

# Détermination de la longueur de pénétration d'un jet à gravité inversée

François FRANQUELIN<sup>1,2</sup>, Olivier VAUQUELIN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>IUSTI, UMR CNRS 6595, Université de la Méditerranée, 60 rue Joliot Curie, 13 453 Marseille

<sup>2</sup>ENSIAME, Univ. de Valenciennes & du Hainaut-Cambrésis, Le Mont Houy, 59 313 Valenciennes

\* (Olivier Vauquelin : olivier.vauquelin@univmed.fr)

**Résumé** - Lorsqu'un fluide de masse volumique plus importante que celle du milieu ambiant est injecté vers le haut, il atteint une hauteur maximale dès que son énergie cinétique a été convertie en énergie potentielle de gravité. Ce type d'écoulement, connu sous le nom de « fontaines » a fait l'objet d'investigations théoriques et expérimentales visant en général des applications environnementales. En particulier, l'une des grandeurs importantes est cette hauteur maximale (ou longueur de pénétration) pour laquelle des corrélations semi-empiriques ont été établies dans le cas de gaz lourds. Dans cette étude nous recherchons à établir puis à valider une corrélation donnant la longueur de pénétration d'une fontaine en fonction des caractéristiques d'injection (diamètre, vitesse et densité) pour une large plage de variation des nombres de Froude  $Fr$  et des nombres de Reynolds  $Re$  et dans le cas du rejet vertical descendant d'un fluide de faible densité. La corrélation proposée à partir de considérations dimensionnelles est ensuite confrontée à des simulations numériques réalisées avec le code *Fire Dynamic Simulator*. Enfin, des tests en laboratoire sont ensuite menés pour des rejets de différentes masses volumiques (mélange air-hélium) à différentes vitesses et pour plusieurs diamètres de la buse d'injection. La confrontation de la corrélation aux données expérimentales est satisfaisante et permet de valider l'approche théorique, au moins dans les plages de  $Fr$  et  $Re$  couvertes lors des expériences.

## Nomenclature

$C$	constante de proportionnalité	$U$	vitesse d'injection, $m.s^{-1}$
$D$	diamètre d'injection, $m$	<i>Symboles grecs</i>	
$F_o$	flux de flottabilité, $m^4.s^{-3}$	$\Delta_o$	déficit de flottabilité, $m.s^{-2}$
$Fr$	nombre de Froude	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$Fr^*$	nombre de Froude modifié	<i>Indices et exposants</i>	
$H$	hauteur de fontaine, $m$	$a$	ambiant
$M_o$	flux de quantité de mouvement, $m^4.s^{-2}$	$i$	injection

## 1. Introduction

On appelle « fontaine » l'écoulement d'un gaz lourd injecté verticalement vers le haut dans un fluide ambiant dont la masse volumique est plus faible. Ce type d'écoulement a fait l'objet d'investigations théoriques et expérimentales, essentiellement pour des applications de dispersion de gaz lourds [1]. Il peut également apparaître lors de la propagation de fumées dans un espace compartimenté (risque incendie) ou plus simplement par soufflage d'air chaud au plafond (thermo-aéraulique de l'habitat). L'une des grandeurs recherchées est la hauteur maximale  $H$  (ou longueur de pénétration) qu'il est important d'estimer avec précision avant d'aborder ensuite l'étude du développement de la fontaine le long de la paroi où elle a été émise. Baines *et al.* [2] ont proposé, en se basant sur une analyse dimensionnelle, de définir la longueur de pénétration  $H$  d'un jet circulaire de masse volumique  $\rho_i$  émis à la vitesse  $U$  dans un fluide de masse volumique  $\rho_a$  en fonction des flux de flottabilité et de quantité de mouvement (respectivement  $F_o$  et  $M_o$ ) et du diamètre d'injection  $D$  à partir de la relation suivante :

$$Z \propto M_0^{3/4} F_0^{-1/2} \quad (1)$$

Avec :

$$Z = \frac{H}{D}, \quad M_0 = \frac{\pi D^2 U^2}{4}, \quad F_0 = \frac{\pi D^2 U}{4} \Delta_0 \quad \text{et} \quad \Delta_0 = g \frac{\rho_i - \rho_a}{\rho_i} \quad (2)$$

En faisant intervenir le nombre de Froude défini par :

$$Fr = \frac{\rho_i U^2}{g D (\rho_i - \rho_a)} \quad (3)$$

on montre que la relation (1) peut s'écrire sous la forme :

$$H = C D Fr^{1/2} \quad (4)$$

Suivant la valeur du nombre de Reynolds et le régime d'écoulement, la valeur du coefficient de proportionnalité a été estimé à :

- $C = 1,74$  en régime turbulent par Baines *et al.* [2],
- $C = 2,46$  en régime laminaire par Zhang & Baddour [3].

Dans le cas de fontaines verticales descendantes (injection d'un fluide léger dans un milieu ambiant plus lourd) ces constantes ne sont plus valables. Par ailleurs, il nous semble que dans ce cas, la définition (3) du nombre de Froude ne soit plus judicieuse puisque l'énergie cinétique de référence (au numérateur) n'est plus celle du fluide lourd injecté vers le haut mais celle construite à partir de la masse volumique du milieu ambiant plus lourd que le rejet. En effet, si dans le cas d'un gaz lourd, cette énergie cinétique représente simplement l'énergie nécessaire pour vaincre la pesanteur, dans le cas du gaz léger, elle doit représenter l'énergie nécessaire pour déplacer le fluide ambiant plus lourd que le rejet. Nous définissons donc un nombre de Froude modifié défini par :

$$Fr^* = \frac{\rho_a U^2}{g D (\rho_a - \rho_i)} \quad (5)$$

Dans cette étude, nous proposons, à partir de simulations numériques puis d'expérimentations en laboratoire de vérifier, et le cas échéant de déterminer la constante de proportionnalité, la validité d'une loi donnant la longueur de pénétration d'un gaz léger sous la forme :

$$H = C D Fr^{*1/2} \quad (6)$$

## 2. Simulations numériques

Les simulations ont été réalisées avec la version 4 du logiciel *Fire Dynamic Simulator*. Ce logiciel développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) est un code en libre accès utilisant la simulation des grandes échelles de la turbulence et traitant les variations de masses volumiques à partir de l'hypothèse d'un nombre de Mach faible. Dans cette version du code, le modèle de sous-maille est celui de Smagorinsky avec une constante  $C_s = 0,2$  par défaut. La résolution numérique des équations repose sur une discrétisation en différences finies centrées du second ordre pour l'espace et sur un schéma prédicteur-correcteur explicite du second ordre pour l'espace. Le maillage est cartésien structuré et décalé, les variables scalaires étant calculées au centre des mailles.

Le domaine considéré dans notre étude est un parallélépipède de 80 cm de hauteur et de 60 cm de côté. Le maillage utilisé est structuré et régulier sur l'ensemble du domaine. Le nombre de mailles est de 2 millions. Toutes les faces du parallélépipède sont ouvertes et considérées comme étant à la pression atmosphérique sauf la face horizontale supérieure (le plafond) définie comme un mur. On définit au centre du plafond une surface carrée par laquelle est injecté de façon continue à la vitesse  $U$  un mélange léger constitué d'air et hélium. Les plages balayées varient entre 20 et 400 pour le nombre de Froude modifié et entre 100 et 5000 pour le nombre de Reynolds. La grille des essais numériques est présentée dans le tableau 1 :

$D_{inj} (m)$	$\rho_{inj} (kg/m^3)$	$V_{inj} (m/s)$	$Re$	$Fr^*$	$D Fr^{*1/2}$	$H$
0.03	0.16	7.5	1680	221	0.45	<b>0.3</b>
0.03	0.16	5	1120	98	0.3	<b>0.22</b>
0.03	0.16	2.5	560	24.5	0.15	<b>0.1</b>
0.03	0.68	7.5	3360	44.1	0.63	<b>0.42</b>
0.06	0.16	7.5	3960	11	0.63	<b>0.4</b>
0.09	0.16	7.5	5040	73.5	0.7	<b>0.54</b>

Tableau 1 : Grille d'essais des simulations numériques

La valeur de la longueur de pénétration est indiquée dans la dernière colonne du tableau 1. Elle est déterminée en recherchant sur la verticale descendante la cote du point où la différence de densité a chuté de 90 % par rapport à sa valeur à l'injection. A titre indicatif, la figure 1 présente une vue des iso-contours de masse volumique obtenue à l'aide du logiciel de post-traitement Smokeview.

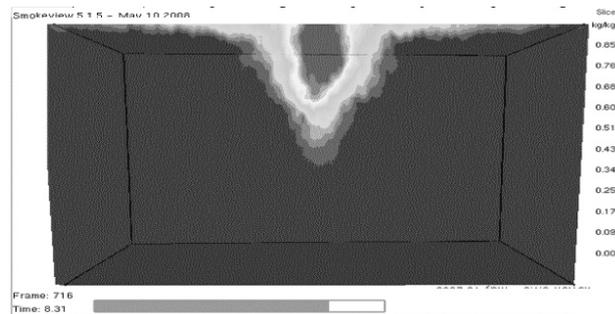


Figure 1 : Iso-contours de masse volumique obtenue à l'aide du logiciel Smokeview

Conformément à la loi (6) que nous souhaitons valider, nous traçons alors la hauteur de pénétration  $H$  en fonction du produit entre le diamètre d'injection et la racine carrée du nombre de Froude. Comme on peut le voir sur la graphie de la figure 2, les points s'alignent très correctement le long d'une droite passant par l'origine. Le coefficient directeur (c'est-à-dire la constante de proportionnalité  $C$ ) est de l'ordre de 0,7. Soit donc la corrélation suivante, dans les plages de Froude et de Reynolds étudiées :

$$H = 0,7 D Fr^{*1/2} \quad (7)$$

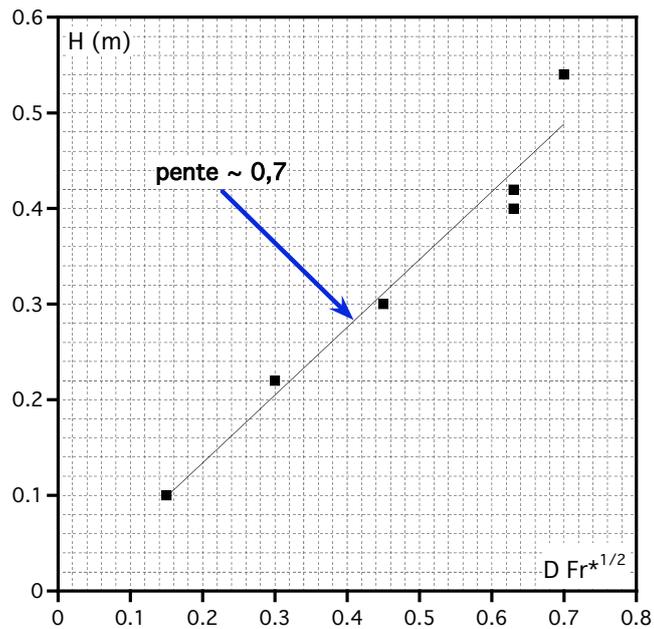


Figure 2 : Tests numériques – Hauteur de pénétration en fonction de  $D Fr^{*1/2}$

### 3. Essais expérimentaux

Afin de confirmer les résultats numériques, des tests expérimentaux ont été menés en laboratoire. Le dispositif est schématisé sur la figure 3 : un mélange d'air et d'hélium est injecté verticalement vers le bas depuis un orifice circulaire aménagé dans une paroi solide (planche de bois). Le mélange est ensemencé par des fines particules et la fontaine est éclairée dans son plan médian par un laser continu. Un appareil photo perpendiculaire au plan laser permet de récupérer, pour chaque test, des séries d'images instantanées.

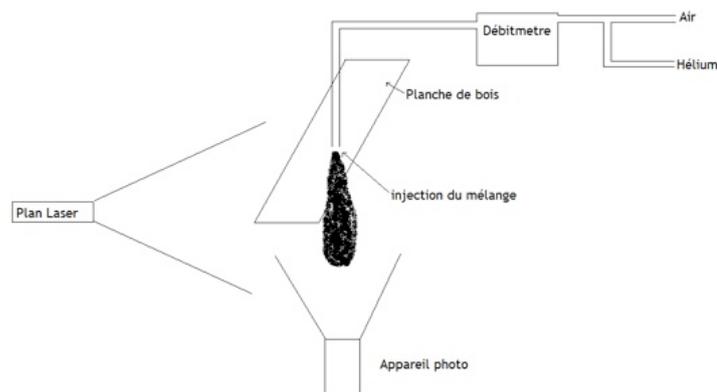


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental

Comme indiqué sur la figure 4, pour déterminer la longueur de pénétration du jet, on utilise le logiciel ImageJ qui permet de connaître le nombre de pixels « éclairés » sur la verticale depuis la sortie de l'injecteur. La correspondance entre la longueur physique et le nombre de pixels est déterminée préalablement à partir d'une zone de dimension connue.

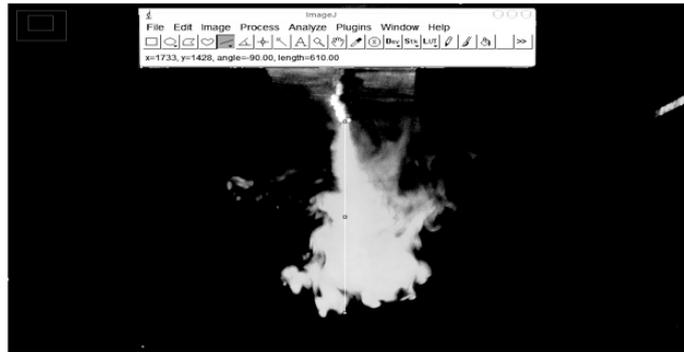


Figure 4 : Mesure de la longueur de pénétration via imageJ sur une photographie instantanée

Sachant que la longueur du jet fluctue au cours du temps, il faut prendre une série d'images et en effectuer la moyenne. Pour connaître le nombre d'images nécessaires à l'obtention d'une moyenne significative, l'erreur moyenne relative a d'abord été tracée en fonction du nombre d'images considérées pour le calcul de la moyenne. Pour les tests présentant le plus de fluctuations, une moyenne effectuée sur 30 images (prises toutes les 5 secondes) s'est avérée être largement suffisante. Cette procédure a donc été adoptée pour l'ensemble des tests.

De la même façon que pour les tests réalisés numériquement, lors des essais expérimentaux, les paramètres variables sont le diamètre de la buse, la vitesse d'injection et la masse volumique du mélange. La grille des essais est donnée dans le tableau 2 ci-dessous :

$D_{inj}$ (mm)	$\rho_{inj}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{inj}$ (m/s)	$H$ (m)	$D Fr^{*1/2}$	Froude	Reynolds
18	0.17	3.27	<b>0.14</b>	0.15	70	544
18	0.34	3.93	<b>0.17</b>	0.20	122	1330
18	0.46	4.58	<b>0.22</b>	0.25	193	2116
18	0.55	5.24	<b>0.26</b>	0.31	289	2901
18	0.63	5.89	<b>0.29</b>	0.36	411	3687
18	0.68	6.55	<b>0.34</b>	0.43	564	4473
18	0.17	1.31	<b>0.06</b>	0.06	11	217
13	0.17	6.28	<b>0.24</b>	0.25	359	753
13	0.34	7.53	<b>0.31</b>	0.32	620	1841
13	0.46	8.79	<b>0.40</b>	0.41	984	2929
13	0.55	10.05	<b>0.50</b>	0.50	1469	4017
13	0.17	2.51	<b>0.12</b>	0.10	57	301
13	0.37	3.14	<b>0.15</b>	0.14	112	845
13	0.51	3.77	<b>0.22</b>	0.18	194	1389
13	0.61	4.39	<b>0.25</b>	0.23	308	1933
13	0.68	5.02	<b>0.35</b>	0.28	459	2478
6	0.17	11.79	<b>0.33</b>	0.31	2740	652
6	0.37	14.74	<b>0.47</b>	0.44	5352	1831
6	0.34	3.54	<b>0.10</b>	0.10	296	399
6	0.46	4.13	<b>0.13</b>	0.13	470	635
6	0.55	4.72	<b>0.15</b>	0.16	702	870
6	0.63	5.31	<b>0.18</b>	0.19	999	1106

Tableau 2 : Grille d'essais des essais expérimentaux

Les résultats sont présentés sur le graphe de la figure 5 en traçant, comme pour les tests numériques, la hauteur de la fontaine en fonction du produit diamètre par racine carrée du

nombre de Froude. On constate que l'ensemble des points s'alignent très correctement le long d'une droite avec un coefficient directeur cependant supérieur ( $\sim 0,9$ ) à celui trouvé lors des tests numériques ( $\sim 0,7$ ). Les essais expérimentaux permettent donc valider la forme de la corrélation proposée dans les plages de Froude et de Reynolds investiguées. La différence relevée sur le coefficient directeur entre les tests numériques et les essais expérimentaux est sans doute à attribuer aux protocoles différents pour déterminer la hauteur : pour la partie numérique, on a choisi de définir la hauteur maximale lorsque la concentration massique de gaz injecté était inférieure à 10% de la valeur à la source alors que dans la partie expérimentale on a défini les hauteurs de manière visuelle.

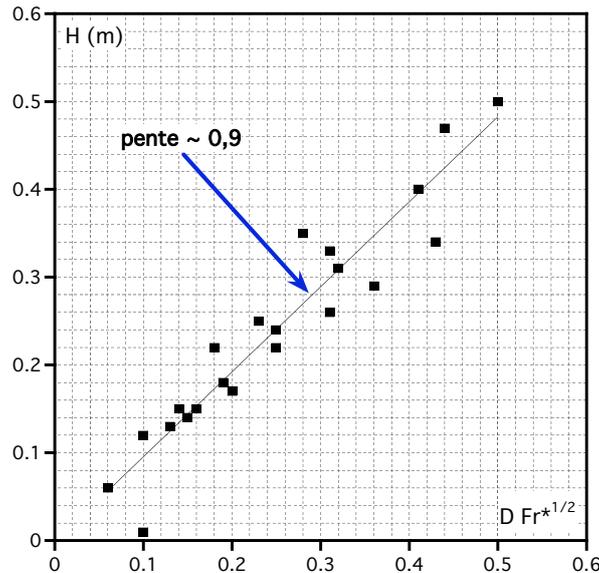


Figure 5 : Essais expérimentaux – Hauteur de pénétration en fonction de  $D Fr^{*1/2}$

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étendu, dans le cas des gaz légers, la corrélation proposée par Baines *et al.* [2] pour estimer la hauteur maximale d'une fontaine de gaz lourd. Il est apparu que le nombre de Froude devait être défini de façon différente pour les gaz légers, ce qui conduit bien évidemment à un coefficient de proportionnalité différent de celui de la corrélation initiale. La confrontation entre simulations numériques et tests en laboratoire a montré un accord satisfaisant malgré une différence d'environ 20 % sur la valeur du coefficient de proportionnalité. Cette différence est certainement liée au protocole retenu pour déterminer la hauteur de la fontaine lors des tests numériques.

#### Références

- [1] L. Ricciardi, C. Prévost, L. Bouilloux, R. Sestier-Carlin, Experimental and numerical study of heavy gas dispersion in a ventilated room, *Journal of Hazardous Materials* 152 (2008) 493-505.
- [2] W.D. Baines, J.S. Turner, I.H. Campbell, Turbulent fountains in an open chamber, *J. Fluid Mechanics* 212 (1990) 557-592.
- [3] H. Zhang and R.E. Baddour, Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers, *J. Hyd. Eng., ASCE* 124 (5) (1998) 550-553.