

Simulation des transitoires violents et écoulements pulsés dans les turbines - 2

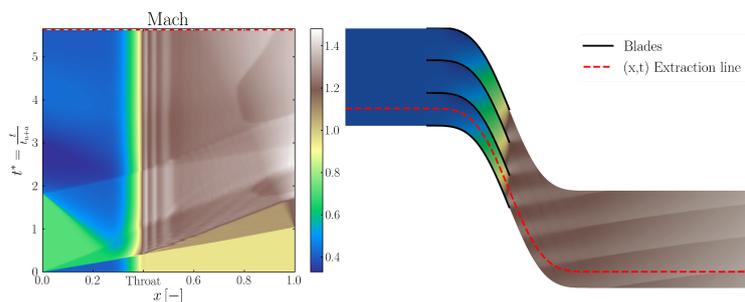


FIGURE 1 – Évolution du nombre de Mach dans une grille d’aube au passage d’une onde de choc.

Problématique générale :

intérêt, contexte, application, problèmes, état de l’art, objectifs généraux

Une voie prometteuse d’amélioration des performances des turbomachines est d’utiliser des cycles moteurs avec une combustion à volume constant (isochore) au lieu de la traditionnelle combustion isobare. Dans l’aéronautique et en particulier pour les applications défense, des perspectives d’évolution vers des moteurs à détonation (PDE pour Pulsating Detonation Engine ou RDE pour Rotating Detonation Engine) sont envisagées, afin d’accroître la performance globale^[9], que ce soit en rendement ou en puissance spécifique. De plus, ces modes instationnaires de compression et combustion permettent aussi un élargissement du domaine de vol des systèmes propulsifs, en particulier vers les régimes supersoniques.

Ces architectures particulières de systèmes propulsifs nécessitent des conditions d’alimentation très différentes de la chambre et des organes qui l’entourent. En particulier le caractère instationnaire de l’écoulement devient dominant. Il est indiqué dans^[11] que les évolutions vers des architectures à combustion à volume constant sont les plus prometteuses, à condition d’une maîtrise de la performance des turbines, qui sont alors soumises à des conditions d’alimentation fortement instationnaires. Il apparaît ainsi des ondes de choc pour les turboréacteurs équipés de chambres à détonation, mais également des écoulements pulsés pour les turbocompresseurs automobiles ou pour les applications de co-génération.

Tout d’abord considéré comme défavorable pour le rendement des turbines, le caractère instationnaire de l’écoulement fait maintenant l’objet d’une discussion scientifique plus nuancée. Plusieurs observations expérimentales ou numériques^[3,12,6] ayant suggéré qu’un effet bénéfique est exploitable lors de variations brutales des conditions de fonctionnement, un examen détaillé de cette question a été entrepris, en phase avec une mouvance de la communauté scientifique, décrite dans les articles^[15,19,20], et qui incite à revoir les positions établies en ce qui concerne les écoulements instationnaires. Mais peu de conclusions définitives sont à ce jour établies. Cette difficulté à conclure vient du fait que les écoulements de turbomachines sont très complexes, produits par des géométries elles-mêmes complexes et intégrées dans des systèmes couplés. Un diagnostic clair requiert donc une simplification vers une configurations académique (figure 2), permettant le meilleur niveau de simulation. Ce fut l’objet de la thèse de F. Hermet, qui concerne la propagation d’ondes de choc et de faisceaux de détente dans les grilles d’aubes, financée pour partie par le programme STEP. Ces travaux ont d’ores et déjà permis d’établir :

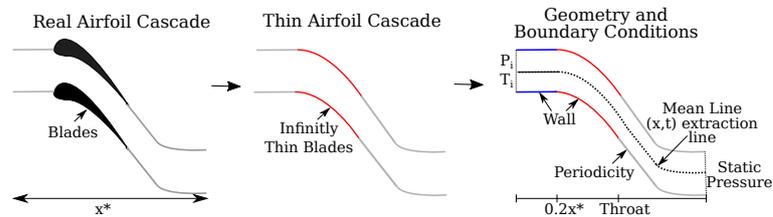


FIGURE 2 – Schématisation de la simplification géométrique du problème^[13]

- le comportement physique détaillé du passage d’une onde de choc dans des conduites de section variable (figure 1, voir^[14]) ;
- qu’il existe bien, au passage d’une onde de choc, une opportunité de récupérer plus d’énergie que l’analyse quasi-statique de la situation ne le prévoit^[13] ;
- que cette situation n’apparaît que pour des temps caractéristiques particuliers de la perturbation, dont les bornes ont été identifiées^[13] ;
- que cet effet bénéfique produit par l’onde de choc peut être annihilé par une phase transitoire équivalente de détente, et qu’il convient donc de travailler sur la dissymétrie de la compression et la détente pour les écoulements périodiques ;
- que les critères de performance habituels ne peuvent rendre compte de cette situation, et qu’ils sont à revoir. Des propositions ont été faites ;
- que l’interaction d’une onde de choc avec la couche limite en proche paroi en réduit le niveau de turbulence, modérant ainsi les transferts entre le fluide et la pale tels que le frottement ou l’échange de chaleur. Ce dernier point doit être approfondi, mais constitue un point d’intérêt dans la perspective d’application dans les parties chaudes d’un moteur ;
- que les meilleurs niveaux de simulation ne sont pas requis pour obtenir une restitution fidèle de la sur-activation de l’effort aérodynamique, observé dans la phase transitoire (figure 3) ;
- qu’il est possible de formuler des premières recommandations pour le dimensionnement de turbines apte à tirer bénéfice des effets instationnaires.

Ces conclusions, tirées à partir de configurations académiques, doivent toutefois être démontrées sur des configurations géométriques plus complexes, et représentatives de la réalité d’un moteur aéronautique. On retiendra, en particulier :

1. la nature tri-dimensionnelle de l’écoulement et ;
2. l’étude détaillée du transfert thermique lorsque l’onde de choc est suivi d’une forte élévation de la température.

Ces deux axes de travail permettront aussi d’amener le TRL de l’étude à un niveau permettant de statuer sur la pertinence de l’approche, dans une perspective industrielle.

Programme de thèse :

Le travail proposé est en continuité directe des précédents travaux, principalement à partir de simulations numériques. Un premier volet de validation expérimentale sur le tube à choc du département est envisagée si la disponibilité du moyen d’essai le permet (strioscopie rapide de propagation d’onde de choc dans une grille squelettique courbée).

Le déroulement des travaux est envisagé comme suit :

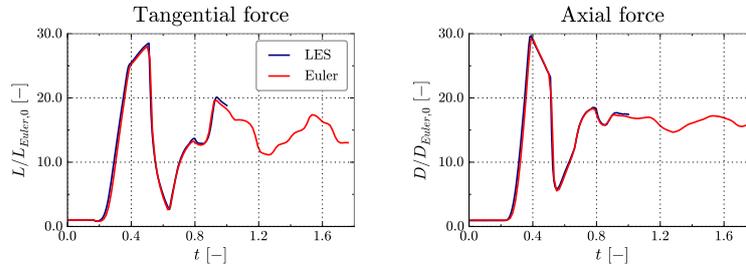


FIGURE 3 – Comparaison de résultats de simulations de type LES et Fluide Parfait, pour la prédiction de l’effort aérodynamique instantanée.

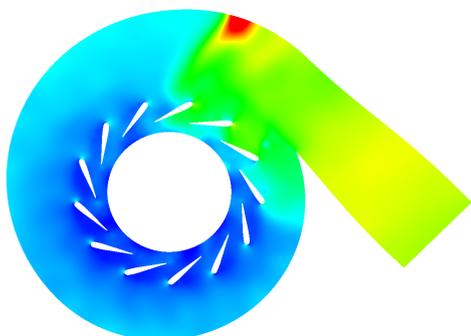
1. prise en compte des effets tridimensionnels de l’écoulement à l’aide de simulations de propagation d’une onde de choc et d’un faisceau de détente dans une configuration de type annulaire rectiligne, convergente puis divergente. Un comportement similaire à ce qui est décrit dans les conclusions de^[14] est attendu, et doit être vérifié. Ces cas 3D permettront de quantifier les effets de conicité, centrifuge et des parois de veine sur les résultats déjà établis ;
2. intégration progressive des aubes 3D dans la conduite annulaire (stator seul puis rotor-stator), et vérification de la présence du sur-couple observé en 2D, au passage du choc. Cette vérification peut être faite par des simulations de type Euler (non-visqueux) qui sont suffisantes pour prédire l’effort aérodynamique dans le transitoire. Ces résultats seront également à rapprocher des simulations de type URANS réalisées sur une géométrie industrielle de turbine radiale pour laquelle le sur-couple est observé ;
3. poursuite de l’étude paramétrique réalisée en 2D en prenant en compte l’envergure des pales, et les facteurs géométriques qui y sont associés (vrillage, effilement, ...). Un effort pourra être mené sur l’influence des lois d’épaisseur vis à vis de l’impact des ondes de choc (en particulier en bord d’attaque) ;
4. poursuite des travaux d’analyse du comportement d’une couche limite au passage d’un choc ou d’une détente, à l’aide de simulations aux grandes échelles. En particulier, les propriétés de la turbulence, probablement hors d’équilibre, l’étude de la re-laminarisation et des conséquences sur le transfert thermique permettront de statuer sur la situation réelle que devront subir les parties chaudes de telles évolutions d’architectures propulsives. L’évaluation des modèles U-RANS, qui sont actuellement déployés dans les bureaux d’étude, est également envisagée.

Références de l’équipe :

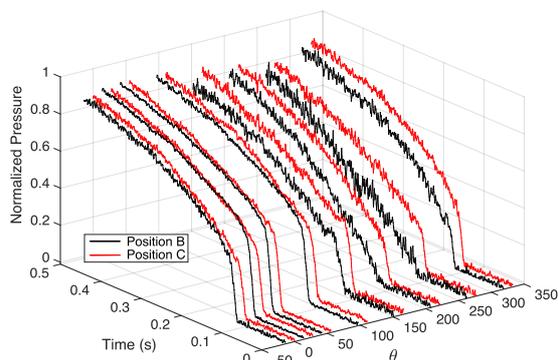
La prise en charge de ce sujet mobilise la complémentarité de deux équipes de recherche du département : l’équipe de Dynamique des Fluides Fondamentale (D2F) et l’équipe de TurboMachines et Propulsion (TMP). La première (D2F) développe et applique des outils de simulations proposant le meilleur niveau de fidélité de l’état de l’art : robustesse^[10] et précision^[7,18] des méthodes numériques, simulation haute résolution et haute performance sur maillages non structurés^[5,1], interaction choc/turbulence^[16,8,17]. L’étude de l’interaction d’une onde de choc avec une interface entre deux fluides de densité différente a permis de doter le département d’un tube à choc, instrumenté pour les phénomènes aux échelles de temps très courtes.

La seconde (TMP) est mobilisée depuis plusieurs années sur la question de l’alimentation instationnaire des turbines radiales. Ces travaux ont été initiés dans le contexte de la suralimentation automobile, pour laquelle la question du régime pulsé imposé à l’étage de turbine est toujours débattu

dans la littérature. Une première approche expérimentale^[3] suggère l'apparition d'une phénoménologie hors de portée de l'approche quasi-statique, lors de phases transitoires sévères. Ces travaux ont été approfondis (figure 4(b),^[4]), et enrichis de la complémentarité entre l'expérience et la simulation numérique (figure 4(a)). Ces résultats récents, actuellement formatés pour publication, renforcent



(a) Extraction de la pression statique sur une coupe à mi-hauteur du canal du distributeur. Le front de pression se propage à partir du bec de volute dans les deux directions azimutales. Approche U-RANS.



(b) Évolution spatio-temporelle de la pression normalisée en sortie de volute et en sortie de stator, suite à un échelon des conditions d'alimentation. Résultats expérimentaux.

FIGURE 4 – Propagation d'un front de pression dans un étage de turbine radiale.

l'hypothèse de l'existence d'un potentiel de récupération d'énergie non exploité par les turbines, lorsqu'elles sont soumises à de fortes variations temporelles.

Références

- [1] I. Bermejo-Moreno, J. Bodart, J. Larsson, B.M. Barney, J.W. Nichols, & S. Jones. *Solving the compressible Navier-Stokes equations on up to 1.97 million cores and 4.1 trillion grid points*. Supercomputing conference 2013, Denver(CO), 2013.
- [2] Nicolas Binder, Sebastien Le Guyader, & Xavier Carbonneau. *Analysis of the variable geometry effect in radial turbines*. Journal of Turbomachinery, **134**(4), 041017, 2012.
- [3] Nicolas Binder, Jaime Garcia Benitez, & Xavier Carbonneau. *Dynamic Response in Transient Operation of a Variable Geometry Turbine Stage : Influence of the Aerodynamic Performance*. International Journal of Rotating Machinery, **2013**, 2013.
- [4] Nicolas Binder, Yannick Bousquet, Florian Hermet, & Jérémie Gressier. *Basic physics and scaling of the dynamic response of a radial inflow turbine to short time-scale variation of inlet conditions*. Under submission at Journal of Turbomachinery, 2020.
- [5] I. Bermejo-Moreno, J. Larsson, L. Campo, J. Bodart, R. Vicquelin, D. Helmer, & J. Eaton. *Wall-modeled large eddy simulation of shock/turbulent boundary-layer interaction in a duct*. Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, Stanford University, 2011.
- [6] Teng Cao, Liping Xu, Mingyang Yang, & Ricardo F Martinez-Botas. *Radial turbine rotor response to pulsating inlet flows*. Journal of Turbomachinery, **136**(7), 071003, 2014.
- [7] O. Chikhaoui, J. Gressier, & G. Grondin. *Assessment of the Spectral Volume Method on inviscid and viscous flows*. In *International Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2010.

- [8] M. Crespo, S. Jamme, & P. Chassaing. *Direct numerical simulation of the interaction between a shock wave and a turbulent shear flow : some effects of anisotropy*. In *Fifth Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, 2007.
- [9] A St George, R Driscoll, E Gutmark, & D Munday. *Experimental Comparison of Axial Turbine Performance Under Steady and Pulsating Flows*. *Journal of Turbomachinery*, **136**(11), 111005, 2014.
- [10] Jérémie Gressier, Philippe Villedieu, & Jean-Marc Moschetta. *Journal of Computational Physics*, (1), October.
- [11] Tomas Grönstedt, Mohammad Irannezhad, Xu Lei, Oskar Thulin, & Anders Lundbladh. *First and second law analysis of future aircraft engines*. *Journal of engineering for gas turbines and power*, **136**(3), 2014.
- [12] Marc Gugau & Harald Roclawski. *On the Design and Matching of Turbocharger Single Scroll Turbines for Pass Car Gasoline Engines*. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **136**(12), 122602, 2014.
- [13] Florian Hermet, Nicolas Binder, & Jérémie Gressier. *Transient flow in infinitely thin airfoil cascade*. In *13 th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. EUROPEAN TURBOMACHINERY SOCIETY, 2019.
- [14] Florian Hermet, Nicolas Binder, & Jérémie Gressier. *Shock motion behind a non-uniform cross-sectional region*. Under submission at *Journal of Fluid Mechanics*, 2020.
- [15] HP Hodson, TP Hynes, EM Greitzer, & CS Tan. *A physical interpretation of stagnation pressure and enthalpy changes in unsteady flow*. *Journal of Turbomachinery*, **134**(6), 060902, 2012.
- [16] S. Jamme, J.-B. Cazalbou, F. Torrès, & P. Chassaing. *Direct numerical simulation of the interaction of a shock wave and various types of isotropic turbulence*. *Flow, Turbulence and Combustion*, **68**, 227–268, 2002.
- [17] S. Jamme, M. Crespo, & P. Chassaing. *Thermodynamic fluctuations behaviour during a sheared turbulence/shock interaction*. In *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, volume 110, 2010.
- [18] Raphaël Lamouroux, Jérémie Gressier, & Gilles Grondin. *A High-Order Compact Limiter Based on Spatially Weighted Projections for the Spectral Volume and the Spectral Differences Method*. *Journal of Scientific Computing*, pages 1–29, 2015.
- [19] Martin Marx, Martin Lipfert, Martin G Rose, Stephan Staudacher, & Detlef Korte. *Unsteady Work Processes Within a Low Pressure Turbine Vane Passage*. In *ASME Turbo Expo 2013 : Turbine Technical Conference and Exposition*, pages V06CT42A005–V06CT42A005. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [20] Martin G Rose & Martin Marx. *Unsteady Work Transfer Within a Turbine Blade Row Passage*. *Journal of Turbomachinery*, **136**(9), 091001, 2014.