

# Couplage d'oscillateurs : l'instabilité d'un système d'équilibrage axial d'une turbo-pompe

Le Gal Patrice & Verhille Gautier

Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, 49 rue F. Joliot-Curie, F-13384, Marseille, France  
 legal@irphe.univ-mrs.fr

Les très grandes vitesses de rotation des turbo-pompes nécessitent la présence de cavités fluides aux dos de leurs rotors afin de supporter les efforts créés par les fluides en rotation. Ces cavités sont équipées d'ajutages situés en entrée et en sortie du circuit du fluide qui permettent par leur pertes de charge de contrôler la pression sur les faces des disques. Ces cavités constituent ainsi les Systèmes d'Équilibrage Axial (SEA) des pompes. Ces systèmes sont auto-équilibrants et la position axiale des rotors est obtenue lorsque les pressions sur leurs faces s'équilibrent. Il s'avère cependant que cet équilibre peut être instable lorsque l'écoulement est compressible : dans ce cas un couplage peut apparaître entre un oscillateur de type Helmholtz, constitué du rotor de masse  $M$  et de la cavité fluide, et un oscillateur hydraulique créé par les ajutages. Le système dynamique peut alors être décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{x} + \lambda_2 \dot{x} + \omega_0^2 x + \lambda_1 x = 0. \quad (1)$$

Ici,  $x$  est la variation de la hauteur de la cavité par rapport à la position d'équilibre,  $\omega_0$  est la pulsation propre du mode de Helmholtz de la cavité,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont des paramètres dépendant des caractéristiques des ajutages amont et aval de la cavité :

$$\omega_0^2 = \frac{\rho S^2 c^2}{MV_0}, \quad \lambda_1 = \frac{K_2 S c^2}{MV_0}, \quad \lambda_2 = \frac{K c^2}{V_0}, \quad (2)$$

avec  $\rho$  et  $c$  la densité et la vitesse du son du fluide,  $S$  et  $M$  la surface et la masse du stator,  $V_0$  le volume de la cavité,  $K_2 = \partial Q / \partial x|_P$  et  $K = \partial Q / \partial P|_x$  les caractéristiques des ajutages données par les dérivées partielles du débit  $Q$ , respectivement à  $P$  et  $x$  fixés.

La stabilité du système est donnée par le signe des valeurs propres de l'équation 1 et est obtenue par le critère de Routh-Hürwitz. Ainsi, le système est stable si  $\omega_0^2 > \lambda_1 / \lambda_2$ . A partir de cette inégalité, on peut définir un débit critique  $Q_c$  au-delà duquel l'instabilité apparaît :

$$Q_c = \frac{\pi D_0^2 c}{\sqrt{8h\xi'}}. \quad (3)$$

$h$  étant la hauteur de la cavité,  $D_0$  une taille caractéristique de l'ajutage et  $\xi'$  la dérivée de la perte de charge à l'ajutage par rapport à l'ouverture :  $\xi' = |\partial \xi / \partial x|$ , avec  $\xi$  la perte de charge  $\Delta P$  normalisée par la vitesse  $U$  de l'écoulement au travers de l'ajutage :  $\xi = 2\Delta P / \rho U^2$ .

Suite à cette étude théorique et afin d'étudier cette instabilité expérimentalement, nous avons conçu une cavité rotor-stator dont le stator est monté sur une membrane élastique qui permet un déplacement axial. La géométrie de l'ajutage, une soupape conique placée au centre du stator, a été choisie suite à des mesures préliminaires de pertes de charge. Les expériences ont été menées dans de l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) pressurisé entre 20 et 70 bars et qui a l'avantage de posséder, proximité de son point critique, une faible vitesse du son ( $c \sim 100m/s$ ) et une faible viscosité dynamique (20 fois plus petite que celle de l'eau). Cela nous a permis d'explorer une large gamme de paramètres avec des écoulements fortement turbulents ( $Re \geq 10^7$ ) et compressibles ( $Ma \sim 0.5$ ) dans des expériences de taille relativement réduite ( $\sim 10cm$ ) et pourtant en similitude des turbo-pompes réelles. Après avoir caractérisé l'oscillateur de Helmholtz de notre système, en particulier par l'étude de sa réponse impulsionnelle, nous avons réussi à mettre en évidence pour la première fois en laboratoire l'instabilité recherchée. Les mesures des seuils d'instabilité montrent que ceux-ci vérifient les prédictions de notre modèle théorique avec une grande précision.