

Validation numérique d'un modèle aérodynamique : application à une aile d'avion

Validation of numerical model in aerodynamics : application to aircraft's wing

R. El Maani¹, B. Radi², A. El Hami³

¹LOFIMS, INSA de Rouen, France, rabii.el_maani@insa-rouen.fr

²LIMII, FST Settat, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

³LOFIMS, INSA de Rouen, France, abdelkhalak.elhami@insa-rouen.fr

RÉSUMÉ. Le couplage fluide-structure peut se produire dans de nombreux domaines d'ingénierie, et il a une considération cruciale dans la conception de nombreux systèmes d'ingénierie ; par exemple, la stabilité et la réponse des ailes d'avions dans l'industrie aéronautique et de la réponse des ponts et des bâtiments de grande hauteur au vent dans le génie civil. Ces problèmes sont souvent trop complexes pour les résoudre analytiquement et ils doivent donc être analysés par des simulations numériques. Ce papier vise à contribuer à la discussion et la comparaison de deux différentes méthodes de discréétisation utilisées dans les solveurs de la dynamique des fluides (CFD) pour la simulation des charges aérodynamiques autour de l'aile ONERA M6. On compare l'efficacité numérique des deux codes de simulations (ANSYS/Flotran et ANSYS/Fluent), basés sur la méthode des éléments finis (MFE) et la méthode des volumes finis (MFV) respectivement, qui chacun sera couplé avec un solveur de la dynamique des structures (ANSYS/Mechanical) pour décrire le comportement aéroélastique de l'aile ONERA M6 dû à la charge aérodynamique du flux d'air.

ABSTRACT. Fluid structure coupling can occur in many fields of engineering, and it has a crucial consideration in the design of many engineering systems; for example, stability and response of aircraft wings in aerospace industry and response of bridges and tall buildings to winds in civil engineering. These problems are often too complex to solve analytically and so they have to be analyzed by means of numerical simulations. This paper aims to contribute to the discussion on the efficiency of two different discretization methods used as computational fluid dynamics (CFD) solvers for the simulation of the airflow's aerodynamic loading around the ONERA M6 wing. We compare the accuracy and computational efficiency of two simulation codes (ANSYS/Flotran and ANSYS/Fluent) based on the Finite Element Method (FEM) and the Finite Volume Method (FVM) respectively, and then coupled with a computational structure dynamics solver (ANSYS/Mechanical) to describe the aeroelastic behavior of the wing due to aerodynamic loads.

MOTS-CLÉS. Couplage fluide-structure, aérodynamique, aéroélastique, éléments finis, volumes finis.

KEYWORDS. Fluid/structure coupling, aerodynamic, aeroelastic, finite element, finite volume.

1. Introduction

Les simulations de problèmes multi-physiques sont devenues plus importantes dans le domaine des analyses et simulations numériques. Pour résoudre de tels problèmes d'interaction, les équations qui décrivent la dynamique des fluides et la mécanique des structures doivent être couplées. Bien que les solveurs fluides et structures puissent être utilisés pour résoudre ces domaines respectifs. L'utilisation de la simulation numérique peut réduire la quantité de temps consacrée à l'utilisation de méthodes expérimentales pour évaluer un grand nombre d'alternatives conceptuelles et une meilleure compréhension du problème est obtenue grâce à une approche de calcul en raison de la quantité accrue d'informations recueillies lors du calcul (Dubini G., Pietrabissa R., and Montecchi F. M., 1985).

Cet article a pour but d'analyser le phénomène d'interaction fluide-structure d'une aile ONERA M6 tridimensionnelle sous écoulement d'air afin de déterminer sa déformation déduite des charges

aérodynamiques générées. Le fluide et la structure ont été modélisés indépendamment et ont échangé des informations selon leurs interfaces afin d'obtenir des solutions aéroélastiques. Le fluide a été modélisé à l'aide de deux solveurs de dynamique des fluides différents basées sur la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis, la structure a été modélisée par un solveur de dynamique des solides et un couplage a été effectué pour une résolution aéroélastique. Le code ANSYS est utilisé comme outil de modélisation pour créer l'ensemble du domaine de calcul et du maillage de volume. L'écoulement du fluide est résolu séparément à l'aide de deux solveurs, Ansys/Fluent © et Ansys/Flotran ©, et couplé avec un solveur de dynamique des structures ANSYS/Mechanical © en utilisant une approche implicite partitionnée (Souli M., and Benson D. J., 2010, Huang S., Li R., and Li Q. S., 2013).

2. Problème d'interaction fluide-structure

Un problème général d'interaction fluide-structure consiste en la description des champs solide et fluide, des conditions de l'interface conjointe et des conditions aux limites restantes. Dans cet article, on se limite à des écoulements incompressibles, ce qui est un choix raisonnable pour de nombreuses applications d'ingénierie.

2.1. Équations pour le fluide

La partie fluide du problème IFS est régie par les équations de Navier-Stokes pour un écoulement incompressible qui peuvent être écrites sur le domaine spatial de la mécanique des fluides comme. (Patankar S. V., 1980, Ferziger J. H., and Peric M., 2002) :

$$\begin{aligned} \frac{(\partial v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v - \sigma) - \rho f &= 0 \\ \nabla \cdot v &= 0 \end{aligned} \quad [1]$$

où ρ , v , et f sont la densité, la vitesse et la force externe, et σ le tenseur des contraintes.

2.2. Équations pour la structure

L'équation régissant la réponse dynamique d'une structure ou d'un milieu élastique peut être écrite sous forme matricielle (Chopra A., 2001) comme :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad [2]$$

où m est la matrice masse de la structure, \ddot{u} le vecteur d'accélération, c la matrice d'amortissement de la structure, \dot{u} le vecteur vitesse, k la matrice de rigidité de la structure, u le vecteur déplacement et f le vecteur des forces en fonction du temps.

2.3. Conditions d'interface

Les conditions principales à l'interface sont les conditions de couplage dynamique et cinématique. L'équilibre des forces exige l'égalité des vecteurs de contraintes comme suit :

$$\sigma^f \cdot n = \sigma^s \cdot n \quad \forall x \in \Gamma^{fsi} \quad [3]$$

aussi l'égalité des vitesses normales à l'interface :

$$v \cdot n = \frac{\partial u}{\partial t} \cdot n \quad \forall x \in \Gamma^{fsi} \quad [4]$$

3. Validation numérique

3.1. L'aile Onera M6

L'aile ONERA M6 a été conçu par Bernard Monnerie et ses collègues en 1972, dans le cadre de la coopération au sein de l'AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development), pour servir de support expérimental à des études d'écoulement tridimensionnels à des vitesses transsoniques et à des nombres de Reynolds élevés et pour la validation des Simulation numérique des écoulements (conditions représentatives de vols réels d'avions militaires et civils). Elle a un profil symétrique et ses dimensions sont présentées dans la figure 1.



Figure 1. L'aile M6 dans la soufflerie S2MA de l'ONERA

SWEPT WING M6

Aspect ration $A = 3.8$
 Taper ration $\lambda = 0.56$
 Sweep angle $\Lambda_{25\%} = 26.7^\circ$

ROWS OF PRESSURE TAPS

N°	y/b	upper	under
1	0.20	23	11
2	0.44	23	11
3	0.65	23	11
4	0.80	23	11
5	0.90	31	14
6	0.95	31	14
7	0.99	31	14

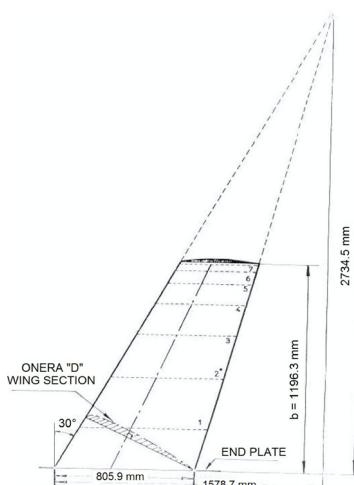


Figure 2. Dimensions de l'aile ONERA-M6

Les résultats de ces essais ont été consignés en 1979 dans un rapport AGARD par Volker Schmitt et François Charpin (Schmitt V., and Charpin F., 1979). La base de données des résultats de l'aile ONERA-M6 a été utilisée des centaines de fois pour valider des logiciels de CFD et est toujours employée dans le monde entier. C'est un des cas tests les plus populaires, particulièrement adapté à la compréhension et à l'évaluation des modèles de transition laminaire-turbulent, d'interaction onde de choc-couche limite, de décollement.., phénomènes caractéristiques de ce qui se produit sur les ailes à l'approche de la vitesse du son.

3.2. Analyse aérodynamique de l'aile ONERA M6

L'analyse aérodynamique a été effectuée par le solveur ANSYS/Fluent à un nombre de Mach (M) 0.8395 à un angle d'attaque (α) 3.06° et un nombre de Reynolds (Re) $11.72E6$.

On valide nos résultats de simulation en comparant ceux trouvés par ANSYS/Fluent avec les données expérimentales pour l'aile Onera M6. Nous traçons le coefficient de pression à différents contours de plans

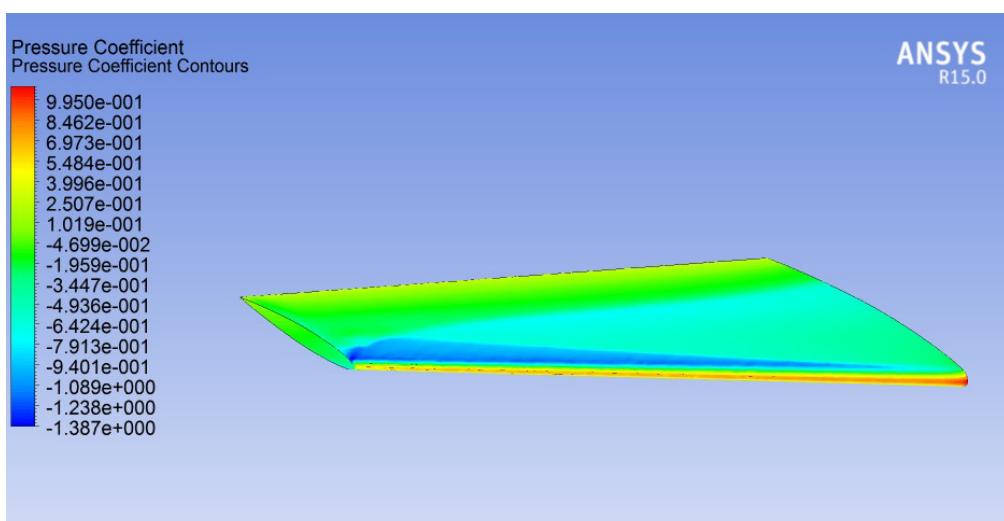


Figure 3. Distribution de la pression sur l'aile

de coupe de l'aile. On compare les résultats dans les endroits $y/b = 0.2, 0.44, 0.65, 0.9$ et 0.95 entre les résultats simulés et les données expérimentales (Schmitt V., and Charpin F., 1979) pour un premier maillage grossier et un autre maillage plus raffiné et un bon accord a été observé entre les résultats trouvés (voir figure 4).

La distribution de la pression sur la surface supérieure de l'aile est montré dans la figure 3. Un choc violent a été observé sur le bord d'attaque près de l'extrémité fixe et ce choc obtenu s'affaiblit près de celle libre de l'aile.

3.3. Analyse aéroélastique de l'aile ONERA M6

Dans cette section, nous considérons la déformation due à la charge aérodynamique de l'aile en effectuant un couplage fluide structure one-way pour une structure statique. Après avoir développé la charge aérodynamique sur l'aile en utilisant ANSYS/Fluent, les pressions sur les zones en contact sont passés en charges de pression à ANSYS/Mechanical pour déterminer les contraintes et la déformation sur l'aile. La configuration de la structure considérée est constituée d'un alliage d'aluminium dont les propriétés matérielles sont :

Module d'Young	$E = 7.1e10 \text{ Pa}$
Densité	$\rho_s = 2770 \text{ kg.m}^{-3}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.32$

Le déplacement calculé de l'aile pour les deux cas est présenté dans le tableau 1. On peut clairement voir que la pression de fluide calculée a été transférée avec succès pour déformer le maillage volumique CSD.

Déplacement total (m)	
ANSYS Fluent	ANSYS Flotran
0.0705	0.0690

Tableau 1. Déplacement total de l'aile

Les résultats de l'analyse modale précontrainte sont présentés dans le tableau 2. Ils présentent les quatre premières formes de mode avec ses valeurs de fréquences propres.

Modes propres	Fréquences propres (ω_n)	
	ANSYS Fluent	ANSYS Flotran
R_1	31.414	30.904
R_2	103.338	101.46
R_3	142.073	140.49
R_4	232.695	227.55

Tableau 2. Fréquences propres de l'aile

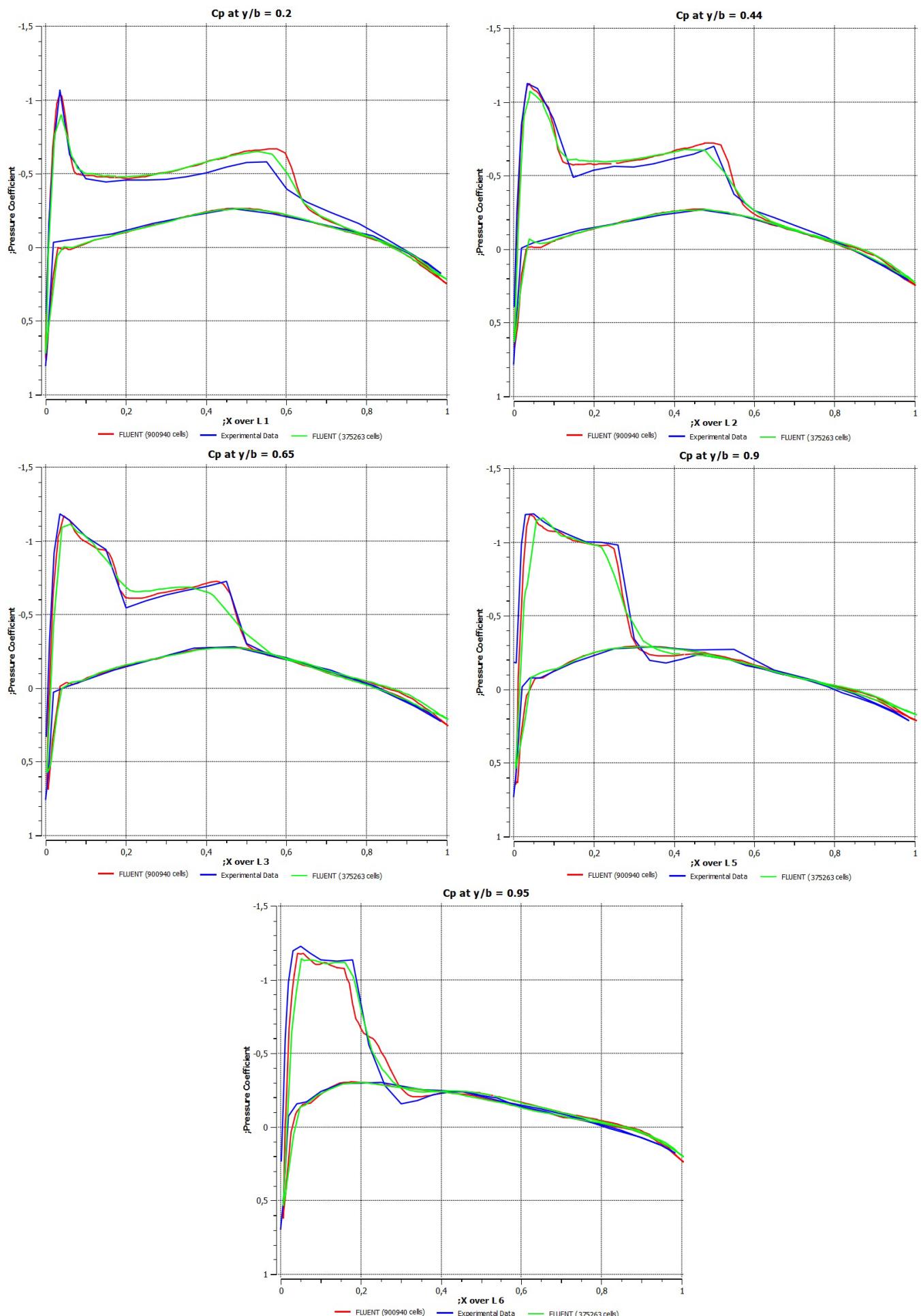


Figure 4. Répartition du Coefficient de pression sur le contour des plans de coupe de l'aile M6

4. Conclusion

Des problèmes d'interaction entre un fluide et une structure ont été résolus par rapport à l'aile ONERA M6 sous écoulement d'air. On a d'abord commencé par une validation des données expérimentales du coefficient de pression sur l'aile dans différentes sections de surface avec celles calculées par ANSYS/Fluent et un bon accord a été révélé. Ensuite, le fluide a été modélisé en utilisant deux méthodes d'approximation différentes utilisées comme solveurs de dynamique des fluides basées sur les méthodes de volumes finis (FV) et éléments finis (FE) et les deux approches ont été couplées avec un solveur de dynamique des structures (ANSYS/Mécanique) afin de comparer la déformation de la structure pour les deux charges aérodynamiques calculées. La solution entre les deux méthodes de couplage est représentée et ensuite une analyse modale précontrainte a été conduite pour déterminer les fréquences naturelles et leurs formes modales respectives.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier “Erasmus Mundus Programme, Action 2 - STRAND 1, Lot 1, North Africa Countries” pour leur soutien financier pour la réalisation de ce travail.

Bibliographie

- YUN Z., and HUI Y., Coupled fluid structure flutter analysis of a transonic fan. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24, 258–264, 2011.
- IWANOWSKI B., GLADSO R., and LEFRANC M., Wave-in-deck load on a jacket platform-CFD derived pressures and non-linear structural respons, 28th OMAE International conference, Hawaii, USA, May 31–June 5, 2009.
- ANAGNOSTOPOULOS S. A., Dynamic response of offshore platforms to extreme waves including fluid structure interaction. *Eng. Struct.*, 4, 179–185, July, 1982.
- DUBINI G., PIETRABISSA R., and MONTEVECCHI F. M., Fluid structure interaction problems in bio-fluid mechanics : a numerical study of the motion of an isolated particle freely suspended in channel flow. *Med. Eng. Phys.*, 17, 609–617, 1985.
- PATANKAR S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing, New York, USA, 1980.
- FERZIGER J. H., and PERIC M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin, Germany, 2002.
- CHOPRA A., Dynamics of Structures, Pearson Prentice Hall, 2nd ed., 2001.
- SOULI M., and BENSON D. J., Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Fluid-Structure Interaction, ISTE Ltd and John Wiley Sons, 2010.
- HUANG S., LI R., and LI Q. S., Numerical simulation on fluid-structure interaction of wind around super-tall building at high reynolds number conditions. *Structural Engineering and Mechanics. An Int'l Journal*, 46(2), 197–212, 2013.
- SCHMITT V., and CHARPIN F., Pressure distributions on the onera m6 wing at transonic mach numbers, Agard-ar-138-experimental data base for computer program assessment, 1979.