

# Caractérisation des écoulements de cavités asymétriques

**D. CORNU<sup>ab 1</sup>, L. KEIRSBULCK<sup>a</sup>, C. CHOVET<sup>a</sup>, M. LIPPERT<sup>a</sup>,  
F. KERHERVÉ<sup>c</sup>, F. ALOUI<sup>a</sup>,**

a. LAMIH, CNRS UMR 8201, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Le Mont Houy,  
59313 VALENCIENNES CEDEX 9, France

b. Alstom, rue Jacquard, F-59494, Petite-Forêt, France

c. Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS, Université de Poitiers - ENSMA, Poitiers, France

## Résumé :

*La définition d'une cavité est simple. Il s'agit d'un espace creux, naturel ou artificiel, plus ou moins large et plus ou moins profond, fermé ou non. Il existe de nombreuses formes de cavités (rectangulaires, cylindriques). D'une manière plus mécanique on peut décrire une cavité comme une succession de 2 marches, descendante puis montante. Alors que dans le cas d'une marche descendante, l'écoulement d'air vient recoller plus loin le long du plan horizontal, la présence d'une marche montante va créer une zone de mélange où nous allons trouver de part et d'autre une vitesse d'écoulement de cavité faible et une vitesse d'écoulement extérieur élevée. Ce cisaillement du champ de vitesse va dépendre des paramètres géométriques de la cavité : largeur, hauteur, profondeur, et finalement différence de hauteur entre parois amont et aval. Les effets liés aux écoulements de cavités sont de type aéro-acoustique (modes hydrodynamiques) et également de recirculation avec des possibilités de mise en pression de la cavité et de pompage. Historiquement, l'un des premiers à avoir compris l'importance des cavités est Rossiter et plus tard Block. Ils détermineront des fréquences d'oscillation auto-entretenues pour chaque mode. Les constantes de Rossiter ( $\gamma$  et  $\kappa$ ) permettent ainsi d'obtenir pour une largeur de cavité les fréquences des oscillations auto-entretenues. De nombreuses études expérimentales et numériques se sont focalisées sur les paramètres de largeur ou de profondeur de cavité mais peu ont étudié l'impact de la différence d'altitude entre faces amont et aval. Seul Yamamoto s'est penché sur l'influence de ce paramètre. Il a notamment regardé l'effet d'une variation de Nusselt. Nous verrons dans cette étude les conséquences d'une telle géométrie. En effet, une cavité dite industrielle n'est que très rarement symétrique. Pour conclure sur l'importance des cavités on peut citer plusieurs exemples d'application : soute de larguage des bombardiers, toits ouvrants dans l'automobile ou encore les équipements en toiture des trains. Alors que cette présence dans de nombreux domaines est avérée, il n'existe que très peu d'études s'attachant à caractériser les écoulements de cavités asymétriques.*

**Mots clefs : Cavité, Rossiter, modes hydrodynamiques, instabilités, turbulence, couche de cisaillement**

1. adresse de correspondance : denis.cornu@transport.alstom.com

## 1 Introduction

De nos jours, la société demande que les trains soient plus confortables, plus efficaces et plus rapides. Pour cela, l'innovation, la recherche et le développement jouent un rôle majeur dans l'accomplissement de ces challenges. Les études aérodynamiques ne sont pas seulement recommandées pour les trains à grande vitesse. Il existe bon nombre d'autres applications, et pas uniquement liées à la définition aérodynamiques, à savoir les coefficients  $C_D$ ,  $C_M$  or  $C_L$ . L'aérodynamique du ferroviaire peut se décomposer en 3 grands domaines :

- L'aérodynamique externe due au déplacement du train dans son environnement
- L'aérodynamique interne, usuellement appelée aéraulique, directement reliée au conditionnement de l'air dans les compartiments passagers et dans la cabine de pilotage
- L'aérothermie et le refroidissement des équipements (dissipation de chaleur)

Ces études doivent être menées pour chaque projet, à chaque phase, même lors de l'offre ou du pré-projet. Le temps entre la signature d'un contrat et la sortie de production d'un train se réduisent d'année en année, les études doivent par conséquent être plus rapide et démarrer immédiatement. De plus, dès le départ, lorsque tous les équipements ne sont pas encore intégrés, les ingénieurs doivent composer avec les effets aérodynamiques et les conséquences que cela peut engendrer sur le train. De ce fait, il est nécessaire de développer une méthodologie active et rapide afin de tirer le meilleur parti de l'écoulement d'air provoqué par le déplacement du train. Les développements dans l'industrie ferroviaire, tout comme dans n'importe quelle autre industrie du transport, dépendent de la dynamique, et plus précisément de la dynamique du flux d'air autour du train. Des études détaillées des caractéristiques du flux d'air autour du train et des équipements situés en toiture ou en sous châssis doivent être menées. Ce genre d'études doit prendre en compte les aspects climatiques, opérationnels et fonctionnels. Certains équipements du train sont placés en toiture, tels que : l'unité de conditionnement de l'air, le rhéostat, les convertisseurs de puissance de l'unité de traction et bien d'autres. Afin de refroidir efficacement ces équipements, un système propre d'aération doit être mis en place. Dans cette étude, une analyse du comportement dynamique du flux d'air au dessus du train, plus particulièrement entre les équipements en toiture sera effectuée. La compréhension de l'écoulement en toiture peut permettre de réduire les bruits mécaniques et vibratoires causés par des sources aérodynamiques. Une analyse spectrale des signaux de pression instantanés, enregistrés dans le cas d'écoulement compressible subsonique au dessus d'une cavité ouverte, révèle des composantes de fortes fréquences (modes de Rossiter). De plus, lorsque ces modes sont appliqués au comportement dynamique d'une cavité asymétrique, il est possible de comprendre la physique du problème et de contrôler ces phénomènes.

## 2 Cavité industrielle : Application au ferroviaire

Les cavités rectangulaires ont déjà fait l'objet d'un grand nombre de recherches, montrant leur importance dans ce domaine d'étude. Rossiter a proposé une relation semi-empirique qui prédit les harmoniques dominantes dans une cavité ([1]). Tam et Block ont présenté une étude détaillée des oscillations de pression induites par un écoulement dans une cavité rectangulaire ([3]). Une autre étude a montré l'importance des échanges de chaleur dans une cavité avec de la convection forcée, mais cela n'a jamais pris en considération la fréquence des champs de vitesse ([2]). Malgré toutes ces recherches, l'étude de l'écoulement autour de cavités asymétriques rectangulaires n'a jamais été approfondie. Cependant, ces

écoulements dans des cavité asymétriques sont usuellement présents dans de nombreux domaines de l'ingénierie, tel que les équipements ferroviaires en toiture comme le montre la Figure 1.



FIGURE 1 – Dualis TTNG produit par Alstom

La position des équipements électriques en toiture de train n'est jamais la même et il est difficile de trouver deux équipements successifs ayant les mêmes dimensions, en termes de hauteur et de profondeur. En plus de cela, la distance qui les sépare est très faible. Toutefois, le flux d'air est une combinaison de différentes configurations de cavités entre chacun de ces équipements. Afin de considérer les différentes configurations possibles, nous allons étudier ici une cavité 2D ayant comme variables sa largeur et la variation de hauteur entre les plans horizontaux amont et aval (Figure 2).

### 3 Montage expérimental

Tous les essais pour cette recherche ont été réalisés dans la soufflerie subsonique en circuit fermé du LAMIH à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. La soufflerie a un rapport de contraction de 6.25 :1 en amont d'une veine d'essais de 2m de large par 2m de haut sur une longueur de 10m (Figure 3). Le cas d'écoulements en cavité asymétrique est étudié ici. Désormais, nous utiliserons la grandeur  $H$  (186mm) pour décrire la hauteur de la cavité et la grandeur  $U_\infty$  pour la vitesse de référence. Les longueurs  $L$  de la cavité sont de 45mm, 90mm ou 120mm. Le cas 120mm correspond à un nombre de Reynolds de  $Re_L = 2.4 \times 10^5$ . Les différents cas étudiés sont détaillés dans le Tableau 1. Ils prennent en compte des configuration d'asymétries positive (I), neutre (II) et négative (III), avec un rapport Longueur-Largeur de  $L/W = 0.06$  et un rapport de longueur-hauteur de  $L/H = 0.6452$ . Concernant la classification de ce type d'écoulement en cavité, cette configuration correspond à une cavité 2D profonde. Pour cette étude, la vitesse du champ libre est de 30m/s, résultant d'un nombre de Reynolds basé sur la hauteur de la cavité  $Re_H = 5.58 \times 10^6$  et correspondant à un nombre de Mach de 0.088. Le système de coordonnées cartésiennes choisi a une origine au niveau de l'arrêt de fuite de la cavité.

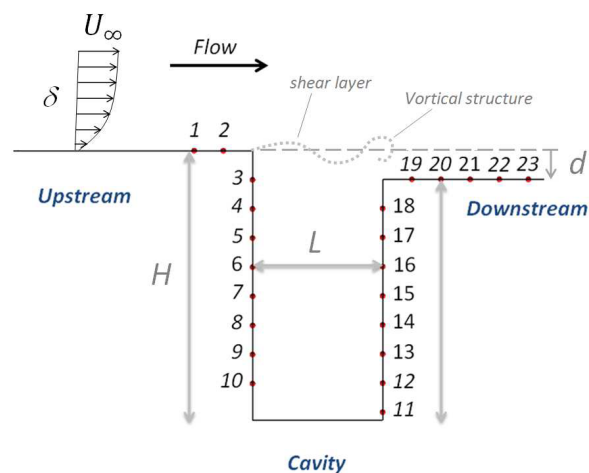


FIGURE 2 – Schéma générique des cavités

Pour toutes les configurations considérées, la couche limite incidente est turbulente, avec une épaisseur  $\delta = 21\text{mm}$ , correspondant à un nombre de Reynolds  $Re_\delta = 6.3 \times 10^5$ .

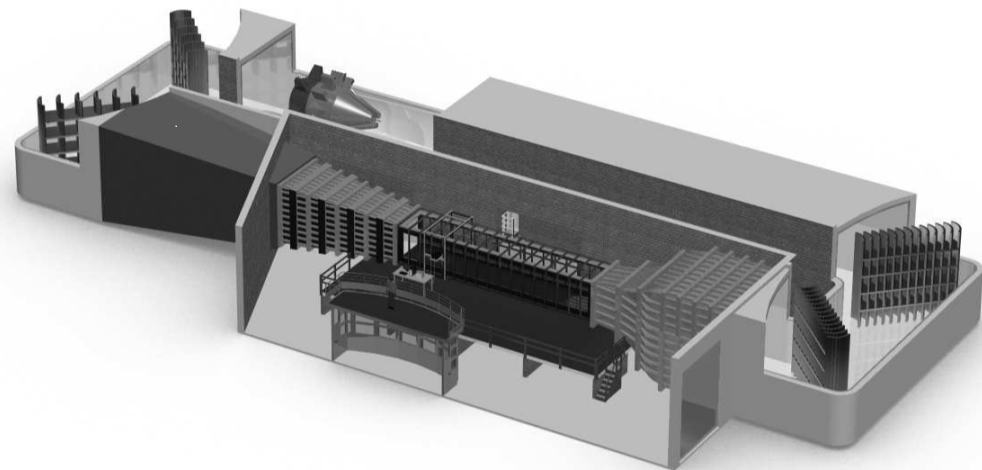


FIGURE 3 – La soufflerie

Les différentes configurations d'écoulement de cavité ont été examinées en détail à l'aide de mesures simultanées de PIV à basses fréquences et de pressions résolues en temps. Deux caméras ont été utilisées afin de caractériser le champ de vitesses d'air dans la cavité et en aval de celle-ci, dans le but d'examiner les structures instationnaires induites par la couche de cisaillement de la cavité. Le système de PIV inclut des caméras à haute définition POWERVIEW dont la résolution est de  $2048 \times 2048$  pixels, des objectifs micro NIKKOR 50 mm et une nappe laser produite par un laser ND-YAG (QUANTEL BSLT220) opérant à 532nm ce qui permet de produire des pulses à 220 mJ. Pour chaque cas, 2000 paires d'images sont acquises avec une fréquence de 7Hz. Le traitement consiste à un premier passage des images sur une fenêtre d'intégration de  $32 \times 32$  pixels suivi d'un second passage à  $16 \times 16$  pixels avec un recouvrement de 50%. La caractérisation de la pression de paroi se fait à l'aide de 23 sondes différentielles encastrées de type Kulite Xcq-080 avec une gamme de pression de 350mBar, placées avant, à l'intérieur et après la cavité. La distance entre deux sondes est constante et égale à 20mm ( $\approx 0.1H$ ). L'acquisition de la pression

a été synchronisée avec les mesures PIV à l'aide d'un signal TTL déclenché par le signal laser. Les signaux de pression sont dans un premier temps filtrés en passe-bas à 5kHz puis un convertisseur de 12 bit A/D du système d'acquisition DEWESoft SIRIUS-8STG M PLUS est utilisé afin d'acquérir les signaux filtrés à une fréquence d'échantillonnage de 10kHz. Les pressions statiques ont également été mesurées à l'aide de prises de pression placées aux mêmes endroits que les sondes de fluctuations, et 18 autres installées dans la continuité de l'aval de la cavité avec le même écartement dans le but d'obtenir des informations complémentaires sur le recollement complet de l'écoulement après la cavité.

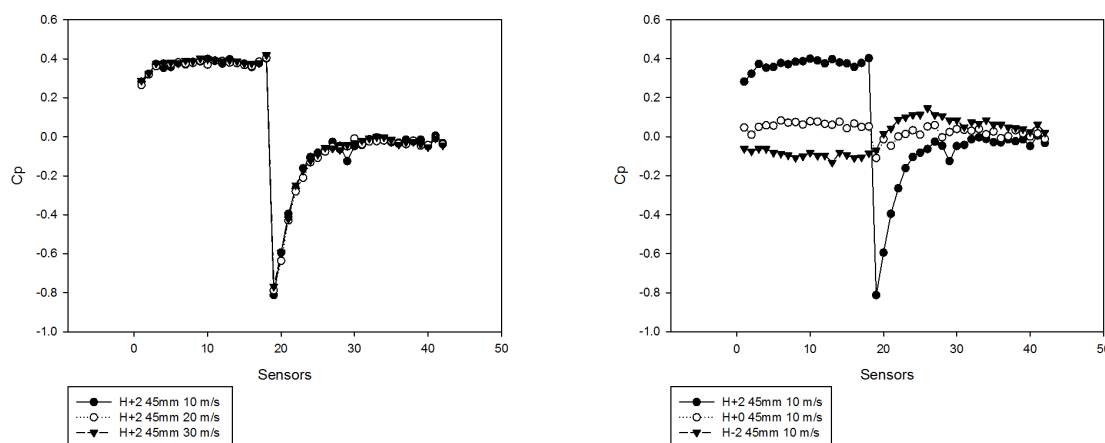
Cases	$d(mm)$	$d/H(\%)$	Symbols
(I)	+20	+10.75	●
(II)	0	0.00	▲
(III)	-20	-10.75	■

TABLE 1 – Paramètres géométriques de la cavité

## 4 Effets d'une cavité asymétrique sur l'écoulement principal

### 4.1 Informations préliminaires sur la topologie de l'écoulement

La Figure 4 montre le coefficient de pression moyen, défini par  $C_p = (p - p_{ref}) / (1/2 \rho U_\infty^2)$ . Cette figure présente la distribution spatiale le long des parois de la cavité. Les données sont obtenues à l'aide de sondes statiques. Pour une configuration géométrique donnée, on observe une indépendance au nombre de Reynolds. Par contre, l'impact de l'asymétrie de la cavité est importante. La distribution de pression moyenne montre différents comportements. On observe 3 principaux types de résultats :

FIGURE 4 –  $C_p$  pour 3 vitesses (à gauche) et dans 3 configurations (à droite)

- Cas (II) : Répartition de pression classique d'un écoulement d'air dans une cavité sans variation significative
- Cas (I) : Avec des pressions faibles dans la cavité mais égales en aval de la cavité
- Cas (III) : Avec différentes topologies pour chaque largeur. Le cas 120mm a une distribution spécifique de pressions.

Par conséquent, pour le cas (III), aucun comportement similaire n'a été observé. L'écoulement de cavité est influencé par la largeur. La Figure 5 montre le coefficient de pression moyen pour les trois largeurs étudiées. L'écoulement d'air se détache à partir de l'arrêt de tête et, en fonction de la largeur de la cavité, l'écoulement se rattache à une position différente. On observe donc 3 topologies différentes :

- Rattachement après l'arrêt de fuite,
- Rattachement sur l'arrêt de fuite,
- Rattachement avant l'arrêt de fuite (dans la cavité).

Pour la cavité de 90mm, on observe sur la Figure 5 un pic de pression dans la cavité qui montre l'influence de cette zone. Mais, pour la largeur de 45mm aucun impact de l'écoulement n'est observé dans la cavité. Dans ce cas, l'écoulement passe au dessus de la cavité et se rattache au niveau de l'arrêt de fuite. Le rattachement génère une augmentation de la pression au niveau des 11 dernières sondes. En outre, à l'intérieur de la cavité, les pressions restent identiques à la référence car il n'y a pas d'interaction à l'intérieur.

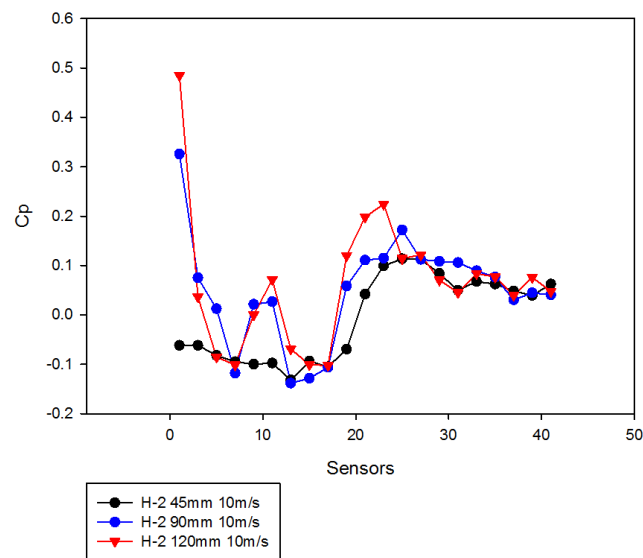


FIGURE 5 –  $C_p$  pour 3 largeurs de cavité

Le cas 120mm est similaire au cas 90mm. Cependant, on observe deux pics de pression : un pic dans la cavité et un autre au niveau de l'arrêt de fuite. On peut penser que l'écoulement se sépare en deux différents flux. Un premier qui entre directement dans la cavité et l'autre qui impacte l'arrêt de fuite.

La Figure 6 schématise 2 différentes topologies : une qui implique les cas 90mm et 120mm, et une autre avec seulement le cas 45mm. Si nous retournons à la problématique industrielle liée à ces configurations, nous pouvons dire que la topologie rouge est plus active et que toute la chaleur dissipée ne peut pas s'y accumuler. Les variations de pression dans la cavité démontrent un déplacement d'air frais qui est en mesure de dissiper cette chaleur.

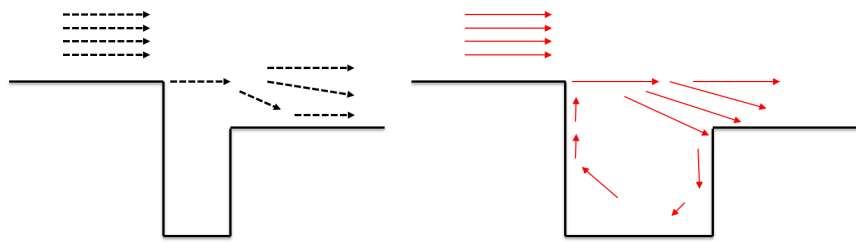


FIGURE 6 – Topologies d'écoulement : noire pour le cas 45mm et rouge pour le cas 120mm (ou 90mm)

## 4.2 Analyse PIV

Les résultats Piv moyennés sont dans un premier temps analysés dans le but d'établir les principales caractéristiques de l'écoulement et d'évaluer les effets de l'asymétrie sur l'écoulement moyen (Figure 7).

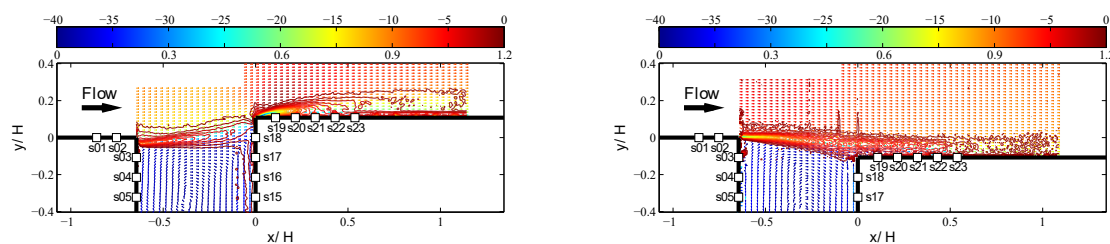


FIGURE 7 – Tracés des vecteurs de la vitesse moyenne ( $\|\vec{U}\|/U_\infty$  - échelle de couleurs inférieure) et la vorticité moyenne ( $\Omega_z^+ = \Omega_z \cdot H/U_\infty$  - échelle de couleurs supérieure). Les cas I (gauche) et III (droite). Les grandeurs vectorielles sont normalisées

Pour le cas I, la couche limite de turbulence à l'arrêt de tête formant une couche de cisaillement, impacte sur le bord de fuite de la cavité et conduit à la formation d'une zone de séparation en aval de la paroi. Causées par une accélération locale à l'arrêt de fuite, de fortes valeurs négatives de la vorticité moyenne ( $\Omega_z^+ < 20$ ) sont observées dans la zone de séparation. De plus, une forte activité de vorticité se manifeste également à l'intérieur de la cavité, le long de la paroi de fuite. Ce comportement particulier sera abordé plus tard. Concernant le cas III, un mécanisme physique différent est en jeu. Au regard de la distribution de la vitesse moyenne, la couche de cisaillement se trouve étendue largement en aval du bord de fuite de la cavité avec un rattachement à  $0.5H$  en aval (près de la sonde 23).

## 4.3 Oscillation de l'écoulement dans la cavité

Pour des écoulements de cavité, le mécanisme le plus commun d'oscillations auto-entretenues est le mécanisme de rétroaction de Rossiter ([1]). Les petites perturbations sont amplifiées le long de la couche de cisaillement par les instabilités de Kelvin-Helmoltz et sont convectées en aval. L'impact de ces structures sur l'arrêt de fuite de la cavité génère des ondes acoustiques qui se déplacent le long du bord d'attaque où elles excitent la couche limite entrante et maintiennent la formation de nouvelles structures amplifiées le long de la couche de cisaillement. Cette boucle de retour a été décrite comme un mode de couche de cisaillement par Rowley ([3]). Plus tard, Block ([4]) a amélioré le modèle en introduisant le rapport d'aspect longueur-profondeur de la cavité et en considérant le déplacement vertical de la



couche de cisaillement et son impact sur la pression acoustique sur les bords de la cavité. La fréquence caractéristique des différents modes  $n$  peut être lue comme :

$$St = \frac{fL}{U_\infty} = \frac{n}{M(1 + 0.514/(L/H)) + 1/\kappa}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

Mais, comme il a été vu précédemment, les parois asymétriques modifient la dynamique du champ d'écoulement à l'intérieur et au dessus de la cavité. Ces modifications sont-elles présentes dans les oscillations de l'écoulement de cavité ? Les spectres de pression à la paroi sont-ils similaires au modèle analytique de Block ? La Figure 8 présente les spectres de pression des sondes 3 et 16, de chaque côté de la cavité. Avec cette analyse, nous serons en mesure de répondre aux questions précédentes.

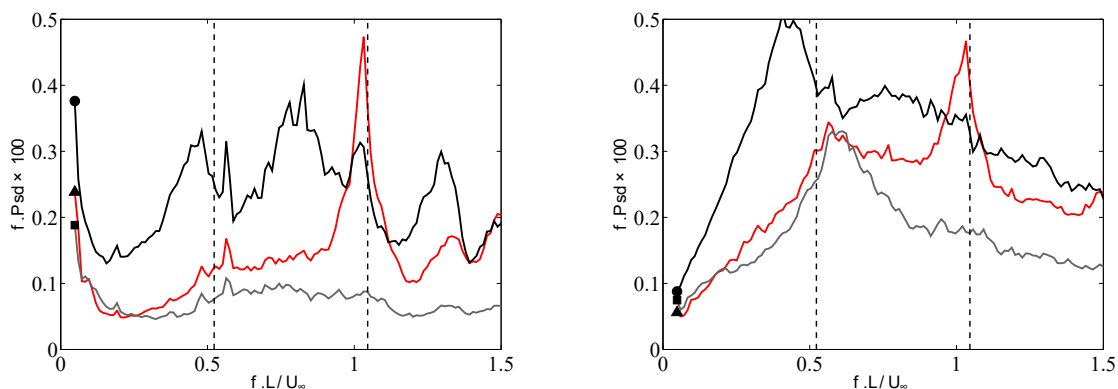


FIGURE 8 – PSD Prémultiplié et normalisé des fluctuations de la pression à la paroi (a) et (b) Les lignes en pointillés représentent les premier et second modes de la prédiction de Block en regard du rapport d'aspect ( $\kappa = 0.57$ ). La sonde 3 (première paroi latérale de la cavité) sur la figure de gauche et la sonde 16 (dernière paroi de latérale de la cavité) sur la figure de droite.

Pour le cas de référence II (ligne rouge), un pic de fréquence est nettement visible à  $St = f.L/U_\infty = 1$  sur la première paroi (sonde 3). Il correspond bien au modèle de prédiction de Block avec  $n = 2$ . Cette fréquence est également présente sur la dernière paroi (sonde 16), ce qui permet d'en déduire une interaction entre ces deux parois. Un autre pic d'énergie se manifeste également sur la dernière paroi autour de  $St = 0.5$  et il est bien prédit par le modèle de Block pour  $n = 1$ . Mais, si on compare avec le cas III (lignes grises) on n'observe pas un tel ajustement qu'avec le cas de référence. On observe bien la prédiction du modèle de Block pour  $n = 1$  mais pas pour  $n = 2$ . Le niveau d'énergie du processus de rétroaction n'est pas équivalent et la dynamique du flux influe clairement sur ce processus. La géométrie est prise pour  $d = -20mm$  et on peut imaginer que l'écoulement impacte moins sur la dernière paroi et donc le niveau d'énergie de la rétroaction décroît significativement. Le cas I (ligne noire) est la géométrie à  $d = 20mm$ . De ce cas, on observe également des pics de fréquences mais ceux-ci ne correspondent pas au modèle de Block. On obtient un niveau d'énergie élevé sur une large gamme de fréquences. La dynamique du cas I est très différente des autres et en particulier du cas de référence. La principale variation est ce fort impact avec la face et l'arrêt de fuite. Cela conduit à une séparation du flux d'air et un changement de topologie. On peut penser que l'énergie dans la cavité est plus importante et que donc la cavité est un obstacle pour le flux entrant. Globalement la viscosité du flux augmente, les vitesses diminuent et on observe des recirculations dans et en dehors de la cavité. D'après ce raisonnement et si on analyse le modèle de Block, on peut mettre en évidence que le paramètre à optimiser est la vitesse de convection  $\kappa$ . En utilisant un  $\kappa$  adapté, le modèle de Block peut être utilisé pour toutes les cavités, incluant les configurations asymétriques comme celles que l'on retrouve au niveau des équipements de



train.

## 5 Conclusion

Le déplacement du train est un moyen important de refroidissement des équipements électriques dissipatifs. La position de chaque équipement est évidemment un paramètre important, mais ce n'est pas le seul. Cette contribution montre que la distance et la hauteur de ces équipements a également de l'importance. L'écoulement d'air au dessus du train et entre les équipements n'a pas la même dynamique en fonction de ces paramètres. Cette étude se focalise sur la description de la topologie de l'écoulement pour chaque cas et plus particulièrement dans le cas de deux comportements typiques basés sur différentes physiques de l'écoulement (cas I et III). Le modèle classique de Block n'est pas en mesure de prédire les oscillations auto-entretenues dans la cavité. Les dynamiques de l'écoulement sont assez différentes et par conséquent, il est nécessaire d'ajuster la vitesse de convection. Mais, tout comme le cas d'écoulement de cavité profonde piloté par cisaillement, un mécanisme de réaction entre les instabilités de la couche de cisaillement et le forçage acoustique est observé dans les configurations asymétriques étudiées.

## Remerciements

Ces travaux s'inscrivent dans les thèmes de la Fédération de Recherche CNRS Transports Terrestres & Mobilité, en articulation avec le projet ELSAT2020 cofinancé par l'Union Européenne, le Ministère de l'éducation Nationale de l'enseignement Supérieur et de la Recherche et la Région Hauts de France, dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région 2015-2020. Les auteurs remercient le support de ces institutions.

## Références

- [1] ROSSITER J.E. 1964 Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds. *Tech. Rep. Aero. Res. Council. R. & M.*
- [2] YAMAMOTO, H., SEKI, N. & FUKUSAKO, S. 1983 Forced Convection Heat Transfer on a Heated Bottom Surface of Cavity with Different Wall-Height. *Warme und Stoffübertragung* **17**, 73-83
- [3] ROWLEY, C.W., COLONIUS, T. & BASU, A.J. 2002 On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities. *J. Fluid Mech.* **455**, 315-346
- [4] BLOCK P.J.W. 1976 Noise response of cavities of varying dimensions at subsonic speeds. *Tech. Rep. D-8351. NASA Tech. Note.*
- [5] LARCHEVÊQUE, L., SAGAUT, P., MARY, I., LABBÉ O. & COMTE, P. 2003 Large-eddy simulation of a compressible flow past a deep cavity. *Physics of Fluids* **15**, 193-210
- [6] J. BASLEY, L. R. PASTUR, N. DELPRAT & F. LUSSEYRAN 2013 Space-time aspects of a three-dimensional multi-modulated open cavity flow. *Phys. Fluids*, **25**, 064105 (2013)
- [7] EL HASSAN, M., LABRAGA, L. & KEIRSBULCK, L. 2007 Turbulent boundary layer over a deep cavity : friction coefficient and streamwise velocity components. *Canadian Journal of Physics*, **85**, 1447-1457
- [8] YAMOUNI, S., SIPP, D. & JACQUIN, L. 2013 Interaction between feedback aeroacoustic and acoustic resonance mechanisms in a cavity flow : a global stability analysis. *J. Fluid Mech.* **717**, 134-165
- [9] EL HASSAN, M., LABRAGA, L. & KEIRSBULCK, L. 2007 Aero-acoustic oscillations inside large deep cavities *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 421-428