VIBRATION STUDY OF A TUBE BANK IN LIQUID CROSS FLOW

(Etude des vibrations d'un faisceau de tubes placé normalement à un écoulement d'eau)

F. N. REMY

Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches,
Département Transferts Thermiques et Aérodynamique, 6, Quai Watier, F-78400 Chatou, France

SUMMARY

Vibrations of tubes in heat exchangers arise from three basic excitation mechanisms : turbulence, vortex shedding and fluid-elastic instability. In water flow, vortex-shedding lock-in and instability take place in the same range of velocity : the purpose of this experimental study is to get a deeper knowledge of the conditions of occurence of the two mechanisms and their interaction.

The maximum size of the test array is 7 x 7 ; the pitch to diameter ratio is 1.44. The array is composed of fixed tubes and of movable tubes.

The mechanical characteristics - frequency and damping - of these flexibility mounted tubes can be perfectly controlled and remain constant even when vibrating with large amplitude. Vibration responses versus flow velocity curves are presented for several numbers and several positions of vibrating tubes in one row or multi-rows arrays.

When several vibrating tubes are located inside the tube bundle, the onset of whirling instability occurs distinctly after a vortex-shedding vibration peak. These phenomena don't exist when only one tube is allowed to vibrate : this behaviour shows the importance of the interaction between tube motions.

When the movable tubes are located in the front part of a bundle or in a single row, the results are more complicated, because the two mechanisms interfere. The evolution of the vibration amplitude versus flow velocity has however the same behaviour whatever the number of vibrating tubes is.

As the velocity increases, a vortex-shedding resonance peak appears in the drag direction then, for higher flow, a sudden increase of the amplitude in the lift direction looks like the beginning of the vortex-shedding resonance for vibrating tubes inside bundle ; but, in this case, there is no decrease of this amplitude as the velocity increases. So, the fluid-elastic instability seems to be initiated by the vibration lock-in range, and this vibration lowers the fluid-elastic threshold.

1. INTRODUCTION

L'étude présentée ici concerne un faisceau à pas carré soumis à un écoulement d'eau. Elle se situe dans un domaine de paramètres, vitesse réduite (U/fD), amortissement réduit ($m\delta/\rho D^2$) où deux causes peuvent être à l'origine de vibrations de grande amplitude :

- la synchronisation entre une fréquence d'excitation liée à une organisation de l'écoulement dans le faisceau, et la fréquence propre des tubes. Ce phénomène appelé accrochage, se caractérise par une valeur du nombre de Strouhal qui ne dépend que de la géométrie du faisceau dans le domaine de valeurs du nombre de Reynolds étudié ici.
- un comportement instable du faisceau, dû au couplage entre les mouvements des tubes par l'intermédiaire du fluide. L'amplitude est limitée uniquement par les non-linéarités du système. CONNORS / 1 / a montré que le déclenchement de cette instabilité a lieu pour une vitesse d'écoulement critique Uc donnée par :

$$\frac{Uc}{fD} = K \quad \frac{m\delta}{\rho D^2} \qquad \text{éq. 1}$$

Après avoir présenté le dispositif expérimental, on compare les résultats obtenus pour différentes configurations de faisceau.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le faisceau est composé de 7 rangées de 7 tubes. La disposition carrée en ligne a un pas réduit égal à 1,44. Quinze tubes appelés "tubes vibrants" sont montés sur support élastique. Le tube de 22 mm de diamètre et de 200 mm de long est collé en son centre sur une longue tige formant ressort. La tige, entièrement usinée afin de garantir l'axisymétrie de montage est encastrée à une extrémité, dans une plaque épaisse et, à l'autre dans un système de croix souples qui permet de grandes élongations sans modification sensible de la tension dans la tige. Un ressort brasé à cette extrémité permet l'ajustement de la fréquence du tube à 3.10^{-3} près (Figure 1). La fréquence propre du tube en eau est de 34 Hz. Elle ne varie pas plus de $\pm$ 0,08 Hz pour une amplitude variant de 0 à 10 mm crête à crête. L'amortissement mesuré en fluide immobile par une méthode de décrément est de 2,5 % pour un tube placé au centre du faisceau.

Le mouvement des tubes est mesuré à l'aide de jauges de contrainte. Les signaux sont enregistrés afin de permettre tous les traitements en temps différé sur ordinateur.

Le faisceau est placé dans la veine d'essai d'un tunnel hydrodynamique alimenté par une cuve à niveau constant (Figure 2).

3. RESULTATS

3.1. Amplitude du mouvement

On compare l'évolution de l'amplitude du mouvement avec la vitesse d'écoulement entre tubes , pour un tube vibrant dont on fait varier l'environnement : tube isolé, placé dans une rangée ou dans un faisceau, constitués de tubes rigides ou vibrants (Figure 3).

L'évolution de l'amplitude d'un tube isolé est donnée pour mémoire. On observe d'abord un accrochage dans le sens de la traînée lorsque la fréquence double du détachement tourbillonnaire coïncide avec la fréquence du tube, puis un accrochage dans le sens de la portance (3a).

Lorsque le tube vibrant est placé dans une seule rangée de tubes fixes (3b), l'évolution de l'amplitude a d'abord la même forme que celle observée pour le tube isolé. Le premier maximum dans la direction de la traînée a lieu pour une vitesse d'écoulement de 2,2 m/s. Le changement de direction dans le mouvement du tube se produit beaucoup plus brutalement. Aucune décroissance de l'amplitude n'est observée une fois la vitesse de synchronisme dépassée.

En revanche, un seul tube "vibrant", placé au centre d'un faisceau de tubes rigides, n'est sensible qu'à l'excitation par la turbulence de l'écoulement. L'amplitude reste très faible dans les deux directions et ne laisse apparaître aucun accrochage (3c).

Lorsque les quinze tubes vibrants sont disposés dans les trois premières rangées, les tubes de la première rangée ont le même comportement que les tubes d'une rangée unique composée entièrement de tubes vibrants (3d) (3e). L'amplitude croit simultanément dans la direction de la traînée et dans la direction de la portance, mettant ainsi en évidence l'effet du couplage introduit par le fluide entre tubes voisins. Le choc des tubes se produit pour une vitesse d'écoulement de 2,5 m/s.

Lorsque les quinze tubes vibrants sont disposés dans les trois rangées centrales (3 x 5) (3f), les autres tubes du faisceau étant rigides, on observe un accrochage et le déclenchement de l'instabilité de manière très distincte. L'accrochage se produit à une vitesse de 2,9 m/s. La vitesse critique, où les tubes se choquent, légèrement variable d'un essai à l'autre est toujours nettement supérieure à la vitesse où l'on constate des chocs de tubes dans les premières rangées.

3.2. Trajectoire des tubes

La trajectoire d'un tube isolé (Figure 4) est tout d'abord une ellipse de grand axe parallèle à l'écoulement; puis lorsque la vitesse augmente, la trajectoire se transforme en une ellipse de grand axe normal à l'écoulement.

La trajectoire d'un tube "vibrant" placé dans une rangée de tubes rigides (Figure 6) est d'abord une ellipse allongée dans le sens de l'écoulement jusqu'à ce que brusquement, le mouvement du tube devienne monodirectionnel dans le sens de la portance. L'amplitude du mouvement du tube, qu'il soit isolé ou entouré de tubes rigides est modulé à basse fréquence, phénomène déjà mis en évidence par SONNEVILLE / 2 /.

Sur la Figure 6, on présente les trajectoires de trois tubes adjacents d'une rangée unique composée entièrement de tubes vibrants : ils décrivent des ellipses de grand axe parallèle à la direction de l'écoulement jusqu'à 2 m/s, vitesse à partir de laquelle leur trajectoire est très perturbée. Le choc est observé à une vitesse de 2,5 m/s. Il en est de même pour les tubes de la première rangée lorsque les tubes vibrants sont disposés dans les trois premières rangées : sur la Figure 7a, on présente un exemple de trajectoire à une vitesse de 2,3 m/s ; mais si on considère le mouvement relatif des tubes en prenant le tube central comme origine (Figures 7b, 7c, 7d), les trajectoires relatives décrites par les tubes adjacents sont alors mieux définies et forment deux ellipses allongées, de grands axes perpendiculaires ou parallèles, le passage d'une configuration à l'autre se faisant de manière aléatoire.

4. SYNTHESE ET CONCLUSION

A l'intérieur du faisceau, conformément aux observations de ISHIGAI / 3 / et de WEAVER et LEVER / 4 /, on n'a pas pu mettre en évidence de fréquence de détachement tourbillonnaire dans les densités spectrales des fluctuations de vitesse, relevées pour un faisceau entièrement rigide. L'accrochage n'est observé que lorsqu'il y a plusieurs tubes vibrants, et correspond à un nombre de Strouhal de 0,26.

Si l'on considère comme vitesse critique, la vitesse pour laquelle apparaît le choc des tubes dans les rangées centrales du faisceau, la constante est voisine de 7, valeur en bon accord avec les résultats de GORMAN / 5 / et de GIBERT / 6 /.

Le comportement des tubes vibrants disposés dans les premières rangées du faisceau ou dans une rangée unique, peut être partiellement expliqué par l'analyse des densités spectrales des fluctuations de vitesse dans le sillage des tubes d'une rangée unique, qui mettent en évidence deux nombres de Strouhal 0,34 et 0,195. A la valeur de 0,34 correspond un accrochage dans la direction de la traînée. En revanche, l'augmentation de l'amplitude observée dans la direction de la portance précède sensiblement la coïncidence avec la vitesse correspondant à un nombre de Strouhal de 0,195. La nature du mécanisme à l'origine de ces mouvements de grande amplitude est complexe : on les observe lorsqu'un seul tube vibre, ce qui les assimile à un accrochage, mais le fait que , dans tous les cas, aucune décroissance ultérieure de l'amplitude n'ait pu être mise en évidence, relève plutôt d'un comportement instable.

On peut dire que pour les premières rangées, les vibrations des tubes sont provoquées par un accrochage, mais cette excitation abaisse le seuil d'instabilité.

Lorsque l'on tient compte du comportement particulier des premières rangées, la vitesse critique relative au choc des tubes, est plus faible et la constante est inférieure à 5. Dans le cas d'un faisceau composé uniquement de tubes vibrants, le comportement des rangées centrales serait probablement modifié par les mouvements de grande amplitude des premières rangées.

Cependant, avant que ne se produise le choc des tubes, les tubes des premières rangées vibrent avec des amplitudes importantes. Il semble alors plus raisonnable de prendre comme seuil critique la vitesse pour laquelle l'amplitude du mouvement n'est plus aléatoire / 4 / ou celle où l'amplitude dépasse une valeur pouvant entraîner une rupture par fatigue / 7 /. La constante à prendre en compte est alors égale à 2,9. On voit que l'interaction, accrochage-couplage entre mouvements, a pour conséquence d'abaisser fortement les vitesses d'écoulement critiques, les risques de vibrations de grande amplitude se situant surtout dans les premières rangées du faisceau.

REFERENCES

/ 1 / CONNORS, H.J., "Flow Induced Vibration in Heat Exchangers" - ASME Winter Annual Meeting - New York 1970 - p. 42

/ 2 / SONNEVILLE, P., "Etude de la structure tridimensionnelle des écoulements autour d'un cylindre circulaire" - Thèse d'état - Université de Paris VI - Février 1976

/ 3 / ISHIGAI, S., NISHIKAWA, E., YAGI, E., "Structure of Gas Flow and Vibration in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow- Transaction of ISME - Tokio 1973 - Paper 2/3

/ 4 / WEAVER, D.S., LEVER, J., "Tube Frequency Effects on Cross Flow Induced Vibrations in Tube Arrays" - Fith Biennal Symposium on Turbulence - 1977 - Paper n° IV

/ 5 / GORMAN, D.J., "Experimental Development of Design Criteria to limit Liquid Cross Flow Induced Vibration in Nuclear Reactor Heat Exchange Equipment" - Nuclear Science and Engineering - 1976 - 61 pp. 321-336

/ 6 / GIBERT, R.J., CHABRERIE, J., SAGNER, M., "Vibrations of Tube Arrays in Transversal Flow" - Proceeding 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology - San Francisco 1977 - Paper F 6/3

/ 7 / PETTIGREW, M.J., GORMAN, D.J., - "Vibration of Heat Exchange Component in Liquid and Two Phase Flow" - B.N.E.S. Vibration in Nuclear Plant - Keswick 1978 - Paper 2/3

FIGURE 1 _ UN TUBE VIBRANT

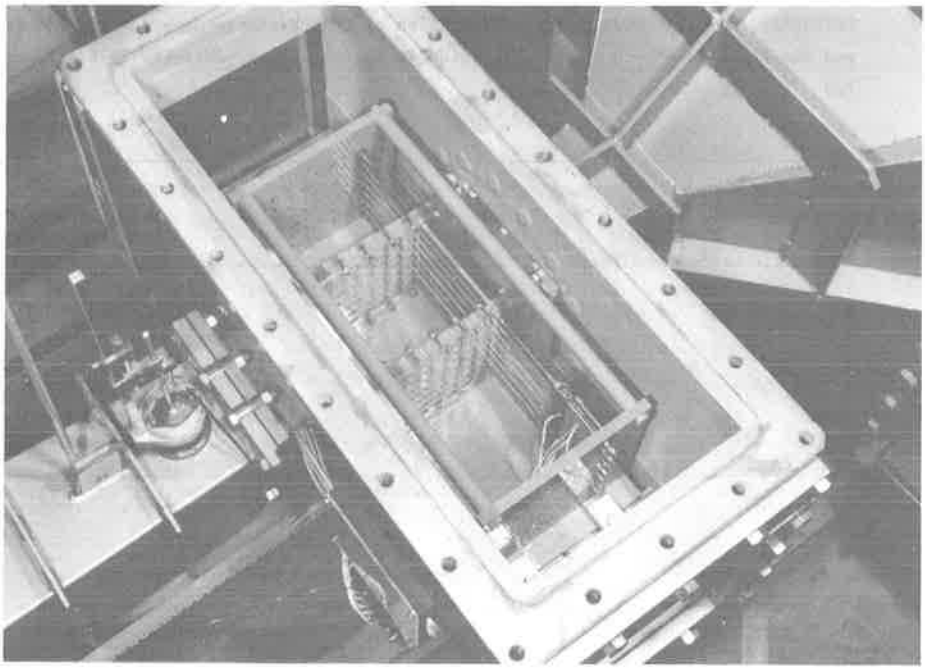

FIGURE 2 _ MONTAGE D'UNE RANGEE UNIQUE DISPOSE DANS LE TUNNEL HYDRODYNAMIQUE

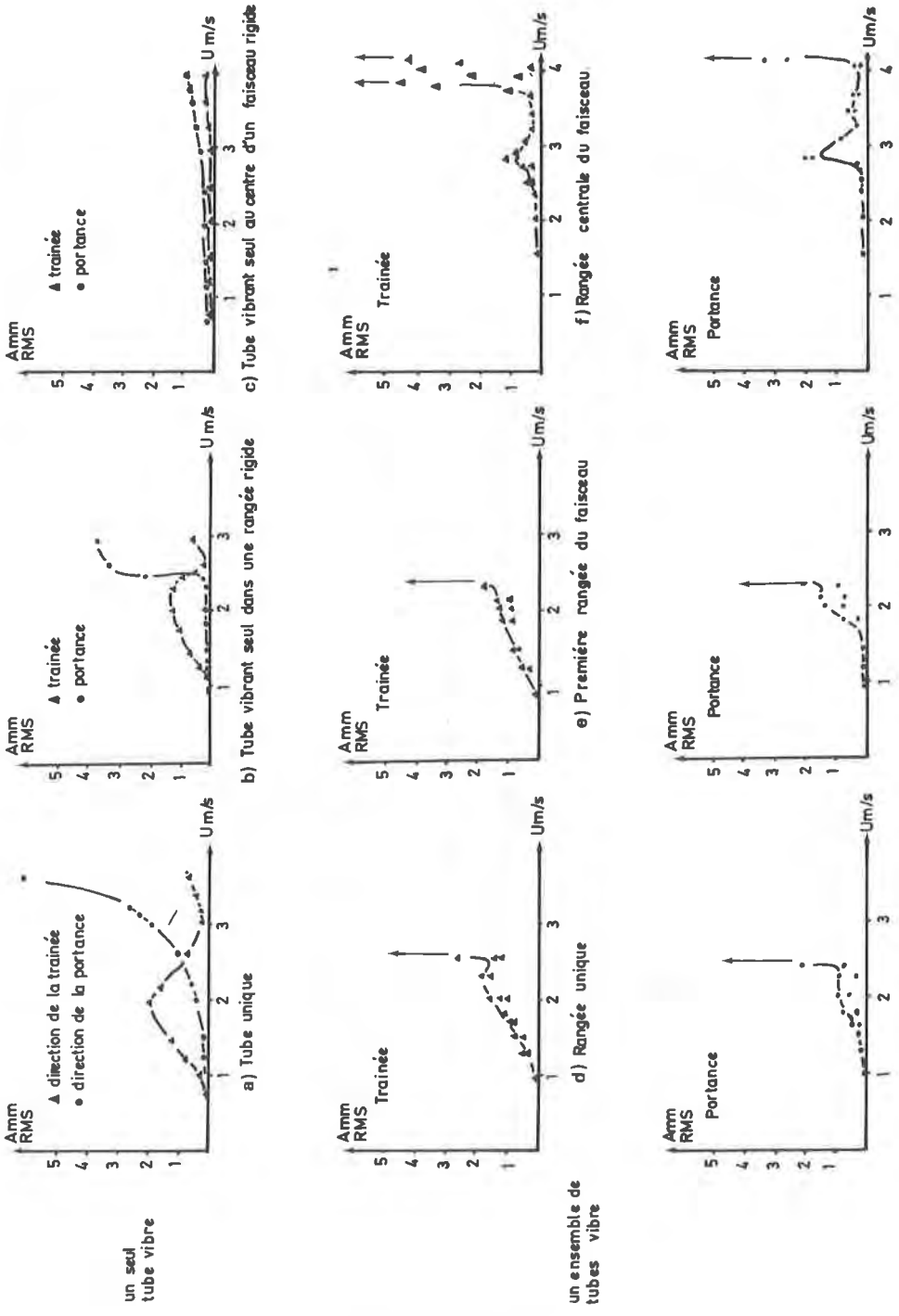

FIGURE 3 _ AMPLITUDE DU MOUVEMENT

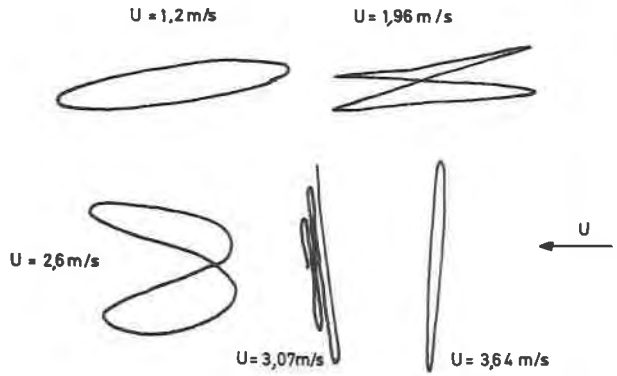

FIGURE 4 _ TRAJECTOIRE DU TUBE UNIQUE
(échelles variables)

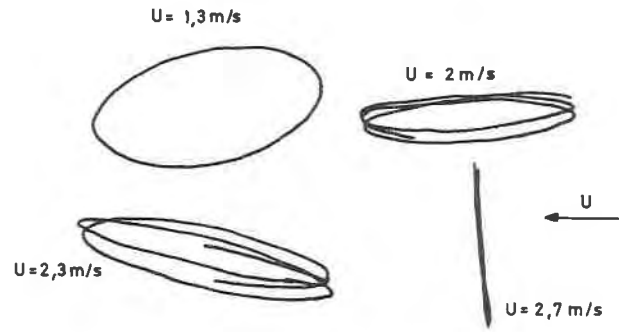

FIGURE 5 _ TRAJECTOIRE D'UN TUBE VIBRANT DANS UNE RANGEE RIGIDE (échelles variables)

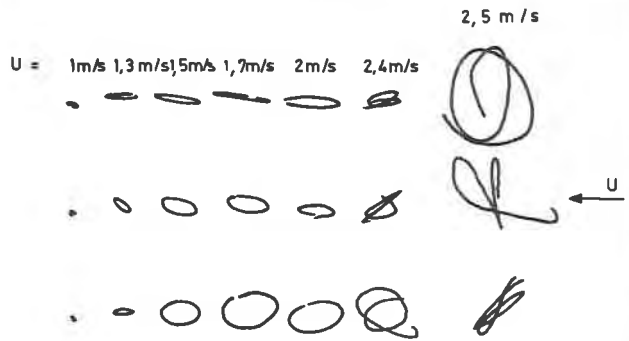

FIGURE 6 _ TRAJECTOIRE DE TUBES ADJACENT D'UNE RANGEE DE TUBES VIBRANTS

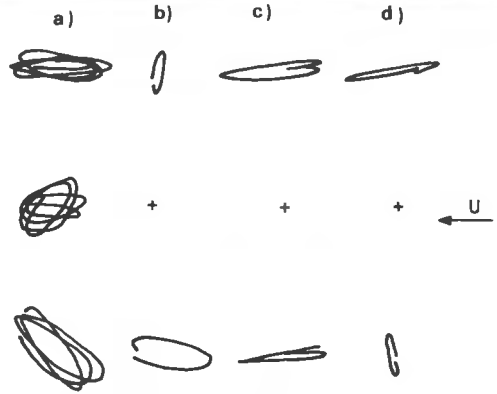

FIGURE 7 _ TRAJECTOIRES DE TUBES ADJACENT _ PREMIERE RANGEE DU FAISCEAU MOUVEMENT REEL ET MOUVEMENT RELATIF
U = 2,3 m/s