

# Caractérisation expérimentale d'écoulements alternés de gaz au sein de microcanaux. Pertes de charge et variations de température

Jean KOVCHAR, Magali BARTHES\*, François LANZETTA, Jean-Marc COTE, Michel DE LABACHELERIE

Institut FEMTO-ST, Univ. de Franche-Comté, CNRS  
25030 Besançon, France

\*(auteur correspondant : magali.barthes@femto-st.fr)

**Résumé** - Les écoulements gazeux au sein d'une machine Stirling sont de type oscillant alterné et sont très peu documentés à l'échelle microscopique. L'objectif de ce travail expérimental concerne l'étude de tels écoulements dans des canaux de section rectangulaire, de diamètres hydrauliques variant de 100  $\mu\text{m}$  à 1  $\text{mm}$  et sous différentes fréquences d'oscillation, de 0.7 Hz à 3.5 Hz. On montre l'influence du diamètre hydraulique sur les variations de pression et de température avec des variations de pression jusqu'à 6 fois plus importantes et des variations de température plus que 6 fois supérieures dans les canaux de diamètre 100  $\mu\text{m}$  par rapport à celles obtenues, dans les mêmes conditions, dans les canaux de diamètre 1  $\text{mm}$ .

## Nomenclature

$D_h = \frac{4S_p}{\Pi}$  diamètre hydraulique, m

$f$  fréquence, Hz

$h$  hauteur du microcanal, m

$L$  longueur du microcanal, m

$P$  pression, Pa

$r$  rayon hydraulique du microcanal, m

$S_p$  section de passage,  $\text{m}^2$

$T$  température, K

$w$  largeur du microcanal, m

*Nombres adimensionnels*

$Re$  nombre de Reynolds

$Wo$  nombre de Womersley

*Symboles grecs*

$\alpha = \frac{l}{h}$  rapport d'aspect

$\nu$  viscosité cinématique,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$\Pi$  périmètre mouillé, m

$\omega$  fréquence angulaire  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

## 1. Introduction

La valorisation des chaleurs fatales constitue un enjeu majeur pour notre économie. On estime que, sur le gisement industriel sur près de 110  $TWh$ , 25 % correspondent à un niveau de température compris entre 100 °C et 200 °C. Les progrès récents des dernières décennies dans les technologies MEMS ont ouvert la voie à la conception, au développement et à la miniaturisation de dispositifs de récupération et de conversion en énergie électrique d'énergie basse température fonctionnant sur le principe d'une machine Stirling. Ces machines Stirling sont caractérisées par des écoulements oscillants alternés de gaz (air, hélium, hydrogène).

De précédentes études menées au sein de l'institut FEMTO-ST [1] [2] ont contribué à la fabrication d'un prototype de moteur Stirling miniaturisé. Cependant, les tests expérimentaux de ce prototype ont mis en évidence des problèmes liés aux écoulements alternés à ces échelles milli- et sub-millimétriques. Les pertes de charge observées étaient, en effet, bien plus importantes que celles prévues par la théorie basée sur les résultats à échelle macroscopique. Optimiser le design de la machine Stirling miniature nécessite donc de bien comprendre les

caractéristiques thermiques et fluidiques des écoulements alternés de gaz au sein de conduites de dimensions milli- et sub millimétriques.

Cependant, il existe très peu de références bibliographiques de tels écoulements à ces échelles, alors qu'à l'échelle macroscopique, ces écoulements alternés ont été largement étudiés depuis Richardson *et al.*[3] : ils ont montré en particulier qu'à l'échelle macroscopique, le profil de vitesse présentait la particularité d'avoir une vitesse maximale en proche paroi (au lieu d'être localisée au centre de l'écoulement, comme on peut l'observer au sein d'écoulements stationnaires continus). Sur une période, l'écoulement étant à vitesse moyenne nulle, le nombre de Reynolds classique n'était plus pertinent. Ainsi, Womersley [4] a défini un nombre adimensionnel permettant de caractériser l'instationnarité d'un écoulement, le nombre de Womersley :

$$Wo = r \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (1)$$

Plus récemment, Tanaka *et al.*[5], Leong *et al.*[6] ont proposé, pour caractériser les écoulements oscillants alternés, d'utiliser une définition du nombre de Reynolds modifié prenant en compte la vitesse maximale de l'écoulement.

En l'absence de données sur les écoulements oscillants alternés à l'échelle microscopique, et afin d'avoir une base de référence en micro-fluidique, nous nous sommes intéressés aux études menées sur les écoulements stationnaires au sein de microcanaux au cours des dernières décennies.

Parmi les différentes études d'écoulements permanents en microcanaux avec un fluide compressible, nous pouvons citer par exemple le travail de Wu *et al.*[9] qui furent parmi les premiers à étudier les écoulements de gaz au sein de microcanaux de diamètre hydraulique compris entre 45  $\mu m$  et 85  $\mu m$  pour une large gamme de nombre de Reynolds ( $100 < Re < 15000$ ). Plus récemment, Yuan *et al.*[10] ont étudié l'écoulement d'air au sein de canaux circulaires de diamètre 400  $\mu m$ . Dans tous les cas, ces auteurs ont trouvé un coefficient de pertes de charge plus important que celui prévu par la théorie à échelle macroscopique.

Pour mener l'étude visant à une meilleure compréhension des caractéristiques thermo-fluidiques des écoulements oscillants alternés au sein de milli- et microcanaux, nous avons conçu et microfabriqué des canaux de différentes géométries. Dans cet article, nous présenterons les résultats obtenus avec de l'air pour des canaux de même longueur, sans singularité, avec deux diamètres hydrauliques de rapport d'aspect identique.

## 2. Matériel

Une fois le dimensionnement réalisé, les canaux ont été réalisés à l'aide de technologies de microfabrication, au sein de la centrale MIMENTO (salle blanche) de l'Institut FEMTO-ST. Un exemple de canal ainsi réalisé est représenté sur la figure 1.

Le canal est visible au centre et, de part et d'autres, des convergents/divergents ont été dimensionnés afin de permettre l'adaptation de section avec le reste du dispositif expérimental tout en minimisant les pertes de charge singulières (générées par ces singularités) et dans la limite de l'espace disponible sur le substrat (wafer) utilisé en salle blanche. Le tableau 1 présente les dimensions caractéristiques des canaux et les conditions opératoires testées et présentées dans cet article.

Ces canaux sont constitués d'un assemblage de trois wafers : deux en silicium (orientation

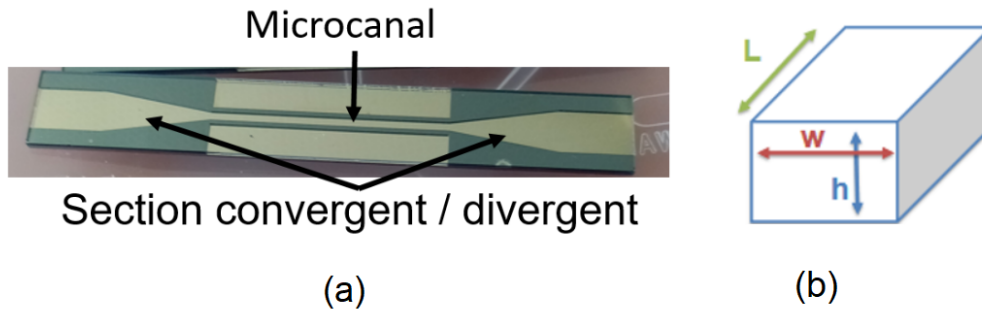


Figure 1 : (a) microcanal ( $D_h = 1 \text{ mm}$ ) réalisé à l'aide de technologies de microfabrication, (b) Schéma des microcanaux avec  $h$  la hauteur,  $w$  la largeur et  $L$  la longueur du microcanal.

	$D_h$	$w$	$h$	$L$	$\alpha$	$f$
	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	mm		Hz
Canal 1	100	100	100	25	1	0.7-3.5
Canal 2	1000	1000	1000	25	1	0.7-3.5

Tableau 1 : Caractéristiques des canaux étudiés et conditions opératoires de l'étude

100, dopés P), et un en verre (borofloat 33). Le substrat du bas est un substrat de Silicium d'une épaisseur de  $500 \mu m$  qui constitue la paroi inférieure du microcanal. Le substrat du milieu constitue le microcanal : il est gravé sur toute son épaisseur par gravure sèche profonde (DRIE). La hauteur des microcanaux «  $h$  » est donc celle de l'épaisseur du substrat de Silicium. Enfin, le wafer du dessus est un substrat de verre de  $500 \mu m$  d'épaisseur prévu pour permettre la visualisation de l'écoulement et servant de paroi supérieure du microcanal.

L'assemblage des différents wafers a été réalisé d'abord par thermocompression Or-Or entre les deux substrats de Silicium; l'élément obtenu (stack) constitué des 2 wafers de silicium assemblés a ensuite été collé au wafer de verre par soudure anodique.

Après découpe des wafers, différents microcanaux sont obtenus. Chaque microcanal est ensuite testé sur un banc de mesure représenté sur la figure 2. L'écoulement alterné d'air qui traverse le microcanal (1) est généré à l'aide de deux pistons (5) qui sont mis en mouvement, avec un déphasage de  $\pi$ , par un système de bielle-manivelle entraîné par un moteur (4) dont la vitesse de rotation est réglable.

Le design des raccordements entre les pistons et le microcanal est réalisé de sorte à obtenir une symétrie de l'écoulement alterné de part et d'autre du microcanal. Ces raccordements supportent d'une part les capteurs de pression KULITE XCQ-055-10 BARA-8068-3-661 (2). D'autre part, ils supportent aussi des capteurs de température (3) qui sont des thermocouples de type K de diamètre  $12.7 \mu m$ , fabriqués et étalonnés au laboratoire. Des emplacements sont également prévus pour intégrer des capteurs de vitesse par fil chaud, de part et d'autre des extrémités du canal, en regard des capteurs de pression et de température.

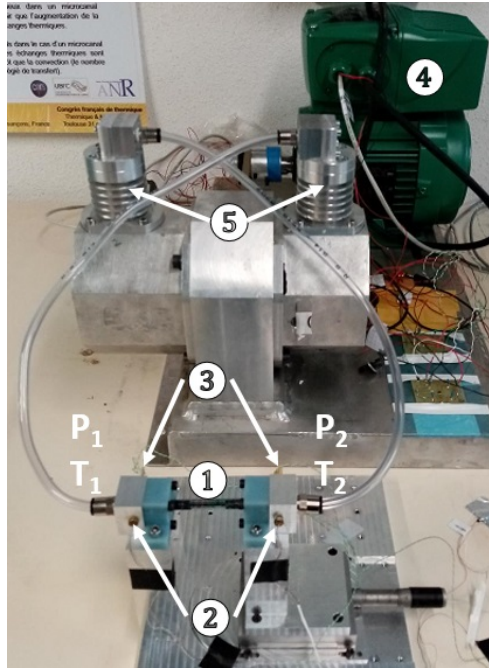


Figure 2 : Dispositif expérimental. (1) microcanal, (2) Capteurs de pression, (3) Thermocouple type K, (4) Moteur, (5) Pistons

### 3. Résultats

La figure 3 représente l'évolution de la pression relative pour différentes fréquences, de 1  $Hz$  à 3  $Hz$  pour les microcanaux de diamètre hydraulique 1  $mm$  et 100  $\mu m$ . On observe sur une période que, pour le microcanal de 1  $mm$ , l'amplitude de variation de la pression augmente de 170  $Pa$  à 310  $Pa$  lorsque la fréquence augmente de 1.05 à 3.2  $Hz$ . Cela s'explique par l'augmentation de la vitesse en fonction de la fréquence, qui induit en conséquence des pertes de charge bien plus importantes. On peut aussi constater que cette variation de pression est bien plus importante pour un écoulement au sein du microcanal de diamètre hydraulique 100  $\mu m$ . On observe en effet une amplitude de variation de pression passant de 500  $Pa$  à 2000  $Pa$  lorsque la fréquence augmente de 1.05  $Hz$  à 3  $Hz$ . Cela montre l'influence du diamètre hydraulique et s'explique par le changement de section, qui provoque une élévation des vitesses de l'écoulement, et donc des pertes de charge plus importantes.

La figure 4 représente la variation de pression en fonction de la fréquence d'alternance au sein des microcanaux de diamètre 1  $mm$  et 100  $\mu m$ . On observe les tendances observées sur la figure 3. L'amplitude de variation de la pression augmente lorsque la fréquence augmente. De plus, cette variation est bien plus importante au sein du microcanal 100  $\mu m$  qu'au sein de celui de 1  $mm$  : elle y est jusqu'à 5 fois plus importante entre 0.7  $Hz$  et 3.5  $Hz$ . On observe par ailleurs que cette variation en fonction de la fréquence semble être linéaire, contrairement à ce qui est observé en régime unidirectionnel stationnaire où les variations de pression varient en fonction du carré de la vitesse.

La figure 5 représente l'évolution de la température au sein du microcanal de 1  $mm$  et 100  $\mu m$  de diamètre pour des fréquences entre environ 1  $Hz$  et 3  $Hz$  au cours d'une période.

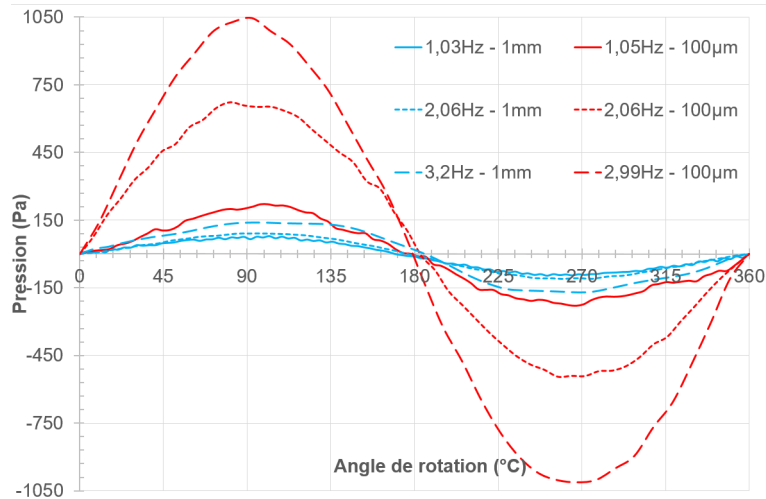


Figure 3 : Evolution de la pression au cours d'une oscillation de l'écoulement au sein du canal de diamètre 1 mm et 100  $\mu\text{m}$  pour plusieurs fréquences

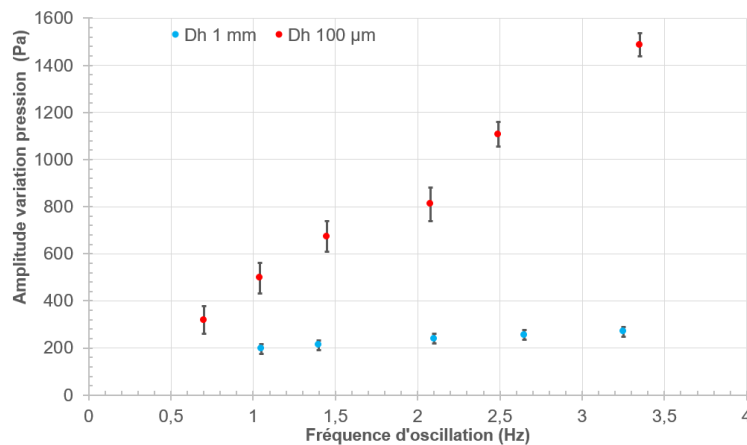


Figure 4 : Influence de la fréquence d'oscillation de l'écoulement sur l'amplitude de variation de la pression au sein des microcanaux de diamètre 1 mm et 100  $\mu\text{m}$

La précision des mesures de températures est de l'ordre de  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . On constate que la température varie comme la pression, avec un léger déphasage quant à la position des pics : le maximum est légèrement décalé de la position  $90^\circ$ , correspondant à la position du maximum de pression sur une période. Pour le microcanal de 1 mm, la température varie de  $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  à 3.2 Hz. La variation de température est encore une fois bien plus importante pour le microcanal de 100  $\mu\text{m}$ , passant de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  pour une fréquence de 1.05 Hz, à environ  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  pour une fréquence de 2.99 Hz.

La figure 6 représente l'évolution de l'amplitude de variation de la température en fonction de la fréquence d'alternance de l'écoulement, au sein des microcanaux de diamètre 1 mm et 100  $\mu\text{m}$ . On observe les tendances observées sur la figure précédente : l'amplitude de variation de la température augmente lorsque la fréquence augmente. De plus, cette variation est bien plus importante au sein du microcanal 100  $\mu\text{m}$  qu'au sein du microcanal 1 mm. L'amplitude de

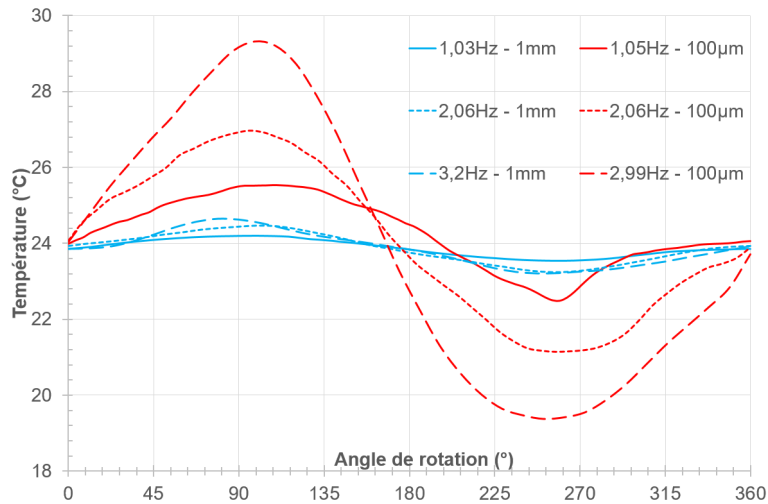


Figure 5 : Evolution de la température au cours d'une oscillation de l'écoulement au sein du canal de diamètre 1 mm et 100  $\mu\text{m}$  pour plusieurs fréquences

variation de la température est jusqu'à environ 7 fois plus importante entre 0.7 Hz et 3.5 Hz au sein du microcanal de 100  $\mu\text{m}$ . Cette variation de température observée est liée aux variations de pression. Les pertes de charge, plus importantes à fréquence élevée et dans des canaux de diamètres plus faibles, induisent des frottements plus importants qui peuvent être à l'origine de cette augmentation de température significative.

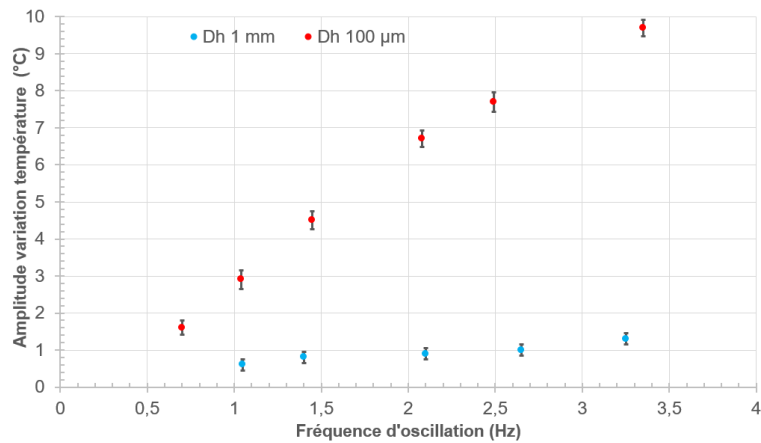


Figure 6 : Influence de la fréquence d'oscillation de l'écoulement sur l'amplitude de variation de la température pour le canal de diamètre 100  $\mu\text{m}$

## 4. Conclusion

L'étude des écoulements oscillants alternés, avec de l'air, dans des canaux millimétriques et sub-millimétriques nous a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes. Tout d'abord, le changement de diamètre hydraulique induit des variations de pression non négligeables : à débit massique identique, ces variations sont jusqu'à 5 fois plus importantes avec le canal de 100  $\mu\text{m}$

qu'avec celui de 1 mm. Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence induit, comme l'augmentation de la vitesse en écoulement permanent, une augmentation de l'amplitude de variation de pression jusqu'à deux fois plus importante entre 1 Hz et 3 Hz, ceci pouvant être attribué majoritairement à l'augmentation des pertes de charge. Enfin, l'amplitude de variations des températures augmente avec la fréquence et, à fréquence identique, est bien plus élevée avec le canal de 100  $\mu\text{m}$  qu'avec le canal de 1 mm. Cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation des pertes de charge et donc des frottements. Le léger déphasage observé entre les signaux de température et pression va être étudié plus en profondeur. Par ailleurs, afin de généraliser les résultats obtenus et de pouvoir les corrélérer entre eux, d'autres dimensions de canaux, sur des gammes de fréquence plus élevées, sont actuellement testés. Enfin, il sera intéressant de compléter cette étude en s'intéressant à l'influence de paramètres supplémentaires, comme le rapport d'aspect des canaux, la présence de singularités (coudes), la compressibilité du fluide (choix du fluide) et la présence d'un gradient de température imposé de part et d'autre du canal (échangeurs de chaleur intégrés au dispositif expérimental). Les canaux permettant une telle étude ont déjà été conçus en ce sens et seront testés dans la suite de ce travail.

## Références

- [1] E. Dellali, Étude théorique et expérimentale des écoulements oscillants alternés d'un gaz au sein de micro et milli-régénérateurs de moteur Stirling, *PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté* (2018)
- [2] A. D. Diallo, Contribution à la conception et à la réalisation d'une micro-machine thermique à cycle de Stirling, *PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté* (2019)
- [3] E. G. Richardson, E. Tyler, The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which an alternating or continuous flow of air is established, *Proceedings of the Physical Society*, 42-1 (1929) pp.1-15
- [4] J. R. Womersley, Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known, *The journal of physiology*, 127-3 (1955) pp.553-563
- [5] M. Tanaka, I. Yamashita, F. Chisaka, Flow and heat transfer characteristics of the Stirling engine regenerator in an oscillating flow, *JSME International journal*, 33-2 (1990) pp.283-289
- [6] K. C. Leong, L. W. Jin, Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam, *International Journal of Heat and Fluid flow*, 27-1 (2006) pp.144-153
- [7] D. Pfund, D. Rector, A. Shekarriz, A. Popescu, J. Welty, Pressure drop measurements in a micro-channel, *AIChE Journal*, 46-8 (2000) pp.1496-1507
- [8] G. Croce, P. D'Agaro, Numerical simulation of roughness effect on microchannel heat transfer and pressure drop in laminar flow, *Journal of Physics D : Applied Physics*, 38-10 (2005) pp.1518
- [9] W. Peiyi, W. Little, Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigerators, *Cryogenics*, 23-5 (1983) pp.273-277
- [10] X. Yuan, Z. Tao, H. li, Y. Tian, Experimental investigation of surface roughness effects on flow behavior and heat transfer characteristics for circular microchannels, *Chinese Journal of Aeronautics*, 29-6 (2016) pp.1575-1581
- [11] T. P. Brackbill, S. G. Kandlikar, Effect of sawtooth roughness on pressure drop and turbulent transition in microchannels, *Heat transfer engineering*, 28-8 (2007) pp.662-669
- [12] S.-S. Hsieh, H.-H. Tsai, C.-Y. Lin, C.-F. Huang, C.-M. Chien, Gas flow in a long microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47-17 (2004), pp.3877-3887
- [13] G. L. Morini, M. Lorenzini, S. Salvigni, M. SPiga, *Microfluidics and nanofluidics*, 7-2 (2009) pp.181-190

## Remerciements

Ce projet a été soutenu par l'EUR EIPHI (ANR-17-EURE-0002), le projet ISITE-BFC (ANR-15-IDEX-0003) et la Région Bourgogne-Franche-Comté. Ce projet a été partiellement soutenu par le réseau français RENATECH et son infrastructure technologique MIMENTO de l'Institut FEMTO-ST.