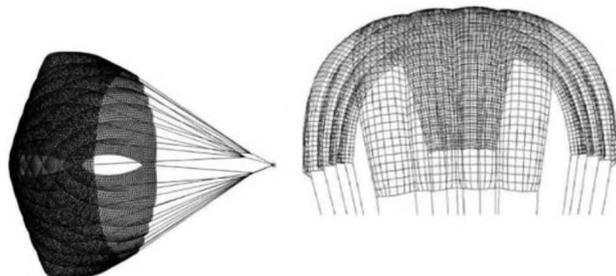


Figure 1-9 : Diverses études d'ouverture et d'écoulement d'interactions fluide-structure autour de parachutes



plus valable.

1.3.3. Cas de fluide peu compressible

Bien que le nombre d'exemples dans cette catégorie de problème soit plus restreint, il est possible de citer certains exemples comme l'impact du vent sur les véhicules terrestres roulant à grandes vitesses, ou encore le croisement des trains à vitesse importante ou dans un tunnel (milieu confiné).

1.3.4. Cas de fluide compressible

On parle de compressibilité à des nombres de Mach relativement grands, et donc les écoulements compressibles sont souvent rencontrés dans les problèmes où les structures sont à des vitesses trop élevées comme le domaine de l'aéronautique et l'aérospatial. On peut citer l'exemple d'un calcul autour d'un F-16 [25] (figure 1-10) ou un calcul de vibration des ailes d'avion. [26]

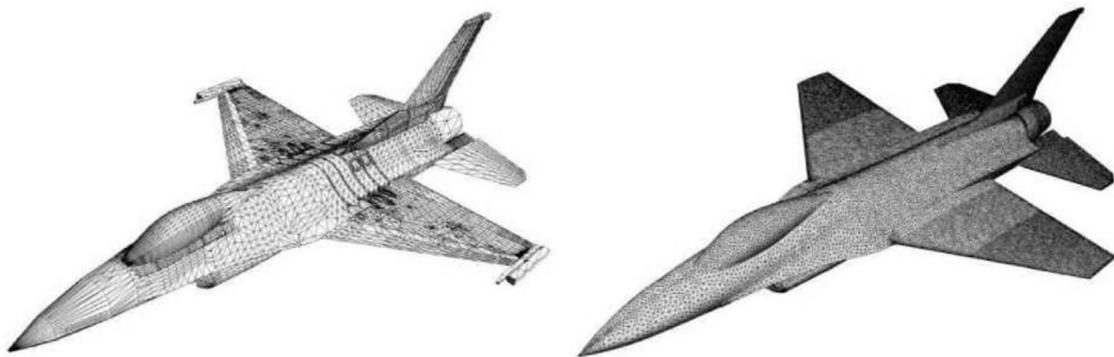


Figure 1-10 : Modélisation et simulation numérique d'un F-16 (maillage de la structure à l'interface)

Remarque

De nombreux autres domaines d'applications existent : des études sont réalisées sur des machines tournantes (pales d'hélicoptères, turbines et turbocompresseurs). Les

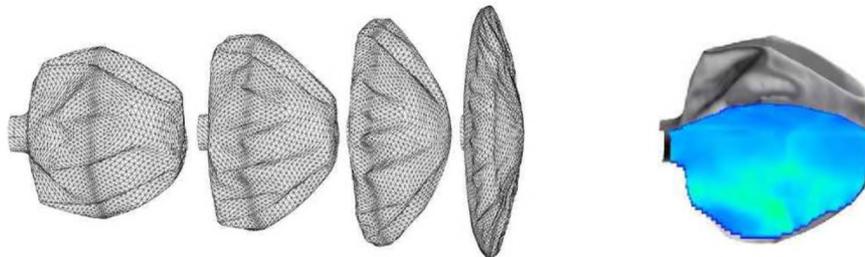


Figure 1-11 : Impact d'explosion aérienne sur des véhicules terrestres

explosions appartiennent aussi au domaine compressible. Des recherches sur les impacts dus à ces déflagrations sur des structures sont en cours (pliage et ouverture d'airbag)

1.3.5. Problèmes d'IFS et ondes acoustiques

Ce dernier domaine est un peu à part : dans cette situation le fluide et la structure ne subissent que de faibles perturbations. Dans cette catégorie on trouve par exemple les problématiques environnementales : réduire les signatures acoustiques des voitures et avions. D'autres exercices plus ludiques peuvent être cités comme les études sur les instruments de musique (acoustique d'une guitare [27] [28]).

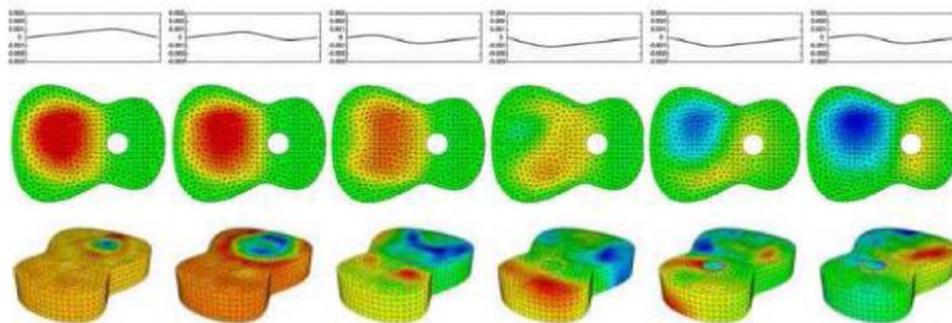


Figure 1-12 : Modélisation et simulation numérique de l'acoustique d'une guitare en fonction du pincement initial de la corde

Chapitre 2

2. Méthodes de couplage fluide-structure

Il existe plusieurs méthodes de couplage qui sont adaptées aux problèmes rencontrés.

La méthode découplée permet de résoudre la déformation d'une structure soumise à un chargement hydrostatique. La méthode consiste à déterminer le chargement, c'est-à-dire la pression hydrostatique au niveau de la structure, soit analytiquement soit avec des codes simples puis à utiliser ce chargement comme donnée d'entrée lors de la résolution du problème structure.

Les formulations fluides acoustique (en fréquentiel) permettent de déterminer les petits déplacements autour de la position d'équilibre d'une structure. Dans le cas où le fluide est lourd, il y a un couplage fort entre la vibration de la structure et le fluide. Ce couplage se traduit au niveau des fréquences propres des modes qui sont différentes ainsi que leur forme. Ces méthodes incluent les formulations dites non-symétriques (u, p) et symétriques (u, p, φ) . Elles sont proposées par Morand et Ohayon [29] et illustrées par Sigrist [30]

Les formulations en fluide potentiel dans le domaine fréquentiel s'appliquent à des cas de fluide stagnant mais également dans le cas d'une élévation de la surface libre du type ballonnement. Il s'agit alors de connaître les mouvements de la surface libre afin de déterminer les variations de pression le long des parois. Ces méthodes sont proches des formulations en fluide acoustique, lesquelles sont formulées en une écriture symétrique ou non symétrique des équations de couplages qui sont respectivement appelées (u, p_0) et (u, h, φ) [30]

Dans notre étude, nous sommes en présence d'un fluide en écoulement. Il est important de remarquer que la résolution d'un problème d'écoulement fait intervenir une formulation eulérienne. Une telle formulation est très bien adaptée pour l'étude d'un écoulement et simplifie fortement la résolution des équations du problème fluide.

La résolution de la déformation d'une structure fait intervenir, plus naturellement, une description lagrangienne. L'écriture d'un problème d'interaction entre un fluide s'écoulant et une structure ajoute une difficulté sur la formulation à retenir pour le problème afin de rendre compatibles les modélisations fluides et structure. Les méthodes existantes apportent des réponses différentes et permettent de prendre en compte des niveaux d'interactions variables.

Les approches monolithiques consistent à résoudre le problème posé en un seul bloc. On peut distinguer la formulation monolithique de la résolution monolithique. La première décrit et résout le problème dans une formulation soit lagrangienne, soit eulérienne. Cette solution est la plus proche du problème physique à résoudre mais aussi la plus délicate à formuler et à solutionner. On peut citer les travaux de Morinishi et Fukui [31] qui utilisent une formulation eulérienne ainsi que ceux de Dermidzic et Muzafertija [32] qui ajoutent la prise en compte des effets thermiques. La seconde, la résolution monolithique, décrit le problème à la fois en formulations eulérienne et lagrangienne. Ensuite, elle regroupe et résout ces deux formulations dans un système unique. Les méthodes généralement employées s'appuient sur les domaines fictifs avec des multiplicateurs de Lagrange ou une méthode de pénalités [33,34] des méthodes de frontières immergées [35]. Hübner *et al.* [36] utilisent une résolution monolithique en réalisant un avancement en temps par une méthode éléments finis permettant de résoudre simultanément les équations fluides et structure.

La première comme la seconde méthode sont particulièrement bien adaptées aux cas très fortement couplés. Cependant, leur mise en œuvre est complexe et n'est, à ce jour, ni implémentée ni validée dans un code robuste et disponible : ces méthodes restent du domaine de la recherche. Des approches, dites sans maillages, du type SPH sont utilisées également pour la résolution de cas d'interaction fluide-structure.

Les approches partitionnées séparent le problème en une partie fluide et une partie structure résolues chacune par un code dédié. Les deux codes communiquent entre eux pour s'échanger les grandeurs (pression sur la structure, déplacement de l'interface fluide-structure) nécessaires aux calculs. Afin d'affiner la précision du calcul, des boucles itératives internes à chaque pas de temps permettent de faire converger les grandeurs échangées entre les solveurs fluide et structure.

L'utilisation de deux codes permet d'utiliser les méthodes de résolution les mieux adaptées aux problèmes fluide et structure ainsi que d'exploiter des outils existants. La difficulté de ces méthodes repose sur la qualité du couplage entre les solveurs et sur la bonne convergence de l'ensemble des solveurs.

Les approches chaînées sont une forme simplifiée des méthodes partitionnées. Il s'agit généralement des mêmes méthodes mais sans les itérations internes aux pas de temps. Ces méthodes sont valables pour des couplages faibles où les déformations de la structure sont limitées.

Les méthodes de corps rigide Le transfert d'énergie mécanique peut également provoquer le déplacement d'une structure et des déformations négligeables, dans ce cas on parlera de mouvement de corps rigide. Le déplacement étant piloté soit par l'écoulement soit par la gravité, il existe un couplage entre le mouvement du solide et celui du fluide. Un tel problème se résout en déterminant les efforts du fluide sur la structure et en les utilisant pour résoudre une équation de mouvement à six degrés de libertés (trois translations et trois rotations). Deux grandes méthodes existent, la première dite *6dof*, est disponible couramment dans les solveurs Navier-Stokes

généralistes. La seconde est la méthode des frontières immergées qui est plus complexe et moins couramment utilisée.

L'utilisation de méthodes de résolutions monolithiques donne une meilleure précision que les méthodes partitionnées mais nécessitent un temps de calcul plus important d'un facteur quatre à cinq [37].

On peut définir les méthodes de couplages avec les mêmes critères que les problèmes présentés précédemment (voir figure 2.2). Dans notre cas, on s'intéresse particulièrement aux méthodes dites partitionnées. Dans ces méthodes, la qualité de couplage dépend de celle de la résolution de chaque système (fluide et structure) mais aussi de celle des algorithmes de couplage [38]. Cela implique que pour réaliser un couplage d'ordre élevé, il faudra que les systèmes fluide et structure soient d'un ordre au moins égal à celui de l'algorithme de couplage en temps et en espace, d'où l'importance du choix de ces algorithmes.

Farhat et Geuzaine [39] donnent la répartition du temps de calcul entre les parties fluide 60%, structure 2% et maillage 38% pour la résolution d'un problème d'aéroélasticité sur un F-16 avec un processeur. Ces temps de calculs s'expliquent par la complexité du système d'équations à résoudre en mécanique des fluides qui induit des pas de temps plus faibles et par le maillage plus fin que celui qui est généralement utilisé pour la partie fluide qui définit le nombre d'inconnue du problème. Le temps de calcul du maillage dynamique est fortement dépendant de l'amplitude des mouvements de la structure et des algorithmes utilisés pour gérer le déplacement des nœuds du maillage et les éventuels remaillages. Le Tallec et Mouro [40] obtiennent, pour le calcul d'un clapet d'amortisseur, une répartition du temps de calcul de 45% pour la partie fluide, 20% pour la structure et 30% pour le maillage, les 5% restants ont dus aux temps d'écriture et de lecture des fichiers informatiques. La partie fluide représente encore près de la moitié du temps de calcul et le maillage un tiers. Le choix des algorithmes de maillage et de CFD a donc un impact très important sur les temps de calculs.

Piperno [41] présente de façon plus complète les algorithmes de couplage partitionnés, notamment leur mise en œuvre et leur stabilité. Il montre l'intérêt des prédicteurs pour les schémas temporels et détaille de manière plus approfondie les méthodes de maillages dynamiques.

Afin de réaliser un couplage partitionné, il est nécessaire de disposer, outre d'un solveur fluide et d'un solveur structure, d'algorithmes de couplage entre ces deux codes. Ces algorithmes doivent permettre la synchronisation des solveurs et l'échange des données. La synchronisation consiste à envoyer la bonne donnée au bon moment et à réaliser des boucles itératives ou des prédictions efficaces. Le second doit garantir que les informations envoyées d'un solveur à l'autre soient interpolées d'une façon correcte entre les maillages des deux solveurs. Ces deux familles d'algorithmes sont décomposées ci-dessous sous les appellations de couplages en temps et en espace.

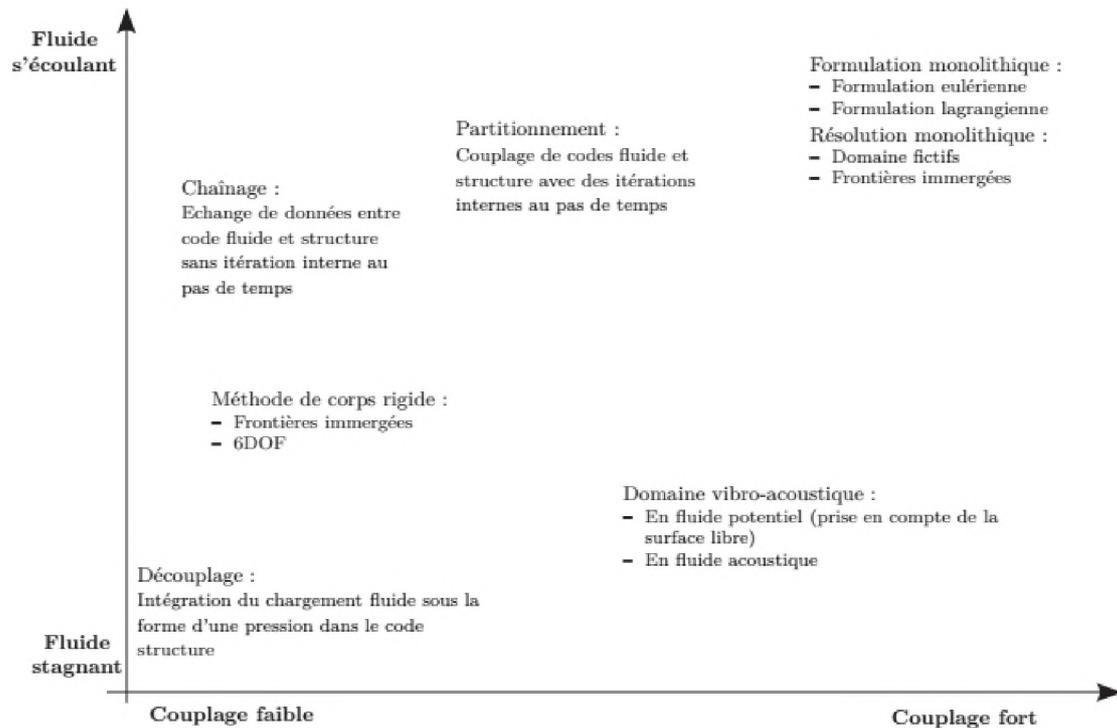


Figure 2-1 : Exemple de méthodes de résolution d'un problème d'interaction fluide-structure en fonction de la nature de l'écoulement (fluide stagnant ou s'écoulant) et de la force de l'interaction

Quatre éléments sont essentiels pour réaliser une simulation numérique d'interaction fluide-structure :

- Un solveur de dynamique des fluides
- Un solveur de dynamique des structures
- Une interface de couplage en espace
- Une interface de couplage en temps

2.1 Couplage en temps

Les algorithmes partitionnés, dits aussi différentiels sont présentés ci-dessous. Ils présentent l'avantage de nécessiter moins de temps de calcul que les autres méthodes de couplages temporels. Par contre, ils génèrent une erreur lors de l'échange d'informations entre les parties fluide et structure. Cette erreur est réduite lors de l'utilisation des modèles avec prédicteurs [42,43] et peut-être quasiment supprimée avec des algorithmes implicites.

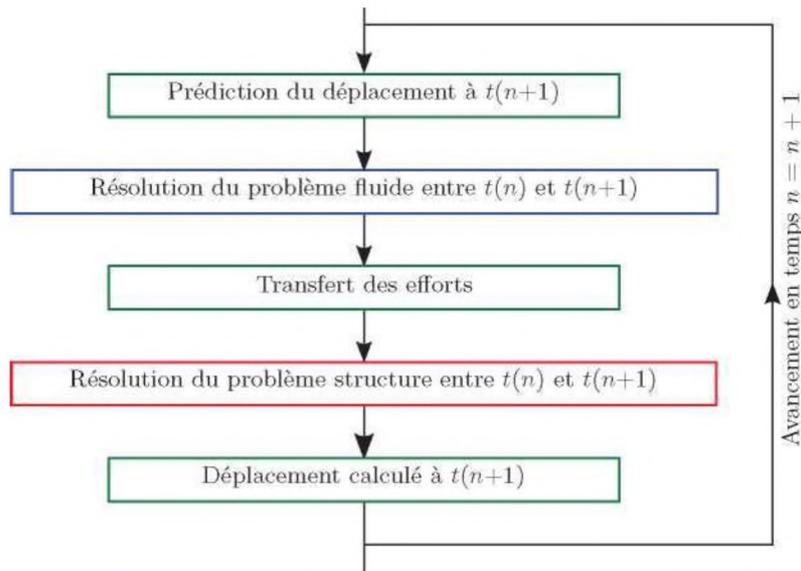


Figure 2-2 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite synchrone

2.1.1 Méthode explicite synchrone

Dans cet algorithme, comme le nom l'indique, les parties fluide et structure sont résolues au même pas de temps avec la prédiction du déplacement du maillage \mathcal{E} à l'instant $n + 1$ qui peut être de la forme :

$$\xi^{n+1;p} = u^n + \alpha \Delta t \dot{u}^n + \beta \Delta t (\dot{u}^n - \dot{u}^{n-1}) \quad (2.1)$$

Les valeurs d' α et β font varier l'ordre de l'algorithme (par exemple le choix $\alpha = 1$ et $\beta = 0,5$ forme un schéma du second ordre). Plusieurs formes de prédicteurs sont possibles, le choix des paramètres faisant varier la précision et la stabilité des modèles [44]. L'algorithme de couplage est schématisé sur la figure 2.2.

Les efforts sur la structure, déterminés par le code fluide, ne sont pas transmis directement au code structure. Ils sont d'abord moyennés [45] : ceci permet de réduire les erreurs induites par la prédiction du déplacement. Une étape similaire est présente dans l'algorithme explicite asynchrone. Les méthodes utilisées pour moyenner sont présentées dans [46].

2.1.2 Méthode explicite asynchrone ou décalée

Cet algorithme est proche du précédent, les itérations fluides sont décalées par rapport à celles de la structure. La prédiction est alors faite pour un temps intermédiaire avec une méthode similaire à la précédente. L'algorithme se déroule suivant la figure 2.3.

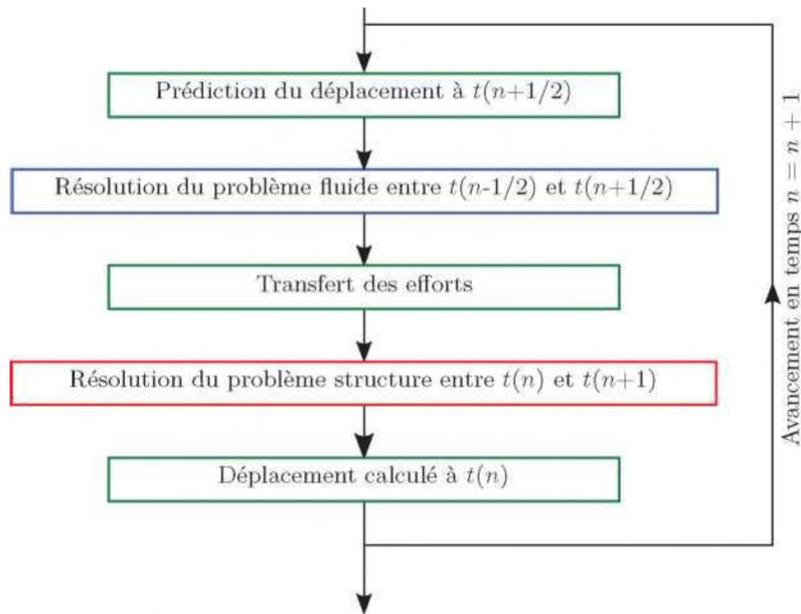


Figure 2-3 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite asynchrone ou décalé

2.1.3 Méthode avec sous-cyclage fluide

Cet algorithme part du principe qu'il peut y avoir de grandes différences de temps caractéristiques entre les parties fluide et structure. Afin d'améliorer la résolution, il faut diminuer le pas de temps de la partie fluide et réaliser plusieurs itérations fluides pour une itération structure (voir figure 2.4). Ceci est applicable aussi bien à un algorithme synchrone qu'asynchrone.

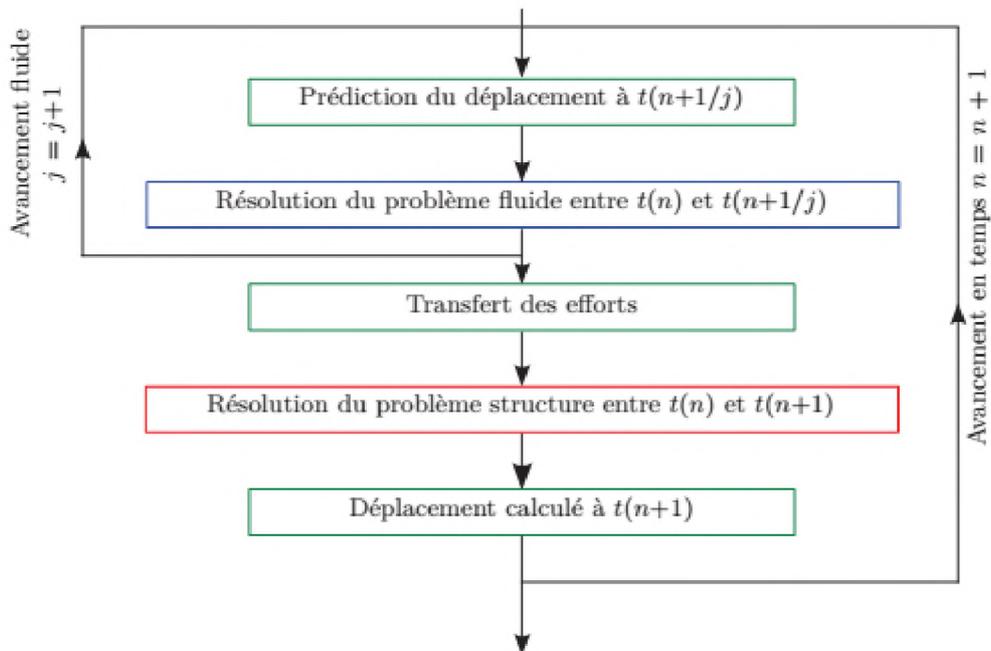


Figure 2-4 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite synchrone avec sous-cyclage (j itérations du fluide par pas de temps)

2.1.4 Méthode implicite

Cet algorithme ajoute une boucle itérative qui permet de vérifier la convergence entre le déplacement prédit et le déplacement calculé (voir figure 2.5). Ainsi, les erreurs dues à la prédiction sont fortement réduites. Le temps de calcul augmente d'autant plus que le critère de convergence est précis. Ce solveur est plus stable que les schémas explicites.

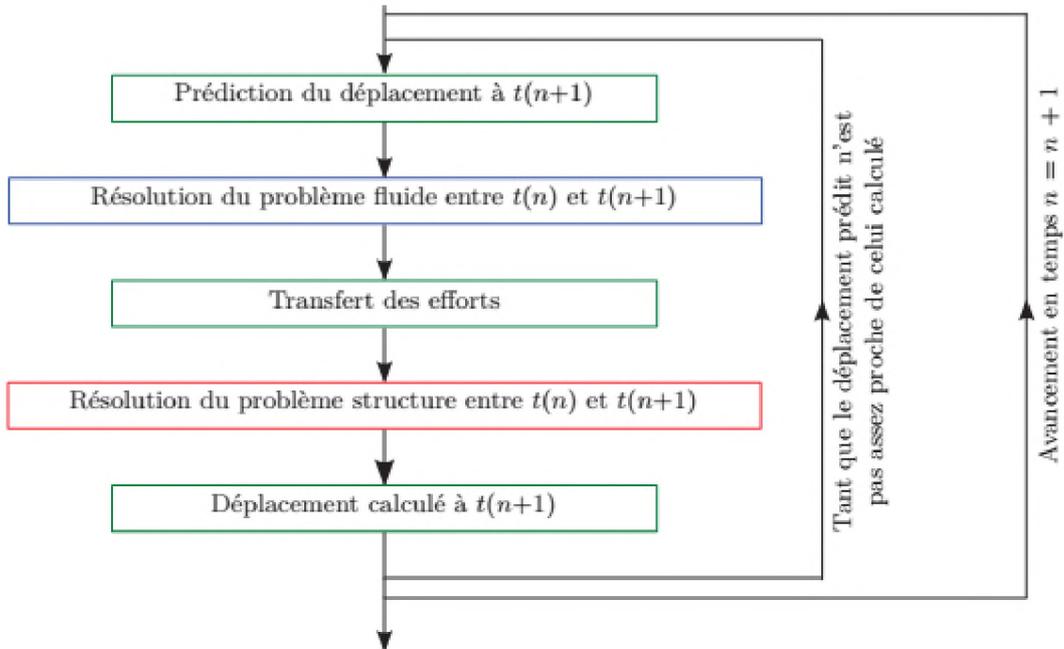


Figure 2-5 : Schématisation de l'algorithme de couplage temporel implicite

Causin *et al.* [47] ont montré que des instabilités sont introduites lorsque les effets de masse ajoutée ne sont pas négligeables et lorsque les dimensions du domaine fluide sont trop grandes par rapport à la structure. Afin d'améliorer la stabilité des méthodes explicites, des méthodes hybrides ont été développées [48,49,50]. Elles déterminent le couplage en effort en implicite et le couplage des autres termes en explicite.

2.1.5 Comparaison des méthodes

Du point de vue de la précision des résultats, Benaouicha [46] a réalisé une étude comparative de différents modèles sur un système de deux masses reliées par un ressort. Il montre que l'approche monolithique donne les meilleurs résultats, mais que ces derniers sont comparables à ceux de la méthode implicite et du même ordre que ceux des méthodes explicites lorsque le système contient un amortissement. Il montre aussi que l'étape de correction des efforts pour les méthodes implicites et explicites synchrones n'est pas indispensable, mais qu'elle est utile pour les méthodes explicites asynchrones. Piperno [50] montre qu'un schéma avec prédicteur est meilleur qu'un schéma sans prédicteur. Par contre, un schéma explicite avec prédicteur ne permet pas le respect parfait de la continuité des déplacements entre le fluide et la structure.

Farhat et Lesoinne [42] ont montré que les algorithmes en série avec prédicteur choisi pour respecter les conditions de continuité de la vitesse à l'interface donnent des résultats meilleurs que les autres méthodes avec et sans prédicteur. Ils montrent aussi que les modèles parallèles sont moins stables que les modèles séries équivalents, ce qui confirme que le choix des prédicteurs influe de façon importante sur la qualité du couplage.

Dans [52], Piperno et Farhat montrent l'influence du prédicteur des méthodes explicites synchrone et asynchrone afin d'obtenir des algorithmes de couplage d'ordre plus élevé et respectant mieux l'équilibre énergétique du système couplé. Dans [53] et [54], ils présentent un critère de comparaison des modèles de couplage temporel basé sur l'énergie échangée à l'interface. Ainsi, il est possible de choisir un modèle qui respecte mieux l'équilibre énergétique et donc n'ajoute pas d'erreur sur l'amortissement, lequel définit la stabilité du système [48].

2.2 Couplage en espace

Les efforts émis du fluide vers la structure et les déplacements envoyés de la structure vers le fluide sont échangés à partir des nœuds des maillages. La difficulté du couplage en espace consiste donc à transmettre les informations entre les maillages sans pertes et sans ajouter d'erreurs [55,56]

Dans la plupart des cas les maillages, structure et fluide, ne sont pas coïncidents. Le couplage en espace est alors décomposable en deux phases : tout d'abord, on projette les nœuds de l'un des maillages sur l'autre et ensuite on détermine les grandeurs sur ces nœuds.

2.2.1 Projection des nœuds

La méthode la plus simple consiste à projeter les nœuds d'un maillage sur l'autre suivant la normale à l'un des deux maillages. Les choix de la normale et du maillage projeté sont importants, car ils vont déterminer, en partie, la qualité du couplage en espace. Maman et Farhat [56] expliquent plus en détail le choix de la normale de projection avec une méthode de points de Gauss.

La figure 2.6 montre un exemple de projection des nœuds d'un maillage structure sur un maillage fluide. On remarque que, pour le nœud structure S_5 , la projection n'est pas possible. La valeur au nœud est alors renvoyée vers le nœud fluide le plus proche, c'est à dire le F_8 . Le nœud structure S_2 a deux projections possibles, d_1 et d_2 . C'est la plus courte des deux qui est retenue, ici d_2 . L'élément fluide délimité par les nœuds F_2 et F_3 ne contient aucune information provenant directement de la structure.

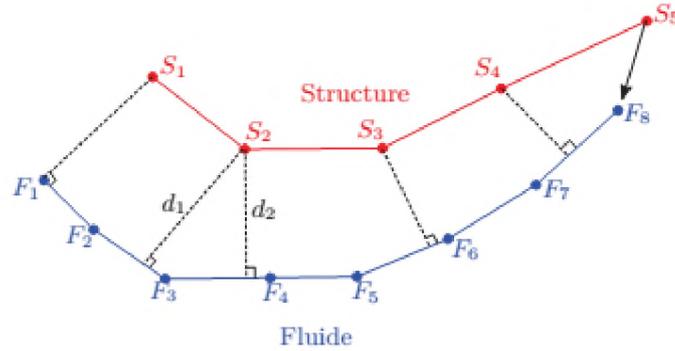


Figure 2-6 : Exemple de projection entre deux maillages

Dans l'exemple de la figure 2.6, on a choisi de projeter les nœuds structure sur le maillage fluide. Cette solution permet de réaliser moins de projections car le maillage structure est généralement moins dense ; la solution contraire est aussi possible. Farhat *et al.* [55] proposent de projeter les nœuds des deux maillages sur un élément intermédiaire de couplage.

Afin d'améliorer le fonctionnement de cette méthode, on peut réaliser un découpage de l'interface en zones appelées *buckets*. Ensuite on traite chaque zone indépendamment les unes des autres, avec des algorithmes spéciaux pour traiter les cas où seule l'une des deux interfaces est présente dans une zone.

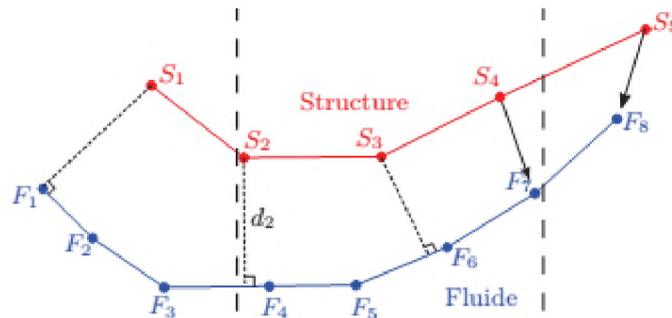
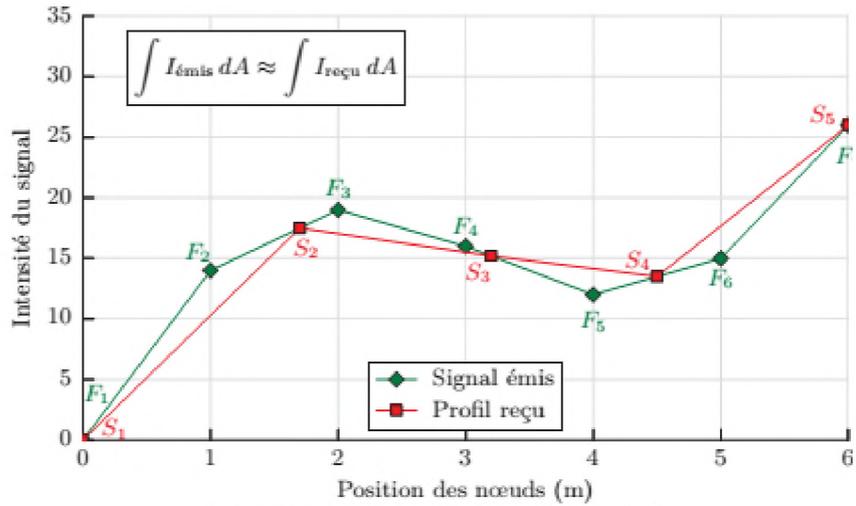


Figure 2-7 : Exemple de projection avec une méthode buckets

La figure 2.7 reprend l'exemple précédent avec des *buckets*.

2.2.2 Détermination des grandeurs aux nœuds

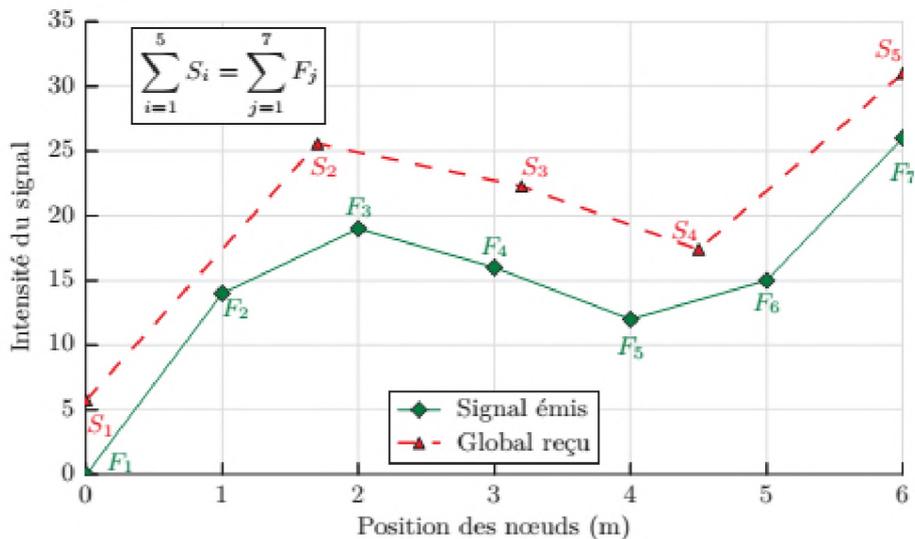
Cette partie présente les méthodes de détermination des valeurs aux nœuds utilisées dans ANSYS CFX [57]. La première méthode, préservation du profil, consiste à interpoler linéairement les grandeurs aux nœuds projetés dans la même idée que Piperno [51]. Cette méthode permet de conserver l'intégrale de la grandeur échangée (voir figure 2.8). La seconde, conservation globale, consiste à déterminer les grandeurs aux nœuds projetés à l'aide d'une fonction de forme. Elle permet de conserver la somme de la grandeur sur l'interface (voir figure 2.9).



Comme le montrent les figures 2.8 et 2.9 ainsi que le tableau 1.1, la méthode de détermination des grandeurs aux nœuds influence fortement l'erreur introduite dans le calcul par la discrétisation en espace. La méthode globale est meilleure pour les valeurs discrètes qui ne nécessitent pas d'être conservées exactement dans la plupart des cas. Par contre, les efforts et les flux, nécessitent que leurs intégrales soient égales pour que l'énergie échangée entre le fluide et la structure soit respectée. C'est donc la méthode de préservation du profil qui est préférable.

	Somme des valeurs aux points	Intégrales
Envoyé	102,0	89,0
Global	102,0	97,7
Profil	72,2	87,7

Table 2-1: Exemples de résultats obtenus avec les deux méthodes



2.2.3 Méthode General Grid Interface

Une variante de la méthode globale est la méthode *General Grid Interface* (GGI). Cette méthode intègre les étapes de projection et d'interpolation. La figure 2.10 montre le fonctionnement de cette méthode pour un cas simple. Dans un premier temps, les faces de chaque élément à l'interface sont divisées par le nombre de nœuds de la face. Ces faces, dites IP, sont converties en polygones faits de lignes et colonnes de *pixels* ayant une résolution de 100 x 100. Puis les polygones ainsi créés sur la face émettrice (le maillage fluide dans notre cas) sont intersectés avec ceux de la face receveuse. On obtient ainsi les surfaces de contrôle. Ces surfaces de contrôle sont ensuite utilisées

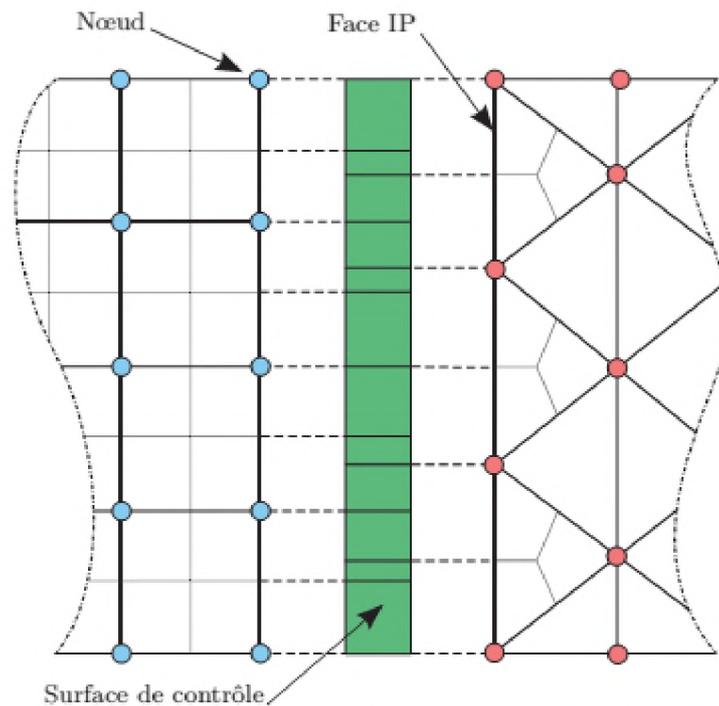


Figure 2-10 : Méthode d'échanges du type General Grid Interface (GGI)

pour l'échange des grandeurs.

Il existe d'autres méthodes dont celle du voisin le plus proche qui consiste à donner la grandeur du nœud projeté au nœud du maillage receveur le plus proche. D'autres méthodes d'interpolation peuvent-être utilisées, par exemple Bøer *et al.* [58] présentent des méthodes de projection à partir des points de Gauss d'un élément ou utilisent des splines. Farhat *et al.* [55] comparent deux méthodes de projection, l'une consistante et l'autre non. Ils montrent que l'utilisation d'une méthode consistante (i.e. l'erreur de troncature tend vers zéro avec la diminution de l'espacement de la grille) améliore sensiblement les résultats en termes de robustesse et de précision.

2.3 Geometric Conservation Law et formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne

2.3.1 La formulation Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne

Lors d'un calcul en interaction fluide-structure certaines frontières du domaine fluide deviennent mobiles et celui-ci peut alors se déplacer ou se déformer. Pour prendre en compte cette modification du domaine, on utilise une formulation des équations de Navier-Stokes différente de celles couramment employées. Cette formulation dite Arbitrairement Lagrangienne Eulérienne (ALE) fait intervenir la vitesse de déplacement du volume de contrôle v^* et s'écrit [59] :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_f} \rho_f v d\Omega_f + \int_{\Gamma_f} \rho_f (v - v^*) n d\Gamma_f = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_f} \rho_f v d\Omega_f + \int_{\Gamma_f} \rho_f v \otimes (v - v^*) n d\Gamma_f = \int_{\Gamma_f} T n d\Gamma_f + \int_{\Omega_f} \rho_f b d\Omega_f \quad (2.3)$$

Pour une vitesse de maillage $v^* = 0$, on retrouve les équations de Navier-Stokes en formulation eulérienne. Lorsque la vitesse du maillage est égale à celle du fluide, les équations sont alors en formulation lagrangienne.

En interaction fluide-structure, le maillage doit suivre les mouvements de la structure. La vitesse du maillage fluide doit donc être égale à celle de la structure. Le fait que le maillage suive, de façon rigide, la structure peut provoquer des difficultés pour gérer les conditions aux limites. Pour s'affranchir de ce problème la formulation ALE utilise une vitesse de maillage non-uniforme dans le domaine. Elle est prise nulle aux frontières fixes de ce dernier et égale à la vitesse de la structure au niveau de l'interface.

Dans le reste du domaine il s'agit d'une nouvelle inconnue. La différence de vitesse du maillage provoque une déformation de celui-ci. Le contrôle de cette déformation, voire le remaillage de tout ou partie du domaine, augmente le temps de calcul et doit être réalisé avec précaution, afin de garantir un maillage de qualité. La méthode ALE est présentée plus en détail dans [46] et [60].

D'autres méthodes ont été mises au point, notamment la méthode de transpiration qui ne nécessite pas de remaillage. Elle consiste à autoriser le fluide à s'écouler à travers l'interface avec une vitesse de transpiration qui est définie à partir du déplacement de la structure. Cette méthode est détaillée dans [61], elle s'adapte particulièrement bien au cas de petites déformations.

2.3.2 Loi de conservation géométrique

Afin d'avoir un problème fermé, il est nécessaire d'introduire une équation complémentaire portant sur la vitesse du maillage. La *Geometric Conservation Law* (GCL)

ou *Space Conservation Law* (SCL) décrit la conservation de l'espace, quand l'élément change de position ou de forme dans le temps [62].

Guillard et Farhat [63] expliquent que le respect de la *Geometric Conservation Law* revient à déterminer les paramètres géométriques du modèle numérique tels qu'ils préservent l'état d'un écoulement uniforme, indépendamment des mouvements du maillage. C'est-à-dire que le maillage mobile ne doit pas ajouter d'erreurs à la résolution du problème. Pour cela, il faut respecter exactement l'égalité suivante [64] :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_f} d\Omega_f - \int_{\Gamma_f} v^* n d\Gamma_f = 0 \quad (2.4)$$

Farhat *et al.* [39] appliquent la *Geometric Conservation Law* lors de la création d'algorithmes d'avancement en temps pour des systèmes utilisant une approche ALE. Boffi et Gastaldi [65] l'appliquent sur plusieurs schémas d'avancement temporel tel que Euler Implicite et Crank-Nicolson. Cao [66] l'applique à une méthode de maillage mobile basée sur le jacobien du changement de coordonnées et sur une condition sur le rotationnel de la vitesse. La GCL est une condition qui est souvent rendue invisible dans les codes généralistes et le détail de son implémentation n'est pas connu de l'utilisateur. Son implémentation est présentée par [67] pour CFX-5. Elle est introduite dans les équations de Navier-Stokes à travers une contrainte de conservation du volume qui influe sur le terme source volumique introduit par le maillage mobile.

La GCL peut se ramener, d'après Koobus et Farhat [68], pour une précision temporelle du premier ou du second ordre, à déterminer la vitesse du maillage de la façon suivante :

$$v^* = \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Farhat et Lesoinne [42] montrent que dans certains cas, cette condition est incompatible avec les conditions de continuité de la vitesse à l'interface. Une erreur dans la résolution apparaît qui, pour de petits pas de temps, peut ne pas être significative.

Pour Guillard et Farhat [63] le respect de la GCL n'est pas indispensable pour les méthodes d'ordre un, mais la précision et la stabilité sont améliorées pour les méthodes avec GCL à l'ordre deux. Ils montrent aussi que l'intérêt de la GCL est plus important pour les cas de couplage fort que pour les cas sans échange important, comme un cylindre en vibration forcée. Cependant, il est possible d'avoir des schémas de couplage au second ordre en temps qui ne respectent pas la GCL et donnent des résultats identiques à ceux d'un couplage respectant la GCL à pas de temps égaux [69].

Le non-respect de la GCL peut entraîner, en aéroélasticité, des instabilités numériques sur la portance et des vitesses de flottement sous-estimées [68]. Il est donc conseillé d'utiliser des schémas respectant la GCL, d'autant plus que le respect de cette condition n'augmente pas les temps de calculs [70].

2.4 Maillage dynamique

Dans le cas de petits déplacements, un maillage dynamique est suffisant. Il permet de déplacer les nœuds des éléments et, en déformant un peu ces derniers, de suivre le mouvement de la structure.

Pour les grands déplacements, les déformations subies par le maillage dégradent sa qualité. Il faut alors remailler le domaine ou à minima les zones les plus déformées. Il est possible de coupler les deux méthodes de maillage, c'est-à-dire déformer le maillage puis, lorsqu'une zone présente une qualité de maillage inférieure à un critère fixé, la remailler. Le remaillage est une action coûteuse en temps de calcul et délicate à paramétrer [71].

2.4.1 Analogie des ressorts (Spring Analogy)

Il s'agit de déplacer des nœuds du maillage afin de suivre le mouvement de la structure. La difficulté réside dans la nécessité de garder un maillage de qualité, c'est-à-dire que les éléments ne soient pas trop déformés et qu'ils ne s'interprètent pas.

Les méthodes suivantes sont présentées plus précisément dans [72,73]. Elles consistent à ajouter des éléments de raideur en torsion et/ou en compression aux nœuds.

a. Torsional Spring Analogy

Dans un élément triangulaire, on ajoute à chaque sommet (nœud) une raideur égale au rapport des longueurs des côtés du triangle l_j et l_k par rapport à l'aire du triangle A_{jk} . Il existe au sommet i autant de raideurs C_i que de triangles en contact, la raideur pour le triangle ijk s'écrit alors :

$$C_i^{ijk} = \frac{l_j^2 l_k^2}{4A_{ijk}^2} \quad (2.6)$$

Généralement, des éléments de raideurs inversement proportionnels à la longueur du côté du triangle sont placés entre les sommets du triangle (voir figure 2.11). Ainsi, comme le montre Farhat *et al.* [55], la géométrie de l'élément est bien contrôlée, notamment les risques d'interpénétration et d'affaissement. Par contre, le temps de calcul nécessaire en utilisant cette méthode est trois à quatre fois supérieure aux méthodes suivantes [72].

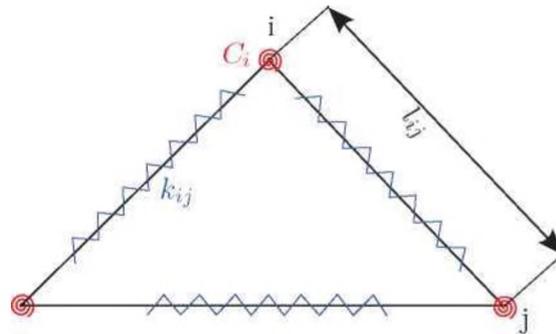


Figure 2-11 : Méthode torsional spring avec raideurs linéaires

b. Ball-Vertex Spring Analogy

Dans cette approche, on utilise des raideurs linéaires entre les nœuds et entre ces derniers et la face opposée (voir figure 2.12). Cette méthode contrôle l'écrasement de l'élément, mais pas ses déformations angulaires, ce qui peut conduire à des déformations importantes de l'élément.

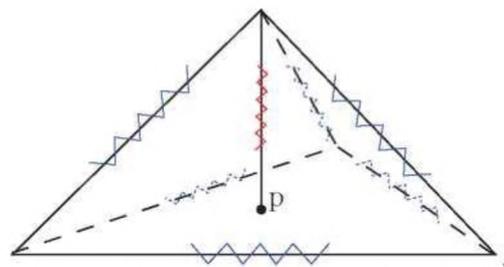


Figure 2-12 : Méthode ball-vertex (les raideurs entre les nœuds j et k et leur face opposée ne sont pas représentées)

c. Semi-Torsional Spring Analogy

Cette méthode est un mélange entre la méthode de base utilisant des raideurs entre les nœuds et la méthode *Torsional*. On emploie ici des raideurs entre les nœuds mais définies par la raideur en torsion de l'angle opposé. Ainsi, les déformations sont mieux contrôlées qu'avec la méthode *Ball-Vertex* et nécessitent moins de ressources que pour la méthode *Torsional* [73].

d. Orthogonal Semi-Torsional Spring Analogy

Cette méthode est identique à la précédente avec en plus une raideur entre le sommet et sa projection sur la face opposée. Ainsi, l'élément ne peut pas s'affaisser ne s'y inverser. Markou *et al.* [72] montrent que cette méthode est celle qui, pour les grandes déformations, donne les meilleurs résultats pour un temps de calcul comparable aux méthodes *Semi-Torsional* et *Ball-Vertex*.

2.4.2. Renforcement basé sur la matrice Jacobienne

L'objectif est de conserver la géométrie des petites mailles et de favoriser la déformation des grandes mailles. Les petites mailles n'étant que peu (ou pas) déformées, on peut effectuer des remaillages partiels du domaine sans modifier les

mailles près de la structure qui forment la couche limite. Pour ce faire, un Jacobien de l'élément est défini, ainsi qu'une raideur artificielle sur le volume de l'élément [73].

2.4.3. Modèle élastique

Le maillage dynamique est vu comme un système supplémentaire dans le problème de couplage. Piperno *et al.* [54] proposent d'écrire le maillage comme une pseudo-structure avec son équation de mouvement et ses matrices fictives de masse, raideur et amortissement. La résolution de l'équation de mouvement permet de déterminer l'évolution de la position ξ des nœuds du maillage.

$$M\ddot{\xi} + K\xi + D\dot{\xi} = F \quad (2.7)$$

Cette méthode, pour certaines valeurs des matrices de masses M , raideurs K et amortissements D fictifs, revient aux méthodes de maillages dynamiques par ressorts.

La méthode SEMMT (*Solid-Extension Mesh Moving Technique*) consiste à considérer le maillage proche de la structure comme étant fixé rigidement sur celle-ci et non plus seulement l'interface [74].

Ainsi, la couche limite de l'écoulement conserve sa géométrie et donc sa qualité.

2.4.4. Méthode de remaillage

Le but de cette famille de méthodes est d'ajouter ou supprimer des éléments au maillage. Pour cela un critère surveille l'état du maillage (taille des mailles, affaissement...). Lorsque la valeur du critère est inférieure à celle fixée, un code de remaillage est appelé. L'opération de remaillage se décompose en deux phases, la première consiste à créer le nouveau maillage et la seconde à interpoler sur le nouveau maillage les grandeurs physiques. Cette deuxième partie peut être réalisée par les méthodes correspondant au couplage en espace. La création d'un nouveau maillage peut se faire en décomposant chaque élément en sous-éléments ou en calculant complètement un nouveau maillage. Pour des raisons de simplicité, il n'est généralement pas possible d'ajouter des nœuds sur les frontières du domaine.

2.4.5. Applications aux corps portants

La prise en compte de la déformation de la structure peut être réalisée soit avec un écoulement non cavitant, soit avec cavitation. La prise en compte de la cavitation est présente dans les travaux de Benaouicha *et al.* [75] qui réalisent un chaînage de codes pour déterminer l'interaction entre les déformations d'un foil viscoélastique et un écoulement cavitant. Ces travaux ont permis de montrer que le chaînage donne de bons résultats en termes d'amplitude maximale des déformations du foil et en terme de longueur de poche et de fréquences d'oscillations de la poche. Par contre, les variations de l'angle d'attaque du foil, produites par les déformations de celui-ci, sont sous-estimées. Or l'angle d'attaque est un paramètre influant fortement la cavitation.

Plusieurs études ont également été réalisées sur des profils de pales ou sur des hélices complètes. Par exemple, Young [76] utilise une formulation en éléments frontières

(BEM) écoulement potentiel pour le fluide et en éléments finis pour la structure. Elle obtient des résultats proches des essais pour des cas stationnaires et instationnaires avec, pour ces derniers, une mauvaise prédiction de la forme de la poche de cavitation en bout de pales, à cause de l'absence de modélisation de la cavitation de vortex. De plus, elle montre que le virilement d'une pale diminue la fréquence propre de cette dernière. De même, une pale en eau a une fréquence propre inférieure à celle en air en raison des effets de masse ajoutée. La même méthode est appliquée par Young *et al.* [77] pour des hydroliennes immergées avec des résultats numériques similaires à l'expérimental. Afin de bien dimensionner un propulseur composite flexible, Young [78] montre que l'on est obligé de prendre en compte le couplage fluide-structure ainsi que l'anisotropie du matériau (sens des plis du composite). Un tel modèle permet de prédire convenablement les efforts sur la structure et sa déformation.

Liu et Young [79], étudient la déformation statique d'une hélice lors d'une manœuvre d'inversion de la rotation (*crash-back*). Lors de ces manœuvres, le chargement hydrodynamique appliqué sur les pales est très important. Ils proposent une méthode basée pour la modélisation structure, sur une approche 2D. La pale est décomposée en sections rigides qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Ce modèle analytique est couplé avec une approche fluide potentiel BEM. Une méthode similaire est présentée par Ducoin et Young [80] pour l'étude de la stabilité d'un hydrofoil flexible.

L'optimisation d'une hélice flexible peut se faire pour deux cas. Soit la flexibilité permet d'améliorer le fonctionnement pour deux vitesses d'avance, soit elle permet de réaliser un propulseur plus efficace pour une vitesse d'avance mais en tenant compte de l'instationarité et de l'inhomogénéité du champ entrant dans le disque hélice. Ce second cas est traité par He *et al.* [81] qui démontrent la possibilité de réduire le niveau de vibrations induites par le sillage en modifiant les caractéristiques du composite (orientation et nombre des plis). Pour ce faire, ils utilisent un couplage entre ANSYS Mechanical et CFX. Mulcahy *et al.* [82] réalisent une étude sur le même principe et montrent que les gains obtenus restent relativement faibles.

2.5. Formulations et discrétisations

L'autre point important de l'interaction fluide-structure numérique est le type de discrétisation utilisée. 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.

La communauté de simulation des structures possède une prédilection pour les éléments finis en raison de son *universalité et d'un ordre de précision modulable à volonté*. Cependant des travaux comme ceux de I. Demirdzic et S. Muzaferija (cf. [83] et [84]) sont apparus, traitant les problèmes structure avec des discrétisations volumes finis.

Du côté fluide les deux approches sont aussi possibles. Les solveurs fluides formules 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 bases sur les éléments finis [85] et des codes découplés ayant une discrétisation fluide volumes finis et une discrétisation structure éléments finis [49]. 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 inexistant. On rencontre aussi des codes découplés qui n'utilisent qu'une formulation : tout "volumes finis" [45] ou tout « éléments finis" [44].

Résumons en deux tableaux les grandes lignes des algorithmes de couplage et les discrétisations :

	Volumes finis	Eléments finis
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Conservatif localement et globalement • Approche physique (chaque contribution identifiée physiquement) • Traite les phénomènes non-linéaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Ordre de précision en espace modulable à volonté • Champ d'application universel
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté de monter en précision 	<ul style="list-style-type: none"> • Methode non-conservative localement

	Monolithique	Découplé
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Couplage fort • Meilleure convergence 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus rapide • Modulable et souple
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Gourmand en mémoire • Formulation peu souple (tous les outils doivent être intégrés au code) • Gestion des interfaces en mouvement difficile à coder 	<ul style="list-style-type: none"> • Couplage faible à priori • Contraintes et déplacements discontinus • Convergence problématique

Conclusion

L'interaction fluide-structure est un pont entre les deux domaines distincts que sont la mécanique des fluides et la mécanique des solides. Cette discipline est par nature très vaste ; elle touche de nombreux corps de métier (le génie civil, le domaine nucléaire et biomédical, les métiers de la mer, l'aéronautique et l'aérospatiale... Elle a commencé à se développer de plus en plus avec l'apparition du calcul parallèle dans les années 1970.

Ces dix dernières années, elle a connu un important essor dans la communauté du calcul numérique. Les équipes de recherche cherchent à étendre les capacités de leur code.

Chapitre 3

3. Exemple d'application sur une artère d'aorte

Le but de cette thèse est de reproduire numériquement des comportements d'interaction fluide-structure pour des corps élancés. Un cas-test IFS été réalisés à l'aide du ANSYS Workbench a pour but de montrer les capacités du code IFS en 3D.

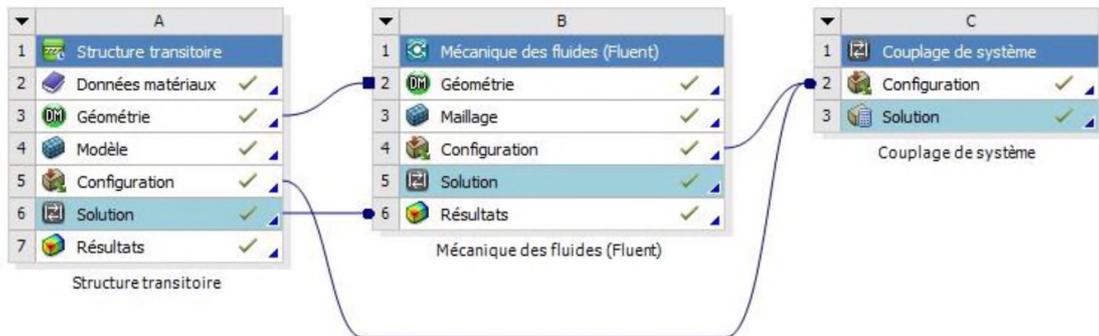


Figure 3-1 : la modélisation de l'IFS sous le logiciel ANSYS

Une artère d'aorte conduisant du sang s'écoulant en régime transitoire (Pulsation du cœur) et donc subissant des efforts qui varient au cours du temps.

Comme mentionné avant, quatre éléments sont essentiels pour réaliser une simulation numérique d'interaction fluide-structure :

- Un solveur de dynamique des fluides qui est « FLUENT » représenté dans la fenêtre B dans la figure 3-1.
- Un solveur de dynamique des structures qui est « Mechanical APDL » représenté dans la fenêtre A dans la figure 3-1
- Une interface de couplage en espace
- Une interface de couplage en temps

Qui sont intégrés dans « Couplage de Système » représenté dans la fenêtre C dans la figure 3-1

Les Configurations des deux solveurs se connectent à la configuration du couplage de système.

La géométrie est unifiée par une liaison entre les deux solveurs.

Après génération de la solution du solveur de dynamique de structure, les résultats sont comparés par une liaison avec les résultats du FLUENT.

3.1. Le solveur de dynamique des fluides « FLUENT » :

Géométrie

Table 2-1 : la géométrie du fluide

Nom de l'objet	Géométrie
Etat	Défini complètement
Boîte englobante	
Longueur suivant X	2,5e-002 m
Longueur suivant Y	2,5e-002 m
Longueur suivant Z	5,e-002 m
Propriétés	
Volume	2,4544e-005 m ³
Coord. X du centre de gravité	2,7546e-020 m
Coord. Y du centre de gravité	5,9359e-020 m
Coord. Z du centre de gravité	2,5e-002 m

Maillage

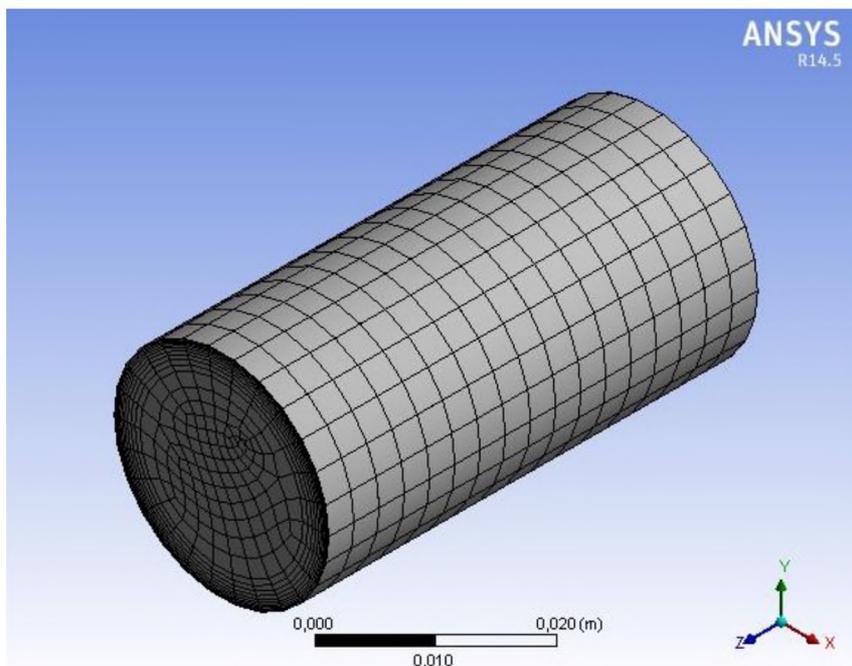


Figure 3-2 : le maillage du fluide

Table 3-2 : le maillage du fluide

Nom de l'objet	<i>Maillage</i>
Etat	Résolu
Dimensionnement	
Utiliser la fonction de taille avancée	Activé: Courbure
Centre de pertinence	Moyen
Taille d'élément initiale	Assemblage actif
Lissage	Moyen
Transition	Rapide
Centre d'angle de course	Moyen
Angle normal de courbure	Default (30,0 °)
Taille min	Default (1,174e-003 m)
Taille de face max	Default (5,8699e-003 m)
Taux de croissance	Par défaut
Longueur d'arête minimale	7,854e-002 m
Inflation	
Utiliser l'inflation tét. automatique	Oui
Option Inflation	Taille maximal
Taille maximal	0,003 m
Maximum couches	10
Taux de croissance	1,2
Algorithme d'inflation	Pré
Statistiques	
Noeuds	7236
Eléments	6613

Configuration:

Les paramètres du sang sont définis dans cette partie, aussi les conditions aux limites, pour les insérer un code UDF doit être écrit pour définir les pulsations du cœur sous formes de vitesses sinusoïdal à l'entrée (Inlet) et pour la sortie une pression plus au moins grande ($13332 \text{ Pa} > 3333.2 \text{ Pa}$ qui est la pression maximale normale) pour sortir de l'ordinaire.

Un maillage dynamique est aussi activé.

```

/*****
vprofile.c
UDF for specifying steady-state velocity profile boundary condition
*****/
#include "udf.h"
#define PI 3.141592654
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
        double t = (CURRENT_TIME*2-floor(CURRENT_TIME*2))/2;

```

```

{
  if(t <= 1)
    F_PROFILE(f, thread, position) = 1.3754*sin(4*PI*(t+0.0160236));
  else
    F_PROFILE(f, thread, position) = 0.0 ;
}
end_f_loop(f, thread)
}

```

3.2. Lesolveur de dynamique des structures « Mechanical APDL » :

Données relatives aux matériaux

Artère

Constants

Masse volumique	1120, kg m ⁻³
-----------------	--------------------------

Table 4-3 : Elasticité isotrope de l'artère

Température C	Module de Young Pa	Coefficient de Poisson	Module de compressibilité Pa	Module de cisaillement Pa
	1,08e+006	0,49	1,8e+007	3,6242e+005

Géométrie

Table 5-4 : la géométrie du solide

Nom de l'objet	Géométrie
Etat	Défini complètement
Propriétés	
Volume	3,927e-006 m ³
Masse	4,3982e-003 kg
Epaisseur	1,e-003 m
Coord. X du centre de gravité	2,319e-019 m
Coord. Y du centre de gravité	-1,2682e-019 m
Coord. Z du centre de gravité	2,5e-002 m
Moment d'inertie Ip1	1,2566e-006 kg·m ²
Moment d'inertie Ip2	1,2566e-006 kg·m ²
Moment d'inertie Ip3	6,8288e-007 kg·m ²
Aire (approx.)	3,927e-003 m ²

Statistiques	
Noeuds	1014
Eléments	975

Maillage

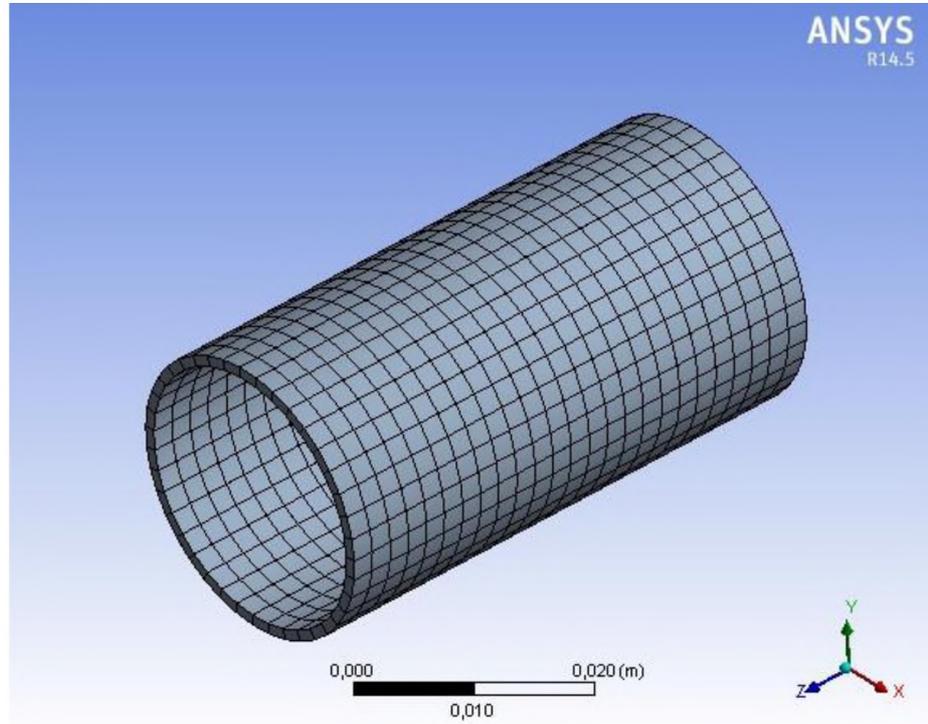


Figure 3-3 : le maillage de l'artère

Table 6-5 : le maillage du solide

Nom de l'objet	Maillage
Etat	Résolu
Réglages par défaut	
Physique de préférence	Mécanique
Préférence de solveur	Mechanical APDL
Dimensionnement	
Utiliser la fonction de taille avancée	Activé: Courbure
Centre de pertinence	Grossier
Taille d'élément initiale	Assemblage actif
Lissage	Moyen
Transition	Rapide
Centre d'angle de course	Grossier
Angle normal de courbure	Default (30,0 °)
Taille min	Default (1,174e-003 m)
Taille de face max	Default (5,8699e-003 m)
Taux de croissance	Par défaut
Longueur d'arête minimale	7,854e-002 m
Inflation	
Utiliser l'inflation tétr. automatique	Aucun

Option Inflation	Transition progressive
Rapport de transition	0,272
Maximum couches	5
Taux de croissance	1,2
Algorithme d'inflation	Pré
Afficher les options avancées	Non
Options conforme aux surfaces paramétriques	
Maillage surfacique triangulaire	Contrôlé par le programme
Avancés	
Contrôle de forme	Mécanique standard
Noeuds intermédiaires d'éléments	Contrôlé par le programme
Nombre de tentatives	Default (4)
Tentatives supplémentaires pour l'assemblage	Oui
Comportement de corps rigide	Dimensionnellement réduit
Morphing de maillage	Désactivé
Simplification	
Utiliser l'épaisseur de la surface pour le pincement	Non
Tolérance de pincement	Default (1,0566e-003 m)
Générer le pincement au rafraîchissement	Non
Suppression de boucles surfaciques	Non
Simplification du maillage de base automatique	Activé
Tolérance de simplification	Default (8,8049e-004 m)
Statistiques	
Noeuds	1014
Eléments	975

Transitoire

Table 7-6 : Analyse

Nom de l'objet	<i>Transitoire</i>
Etat	Résolu
Définition	
Type de Physique	Structure
Type d'analyse	Transitoire
Cible du solveur	ANSYS Mechanical

Table 8-7 : Paramètres d'analyse

Nom de l'objet	<i>Paramètres d'analyse</i>
Etat	Défini complètement
Analyse de reprise	
Type de reprise	Contrôlé par le programme
Incrément de chargement	1000
Sous-incrément	1
Temps	10, s
Contrôles d'incrément	
Nombre d'incrément	1,
Incrément courant	1,

Chapitre 3 : Exemple d'application sur une artère d'aorte

Temps final pour cet incrément	10, s
Incrément de temps automatique	Désactivé
Défini par	Temps
Incrément de temps	1,e-002 s
Effets dynamiques	Activé

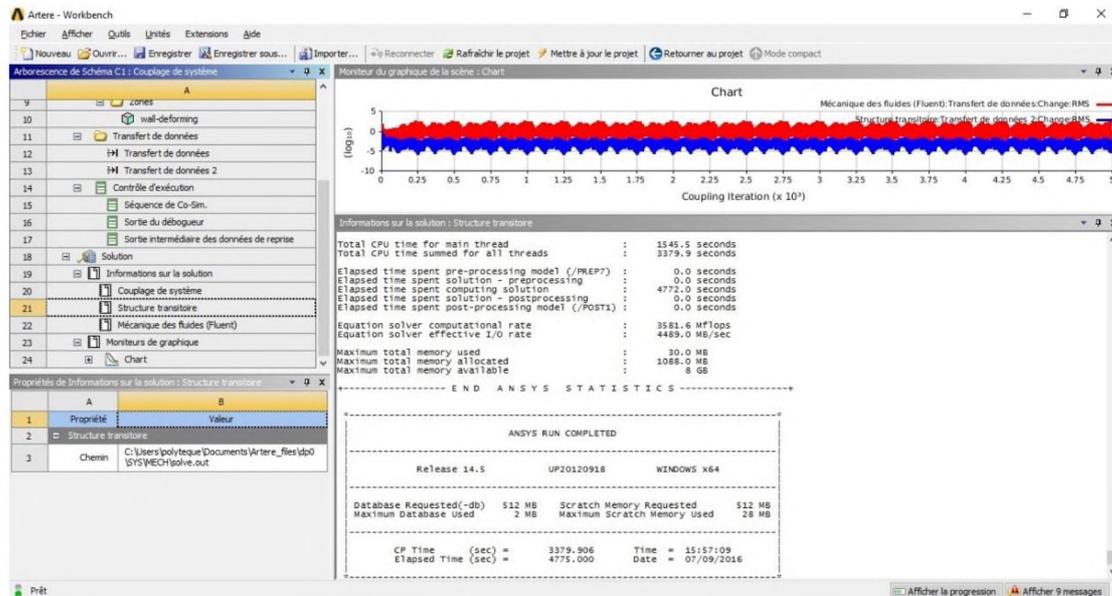


Figure 3-4 : l'interface du couplage après solution

Solution

La simulation a pris presque 80mn et a alloué 1G de mémoire et s'est terminé avec succès, comme le montre la figure 3-4.

Table 9-8 : information sur la solution

Nom de l'objet	Informations sur la solution
Etat	Resolu
Informations sur la solution	
Données de sortie de la solution	Sortie du solveur
Résidus de Newton-Raphson	0
Intervalle de mise à jour	2,5 s
Points d'affichage	Tout
Visibilité des connexions EF	
Activer la visibilité	Oui
Afficher	Tous les connecteurs EF
Dessiner les connexions attachées à	Tous les noeuds
Couleur des lignes	Type de connexion
Visible sur les résultats	Non
Epaisseur des lignes	Simple
Type d'affichage	Lignes

Résultats:

Table 10-9 : Déplacement total

Nom de l'objet	<i>Déplacement total</i>
Etat	Résolu
Définition	
Type	Déplacement total
Par	Temps
Temps d'affichage	10, s
Calculer l'historique des temps	Oui
Résultats	
Minimum	0, m
Maximum	2,241e-003 m
Valeur minimale dans le temps	
Minimum	0, m
Maximum	0, m
Valeur maximale dans le temps	
Minimum	1,8673e-003 m
Maximum	2,5915e-003 m
Informations	
Temps	10, s
Incrément de chargement	1000

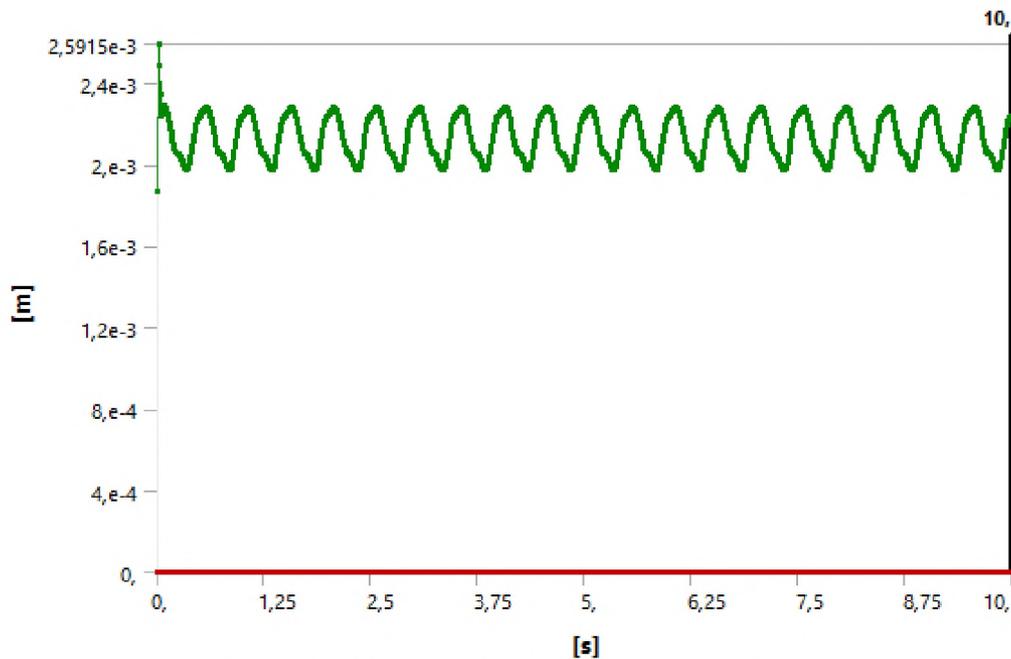


Figure 3-5 : le déplacement total de l'artère au cours du temps

La figure 3-5 nous montre les variations du déplacement de l'artère en sens radiale au cours du temps suite à une interaction avec le sang qui s'écoule à l'intérieur. Ce déplacement atteint une valeur de près de 2.6 mm Par contre la figure 3-6 qui suit nous montre le déplacement à T=10s, et il est évident qu'il est plus grand en s'approchant du milieu.

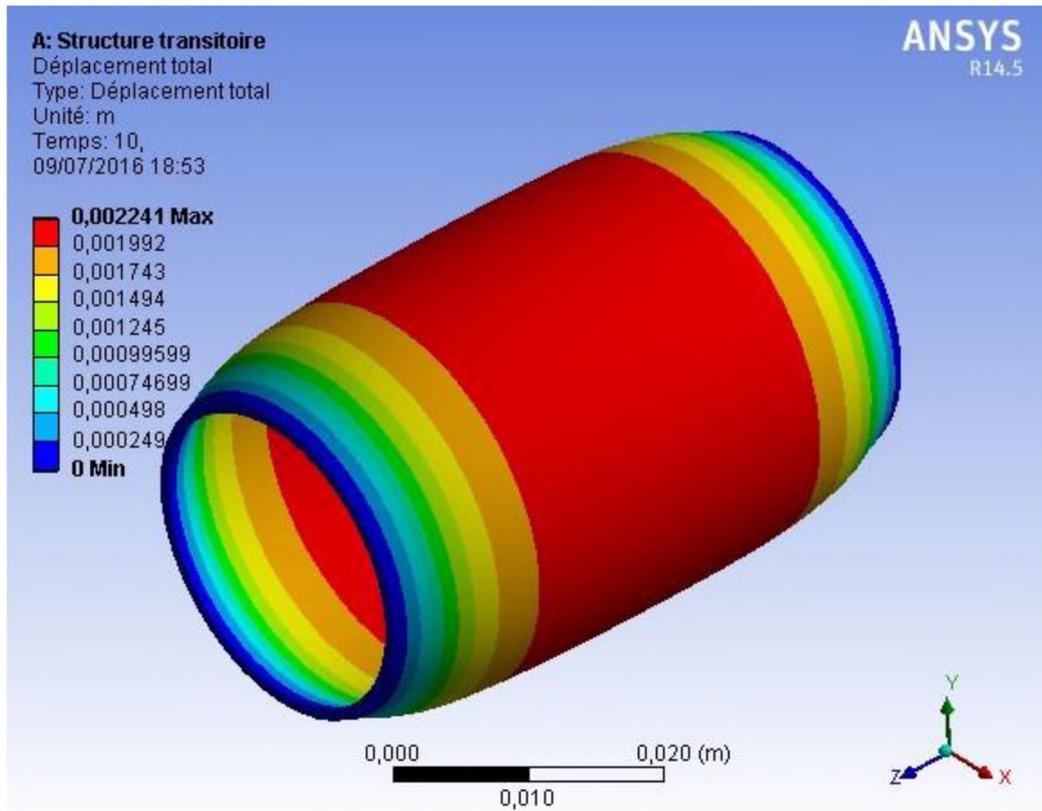


Figure 3-6 : Déplacement total de l'artère

Conclusion

L'application IFS réalisées a montré les possibilités qu'offre le module IFS sous le logiciel ANSYS. On a vérifié que le solveur en mode structure dynamique et calcul fluide instationnaire convergeait vers la solution obtenue de manière transitoire pour la structure et transitoire pour le fluide. Ce cas-test tridimensionnel mis à l'épreuve le coupleur fluide-structure. On a vu que les grands déplacements d'une artère fixé à ses deux extrémités et subissant un courant sinusoïdale étaient bien supportés.

Conclusion Générale

A l'heure actuelle, les codes Navier-Stokes sont capables d'aborder des problèmes fluides à géométrie compliquée et à fort nombre de Reynolds. L'évolution des moyens de calcul permet d'envisager une modélisation fidèle de phénomènes physiques de plus en plus complexes. Cela conduit différentes disciplines à se rapprocher et à échanger leurs connaissances et techniques. Parmi ces domaines multidisciplinaires, la mécanique prenant en compte les interactions fluide-structure, communément appelée IFS, suscite un grand intérêt auprès de la communauté scientifique.

Une recherche non-exhaustive des travaux réalisés en IFS a permis d'avoir une vue générale des outils et méthodes utilisées. Les différents algorithmes de couplage ont été analysés et évalués. Ne pouvant nous tourner vers un code monolithique, trop rigide, les quatre éléments constitutifs d'un code IFS ont pu être abordés.

Tous les exemples précédents nous ont montré le succès rencontré par cette discipline. Celui-ci est dû en partie au développement de la simulation numérique en général et des performances des calculateurs. L'apparition du calcul parallèle dans les années 1970 a rendu possible le couplage de différents codes. L'engouement du domaine scientifique pour cette discipline est aussi dû au fait que la simulation expérimentale coûte très cher. Les exemples donnés précédemment sont très complexes. Les expériences en sont d'autant plus coûteuses. La simulation numérique ne remplace évidemment pas l'expérimentation mais permet souvent de réduire les cas-tests expérimentaux et donc le coût total. L'interaction fluide-structure d'un point de vue numérique a donc connu un fort essor dû à la pression des industriels ces dernières années.

Bibliographie

- [1] Sathe, S., Benney, R., Charles, R., Doucette, E., Miletti, J., Senga, M., Stein, K., and Tezduyar, T. E. Fluid-structure interaction modeling of complex parachute designs with the space-time finite element techniques. *Computers & Fluids* 36 (2007), 127–135. 5
- [2] Stein, K., Benney, R., Tezduyar, T., and Potvin, J. Fluid-structure interactions of a cross parachute : numerical simulation. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 191 (2001), 673–687. 5, 21
- [3] Braun, A. L., and Awruch, A. M. Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models : Application to the Guama River Bridge (Para State, Brazil). *Finite Elements in Analysis and Design* 44 (2008), 105–122. 7
- [4] Frandsen, J. B. Numerical bridge deck studies using finite elements. Part I : flutter. *Journal of Fluids and Structures* 19 (2004), 171–191. 7
- [5] Robbe, M. F., Lepareux, M., Treille, E., and Cariou, Y. Numerical simulation of a Hypothetical Core Disruptive Accident in a small-scale model of a nuclear reactor. *Nuclear Engineering and Design* 223 (2003), 159–196. 7
- [6] Zhang, R. J., Wang, W. Q., Hou, S. H., and Chan, C. K. Seismic analysis of nuclear reactor core. *Computers and Structures* 79 (2001), 1395–1404. 7
- [7] Longatte, E., Bendjeddou, Z., and Souli, M. Methods for numerical study of tube bundle vibrations in cross-flows. *Journal of Fluids and Structures* 18(2003) 513-528.7
- [8] Molin, B. *Hydrodynamique des structures offshore*. Editions TECHNIP, 2002.10,206
- [9] Paidoussis, M. P. *Fluid-Structure Interactions. Volume 1 : Slender Structure & Axial Flow*. Academic Press, 1998. 10
- [10] Paidoussis, M. P. *Fluid-Structure Interactions. Volume 2 : Slender Structure & Axial Flow*. Academic Press, 2004. 10
- [11] Turnock, S. R., and Wright, A. M. Directly coupled fluid structural model of a ship rudder behind a propeller. *Marine Structures* 13 (2000), 53–72. 10
- [12] Greco, M., Landrini, M., and Faltinsen, O. M. Impact flows and loads on ship-deck structures. *Journal of Fluids and Structures* 19 (2004), 251–275. 10
- [13] Farnell, D. J. J., David, T., and Barton, D. C. Numerical model of selfpropulsion in a fluid. *Journal of the royal society Interface* 2 (2005), 79–88. 10

- [14] Pedley, T. J., and Hill, S. J. Large-amplitude undulatory fish swimming : fluid mechanics coupled to internal mechanics. *The Journal of Experimental Biology* 202 (1999), 3431–3438. **10**
- [15] Leroyer, A., and Visonneau, M. Numerical methods for RANSE simulations of a self-propelled fish-like body. *Journal of Fluids and Structures* 20 (2005), 975–991. **11, 137**
- [16] Leroyer, A., and Visonneau, M. Simulation d'un robot-anguille auto-propulsée par résolution des équations de Navier-Stokes. *Mécanique et Industries* 7 (2006), 189–199. **11, 137**
- [17] Boyer, F., and Alamir, M. Robot anguille sous-marin en 3D. *Techniques de l'Ingénieur* 7 (2006), 1–32. **11, 137**
- [18] Hrona, J., and Madlikb, M. Fluid-structure interaction with applications in biomechanics. *Nonlinear Analysis : Real World Applications* 8 (2007), 1431–1458. **11**
- [19] Liu, W. K., Liu, Y., Farrell, D., Zhang, L., Wang, X. S., Fukui, Y., Patankar, N., Zhang, Y., Bajaj, C., Lee, J., Hong, J., Chen, X., and Hsu, H. Immersed finite element method and its applications to biological systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 195 (2006), 1722–1749. **11**
- [20] Liu, D., and Lin, P. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. *Journal of Computational Physics* 227 (2008), 3921–3939. **11**
- [21] Sreejith, B., Jayaraj, K., Ganesan, N., Padmanabhan, C., Chellapandi, P., and Selvaraj, P. Finite element analysis of fluid-structure interaction in pipeline systems. *Nuclear Engineering and Design* 227 (2004), 313–322. **11**
- [22] Zhang, A., and Suzuki, K. A comparative study of numerical simulations for fluid-structure interaction of liquid-filled tank during ship collision. *Ocean Engineering* 34 (2007), 645–652. **11**
- [23] Aliabadi, S., Johnson, A., and Abedi, J. Comparison of finite element and pendulum models for simulation of sloshing. *Computers & Fluids* 32 (2003), 535–545. **11**
- [24] Berglund, M. D. The Boeing Delta IV launch vehicle-pulse-settling approach for second-stage hydrogen propellant management. *Acta Astronautica* 61 (2007), 416–424. **11**
- [25] Farhat, C., Geuzaine, P., and Brown, G. Application of a three-field nonlinear fluid-structure formulation to the prediction of the aeroelastic parameters of an F-16 fighter. *Computers & Fluids* 32 (2003), 3–29. **13**
- [26] Girodroux-Lavigne, P., Grisval, J. P., Guillemot, S., Henshaw, M., Karlsson, A., Selmin, V., Smith, J., Teupootahiti, E., and Winzell, B. Comparison of static and dynamic fluid-structure interaction solutions in the case of

a highly flexible modern transport aircraft wing. *Aerospace Science and Technology* 7 (2003), 121–133. 13

[27] Ezcurra, A., Elejabarrieta, M. J., and Santamaria, C. Fluid-structure coupling in the guitar box : numerical and experimental comparative study. *Applied Acoustics* 66 (2005), 411–425. 14

[28] Becache, E., Chaigne, A., Derveaux, G., and Joly, P. Numerical simulation of a guitar. *Computers and Structures* 83 (2005), 107–126. 14

[29] J. Morand et R. Ohayon : Fluid-structure interaction : applied numerical methods. Wiley, 1995.

[30] J.-F. Sigrist : Interaction fluide-structure - Analyse vibratoire par éléments finis. Technosup. Ellipses Marketing, 2011.

[31] K. Morinishi et T. Fukui : An eulerian approach for fluid-structure interaction Problems. *Computers & Fluids*, 35:92 – 98, 2012.

[32] I. Dermidžić et S. Muzaferiya : Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 125:235–255, 1995.

[33] N. M. Diniz Dos Santos : Numerical methods for fluid-structure interaction problems with valves. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007.

[34] N. Aquelet : Modélisation de l'impact hydrodynamique par un couplage fluide-structure. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.

[35] L. Zhang et M. Gay : Immersed finite element method for fluid-structure interactions. *Journal of Fluids and Structures*, 23:839 – 857, 2007.

[36] B. Hübner, E. Walhorn et D. Dinkler : A monolithic approach to fluid–structure interaction using space–time finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193:2087–2104, 2004.

[37] C. Kassiotis : Nonlinear Fluid-Structure Interaction : a Partitioned Approach and its Application Through Component Technology. Thèse de doctorat, Université Paris Est - école doctorale MODES, 2009.

[38] S. Piperno, C. Farhat et B. Larrouturou : Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems Part I : Model problem, theory and two-dimensional application. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 124(1-2):79 – 112, 1995.

[39] C. Farhat, P. Geuzaine et G. Brown : Application of a three-field nonlinear fluid-structure formulation to the prediction of the aeroelastic parameters of an F-16 fighter. *Computers & Fluids*, 32:3 – 29, 2003.

[40] P. Le Tallec et J. Mouro : Structures en grands déplacements couplées à des fluides en mouvement. Rapport de recherche 2961, INRIA, 1996.

[41] S. Piperno : Simulation numériques des phénomènes d'interaction fluide-structure. Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts et Chaussées, 1995.

- [42] C. Farhat et M. Lesoinne : Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 182:499–515, 2000.
- [43] S. Piperno, B. Larroutou et M. Lesoinne : Analysis and compensation of numerical damping in a one dimensional aeroelastic problem. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 6:157 – 174, 1996.
- [44] J.-F. Sigrist : Méthodes numériques de calculs couplés fluide/structure : Cas du fluide s’écoulant. In *Techniques de l’Ingénieur*. Techniques de l’Ingénieur, 2010.
- [45] C. Yvin : Couplage fluide-structure par une chaîne de calculs open-source. Thèse de Master, ENSIETA - Sirehna, 2010.
- [46] M. Benaouicha : Contribution au développement d’algorithmes de couplage en interaction fluide-structure. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2007.
- [47] P. Causin, J.-F. Gerbeau et F. Nobile : Added-mass effect in the design of partitioned algorithms for fluid-structure problems. Rapport de recherche RR-5084, INRIA, 2004.
- [48] M. A. Fernández, J.-F. Gerbeau et C. Grandmont : A projection semi-implicite scheme for the coupling of an elastic structure with an incompressible fluid. Rapport de recherche RR-5700, INRIA, 2005.
- [49] M. A. Fernández, J.-F. Gerbeau et C. Grandmont : A projection algorithm for fluid/structure interaction problems with strong added-mass effect. *Comptes Rendus Mathématique*, 342:279 – 284, 2006.
- [50] J.-F. Gerbeau et M. Vidrascu : A quasi-newton algorithm based on a reduced model for fluid/structure interaction problems in blood flows. Rapport de recherche RR-4691, INRIA, 2003.
- [51] S. Piperno : Explicit-implicit fluid-structure staggered procedures with a structural predictor and fluid subcycling for 2D inviscid aeroelastic simulations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 25:1207 – 1226, 1997.
- [52] S. Piperno et C. Farhat : Design of efficient partitioned procedures for the transient solution of aeroelastic problem. *Revue Européenne des Eléments Finis*, 9(6-7):655–680, 2000.
- 145 -Bibliographie
- [53] S. Piperno et C. Farhat : Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems - Part II : energy transfer analysis and three-dimensional applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(24-25):3147 – 3170, 2001.
- [54] S. Piperno, C. Farhat et B. Larroutou : Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems Part I : Model problem, theory and two-dimensional application. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 124(1-2):79 – 112, 1995.
- [55] C. Farhat, C. Degand, B. Koobus et M. Lesoinne : Torsional springs for two-dimensional dynamic unstructured fluid meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 163:231–245, 1998.
- [56] N. Maman et C. Farhat : Matching fluid and structure meshes for aeroelastic computations : A parallel approach. *Computers & Structures*, 54(4):779 – 785, 1995.
- [57] ANSYS: ANSYS Coupled Analysis Guide. ANSYS, 2001.

- [58] A. Boer, A. Zuijlena et H. Bijla : Review of coupling methods for non-matching meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(8):1515 – 1525, 2007.
- [59] A. Ducoin : Etude expérimentale et numérique du chargement hydrodynamique des corps portants en régime transitoire avec prise en compte du couplage fluide structure. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [60] J. Donea, A. Huerta, J.-P. Ponthot et A. Rodriguez-Ferran : *Encyclopedia of Computational Mechanics*, vol. 1, chap. 14 - Arbitrary Lagrangian Eulerian Methods, p. 413 – 437. John Wiley & Sons, 2004.
- [61] M. A. Fernández : Modèles simplifiés d'interaction fluide-structure. Thèse de Doctorat, Université Paris IX Dauphine, 2001.
- [62] J. Ferziger et M. Peric : *Computational method for fluid dynamics*. Springer-Verlag, 2002.
- [63] H. Guillard et C. Farhat : On the significance of the geometric conservation law for flow computations on moving meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190:1467 – 1482, 2000.
- [64] M. F. Barone et J. L. Payne : Methods for simulation-based analysis of fluid-structure interaction. Rapport de recherche SAND2005-6573, Sandia National Laboratories, 2005.
- [65] D. Boffi et L. Gastaldi : Stability and geometric conservation laws for ALE formulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(42 - 44):4717 – 4739, 2004.
- [66] W. Cao, W. Huang et R. D. Russell : A moving mesh method based on the geometric conservation law. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 24:118 – 142, 2002.
- [67] J. Penrose, D. Hose, C. Staples, I. Hamill, I. Jones et D. Sweeney : Fluid structure interactions : coupling of CFD and FE. In 18th CAD-FEM User's Meeting - International Congress on FEM Technology, 2000.
- [68] B. Koobus et C. Farhat : Second-order time-accurate and geometrically conservative implicit schemes for flow computations on unstructured dynamic meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 170:103 – 129, 1999.
- [69] P. Geuzaine, C. Grandmont et C. Farhat : Design and analysis of ALE schemes with provable second order time accuracy for inviscid and viscous flow simulations. *Journal of Computational Physics*, 191:206–227, 2003.
- [70] C. Farhat, P. Geuzaine et C. Grandmont : The discrete geometric conservation law and the nonlinear stability of ALE schemes for the solution of flow problems on moving grids. *Journal of Computational Physics*, 174:669 – 694, 2001.
- [71] M. Robin : Validation d'une chaîne de calcul couplé fluide-structure pour le dimensionnement des structures sous écoulement. Thèse de Master, INP ENSE3 - DCNS, 2013.
- [72] G. Markou, Z. Mouroutis, D. Charmpis et P. M. : The ortho-semi-torsional (OST) spring analogy method for 3D mesh moving boundary problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196:747 – 765, 2007.
- [73] M. Picard : Développement et validation d'algorithmes de calcul pour simulations couplées fluide/structure. Thèse de Master, ENSTA - DCNS.

- [74] T. Tezduyar, S. Sathe, R. Keedy et K. Stein : Space-time finite elements techniques for computation of fluid-structure interactions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195:2002–2027, 2006.
- [75] M. Benaouicha, J.-A. Astolfi, A. Ducoin, S. Frikha et O. Coutier-Delgosha : A numerical study of cavitation induced vibration. In *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference*, vol. 4, p. 35 – 42, Etats-Unis, 2010.
- [76] Y. Young : Time-dependent hydroelastic analysis of cavitating propulsors. *Journal of Fluids and Structures*, 23(2):269 – 295, 2007.
- [77] Y. Young, M. Motley et R. Yeung : Hydroelastic response of wind or tidal turbines. In *Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE*, num. OMAE2009-80087, 2009.
- [78] Y. Young : Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers. *Journal of Fluids and Structures*, 24(6):799 – 818, 2008.
- [79] H. Liu et Y. Young : Static divergence of self-twisting composite rotors. *Journal of Fluids and Structures*, 26:841 – 847, 2010.
- [80] A. Ducoin et Y. Young : Hydroelastic response and stability of a hydrofoil in viscous flow. In *Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11*, Allemagne, 2011.
- [81] X. He, Y. Hong et R. Wang : Hydroelastic optimisation of a composite marine propeller in a non-uniform wake. *Ocean Engineering*, 39:14 – 23, 2012.
- [82] N. Mulcahy, B. Prusty et C. Gardiner : Flexible composite hydrofoils and propeller blades. In *International Maritime Conference*, p. 27 – 29, Australie, 2010.
- [83] N. M. Diniz Dos Santos : Numerical methods for fluid-structure interaction problems with valves. *Thèse de Doctorat*, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007.
- [84] A. Ducoin : Etude expérimentale et numérique du chargement hydrodynamique des corps portants en régime transitoire avec prise en compte du couplage fluide structure. *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [85] E. Goncalves et R. Fortes-Patella : Numerical study of cavitating flows with thermodynamic effect. *Computers & Fluids*, 39(1):99 – 113, 2010.