

# Simulations numériques directes d'écoulements turbulents dans un compresseur haute-pression simplifié

R. OGUIC<sup>a</sup>, S. VIAZZO<sup>b</sup>, S. PONCET<sup>c</sup>

- a. Aix-Marseille Université, CNRS, Ecole Centrale de Marseille, Laboratoire M2P2 UMR 7340, Marseille, France + [romain.oguic@13m.univ-mrs.fr](mailto:romain.oguic@13m.univ-mrs.fr)
- b. Aix-Marseille Université, CNRS, Ecole Centrale de Marseille, Laboratoire M2P2 UMR 7340, Marseille, France + [stephane.viazzo@univ-amu.fr](mailto:stephane.viazzo@univ-amu.fr)
- c. Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, Sherbrooke (QC), Canada + [Sebastien.Poncet@USherbrooke.ca](mailto:Sebastien.Poncet@USherbrooke.ca)

## Résumé étendu :

Les turbines à gaz sont des moteurs à combustion interne convertissant l'énergie thermique dégagée par la combustion en un travail mécanique utile. Ces turbines sont le lieu de contraintes mécaniques et thermiques importantes. Le rendement de ces machines est directement relié à la température de combustion, or une température trop élevée endommagerait les éléments constituant la turbine et impliquerait une vitesse de rotation de la turbine à gaz trop importante. Un refroidissement est alors nécessaire : celui-ci est réalisé via les transferts thermiques générés par un écoulement d'air froid le long des parois. Afin d'assurer un flux sortant, l'air doit être comprimé. Cette surpression, bien que ne jouant aucun rôle dans la transformation de l'énergie thermique en un travail utile, peut être à l'origine de la consommation d'environ 6% du carburant dans les turbines modernes. Le refroidissement joue donc un rôle primordial pour la sécurité et a un impact écologique non négligeable. L'objectif est ici d'étudier les caractéristiques de l'écoulement turbulent assurant le refroidissement au sein d'un compresseur haute-pression par simulation numérique directe. On se focalise ici, en tant qu'étape préliminaire au problème complet, au cas isotherme.

Le compresseur haute-pression est constitué d'un ensemble de cavités formées par des disques soumis à de la rotation. Ces cavités sont reliées entre elles par un espace entre l'arbre de transmission et les disques. Une représentation simplifiée d'un tel compresseur est une cavité formée par deux disques de rayon  $b$  espacés d'une longueur  $s$  (Figure 1a). En amont et en aval se trouvent deux conduites cylindriques de rayon  $a$  et de longueur respective  $h_1$  et  $h_2$ . Le rapport d'aspect de la cavité  $G=s/b$  et le rapport des rayons  $a/b$  valent respectivement  $G=0.53$  et  $a/b=0,1$ , ce qui correspond à une des configurations étudiées expérimentalement par Owen et Pincombe [1] et Farthing et al. [2]. Les longueurs adimensionnées des conduites amont et aval valent respectivement  $h_1/b=0,5$  et  $h_2/b=0,97$ .

Deux nombres caractéristiques régissent cet écoulement : le nombre de Reynolds débitant  $Re=2U_b a/\nu$  et le nombre de Rossby  $Ro=2U_b/(a\Omega)$  où  $U_b$ ,  $\nu$  et  $\Omega$  sont respectivement la vitesse débitante, la viscosité cinématique et le taux de rotation. Le nombre de Reynolds est fixé à  $Re=5300$ ,

tandis que pour étudier l'influence de la rotation, cinq nombres de Rossby sont considérés :  $Ro=1$  ;  $2$  ;  $4$  ;  $40$  et  $+\infty$ .

Les équations de Navier-Stokes régissant le mouvement d'un fluide Newtonien incompressible sont résolues en coordonnées cylindriques. Ces équations sont discrétisées avec un schéma temporel semi-implicite d'ordre 2 : les termes de diffusion sont décomposés en une partie implicite traitée avec un schéma de Backward-Euler d'ordre 2 tandis que les termes croisés sont inclus dans les termes convectifs. Ceux-ci sont discrétisés via un schéma d'Adams-Bashforth d'ordre 2. La méthode de projection développée par Hugues et Randriamanpianina [3] est utilisée pour résoudre les équations gouvernant l'écoulement. L'introduction d'une pression préliminaire permet une variation temporelle du gradient de pression tout en assurant une précision temporelle d'ordre 2.

Grâce à leur facilité d'emploi, leur précision et leur faible dissipation numérique, des schémas compacts d'ordre 4 sont utilisés dans les directions radiales et axiales pour discrétiser les équations sur un maillage de type MAC. Des séries de Fourier sont utilisées dans la direction azimutale. Le problème de la singularité à l'axe introduite par l'utilisation de coordonnées cylindriques est traité par la méthode développée par Sandberg [4] et étendue au quatrième ordre. Cette méthode est basée sur les propriétés particulières dans l'espace de Fourier d'un vecteur ou d'un scalaire. L'indétermination à l'axe est levée en imposant des conditions de symétrie appropriées pour chaque variable et chaque nombre d'onde.

La méthode de projection utilisée réduit les équations de Navier-Stokes en des équations d'Helmholtz et de Poisson qui sont résolues par une méthode de diagonalisation [5]. Une méthode de projection multidomaine [5] basée sur la technique de Matrice d'Influence de COntinuité (MICO) est utilisée, notamment, pour complexifier les géométries traitées.

La précision de la méthode numérique a été vérifiée avec des solutions analytiques : une précision temporelle d'ordre 2 et spatiale d'ordre 4 ont été obtenues. Le traitement de la singularité et la méthode de projection multidomaine n'entraînent donc pas de détérioration de la précision. Le code a aussi été validé sur des configurations tests telles que des écoulements d'éclatement tourbillonnaire dans une cuve cylindrique ou un écoulement turbulent en conduite cylindrique. L'ensemble des résultats est en accord avec les données de la littérature. Une attention particulière a été portée sur l'axe et les interfaces entre sous-domaines : aucune discontinuité dans les champs de vitesse ou de pression n'y a été observée.

Afin de réduire les temps de calcul, une parallélisation hybride MPI/OpenMP a été implémentée. La scalabilité du code est satisfaisante jusqu'à 64 processeurs.

En entrée de domaine, un profil turbulent calculé en pré-processing et vérifiant des tensions de Reynolds souhaitées est imposé. Des conditions non-réfléchissantes sont utilisées en sortie de domaine. Le maillage choisi permet la résolution de l'ensemble des échelles spatiales jusqu'à l'échelle de Kolmogorov. Ce critère a été vérifié en considérant l'échelle de longueur caractéristique du maillage basée sur la dissipation de la turbulence. Un raffinement du maillage à proximité des parois permet de modéliser de façon précise la sous-couche visqueuse. Dans le cas sans rotation (i.e.  $Ro=+\infty$ ), la cavité a été discrétisée avec 4 sous-domaines et 7,5 millions de nœuds. Dans les 4 cas avec rotation, 7 sous-domaines ont été utilisés avec un total de 13,1 millions de nœuds.

Dans un étage de compresseur, l'écoulement axial s'étend dans la cavité et impacte le disque aval. Un jet de paroi se forme alors et génère un tourbillon toroïdal au sein de la cavité. Le centre de ce tourbillon est ici situé en  $r/b=0,678$  et  $(z-h_1)/b=0,54$ . A la sortie de la cavité, l'écoulement est localement accéléré et une recirculation apparaît à proximité du coin formé par le disque et la conduite avale. Au centre de la cavité, l'écoulement présente un comportement similaire à un jet : l'instabilité de la couche de cisaillement génère des structures hélicoïdales tandis que des structures axiales s'enroulent autour de ces dernières (Figure 1a). Leur présence est due au mécanisme d'étirement (« vortex-stretching ») entre les structures hélicoïdales.

La rotation a pour effet de perturber l'écoulement axial, de modifier son comportement et d'atténuer l'écoulement secondaire formé par le tourbillon dans la cavité. L'écoulement est alors caractérisé par le nombre de régime d'éclatement tourbillonnaire. Ils peuvent être axisymétriques (mode 2) ou non-axisymétriques (mode 1). Pour un nombre de Rossby égal à  $Ro=40$ , l'écoulement est caractérisé par un éclatement tourbillonnaire non-axisymétrique avec la formation d'un jet oscillant. Ce comportement correspond au mode 1a noté par Owen et Pincombe [1] et Farthing et *al.* [2]. Une oscillation occasionnelle de l'écoulement axial et un éclatement tourbillonnaire axisymétrique ont été observés pour  $Ro=4$ . Ce comportement est typique du mode 2a. Une augmentation de la rotation ( $Ro=2$ ) a permis de mettre en évidence un effet de flamme vacillante (« flickering flame effect ») correspondant au mode 1b (Figure 1b). A  $Ro=1$ , l'écoulement retrouve son caractère axisymétrique (mode 2b).

Les différents modes peuvent être mis en évidence également par l'analyse du spectre de puissance de la vitesse azimutale. Les modes non-axisymétriques sont caractérisés par un unique pic dominant de fréquence tandis qu'un pic dominant et ses harmoniques sont présents pour les modes axisymétriques. L'ensemble de ces résultats obtenus par simulation numérique directe sont en accord avec les expériences menées par Owen et Pincombe [1] et Farthing et *al.* [2].

## Références

- [1] J.M. Owen, J.R. Pincombe, Vortex breakdown in a rotating cylindrical cavity, *Journal of Fluid Mechanics* 90 (1979) 109-127
- [2] P.R. Farthing, C.A. Long, J.M. Owen, J.R. Pincombe, Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: Flow structure, *ASME Journal of Turbomachinery* 114 (1992) 237-246
- [3] S. Hugues, A. Randriamampianina, An improved projection scheme applied to pseudospectral methods for the incompressible Navier-Stokes equations, *International Journal of Numerical Methods in Fluids* 28 (1998) 501-521
- [4] R.D. Sandberg, An axis treatment for flow equations in cylindrical coordinates based on parity conditions, *Computers and Fluids* 49 (2011) 166-172
- [5] S. Abide, S. Viazzo, A 2D compact fourth-order projection decomposition method, *Journal of Computational Physics* 206 (2005) 252-276

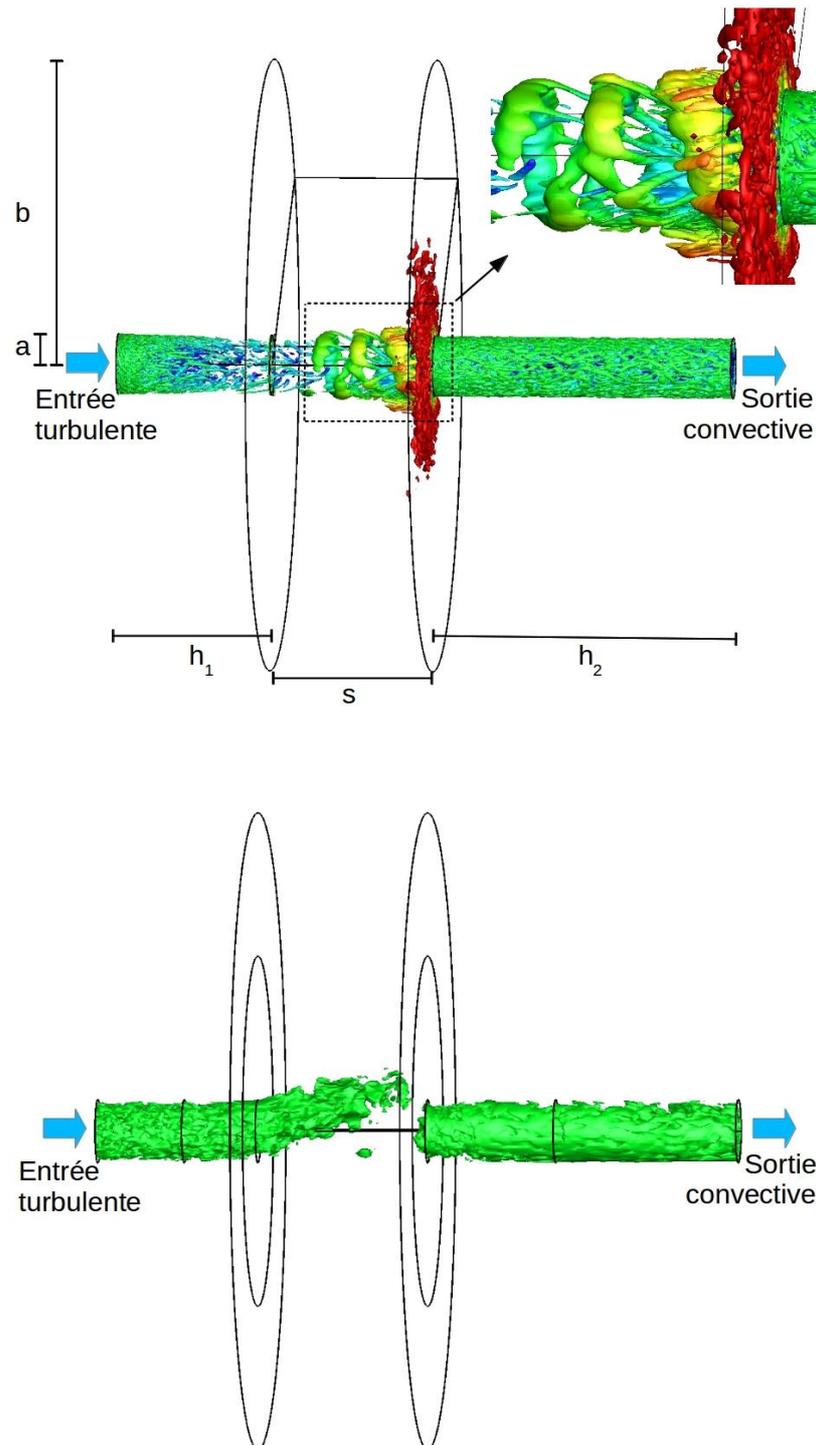


Figure 1 : Simulations numériques directes de l'écoulement turbulent dans un étage simplifié de compresseur haute-pression à  $Re=5300$  et : (a)  $Ro=+\infty$  et (b)  $Ro=2$  (mode 1b)