

Champs dynamiques et thermiques dans une enceinte ventilée en régimes naturel, intermédiaire et bloqué; cas instationnaire

A.NGONDIEP^a, M.GONZALEZ^a, G.GODARD^a, C.GOBIN^a, M.LEBEY^b, P.PARANTHOËN^a

a. CNRS UMR 6614 CORIA, Boulevard de l'Université 76801 Saint Etienne du Rouvray

b. LOMC, Bâtiment COREVA 53 rue de Prony BP 540 76058 Le Havre Cedex

Résumé :

On étudie expérimentalement les écoulements générés par un panache, de débit massique constant Q_{m0} et de température $T_0(t)$ décroissante au cours du temps, dans une enceinte en communication avec l'extérieur par deux ouvertures situées en parties haute et basse de ce compartiment. Les résultats montrent que la variation monotone de $T_0(t)$ peut conduire à l'apparition successive de trois régimes d'écoulements selon la valeur d'un nombre de Froude densitométrique \overline{Fr}_H^ calculé à partir des caractéristiques du panache, du champ thermique et de la hauteur de l'ouverture supérieure.*

Abstract :

We study the flow within a confined ventilated enclosure resulting from the action of a forced plume operating at the bottom of the space with constant source volume flux Q_{m0} and initial source temperature $T_0(t)$ decreasing with time. The enclosure is ventilated through upper and lower openings. Results show the appearance of three flow regimes depending on the value of a densitometric Froude number \overline{Fr}_H^ defined from plume characteristics, thermal field and dimensions of the upper opening.*

Mots clefs : convection mixte, ventilation, nombre de Froude

1 Introduction

L'étude que nous proposons concerne les différents régimes d'écoulements générés par une source de gaz chauds débouchant dans une enceinte en communication avec l'extérieur par deux ouvertures S et E situées respectivement en parties haute et basse de cette enceinte, Figure 1. C'est une situation que l'on rencontre, par exemple, dans la ventilation naturelle ou forcée des habitations, dans le refroidissement des équipements électroniques, la dynamique des écoulements présents dans les situations d'incendie ou de fuites de gaz légers, [1]. Cette source d'air chaud est un panache forcé de débit massique Q_{m0} et de température $T_0 = T_{ext} + \Delta T_0$ injecté verticalement par une buse rectangulaire de section A_0 . Dans ce cas, le panache forcé se développe et chauffe progressivement l'intérieur de l'enceinte. Cela modifie les conditions de pression de part et d'autre des ouvertures E et S qui contrôlent les échanges gazeux entre l'intérieur et l'extérieur. Quand les conditions aux limites restent stationnaires, des études antérieures ont montré que cette situation expérimentale donnait lieu à des régimes d'écoulements variés, [2], [3]. Selon les valeurs du débit volumique $Q_0 = Q_{m0} / \rho_0$, de ΔT_0 et des dimensions des ouvertures, on peut observer deux principaux régimes d'écoulements : le régime naturel caractérisé par un écoulement entrant par E et sortant par S et le régime bloqué avec des écoulements sortant à la fois par E et S. Par une approche analytique simple, supposant une hypothèse de type Boussinesq, nous avons pu montrer que chacun de ces régimes était caractérisé par une gamme de nombres de Froude densitométrique $\overline{Fr}_H = Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho}_H / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2$ où H est la hauteur de l'enceinte, $\overline{\Delta\rho}_H$ la différence de masse volumique moyenne entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte, A_S la section de l'ouverture supérieure et C_S le coefficient de contraction du débit sortant par l'ouverture supérieure, [4]. Le calcul analytique montre que la transition entre les régimes naturel et bloqué se fait pour $\overline{Fr}_H = 2$. Toutefois en raison de la dimension non négligeable de l'ouverture inférieure E, il existe entre ces deux régimes, un régime

intermédiaire que l'on observe expérimentalement où de l'air extérieur pénètre dans l'enceinte par la partie basse de E et de l'air chaud intérieur sort par sa partie haute.

Cependant dans de nombreuses situations, les conditions aux limites ne restent pas constantes. Dans le cas d'un incendie par exemple, la puissance du foyer augmente progressivement avec le temps avant de culminer quand l'embrassement généralisé est atteint puis décroît progressivement durant la phase de déclin du feu, [5]. Dans cette communication, nous étendons l'étude analytique et expérimentale de l'enceinte ventilée alimentée par une source de gaz chaud en considérant le cas non Boussinesq et en nous intéressant à une situation non stationnaire où le débit massique de la source Q_{m0} reste constant mais la différence de température ΔT_0 est maintenant fonction du temps.

2 Modèle analytique

On considère sur la Figure 1, cette enceinte parallélépipédique (longueur L , largeur l et hauteur H) qui est en communication avec l'extérieur par deux ouvertures rectangulaires verticales haute et basse de sections respectives $A_S = l \times H_S$ et $A_E = l \times H_E$. On considère que cette enceinte est alimentée à sa base par un panache forcé injecté verticalement par une buse rectangulaire (longueur l , largeur D_0). Cet écoulement possède un débit massique Q_{m0} constant mais se trouve à une température $T_0(t)$ qui évolue dans le temps. Dans cette approche analytique, nous recherchons les conditions d'existence du régime naturel pour lequel il existe un écoulement de vitesse $U_E(t)$ entrant par l'ouverture inférieure E de section A_E et un écoulement de vitesse $U_S(t)$ sortant par l'ouverture supérieure S de section A_S . On suppose que ces ouvertures sont espacées dans la direction verticale d'une hauteur H avec $H \gg H_S, H_E$. Les différences de pression existant de part et d'autre de E et S s'expriment en fonction des vitesses U_E et U_S au moyen du principe de Bernoulli, puis celles à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte sur deux verticales peuvent s'écrire au moyen du principe de l'hydrostatique.

$$P_{int}(H) - P_{ext}(H) = \frac{1}{2} \rho_{int} U_S^2 \quad P_{ext}(0) - P_{int}(0) = \frac{1}{2} \rho_{ext} U_E^2$$

$$P_{int}(H) - P_{int}(0) = - \int_0^H g \rho_{int}(z) dz = - \overline{\rho_{int H}} g H \quad P_{ext}(0) - P_{ext}(H) = \rho_{ext} g H$$

En décomposant $(P_{int}(H) - P_{ext}(H))$ et en utilisant les relations précédentes on obtient :

$$(\rho_{int} / \rho_{ext}) U_S^2 + U_E^2 = 2(\rho_{ext} - \overline{\rho_{int H}}) g H / \rho_{ext} \quad (1)$$

équation qui permet de relier les débits massiques entrant Q_{mE} et sortant Q_{mS} en utilisant les relations

$Q_{mE} = \rho_{ext} C_E A_E U_E$ et $Q_{mS} = \rho_{int} C_S A_S U_S$ où C_E et C_S sont des coefficients de débit.

$$(Q_{mS} / Q_{m0})^2 + (C_S A_S / C_E A_E)^2 (Q_{mE} / Q_{m0})^2 = (2 \overline{\Delta \rho_H} / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2 / Q_{m0}^2$$

La relation de conservation permet d'écrire dans ce régime naturel: $Q_{mS} = Q_{m0} + Q_{mE}$

En appelant $q_{mE}^* = Q_{mE} / Q_{m0}$, le système se limite à l'équation du second degré suivante pour q_{mE}^* :

$$(1 + \alpha^2 \beta / \gamma) q_{mE}^{*2} + 2 q_{mE}^* + (1 - 2 \beta \gamma / \overline{Fr_H}) = 0 \quad (2)$$

Où $\alpha = C_S A_S / C_E A_E$, $\beta = \rho_{int} / \rho_0$, $\gamma = \rho_{ext} / \rho_0$, $\overline{Fr_H} = Q_0^2 / (\overline{\Delta \rho_H} / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2$

En résolvant (2), on montre que le régime naturel existe car l'équation du second degré possède toujours une racine q_{mE}^* positive tant que :

$$\overline{Fr_H^*} = \overline{Fr_H} / \beta\gamma = \frac{Q_0^2}{\beta\gamma(\overline{\Delta\rho_H} / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2} < 2 \quad (3)$$

Par un raisonnement équivalent on pourrait montrer qu'il peut exister également un régime bloqué où les deux écoulements sont sortants en E et S lorsque $\overline{Fr_H^*} > 2$. Ce nouveau nombre de Froude densitométrique $\overline{Fr_H^*}$ qui contrôle les différents régimes d'écoulement est fonction des caractéristiques de la source Q_0 et T_0 , de l'écoulement interne ($\overline{\Delta\rho_H} / \rho_{ext}$), T_{int} et de l'ouverture supérieure ($C_S A_S$) et H . Lorsque les caractéristiques de la source varient dans le temps, $\overline{Fr_H^*}$ est également fonction du temps et on peut s'attendre dans cette situation à l'apparition au cours du temps de ces différents régimes.

3 Dispositif expérimental

La maquette utilisée a pour dimensions : (500x225x180mm³). La majeure partie de cette enceinte est en plexiglas, seul le plancher est en PVC. L'ouverture inférieure E a une hauteur $H_E=36$ mm et une largeur $l=225$ mm. La seconde ouverture S située sur la partie supérieure de la face latérale opposée a même largeur et une hauteur $H_S=22$ mm. Ces ouvertures relient l'intérieur de l'enceinte à un milieu extérieur au repos, à la pression atmosphérique P_{ext} et à la température T_{ext} . Cette enceinte est alimentée en air chaud par une buse rectangulaire de largeur $D_0=30$ mm et de longueur $l_0=225$ mm au moyen d'un panache forcé. Cet écoulement est issu d'un convergent vertical et d'une chambre de tranquillisation, munie de grilles et de résistances chauffantes et alimentée par un circuit d'air comprimé. Le débit massique Q_{m0} et la différence de température $\Delta T_0(t) = T_0(t) - T_{ext}$ en sortie de buse sont contrôlés par un débitmètre Alicat et deux thermocouples de type T reliés à une centrale d'acquisition GL1. Pour étudier la situation instationnaire, le débit massique Q_{m0} est fixé à 80Nl/mn et l'écoulement amont est chauffé jusqu'à ce que l'écart de température $\Delta T_0(t)$ atteigne 42°C, puis le chauffage est arrêté. A partir de cet instant, $\Delta T_0(t)$ décroît de manière exponentielle comme le montre la Figure 2 avec une constante de temps de l'ordre de quinze minutes liée à l'inertie thermique de la chambre de tranquillisation et du convergent.

Les parois verticales en plexiglas permettent des visualisations qui sont réalisées en ensemençant l'écoulement de panache avec de fines gouttelettes d'huile. L'écoulement au voisinage de E est éclairé au moyen d'une nappe laser de 1mm d'épaisseur fournie par un laser pulsé à 16Hz. Les images sont enregistrées au moyen d'un système d'acquisition R&D Vision comprenant une caméra CCD 1280x1024 pixels et une centrale d'acquisition. Afin de pouvoir estimer le nombre de Froude densitométrique $\overline{Fr_H^*}$ des mesures de température sont également réalisées sur une verticale proche de l'ouverture inférieure E au moyen d'un peigne de thermocouples de type T.

4 Résultats expérimentaux

4.1 Evolution temporelle des profils verticaux de température à proximité de E

Les profils des écarts de température mesurés à différents instants sur une verticale proche de l'ouverture E (tracée sur la Figure 1) sont présentés sur la Figure 3. Ils montrent initialement une forte stratification entre le bas et le haut de l'enceinte, puis lorsque la décroissance est déjà importante on observe une situation bien mélangée avec un gradient vertical de température proche de zéro. La décroissance initiale des températures à proximité du plafond indique la présence de conduction avec la paroi supérieure, phénomène qui semble s'inverser au cours du temps lorsque la température de la paroi supérieure devient plus élevée que le fluide interne.

4.2 Mise en évidence des différents régimes d'écoulement au cours de la décroissance

Les visualisations de l'écoulement au niveau de l'ouverture inférieure E au cours de la décroissance sont présentées sur la Figure 4. Les zones les plus claires des images correspondent à de l'air chaud qui a été ensemenché en gouttelettes d'huile et les zones les plus sombres à de l'air extérieur. Initialement pour $0 < t < 10$ mn, on observe que l'écoulement extérieur pénètre dans l'enceinte et le régime est naturel. Progressivement pour $12\text{mn} < t < 24\text{mn}$, du fluide interne commence par sortir uniquement par la partie

supérieure de l'ouverture inférieure E, puis ensuite par la totalité de cette ouverture inférieure, c'est le régime intermédiaire. Enfin pour $28\text{mm} < t < 39\text{mm}$, on observe un écoulement uniquement sortant et caractérisant le régime bloqué. L'inclinaison de ce panache déversant au niveau de cette sortie inférieure diminue progressivement au fur et à mesure que les effets d'inertie dominent les effets de flottabilité. A partir des mesures de température, il est possible d'estimer le nombre de Froude densitométrique $\overline{Fr_H}^*$ donné dans la relation (3) en supposant comme dans des études similaires un coefficient de débit $C_S = 0,7$. Les valeurs calculées de $\overline{Fr_H}^*$ correspondantes sont précisées sous chacune des visualisations de la Figure 4. On peut noter que dans cette situation instationnaire et pour cette hauteur d'ouverture inférieure H_E de 36mm, le régime naturel est observé pour des nombres de Froude densitométrique $\overline{Fr_H}^*$ inférieurs à 2,2 et le régime bloqué apparaît pour des nombres de Froude densitométrique $\overline{Fr_H}^*$ supérieurs à 3,8. Ces valeurs sont voisines de la valeur 2 obtenue pour cette transition par le calcul analytique.

5 Conclusion

Dans cette communication, nous avons montré expérimentalement que l'écoulement produit dans une enceinte ventilée par une source de débit massique constant mais de débit calorifique décroissant pouvait présenter successivement au cours du temps trois principaux régimes : naturel (entrant E, sortant S), intermédiaire (entrant-sortant E, sortant S) et forcé (sortant E, sortant S). Ces résultats obtenus dans une situation instationnaire confirment que comme en stationnaire les régimes d'écoulement peuvent être caractérisés par un nombre de Froude densitométrique $\overline{Fr_H}^*$. En accord avec les résultats d'un calcul analytique, la transition entre le régime naturel et le régime bloqué est observée expérimentalement quand $\overline{Fr_H}^*(t)$ est de l'ordre de 2.

Références

- [1] Prasad K., Yang J., Vertical release of hydrogen in a partially enclosed compartment: role of wind and buoyancy, *Int.J. of Hydrogen Energy*, 36,1, 1094-1106, 2011.
- [2] Woods A.W., Caulfield C.P., Phillips J.C., Blocked natural ventilation: the effect of a source mass flux, *Journal of Fluid Mechanics*, 495, 119-133, 2003.
- [3] Allano D., Danlos A., Patte-Rouland B., Gonzalez M., Paranthoën P., Ventilation naturelle d'une enceinte soumise à une injection de gaz chauds, *Congrès SFT08, Toulouse, Mai 2008*.
- [4] Paranthoën P., Gonzalez M., Mixed convection in a ventilated enclosure, *Int.J.Heat and Fluid Flow*, 31, 172-178, 2010.
- [5] Karlsson B., Quintiere J.G., *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 2000.

Remerciements

Le soutien financier de la Région Haute-Normandie (Réseau SER) est fortement remercié.

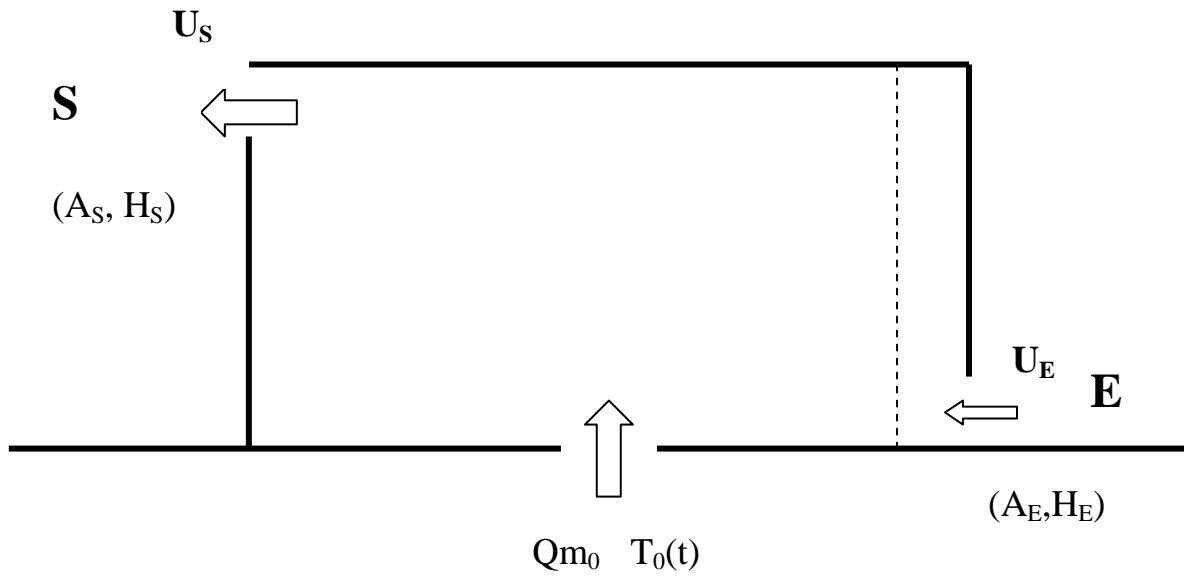


FIG. 1 – Schéma de l'enceinte ventilée.

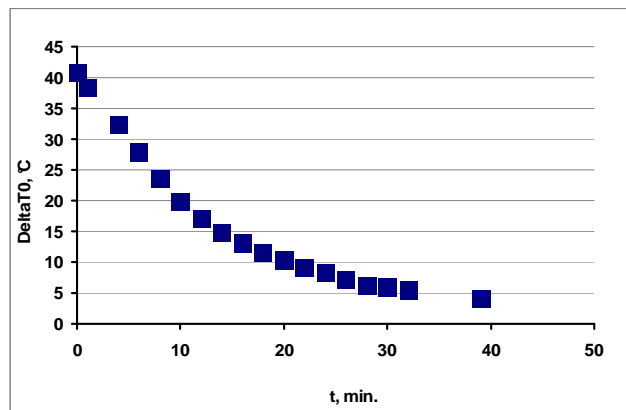


FIG. 2 – Décroissance de l'écart de température $\Delta T_0(t)$ au cours du temps.

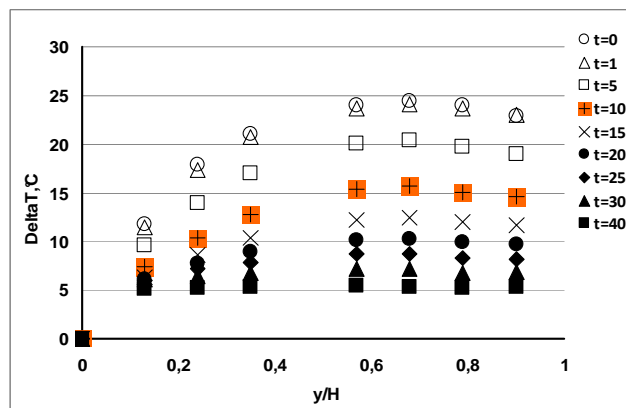


FIG. 3 – Evolution temporelle, au cours de la décroissance de $T_0(t)$, des profils verticaux des écarts de température sur une verticale proche de E (cf Figure 1); le temps est ici exprimé en minutes.

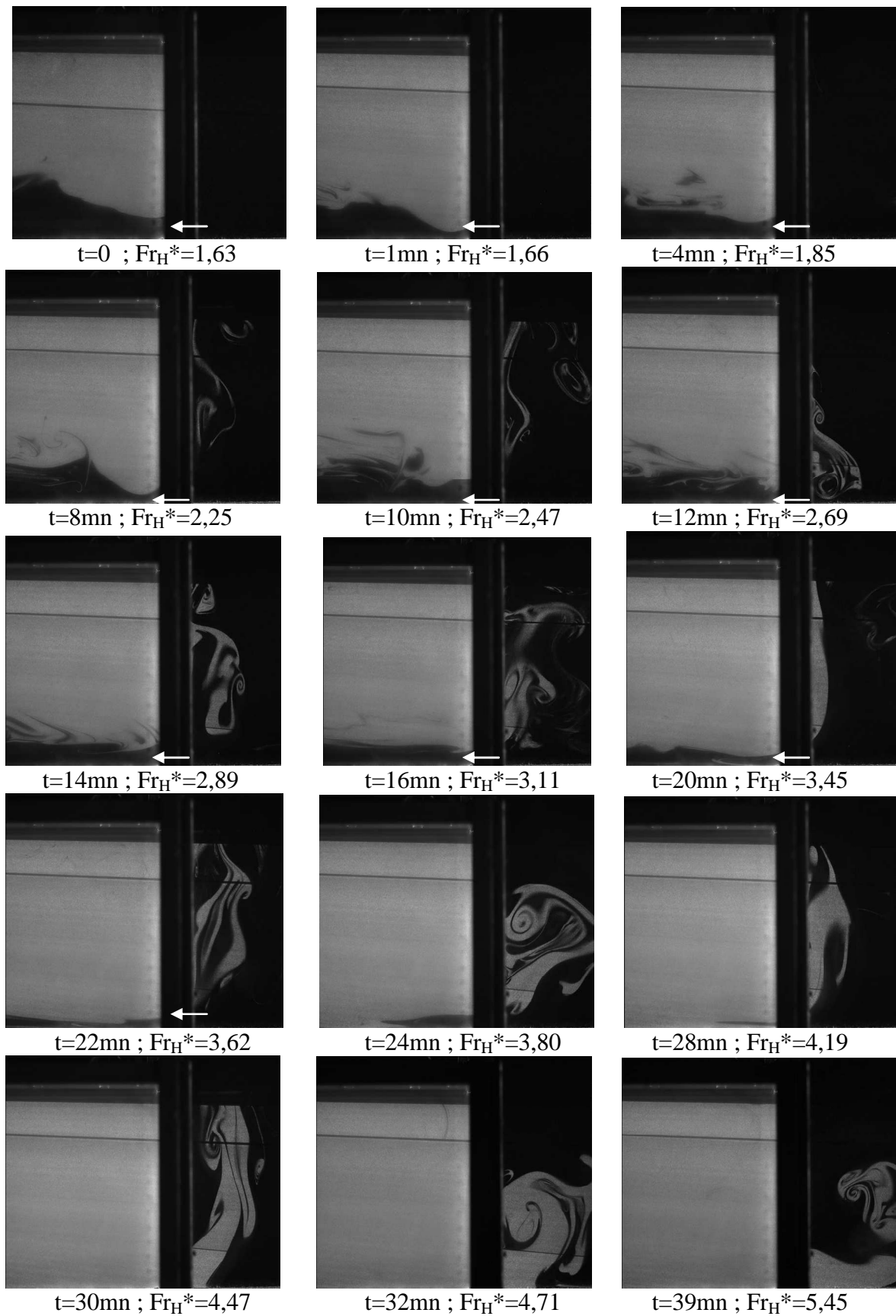


FIG. 4 – Visualisations de l'écoulement au niveau de l'ouverture inférieure à différents instants lors de la décroissance de la température du panache $T_0(t)$.