



**HAL**  
open science

# **Etude expérimentale et numérique du mélange dans le canal de prémélange et la chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz**

Said Lahraichi, Vladimir Sabel'Nikov, Pascal Buel

## **► To cite this version:**

Said Lahraichi, Vladimir Sabel'Nikov, Pascal Buel. Etude expérimentale et numérique du mélange dans le canal de prémélange et la chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03362365>

**HAL Id: hal-03362365**

**<https://hal.science/hal-03362365v1>**

Submitted on 1 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Étude expérimentale et numérique du mélange gazeux dans le canal de prémélange et la chambre de combustion d'une micro-turbine à gaz

Said Lahraichi\*, Vladimir Sabel'nikov\* & Pascal Bruel\*\*

\*ONERA

DEFA/EFCA

Chemin de la Hunière 91761 Palaiseau Cedex, France

said.lahraichi@onera.fr

\*\*CNRS et Université de Pau et des Pays de l'Adour

Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications UMR 5142

UPPA - IPRA, BP 1155, 64000, Pau Cedex, France

## Résumé :

*Le mélange joue un rôle important dans le développement et le maintien de la combustion. Ce rôle est encore plus important dans le cas où la combustion se développe au sein de petits volumes ( $< 1\text{cm}^3$ ) et se caractérise alors par les faibles valeurs du nombre de Reynolds associé. Cette configuration se retrouve en particulier dans les micro-turbines à gaz qui sont l'un des éléments intervenant dans la conception des microsystèmes énergétiques (MEMS) qui nous intéressent dans le cadre de cette étude. Les gaz injectés dans la micro-turbine passent par un canal de prémélange avant d'arriver dans la chambre où aura lieu la combustion. Cette contribution présentera des résultats numériques et expérimentaux destinés à appréhender les principales propriétés des processus de mélange au sein des différentes parties de la turbine. L'objectif final poursuivi est de permettre l'optimisation de la conception des différents éléments constitutifs d'une micro-turbine à gaz.*

## Abstract :

*The mixing plays an important role in the development and the stabilization of a flame. This role is even more important in the case of combustion in small volumes ( $< 1\text{cm}^3$ ) since the Reynolds numbers are relatively small. This configuration is found in particular within the gas micro-turbines which are one of the elements intervening in the design of Micro Electrical Mechanical Systems (MEMS) like flying micro-drones. The gases injected into the micro-turbine pass by a premixing channel before entering in the chamber where combustion takes place. This contribution contains numerical and experimental results intended to apprehend the principal properties of the processes of mixing within the various parts of the turbine. The final goal is to allow the optimization of the design of the various components of a gas micro-turbine.*

## Mots-clefs :

**Mélange ; Micro-turbine ; Simulation numérique**

## 1 Introduction

La réalisation et la stabilisation de la combustion dans les petits volumes ( $< 1\text{cm}^3$ ) représente l'un des défis majeurs à relever en vue de la fabrication de micro-turbines à gaz destinées à fournir l'énergie nécessaire pour la propulsion et l'alimentation d'engins miniatures tels que les micro-drones.

Dans cet article, nous allons nous intéresser plus particulièrement au problème du mélange gazeux combustible-oxydant réalisé au sein du canal d'alimentation d'une micro-chambre. Ce point est en effet tout à fait crucial, compte-tenu des faibles valeurs des nombres de Reynolds associés aux vitesses d'injection des gaz ( $100 < Re < 500$ ) qui conduisent à une absence

de structures fortement tourbillonnaires capables de favoriser le mélange. Ceci se répercute alors négativement sur les conditions d'allumage et de stabilisation de la flamme au sein de la micro-chambre. Comme les coûts élevés de fabrication des micro-turbines à gaz constituent une limitation à leur étude par des moyens expérimentaux et de diagnostic classiques, il est donc nécessaire d'utiliser la simulation numérique pour comprendre la dynamique des fluides et les autres phénomènes qui contrôlent la combustion dans la micro-chambre. Dans cette optique, la qualité de prévision de la simulation numérique sera analysée au vu d'une confrontation avec les résultats expérimentaux disponibles à l'ONERA.

## 2 Présentation de la géométrie du canal de prémélange.

Le concept de micro-turbine a été proposé par Epstein (1997), (2003) et Mehra (2000) au MIT. Ce micro-moteur pourrait produire de 10 à 20 Watts électriques en consommant environ 10 g d'hydrogène à l'heure. Des versions plus puissantes pouvant aller jusqu'à 100 Watts électriques sont envisageables en ayant recours à des combustibles hydrocarbonés. Comme le montre la figure 1-a, l'architecture d'une telle machine est à la fois très simple et très compacte.

En première approche et comme le montre la figure 1-b, la zone de prémélange peut être assimilée à un canal situé entre deux plaques parallèles séparés par une distance de 0,4 mm. Le combustible est injecté par un trou situé sur la plaque supérieure. Le mélange air-combustible doit alors être réalisé sur une distance de 3 à 6 mm. Afin de simplifier l'étude expérimentale, un facteur d'échelle de 3 est appliqué ici par rapport à la configuration du MIT. La distance séparant ces deux plaques est alors de 1,3 mm pour une longueur de mélange de 30 mm. Dans cette étude sans réaction de combustion, le combustible est remplacé par de l'azote pour la caractérisation du mélange. Afin de déterminer la géométrie et les paramètres d'écoulements

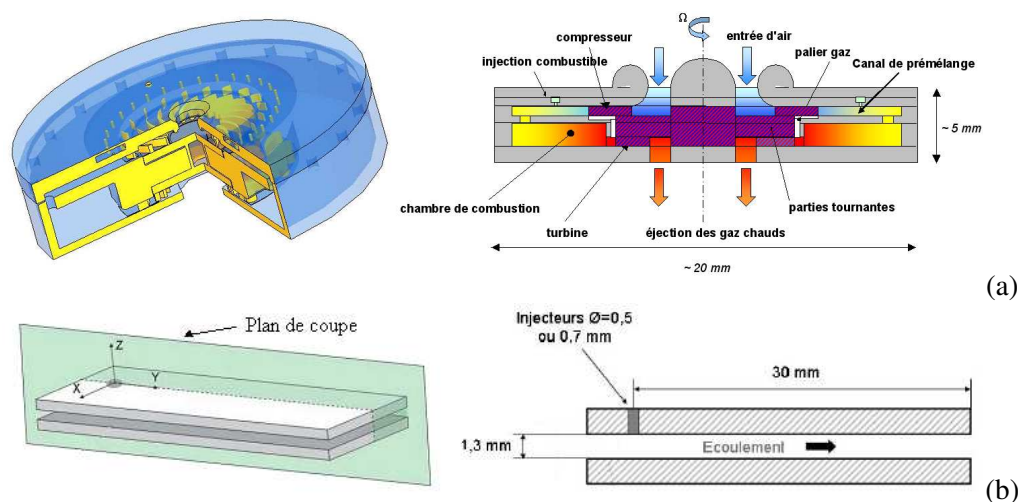


FIG. 1 – Micro-turbine du MIT : (a) schéma de principe et (b) coupe du canal de prémélange

à étudier représentatifs de ceux présents (idéalement) au sein des micro machines envisagées, une étude de similitude sur les nombres de Reynolds caractérisant l'écoulement dans la maquette expérimentale de l'ONERA été réalisée. Le tableau 1 résume les résultats de cette étude. Il apparaît que nous avons pu conserver et même légèrement étendre la plage de nombre de Reynolds envisageable.

Grandeur	Micro machine MIT	Dispositif expérimental ONERA
Section moyenne (m <sup>2</sup> )	$12 \times 10^{-6}$	$200 \times 10^{-6}$
Température de l'air (K)	500 - 800	293
Pression (Pa)	$3 \times 10^5$	$1 \times 10^5$
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1,3 - 2,1	1,2
Viscosité cinématique $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$4 \times 10^{-5}$ - $8 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Débit d'air (kg/s)	$2 \times 10^{-4}$ - $4 \times 10^{-4}$	$0,3 - 2 \times 10^{-3}$
Vitesse moyenne $V$ (m/s)	8 - 20	1 - 8
Nombre de Reynolds $Re_h = \frac{Vh}{\nu}$	100 - 500	100 - 750 (*)

TAB. 1 – Paramètres de similitude entre les écoulements du canal de la micro-turbine du MIT et ceux retenus pour le canal de prémélange de la présente étude. (\*) L'étude a été limitée à  $Re_{max} = 500$ .

### 3 Simulation numérique de l'écoulement au sein du canal de prémélange

Nous présentons ici différents résultats de simulations numériques réalisées sur la configuration du canal de prémélange d'une micro-chambre de combustion étudiée expérimentalement à l'ONERA par Dumand (2005). Ce dernier a utilisé la fluorescence induite par plan laser sur une maquette du canal de prémélange faite en silice afin d'étudier les propriétés de la zone de mélange air-azote. Les différents paramètres d'écoulement considérés sont précisés dans le tableau 2 où les valeurs du nombre de Reynolds sont basées sur la hauteur  $h$  du canal est la vitesse d'injection de l'air. Une caractérisation complète du mélange nécessiterait la connais-

$Re$	100	250	500
Débit d'air (g/ s)	0,3	0,66	1,33
Vitesse d'injection de l'air (m/ s)	1,2	2,8	5,6
Débit d'azote (mg/ s)	6	15	30
Vitesse d'injection de l'azote (m/ s)	1	2,45	5

TAB. 2 – Paramètres caractérisant les différentes configurations étudiées.

sance de l'évolution de la fraction massique intégrée sur plusieurs sections successives du canal (plans  $(x, z)$  sur la figure 1). Les calculs tri-dimensionnels permettant l'accès à cette donnée sont en cours. Pour l'instant, nous disposons de résultats de calculs bidimensionnels et nous avons choisi de suivre l'évolution spatiale de la fraction massique d'azote injectée, intégrée sur la hauteur du canal  $\bar{Y}_{N_2}$ , soit :  $\bar{Y}_{N_2} = \frac{1}{h} \int_0^h Y_{N_2} dy$ .

#### 3.1 Géométrie du domaine de calcul

Le domaine de calcul bidimensionnel considéré est représenté sur la figure 2. Il correspond à une coupe 2D réalisée dans l'axe du canal de prémélange. Bien qu'idéalement, ce type de simulation doit être réalisé en géométrie tri-dimensionnelle, le passage par l'étude d'une configuration bi-dimensionnelle apparaît nécessaire afin de permettre une validation de l'ensemble de la chaîne de calcul employée associée un coût de calcul raisonnable. De plus, il apparaît au vu des comparaisons calculs-expériences présentées ci-dessous que les résultats obtenus dans ce cadre sont encourageants. Le domaine de calcul est discrétisé, à l'aide du mailleur GMSH, en un maillage structuré à base de quadrangles de pas  $\Delta y = 3 \times 10^{-5} m$  suivant  $y$  et  $\Delta x = 1,3 \times 10^{-5} m$  suivant  $x$  ( $\sim 70000$  cellules et  $\sim 135000$  faces).

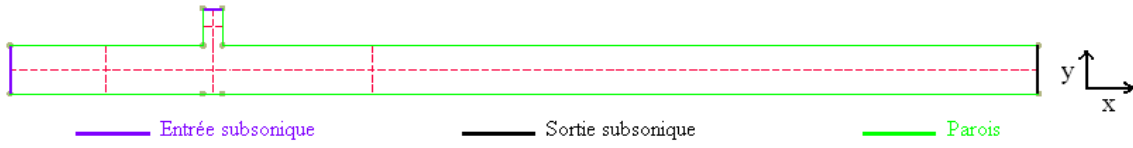


FIG. 2 – Domaine de calcul et conditions aux limites

### 3.2 Système d'équations résolues

la plage des nombres de Reynolds étudiée, laisse supposer que l'on a affaire à des écoulements laminaires si la condition d'entrée est stationnaire (Dans la réalité, l'écoulement arrivant dans le canal passe d'abord par un compresseur, ce qui peut introduire des perturbations. Il faut aussi garder à l'esprit les dimensions réduites du micro-canal de prémélange comparées à celles des turbines à gaz traditionnelles). Nous avons donc opté pour une résolution complète des équations de Navier-Stokes compressibles (Poinot et Veynante (2001)). Le système d'équation est donné en coordonnées cartésiennes par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i - \tau_{ij})}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial [(\rho E + P) u_i - \tau_{ij} + q_i]}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho Y_k + J_{ki})}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique,  $u_i$  les composantes de la vitesse,  $p$  la pression et  $E$  l'énergie totale.  $Y_k$  et  $M_k$ , désignent respectivement, la fraction massique et la masse molaire de l'espèce  $k$ . Le flux de diffusion moléculaire  $J_{ki}$  est modélisé par la loi de Fick :  $J_{ki} = -\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}$ ,  $D_k$  étant le coefficient de diffusion moléculaire de l'espèce  $k$ . Les composantes du tenseur de contraintes  $\tau_{ij}$  sont données par  $\tau_{ij} = \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right]$ , où  $\mu$  représente la viscosité dynamique moléculaire. Le flux de chaleur est donné par l'équation suivante :  $q_i = -\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial x_i} \right]$ ,  $\lambda$  est le coefficient de conductivité thermique. Enfin, la pression est donnée par la loi d'état des gaz parfaits soit :  $p = \rho r T = \rho R \sum_{k=1}^{N_s} \frac{Y_k}{M_k} T$ , le nombre totale des espèces étant noté  $N_s$ .

### 3.3 Simulation numérique

Le calcul a été mené dans le cadre de la mise en oeuvre du code CEDRE développé à l'ONERA. Ce programme qui permet la résolution des équations de Navier-Stokes sur des maillages non structurés utilise une approche de type volumes finis. Les schémas d'interpolation des états moyens et des gradients de chaque côté d'une face séparant deux cellules sont d'ordre deux. Des limiteurs peuvent être utilisés pour réduire les comportements oscillants à l'interface. Nous avons utilisé ici un limiteur de type Van Leer. Les flux convectifs sont évalués par un schéma de Roe utilisant un préconditionnement de type bas Mach. Pour des raisons de stabilité, l'intégration temporelle a été réalisée avec un schéma de Runge-Kutta implicite d'ordre deux. Le traitement des conditions aux limites repose sur une méthode utilisant des équations de

relaxation temporelle des variables vers des valeurs imposées dans les cellules limites. Une interpolation, entre ces cellules limites et les premières cellules internes du domaine de calcul, permet alors de déterminer les flux à la frontière. Cette méthode est utilisée quelle que soit la limite considérée, c'est à dire de type entrée ou sortie fluide et paroi imperméable.

#### 4 Exemples de résultats obtenus et comparaison simulation vs expérience

La figure 3 donne l'évolution de la fraction massique moyenne pour les différentes valeurs du nombre de Reynolds d'injection considérées. On observe un accord assez satisfaisant, sur le plan qualitatif tout du moins, entre les résultats de simulations numériques et les résultats expérimentaux. La figure 4 montre les champs de vitesse moyenne et du module du rotationnel moyen. On constate que l'écoulement est tout à fait laminaire et que la vitesse maximale en sortie du canal est presque deux fois plus grande que celle de l'injection pour les trois nombres de Reynolds. Le champ du rotationnel présente une zone de recirculation juste après l'injection et un décollement de la couche limite dû à l'augmentation de la pression à l'endroit où se rencontrent les deux écoulements au niveau de la paroi inférieure. Quantitativement parlant, la comparaison est également assez encourageante bien que l'écart observé à 15 mm pour un  $Re = 100$  n'ait pas encore pu être expliqué de manière satisfaisante. L'origine du fait que les résultats de simulations numériques tendent à surestimer systématiquement le taux de mélange en sortie de canal peut être éventuellement recherchée du côté du caractère trop diffusif du schéma numérique employé. Des simulations numériques directes, utilisant le programme de calcul PARCOMB 3D, développé à l'EM2C sous forme 2D (Thévenin et al., 1995) et tridimensionnalisé à l'ONERA, *a priori* moins dissipatif sont actuellement en cours afin de permettre de préciser ce point. Néanmoins, les premiers résultats obtenus ici mettent en évidence les potentialités ouvertes par la simulation numérique ainsi que tout l'intérêt de disposer de données expérimentales exhaustives.

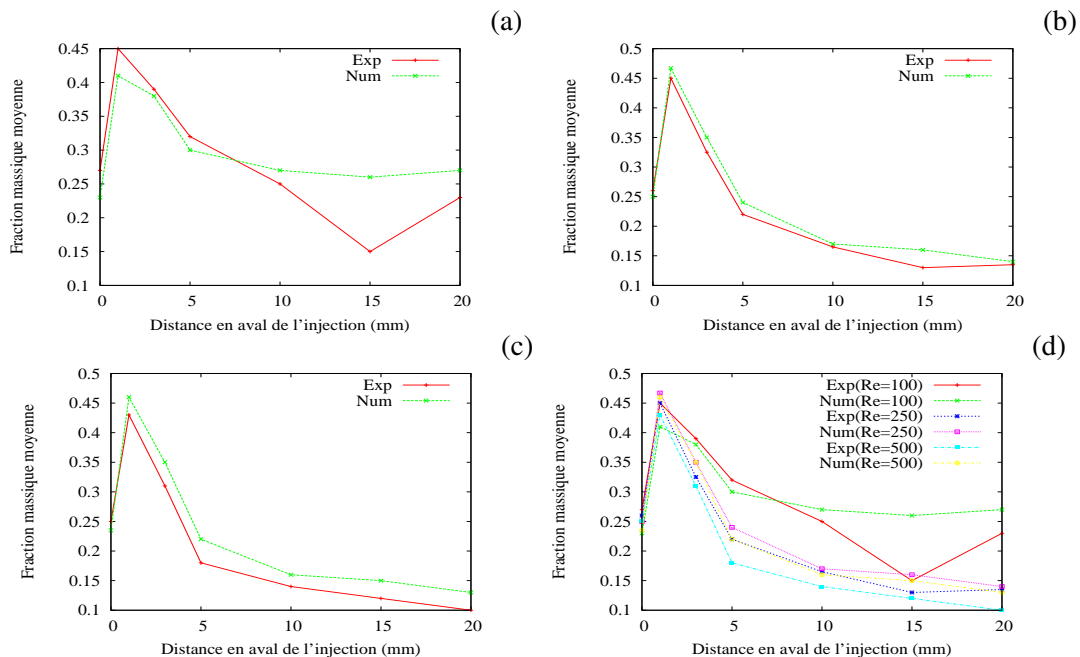


FIG. 3 – Fraction massique moyenne d'azote pour : (a)  $Re = 100$ , (b)  $Re = 250$ , (c)  $Re = 500$  et (d) Récapitulatif de son évolution pour les trois nombres de Reynolds considérés.

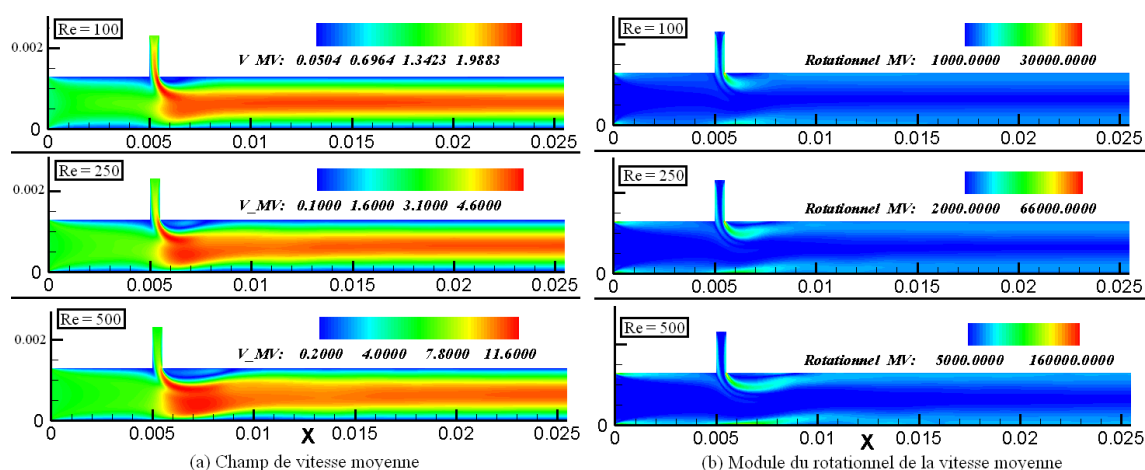


FIG. 4 – Champ de vitesse (gauche) et module du rotationnel du champ de vitesse (droite) pour les différents nombres de Reynolds considérés.

## 5 Conclusions

Dans ce travail, un calcul numérique à l'aide du code CEDRE a été réalisé pour étudier le mélange dans un micro canal de prémélange d'une micro-chambre de combustion. Bien que limitée, la confrontation des résultats obtenus par l'application de cette approche avec ceux issus de l'expérience est assez encourageante. Il apparaît en effet que quantitativement, les niveaux de la fraction massique moyenne d'azote obtenus numériquement dans le plan de sortie du canal de prémélange sont très peu différents de ceux observés expérimentalement. Il reste maintenant à préciser plus avant le degré d'hétérogénéité spatiale obtenu dans le plan de sortie afin de déterminer les moyens de le réduire autant que faire se peut avant l'entrée des gaz au sein de la micro-chambre de combustion.

## Références

- Dumand, C. 2005 Mélange et combustion des les petits volumes : Application aux micro systèmes énergétiques. *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers.*
- Mehra, A. 2000 Development of a high power density combustion system for a silicon micro gas turbine engine. *Ph.D. Thesis, MIT.*
- Poinsot, T., Veynante, D. 2001 Theoretical and numerical combustion., Edwards, second edition.
- Thévenin, D., Behrendt, F., Maas, U., Przywara, B., Warnatz, J. 1996 Development of a parallel direct simulation code to investigate reactive flows. *Comput. Fluids* **25** 485-496.