

Etude de la dynamique instationnaire d'un panache thermique soumis à une pesanteur variable

Aurélien DORIAT¹, Cédric SCHRECK¹, Gildas LALIZEL², Florian MOREAU^{2*}

¹Etudiant de l'ISAE-ENSMA, BP 40109, F-86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

²Institut Pprime, UPR 3346 CNRS – ENSMA – Université de Poitiers, BP 40109, F-86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

*(auteur correspondant : florian.moreau@ensma.fr)

Résumé - Le développement instationnaire dans de l'eau d'un panache thermique est étudié expérimentalement dans un environnement dont la pesanteur varie de 0 g (micro-gravité) à 1.8 g (hyper-gravité). Cette variation est obtenue en réalisant l'expérience au sein d'un avion effectuant des vols paraboliques, l'avion zero G de la société Novespace. Après avoir présenté le dispositif expérimental et les diverses méthodes de mesure utilisées, une analyse de l'évolution de la température à la surface du cylindre chauffant est effectuée à travers une comparaison entre les mesures et une modélisation nodale. L'analyse est complétée à l'aide de la visualisation de la dynamique du panache. La technique de mesure utilisée pour visualiser le panache est la B.O.S. (Background Oriented Schlieren). Elle permet de suivre la dynamique de développement du panache en temps réel. Les résultats montrent que sur les phases à 1 g et 1.8 g les modèles présentent de bons accords avec les mesures. En revanche, il est nécessaire de développer de nouveaux modèles pour résoudre les phases transitions vers la micro-gravité.

1. Introduction

Les phénomènes de convection naturelle sont présents dans la nature : dans le manteau terrestre, dans les océans, dans l'atmosphère mais aussi dans de nombreuses applications industrielles à travers le refroidissement de systèmes électroniques, dans certains modèles de centrales nucléaires, dans le contrôle thermique de l'habitat ou des habitacles : cabine d'avion, train, voiture. Dans le domaine du spatial, les systèmes de refroidissement ou les habitacles des vaisseaux sont soumis à une pesanteur variable entre la phase de décollage et la phase d'apesanteur par exemple. Lorsque la pesanteur est variable, les transferts convectifs peuvent être intensifiés en hyper-gravité, par rapport à ce qui se passe sur terre à 1 g, ou au contraire être atténués en micro-gravité voire ne plus exister et laisser place uniquement aux modes de transfert thermique par conduction et rayonnement. Afin de maîtriser le contrôle des systèmes de refroidissement dans ce type de configuration, il est fondamental de comprendre la dynamique des transferts thermiques à pesanteur variable. Pour l'étude qui va suivre, c'est le cas académique du développement d'un panache thermique laminaire dans une cavité remplie d'eau qui a été retenu.

Des études sur la formation et l'évolution d'un panache convectif au-dessus d'un point chaud ont déjà été réalisées par plusieurs équipes comme [1, 2]. Ces phénomènes ont aussi été étudiées autour d'un cylindre chauffé, à la fois expérimentalement [3, 4] et numériquement [5]. Néanmoins, la simulation numérique est encore loin d'être satisfaisante pour représenter fidèlement les couplages vitesses / température. Les modèles utilisés par les ingénieurs dans les codes cfd industriels sont peu satisfaisants dès lors que les effets de flottabilité doivent être pris en compte. Si, par ailleurs, la pesanteur est variable dans le temps, la physique du problème est d'autant plus complexe.

Un groupe d'étudiants de l'ISAE-ENSMA travaillant sur ce sujet a été lauréat du projet parabole CNES 2018. Ils ont conçu spécialement le dispositif expérimental pour la campagne

de vols paraboliques. Il s'agit d'un cylindre chauffé dans une cavité remplie d'eau. L'expérience a été placée dans l'avion A310 zero G de la société Novespace lors de la campagne du CNES de septembre 2018. Lors d'un vol, l'avion effectue des trajectoires paraboliques, ce qui permet d'obtenir une pesanteur variant périodiquement entre 0 g et 1.8 g. Il a été choisi de ne pas utiliser de techniques laser pour observer le panache pour des raisons de sécurité. La méthode retenue est la B.O.S. (Background Oriented Schlieren). On peut ainsi obtenir la dynamique instantanée et résolue en temps du champ de gradient de température du panache thermique. Cette dynamique est analysée lors des variations de pesanteur.

2. Dispositif expérimental

2.1. La cavité et l'instrumentation

Le banc d'essai (voir la figure 1) a été conçu spécifiquement pour cette expérience. Le but était de limiter et contrôler les risques inhérents à l'environnement dans lequel l'expérience a été réalisée. Deux racks expérimentaux (structures en profilé permettant de lier l'expérience à l'avion) ont été utilisés, le premier contient le système d'alimentation électrique (pouvant délivrer entre 0 et 1.5 kW), de contrôle (un ordinateur avec un programme LabView qui permet de contrôler l'expérience et d'automatiser l'acquisition) et d'acquisition des températures (boîtier de thermocouples). Le second rack contient l'expérience : un appareil photo et la cuve remplie d'eau ainsi que le cylindre chauffant.

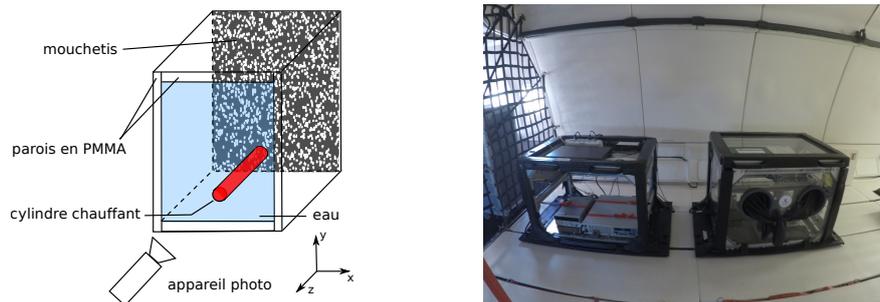


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental (gauche) et le dispositif fixé dans l'avion A310-0g (droite)

La cuve a été mécaniquement conçue pour résister aux fortes contraintes pouvant apparaître lors d'un atterrissage d'urgence, avec une accélération pouvant atteindre 9 g. Elle est étanche pour éviter les risques de courts circuits électriques, d'électrocution et de contamination par l'eau de la cabine de l'A310. Pour cela, trois niveaux d'étanchéité ont été mis en place (deux avec des joints toriques compressés et un joint silicone). Des cornières intérieures et extérieures solidifient la cavité. Leur rôle est d'assurer la résistance structurale et de comprimer les joints pour l'étanchéité. Un vase d'expansion a été utilisé pour absorber les contraintes dues aux variations du volume d'eau lors du chauffage de celui-ci. Le cylindre, creux, contient une cartouche chauffante d'une puissance de 48 W. Afin d'éviter les risques de surchauffe et de brûlure, la cartouche est protégée par une limitation de puissance interne et un fusible (de 2 A) monté en série. Des fusibles thermiques, limitant la température à 55°C, sont également placés sur le cylindre. Les cornières sont reliés à la terre de l'avion pour éviter les courts-circuits.

La cuve a une hauteur de 40 cm, une profondeur de 16 cm et une largeur de 20 cm. Le cylindre chauffant, de 16 mm de diamètre, est placé en partie basse. Les dimensions de la cuve et

la position du cylindre permettent de limiter les effets de bords, tout en ayant un espace important pour observer le développement du panache convectif. Le nombre de Rayleigh critique qui détermine le passage laminaire/turbulent est $Ra_c = 1.10^9$. Dans nos conditions expérimentales et avec de telles dimensions, $Ra = 2.10^6$, ce qui correspond à un régime laminaire. Quatre thermocouples, de type K, ont été installés afin de fournir les conditions aux limites nécessaires à la résolution B.O.S. Trois d'entre eux sont placés en proche paroi à différentes altitudes sur la hauteur de la cuve. Le dernier est sur la paroi du cylindre chauffant. C'est ce dernier qui sert de référence expérimentale pour la modélisation nodale instationnaire. L'ensemble des thermocouples a une précision de 1°C .

2.2. La technique B.O.S.

La méthode B.O.S. est utilisée afin d'observer la dynamique du panache autour du cylindre. Cette méthode est privilégiée car elle est non intrusive. Par ailleurs, elle est peu coûteuse et simple à mettre en oeuvre, en particulier dans un environnement comme celui d'un avion qui effectue des vols paraboliques, où l'utilisation de techniques laser est particulièrement complexe à mettre en oeuvre.

Raffel [6] a réalisé une revue bibliographique présentant la B.O.S. et ses différents domaines d'application. C'est une technique de mesure des gradients d'indice de réfraction présents dans un volume fluide comme l'ombroscopie ou l'interférométrie Mach-Zender. Cette métrologie est "simple" à mettre en oeuvre et permet de mesurer des champs de températures. Le principe de son dispositif expérimental est présenté sur la figure 2.

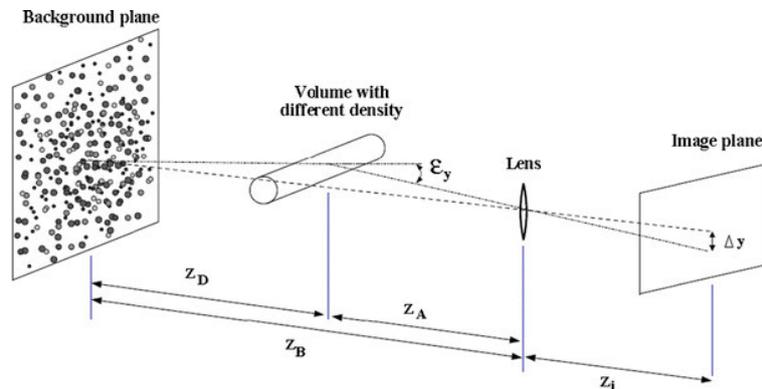


Figure 2 : schéma présentant le principe de la métrologie B.O.S., d'après Raffel [6]

L'indice de réfraction de l'eau dépend de la température. La trajectoire d'un rayon lumineux qui traverse le panache, est d'autant plus déviée que les variations de température y sont importantes.

En reprenant les notations de la figure 2, le problème optique est le suivant, pour une distance entre le mouchetis et le plan de déviation, z_d , suffisamment grande : $\tan \epsilon_y = \epsilon_y = \frac{\Delta y}{M Z_D}$ avec ϵ_y l'angle de déviation selon y , M le grossissement du montage et Δy le déplacement mesuré sur le capteur selon y .

Par ailleurs, la loi de Snell permet de dériver l'angle de déviation selon la stratification du milieu : $\epsilon_y = \frac{1}{n_0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n}{\partial y} dz$, avec $z_2 - z_1 = w$ la profondeur de champs de mesure et n_0 l'indice de réfraction de l'eau à la température de référence loin du panache.

Les équations précédentes se simplifient alors en : $\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{n_0}{M \kappa Z_D w} \Delta y$, où l'on utilise la relation

de Gladstone Dale : $n = \kappa\rho + 1$, avec $\kappa = 3.34 \times 10^{-4} m^3.kg^{-1}$ la constante de gladstone, ρ la masse volumique et n l'indice de réfraction de l'eau.

Enfin, on généralise la solution au problème de déviations dans les deux plans de mesure en résolvant l'équation de Poisson : $\Delta\rho = Ddiv(\vec{X})$, avec $D = \frac{n_0}{M\kappa Z_D w}$. Le gradient de température est déduit en se référant à des tables reliant la densité de l'eau à la température.

Le *mouchetis* est généré en divisant une image en une grille composée de carrés de taille variable. On attribut aléatoirement une couleur noire ou blanche à chaque carré de l'image. Une étude paramétrique a été effectuée en faisant varier la taille des carrés de l'image et la probabilité qu'ils soient noirs. Les tests ont montré que le meilleur résultat était obtenu pour des carrés correspondant à $3 \times 3 pixels^2$ sur le capteur de l'appareil photo et une densité équiprobable de points noirs et blancs.

Une ouverture faible de l'optique de l'appareil photo, f/8, est choisie afin d'éviter les flous de bord. La vitesse d'obturation, 1/25 s et les isos, 800, sont adaptés afin d'avoir une luminosité suffisante. La résolution du capteur est de $22.3 \times 14.9 mm^2$ et $5184 \times 3456 pixels^2$ et la focale est de 17 mm. Les distances géométriques sont $Z_D = 80 mm$, $Z_A = 460 mm$ ainsi que $w = 160 mm$.

Le déplacement des points du mouchetis est analysé à l'aide d'un algorithme de PIV open-source sous Matlab développé par W. Thielicke [7, 8]. Les paramètres utilisés sont une résolution FFT avec quatre passages à fenêtres de tailles $64 \times 64 pixels^2$, $32 \times 32 pixels^2$ puis $16 \times 16 pixels^2$ et $8 \times 8 pixels^2$ et un overlapping de 50 %. Des filtres sont appliqués pour lisser des erreurs locales. On obtient finalement les déplacements \vec{X} selon x et y , axes respectivement horizontal et vertical dans le plan du capteur de l'appareil photo.

A partir des déplacements \vec{X} , on résout l'équation de Poisson avec une méthode itérative de type Gauss-Seidel. Les conditions aux limites sont de type mixte : Dirichlet sur les bords droite/gauche et Neumann sur les bords haut/bas. On impose dans la résolution itérative que toutes les valeurs de température soient supérieures à la température minimale du champ qui est connue ($T_{min} = T_{bord}$). Un masque est utilisé sur la zone du cylindre qui cache le mouchetis. Les déplacements y sont considérés nuls. La température du cylindre ne peut donc pas y être calculée. De plus, les valeurs des températures sont très sensibles aux dimensions géométriques renseignées. Les résultats n'étant pas entièrement satisfaisants pour le moment, les images contiennent des températures adimensionnées par les valeurs limites données par la résolution. L'analyse est donc simplement qualitative et à vocation à permettre une étude de la dynamique du panache.

3. Résultats et discussion

3.1. Modélisation par réseau nodal

L'évolution temporelle de la température de la surface du cylindre et la température moyenne de l'eau ainsi que la variation de la pesanteur sont présentées sur la figure 3. A $t = 0$, la puissance électrique est injectée dans le cylindre et à $t = 500 s$, la puissance électrique est coupée.

Une modélisation utilisant une approche nodale a été mise en place pour comprendre l'évolution de la température de la surface du cylindre en fonction du temps. Cette résolution est une alternative à la résolution de l'équation de la chaleur, elle a l'avantage d'être simple à mettre en place. Le premier noeud caractérise le cylindre en cuivre, et un second noeud est utilisé pour ca-

racteriser la température moyenne de l'eau. Le flux convectif, échangé par convection naturelle, est calculé à partir de la corrélation d'un écoulement laminaire autour d'un cylindre chauffé, pour un nombre de Rayleigh $Ra < 10^6$: $Nu_D = 0,53Ra^{1/4}$, où $Ra = Gr.Pr$. Avec le nombre de Grashof, Gr, défini par : $Gr = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu^2}$.

Pour la modélisation des phases à 1 g et 1.8 g (zones 1, 2, 4 et 5 de la figure 3), la corrélation précédente a été utilisée. En microgravité, une résolution nodale, 2D axisymétrique à 100 noeuds avec un pas d'espace constant de 10^{-4} m, de la diffusion de la chaleur entre le cylindre et l'eau a été utilisée. Une modélisation 3D n'a pas été réalisée car, en première approximation, la distribution de température dans la direction z est homogène et ne présente ainsi pas de gradient initial de la diffusion de chaleur.

3.2. Comparaison des résultats numériques nodaux et expérimentaux et analyse de la dynamique du panache

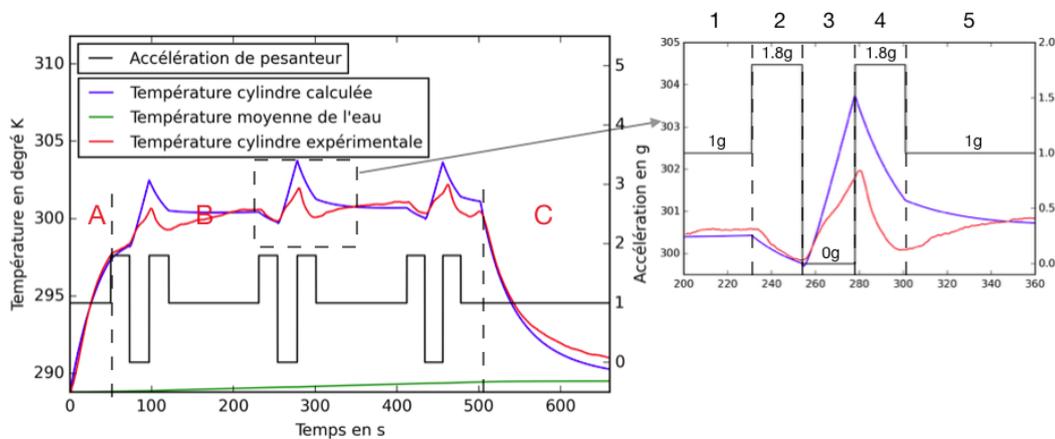


Figure 3 : Courbes théorique et expérimentale de la température de la surface du cylindre en fonction du temps

Le modèle présenté ci-dessus, permet d'obtenir la variation de la température de la surface du cylindre en fonction du temps. Cette modélisation ainsi que les données expérimentales sont présentées en figure 3 pour trois paraboles.

Trois phases sont à noter :

- (A) Tout d'abord un régime instationnaire à 1 g d'augmentation de la température de la surface du cylindre associée au chauffage de celui-ci. Au cours de cette phase, on peut constater que le modèle se superpose très bien aux données expérimentales. Ce qui valide la modélisation nodale instationnaire sur un cas simple.
- (B) Cette phase correspond à trois paraboles avec une succession de phases à 1.8 g, 0 g, 1.8 g et 1 g qui se répète trois fois. Cette succession va faire l'objet d'une analyse détaillée ci-dessous.
- (C) Enfin une phase de relaxation à 1 g au cours de laquelle la puissance électrique injectée dans le cylindre a été coupée.

A titre d'exemple, la seconde parabole est ici analysée plus en détails. Elle est globalement représentative du comportement des autres paraboles.

1. La phase 1 correspond à la fin de la phase à 1 g entre deux paraboles. On constate ici un accord acceptable entre la modélisation et l'expérience. Cette phase correspond ty-

piquement au développement du panache que l'on peut visualiser dans la figure 4, en haut.

2. La phase 2 correspond au début d'une parabole. L'expérience est alors soumise à 1.8 g. On assiste à un refroidissement du cylindre qui s'explique par un échange convectif supérieur en hyper-gravité. La figure 4, au centre, montre un développement plus rapide et plus agité du panache. L'accord entre la température mesurée et modélisée de la surface du cylindre est bon, ce qui permet de valider en hyper-gravité le modèle de convection utilisé.
3. La phase 3 correspond à une phase de micro-gravité à 0 g. L'accord est bien moins bon. La température calculée est sur-estimée ce qui montre que le flux réel échangé entre le cylindre et le fluide est plus grand que le flux calculé. Par ailleurs, on peut remarquer que l'évolution de la température du cylindre présente une rupture de pente qui n'est pas reproduite par la modélisation nodale. En 0 g, il apparaît deux phases distinctes, présentes sur toutes les paraboles, caractérisées par deux pentes différentes. La première pente semble proche de celle modélisée par de la diffusion thermique pure. La seconde pente est moins importante, signifiant que le flux échangé est plus important qu'en diffusion pure. La figure 4, en bas, montre qu'il subsiste dans la cavité, un mouvement résiduel qui entraîne le panache vers le bas. Ce mouvement résiduel n'est pas pris en compte par le modèle. C'est ce qui explique probablement l'écart entre le modèle et l'expérience.
4. La phase 4 correspond à un retour à 1.8 g. On observe un décalage issu, du décalage précédent mais les pentes sont proches.
5. La phase 5 se fait sous 1 g avant le lancement d'une nouvelle parabole.

4. Conclusion

Lors de ce travail, l'influence d'une pesanteur variable sur le développement instationnaire d'un panache thermique est mise en avant. Un cylindre chauffé est placé dans une cavité remplie d'eau. Le développement du panache thermique est suivi par B.O.S. et la température de la surface du cylindre est suivie à l'aide d'un thermocouple placé sur le cylindre. Une analyse nodale permet de modéliser l'évolution instationnaire de la température de surface du cylindre. Les conclusions principales sont que le modèle utilisé permet de rendre compte de l'évolution de la température en phase 1 g et que ce modèle peut être étendu en hyper-gravité, à 1.8 g. En revanche en micro-gravité à 0 g, le modèle ne rend pas parfaitement compte de l'évolution de la température. Cela est probablement provoqué par un mouvement résiduel du fluide lors de la phase à 0 g qui n'est pas pris en compte pour le moment par le modèle. Une des perspectives de ce travail est d'estimer l'évolution de l'agitation du fluide pendant les phases en micro-gravité et développer le modèle afin de corriger les écarts entre les résultats qu'il donne et les mesures.

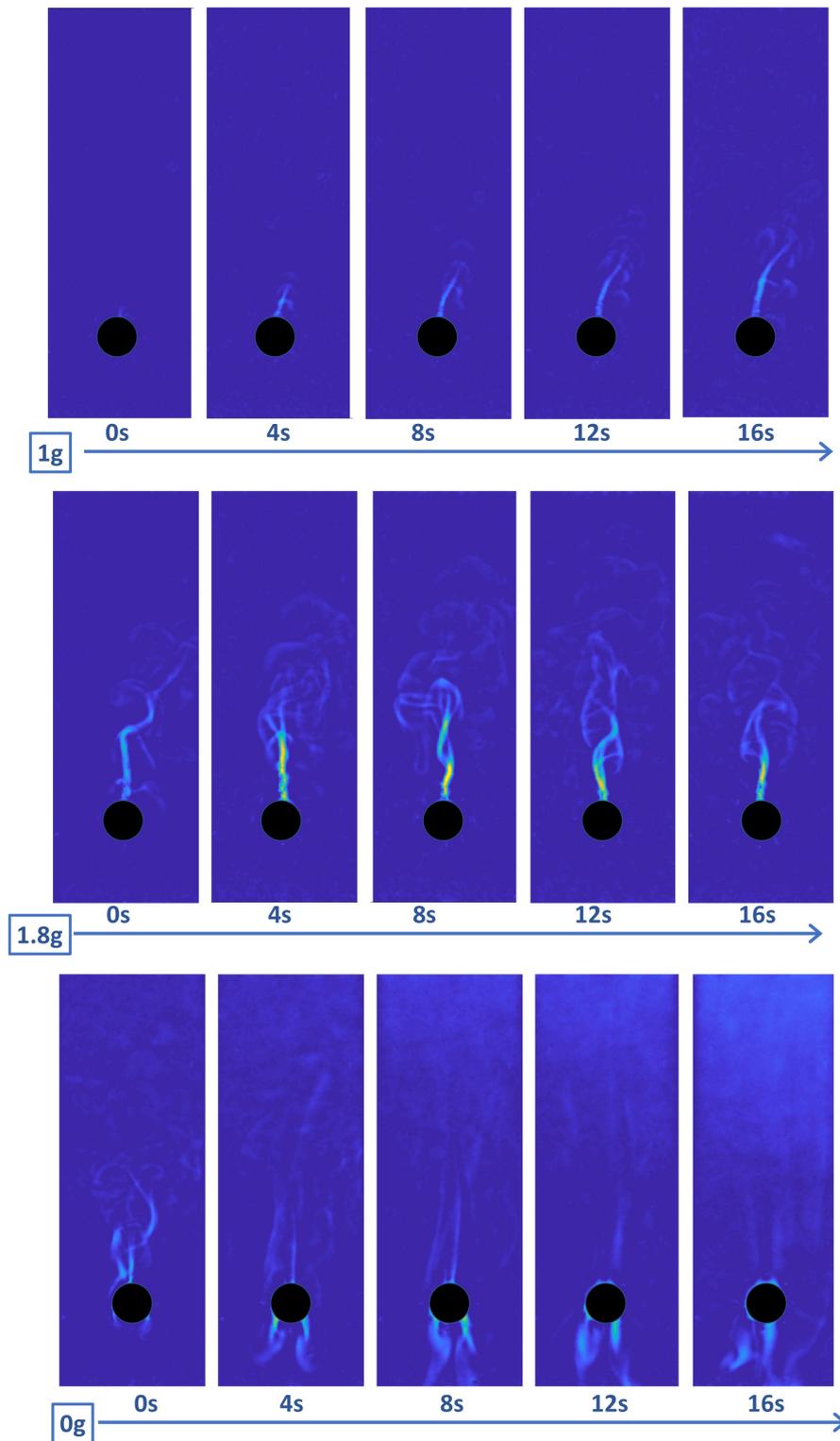


Figure 4 : Développement du panache obtenu par B.O.S. lors des phases 1 g (en haut), 1.8 g au milieu et 0 g (en bas). Les cercles noirs correspondent à la position du cylindre chauffant.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le CNES et Novespace pour leur avoir donné l'opportunité de participer à une campagne d'essais en vols paraboliques ; l'ENSMA, la mairie de Chasseneuil du Poitou et l'Institut Pprime pour leur soutien financier ; T. Villatte, H. Arlaud, J.-C. Fraudeau, A. Piteau, J.-M. Petit et T. Degeay pour leur support technique, C. Petitjean, B. Serres, A. Paqueton, P. Rousseau pour leur aide lors de la première partie du projet et enfin L. Chocinski pour toute son aide lors des différentes phases du projet.

Références

- [1] A. Kondrashov, I. Sboev. and P. Dunaev, Evolution of convective plumes adjacent to localized heat sources of various shapes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103 (2016) 298-304.
- [2] Broučková, Zuzana and Trávníček, Zdeněk, PIV and LIF study of flow and thermal fields of twin plumes in water, *EPJ Web Conf*, 143 (2017)
- [3] Grafsrønningen, Stig and Jensen, Atle, Simultaneous PIV/LIF measurements of a transitional buoyant plume above a horizontal cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (2012) 4195-4206.
- [4] Kuehner, Joel P. and Hamed, A. M. and Mitchell, Jared D., Experimental investigation of the free convection velocity boundary layer and plume formation region for a heated horizontal cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82 (2015) 78-97.
- [5] Grafsrønningen, Stig and Jensen, Atle, Large eddy simulations of a buoyant plume above a heated horizontal cylinder at intermediate Rayleigh numbers, *International Journal of Thermal Sciences*, 112 (2017) 104-117.
- [6] Raffel, Background-oriented schlieren (BOS) techniques, *M. Exp Fluids*, (2015) Raffel, M. *Exp Fluids* (2015) 56 : 60. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5>.
- [7] Thielicke W., Stamhuis E. J., PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version :1.43) (2014) <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- [8] Thielicke W., The flapping flight of birds, *PhD Thesis*, University of Groningen (2014)