

Comparaison des méthodes numériques stationnaire et instationnaires dans la prédiction d'écoulements décollés - Application à un ventilateur subsonique d'auto-rotation

S. COURTY-AUDREN^{a, b}, X. CARBONNEAU^a, N. BINDER^a, F. CHALLAS^b

a. Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)

b. SAFRAN Technofan

Résumé :

Le fonctionnement d'auto-rotation d'une turbomachine est caractérisé par une forte désadaptation des aubages qui entraîne des décollements massifs au niveau de l'intrados des pales. La présente étude aborde les problèmes liés à la simulation de ce type d'écoulements et propose une comparaison de différentes méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes. En particulier, les approches stationnaire, harmonique et instationnaire sur 360° sont comparées au niveau de leur capacité à calculer un point de fonctionnement donné ainsi que sur l'analyse monodimensionnelle. La configuration d'auto-rotation étudiée fait intervenir une instabilité aérodynamique non corrélée à la fréquence de passage des pales. Cette dernière a été mise en évidence par un calcul instationnaire complet sur 360°. La convergence des calculs stationnaire et harmonique n'étant pas rigoureusement atteinte, aucune analyse globale ni locale n'est donnée pour ces simulations.

Mots clefs : Écoulements décollés ; Méthodes instationnaires ; Auto-rotation

Introduction

L'étude est motivée par une nécessité industrielle de générer davantage de puissance électrique à bord des avions de nouvelle génération. En effet, au cours de ces dernières décennies, les besoins de puissance électrique ont été fortement accrus notamment en raison de la croissance du nombre de systèmes électroniques embarqués. Le fonctionnement d'auto-rotation du ventilateur étudié, analogue à celui d'une éolienne, est susceptible de constituer une source de puissance additionnelle. Dans cette étude, les méthodes numériques stationnaire, harmonique et instationnaire sur 360° sont comparées au niveau de leur prédictivité à décrire des écoulements décollés caractéristiques de ce type de fonctionnement. La première partie permet de positionner notre étude par rapport aux études antérieures portant sur la même problématique. Les caractéristiques géométriques du ventilateur étudié ainsi que son point de fonctionnement en windmilling sont abordés dans la deuxième partie. Ensuite, les méthodologies des approches numériques sont présentées dans la troisième partie. Les résultats des simulations sont comparés et analysés dans la quatrième partie. Enfin, les axes d'études à venir seront présentés.

1 Contexte de l'étude

Les phénomènes de décollement autour de profils portants apparaissent lorsque l'incidence de l'écoulement s'éloigne trop fortement de sa valeur de conception. L'importante désadaptation de l'aubage qui en résulte entraîne un décollement (total ou partiel) de la couche limite ainsi que le décrochage du profil. La littérature propose pour des travaux d'écoulements décollés des méthodologies LES, DES et DNS en se limitant, le plus souvent, à des géométries académiques 2D, (cylindre, profil Naca) [6, 9].

Dans le domaine des turbomachines, les décollements sont à l'origine des phénomènes de pompage des

compresseurs et font, à ce titre, l'objet de nombreuses études, majoritairement des simulations numériques. Ces dernières sont effectuées dans le but d'en comprendre l'origine physique afin de déboucher sur des méthodologies de contrôle. Dans le cas de l'autorotation, l'incidence est fortement négative à l'entrée des étages mobiles et statiques. Les forts décollements qui en résultent sont donc positionnés sur l'intrados des aubes [3, 4, 7].

Ils peuvent être abordés à l'aide des triangles de vitesse et de l'étude de D. Prasad [7]. Cette représentation plane des écoulements permet d'expliquer les forts décollements typiquement observés en autorotation. La figure 1 est un exemple de triangle de vitesse en configuration d'autorotation. L'incidence relative en entrée de la roue, donnée par l'angle β_1 , varie en fonction du coefficient de débit défini par :

$$\phi = \frac{V}{U} \quad (1)$$

Ces deux paramètres sont reliés par l'équation suivante :

$$\beta_1 = \frac{\Pi}{2} - \arctan \phi \quad (2)$$

Par ailleurs, la figure 1 met en évidence que les sens de rotation sont identiques en situation d'autorotation et en fonctionnement normal. Enfin, D. Prasad [7] montre dans son étude que l'angle β_2 de l'écoulement est quasiment confondu avec l'angle géométrique de pale, ce qui provoque la forte désadaptation du stator et le décollement massif de l'intrados de cet aube. En 2010, D. Prasad [7] utilise

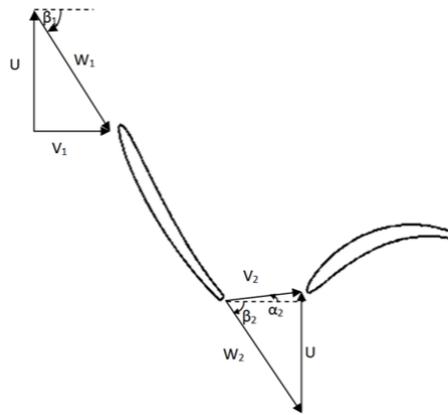


FIGURE 1 – Triangles des vitesses d'autorotation

une approche RANS couplée au modèle $k-\omega$ de Wilcox [8] pour simuler des écoulements d'un turbofan d'autorotation. D'un point de vue qualitatif, les résultats des simulations mettent en évidence les forts décollements à l'intrados des aubes et plus particulièrement dans les zones proche carter. Ces derniers apparaissent au delà de 40% de hauteur de veine dans le rotor. Dans le stator, les décollements sont présents dès 20% de hauteur et peuvent bloquer jusqu'à la moitié du canal dans la région proche carter. Plus quantitativement, la comparaison numérique\expérimental des points de fonctionnement exprimés en variables coefficient de débit \coefficient de pression, montre que les simulations stationnaires RANS sont capables de restituer la physique des écoulements d'autorotation et d'en calculer correctement les performances globales.

Dans son mémoire de thèse, A. Gill [4] étudie un compresseur axial multiétages en situation d'autorotation. Il met en évidence que, pour les faibles valeurs de coefficient de débit ϕ , les résultats expérimentaux et numériques RANS sont relativement proches. Pour les fortes valeurs de ce paramètre, la confrontation des résultats expérimentaux et numériques met en défaut l'approche stationnaire RANS. L'auteur s'oriente, de fait, vers les méthodes instationnaires. Il choisit les méthodes harmoniques qui permettent de prendre en compte les instationnarités de type interaction rotor\stator. Gill montre que ces dernières

améliorent la prédictivité des calculs en régions proche carter mais que des écarts demeurent au voisinage du moyeu.

G. Dufour [3] analyse l'autorotation d'un turbofan à l'aide de simulations harmoniques [5]. Dans sa configuration, l'auteur montre que les seules instationnarités présentes dans l'écoulement sont de type interaction rotor\stator ce qui rend légitime l'utilisation des méthodes harmoniques. L'auteur met alors en évidence que les profils azimuthaux de pression totale, tracés une corde en aval du stator, se superposent à partir de 3 harmoniques.

Enfin, Y. Bousquet [1] a récemment comparé les approches RANS et URANS chorochronique dans une étude sur les phénomènes de pompage en configuration centrifuge. Le modèle de Spalart-Allmaras est utilisé pour fermer les équations de Navier-Stokes turbulentes. L'auteur analyse 3 points de fonctionnement dont 1 proche pompage pour lequel des décollements sont observés. La comparaison des résultats instationnaires chorochroniques moyennés et des résultats stationnaires montre que la prise en compte des interactions rotor\stator n'a pas d'influence sur les grandeurs globales (taux de compression total-statique). Toutefois, des analyses locales des écoulements, dans des zones de fortes fluctuations (sillages), mettent en évidence les limites des approches stationnaires RANS comparées à l'approche instationnaire chorochronique.

2 Géométrie étudiée

Dans cette partie, les caractéristiques géométriques du ventilateur axial sont présentées. Ce dernier est intégré dans une veine d'air dont le diamètre interne est voisin de 200 mm. Le diamètre du moyeu étant supérieur à 100 mm, la hauteur de la veine d'air est d'environ 100 mm. Il est composé d'un unique étage rotor\stator dont les caractéristiques géométriques et le point de fonctionnement sont présentés dans le tableau 1. Pour des raisons de confidentialité, seuls les ordres de grandeurs y sont reportés. Le

Rayon au carter	Inférieur à 200 mm	Encombrement axial	Env. 250 mm
Rayon au moyeu	Supérieur à 100 mm	Débit masse (windmilling)	Env. 0.3 kg/s
Nombre de pales du stator	23	Taux de détente total/total	Env. 1.012
Nombre de pales du rotor	17	Vitesse de rotation (windmilling)	Env. 630 RPM

TABLE 1 – Caractéristiques géométriques et point de fonctionnement

point de fonctionnement choisi est issu d'une campagne expérimentale réalisée sur le même ventilateur en autorotation. Il correspond à la meilleure incidence relative en entrée du rotor obtenue selon la formule 2. Le dispositif expérimental ainsi que les résultats de cette étude sont présentés dans l'étude de S. Courty [2].

3 Méthodologies numériques

Dans une turbomachine, le mouvement relatif de rotation entre les différentes rangées d'aubes constitue la principale source d'instationnarité. Dans l'approche stationnaire, l'utilisation d'un plan de mélange à l'interface rotor\stator permet de ne modéliser qu'un seul canal. De plus, ces derniers opèrent une moyenne azimuthale pondérée masse qui lisse gradients azimuthaux dus aux sillages. Lorsque les instationnarités sont directement liées au passage des pales, les écoulements possèdent une périodicité spatio-temporelle (chorochronique). Cette dernière permet d'écrire des conditions aux limites périodiques et de conserver la modélisation mono-canal pour les simulations instationnaires. Dans le même contexte (instationnarités aérodynamiques corrélées à la BPF), la méthode NLH permet de conserver la modélisation mono-canal. L'approche NLH décompose les variables de l'écoulement en une moyenne temporelle et en une somme de perturbations instationnaires périodiques. Dans le cas où des instationnarités aérodynamiques non corrélées à la BPF seraient présentes dans l'écoulement, cette dernière décomposition ne serait plus pertinente. Dans un calcul harmonique, les perturbations sont transformées en séries de Fourier dont le nombre d'harmoniques de la fréquence de passage des pales (BPF) est fixé. Par conséquent, ce genre de simulations n'est pertinent qu'en l'absence d'instabilités décorréliées de la

BPF. C'est le cas dans l'étude de Dufour [3] qui démontre que les seules instationnarités présentes sont liées à la BPF, ceci lui permet de mener son étude à l'aide de la méthode NLH.

Dans l'étude présentée ici, la comparaison des méthodes numériques stationnaires et instationnaires dans la prédiction d'écoulements décollés est divisée en deux parties. La première est réalisée en 3D, la seconde sur une coupe 2D prise à 50% de hauteur de veine. Les calculs sont réalisés sans loi de paroi (calculs bas Reynolds).

	Maillage 3D	Maillage 2D
y^+ max	1.33	0.54
Nombre de mailles total	5.5M	2.6M

TABLE 2 – Qualité du maillage 3D

Deux maillages 2D ont été réalisés afin de réduire les temps de calculs de l'étude instationnaire 360. Les calculs harmoniques ont été effectués sur un maillage 2D raffiné qui répond aux recommandations de densité azimutale pour les maillages harmoniques. Une synthèse des calculs est présentée dans le tableau 3.

3D	2D
RANS	URANS 360
1H	
2H	
3H	

TABLE 3 – Cas de calculs

Le code de calcul utilisé dans cette étude est le code commercial FINETM/Turbo développé par NUMECA. Les équations de Navier-Stokes sont résolues pour l'air considéré comme un gaz parfait. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle Spalart-Allmaras. La discrétisation spatiale est réalisée à l'aide d'un schéma centré d'ordre 2 de Jameson. La discrétisation temporelle fait appel à un schéma de Runge-Kutta d'ordre 4. Le point de fonctionnement est calculé en imposant le taux de détente total/statique et la vitesse de rotation.

4 Résultats

Dans cette section, les résultats des simulations numériques sont présentés et analysés. Dans un premier temps, l'étude des écoulements décollés est réalisée à l'aide de la méthodologie stationnaire RANS sur le maillage 3D. L'étude de la convergence met en évidence des oscillations importantes au niveau des résidus et des grandeurs physiques suggérant ainsi l'existence d'une instabilité aérodynamique naturelle. La non nullité du terme de dérivation temporelle des équations de Navier-Stokes qui en résulte provoque les fluctuations constatées. L'approche RANS est donc inadaptée dans ce cas d'étude et empêche toute analyse globale et locale.

Dans un second temps, la méthode harmonique est confrontée au même cas de calculs. De la même manière que précédemment, les calculs harmoniques ne convergent pas et des oscillations sur les résidus sont constatées.

En conséquence, dans les deux cas, les grandeurs physiques de l'écoulement dépendent du temps par le biais de l'itération courante. En outre, cette dépendance temporelle n'étant pas modélisée par la transformée de Fourier de la méthode NLH. L'existence d'un phénomène instationnaire décorrélé de la fréquence de passage des pales est donc mise en évidence et oriente l'étude vers la modélisation instationnaire complète sur 360°.

L'approche instationnaire 360 est mise en oeuvre sur une coupe 2D prise à 50% de hauteur de veine. Cette méthodologie 2D a été validée dans l'étude de G. Dufour [3] dans le cas où les gradients radiaux sont relativement faibles. 782 positions angulaires permettent de modéliser un tour de roue. Le pas de temps ainsi obtenu est de $1.229 * 10^{-4} s$. Une sonde de pression statique est positionnée légèrement après le bord d'attaque sur l'intrados du redresseur afin d'enregistrer le signal temporel de pression.

L'échantillon a été enregistré tous les pas de temps pendant un tour complet de roue. La transformée de Fourier discrète (FFT) ainsi obtenue, est présentée sur la figure 2. Les deux premières harmoniques

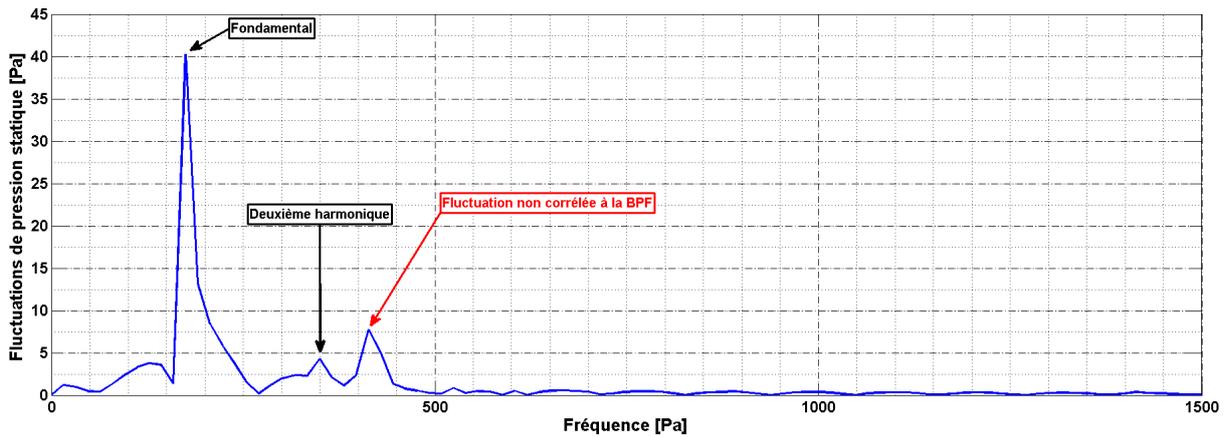


FIGURE 2 – FFT d'un signal de pression statique pris dans le redresseur

de la fréquence de passage des pales sont visibles. Ces fréquences sont calculées selon la formule 3. La FFT précédente met en évidence l'existence d'un phénomène périodique de fréquence $F \approx 421\text{Hz}$ qui n'est pas multiple de F_n . L'amplitude de ce phénomène dépasse celle du deuxième harmonique.

$$F_n = n \frac{RPM}{60} N_R \text{ [Hz]} \quad (3)$$

La morphologie de l'écoulement et de la présence d'un lâcher tourbillonnaire suggère que ce dernier soit à l'origine de cette fréquence. La figure 3 montre un lâcher tourbillonnaire qui **semble** être lié à la morphologie du sillage du rotor. En effet, la "poche" du maximum d'entropie se détache du bord d'attaque lorsque le sillage impacte une position précise de l'extrados de la pale en vis-à-vis.

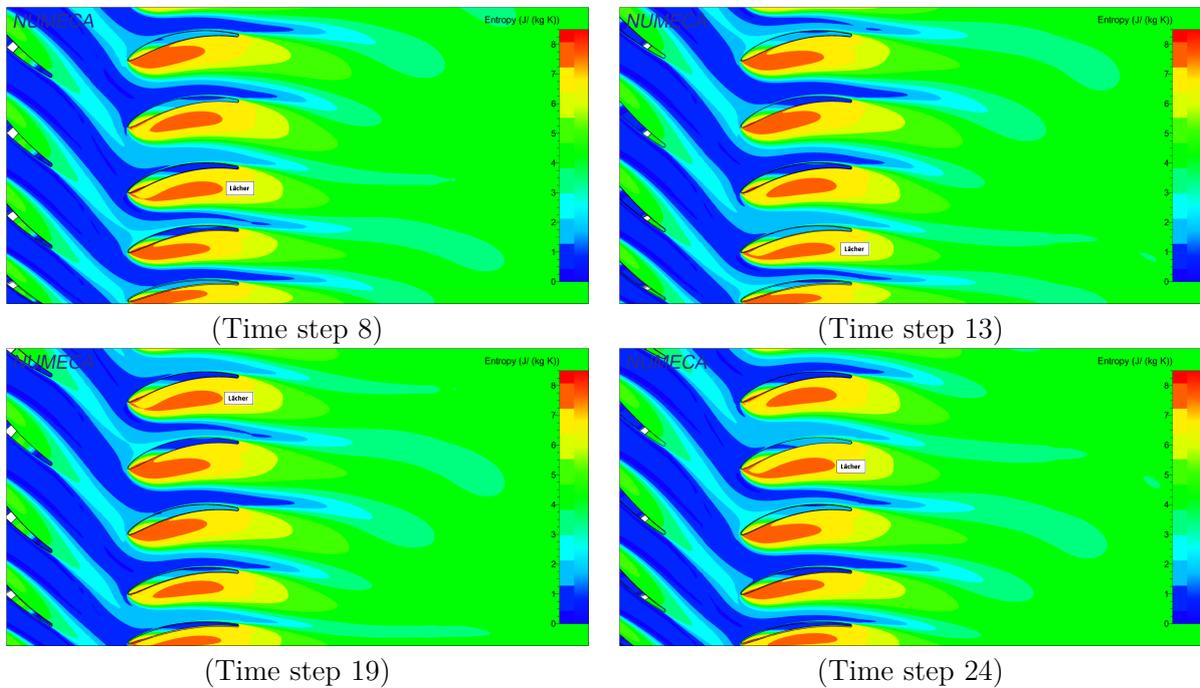


FIGURE 3 – Visualisation du lâcher à l'intrados du redresseur

Conclusions

Les méthodes stationnaire RANS, harmonique et instationnaire complètes réalisés sur les 360° de l'étage ont été comparées en situation d'autorotation. Les deux premières ont été mises en échec par la présence d'une instationnarité non corrélée à la fréquence de passage des pales. Ce phénomène a été mis en évidence par la transformée de Fourier discrète d'un signal de pression mesuré au voisinage du point de décollement de l'intrados du redresseur. L'analyse locale de l'écoulement n'a pas permis de conclure quant à l'origine de ce phénomène instationnaire. En effet, le lâcher tourbillonnaire mis en avant par une vue aube-à-aube à 50% d'entropie semble lié à la fréquence de passage des pales. Le lâcher semble toujours s'effectuer pour la même position du point d'impact du sillage.

Par ailleurs, l'étude similaire menée par G. Dufour[3] met en avant un cas d'autorotation pour lequel aucune instationnarité décorrélée de la BPF n'est présente dans l'écoulement. L'analyse des différences entre ces deux cas d'études pourraient permettre de déterminer les sources d'instationnarité décorrélées de la BPF. Les recherches futures porteront donc sur l'analyse approfondie du cas présenté ici, dans le but de déterminer l'origine de ce phénomène instationnaire.

Références

- [1] BOUSQUET, Y., CARBONNEAU, X., AND TRÉBINJAC, I. Assessment of steady and unsteady predictions for a subsonic centrifugal compressor stage. *ASME Turbo Expo, 11-15 Jun 2012* (2012).
- [2] COURTY-AUDREN, S.-K., CARBONNEAU, X., BINDER, N., AND CHALLAS, F. Potential of power recovery of an axial fan in windmilling operation. *Proceedings of the 10th European Conference on Turbomachinery* (2013).
- [3] DUFOUR, G., CARBONNEAU, X., AND ROSA, N. G. Nonlinear harmonic simulations of the unsteady aerodynamics of a fan stage section at windmill. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013* (2013).
- [4] GILL, A. *Four Quadrant Axial Flow Compressor Performance*. PhD thesis, Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2011.
- [5] HE, L., AND NING, W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines. *AIAA Journal* (1998), pp. 2005–2012.
- [6] HOARAU, Y. *Analyse physique par simulation numérique et modélisation des écoulements décollés instationnaires autour de surfaces portantes*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Juin 2002.
- [7] PRASAD, D., AND LORD, W. K. Internal losses and flow behavior of a turbofan stage at windmill. *Journal of Turbomachinery* 132 (JULY 2010), pp. 031007–1/031007–10.
- [8] WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, 1998.
- [9] YERLY, B. Simulation décollements décollés subsoniques turbulents présentant des détachement tourbillonnaires. Master's thesis, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, Septembre 2003.