

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Propagation d'un courant de densité non-Boussinesq issu d'un relâchement instantané dans un tunnel incliné

Romain HANOZET

Directeur de thèse : Olivier VAUQUELIN

Encadrant IRSN : Samuel VAUX

PSN-RES/SA2I/LIE
AMU - IUSTI UMR 7343
Romain HANOZET
© IRSN

 Aix*Marseille
université
Initiative d'excellence

iusti
UMR 7343



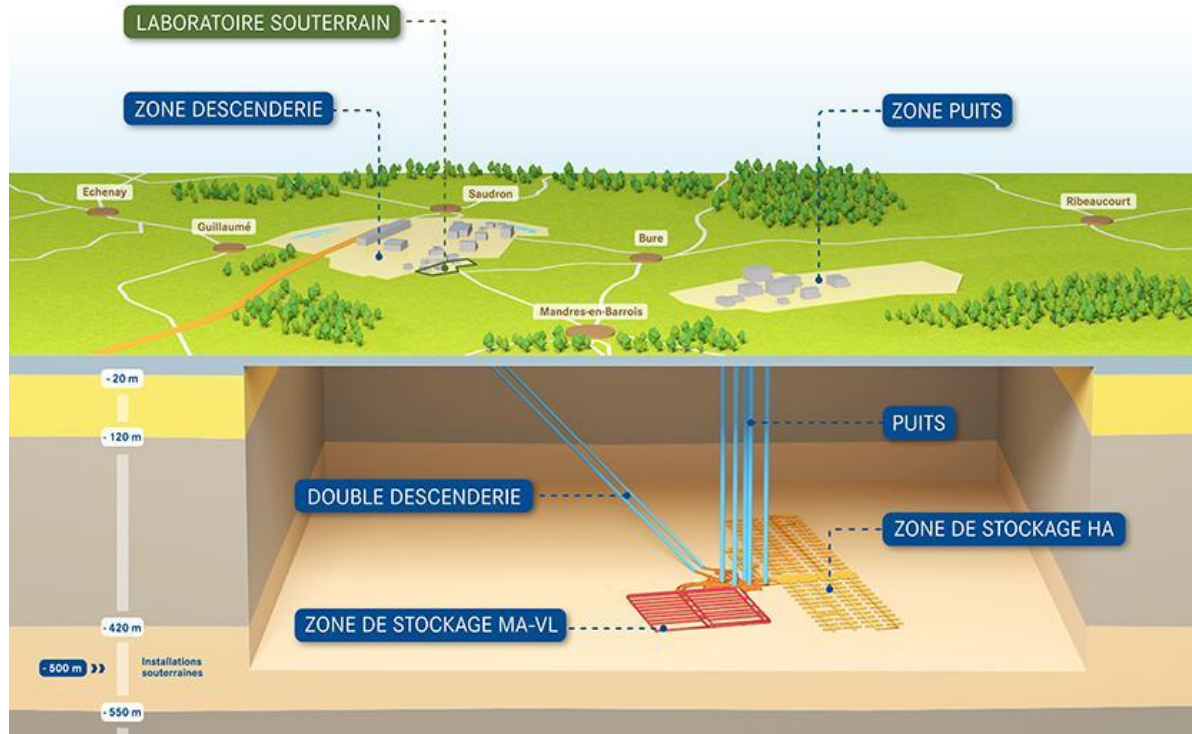

Ecole Doctorale
Sciences Pour l'Ingénieur

Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Présentation bibliographique
- 3) Résultats expérimentaux et analyses
- 4) Conclusion & Perspectives

1) Introduction

Cigéo



Centre Industriel de stockage géologique (Cigéo)

- Capacité de 10 000 m^3 pour les déchets HA et 73 500 m^3 pour les déchets MA-VL
- 270 km de galeries
- Stockage réversible

Une des problématiques :
Risque incendie

2005 : Remise du dossier de faisabilité

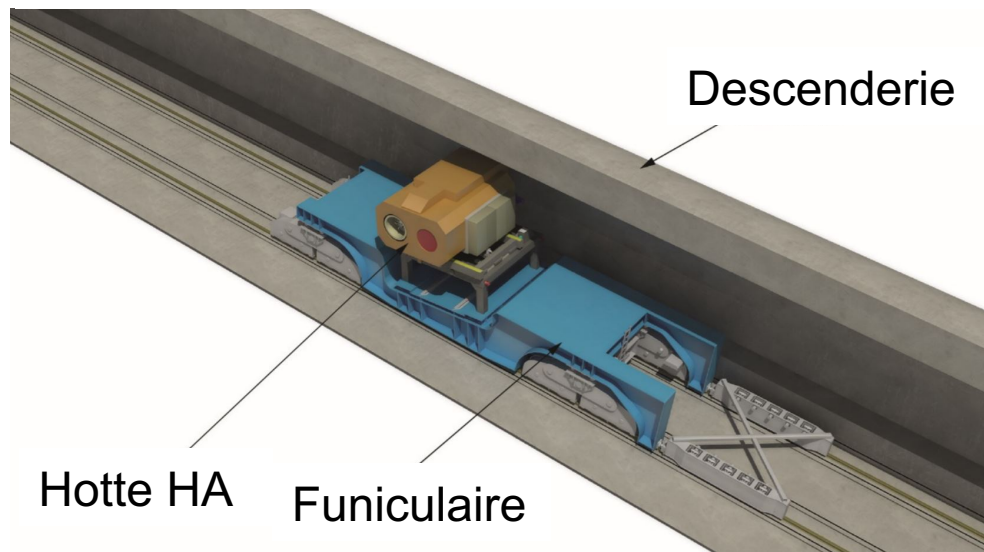
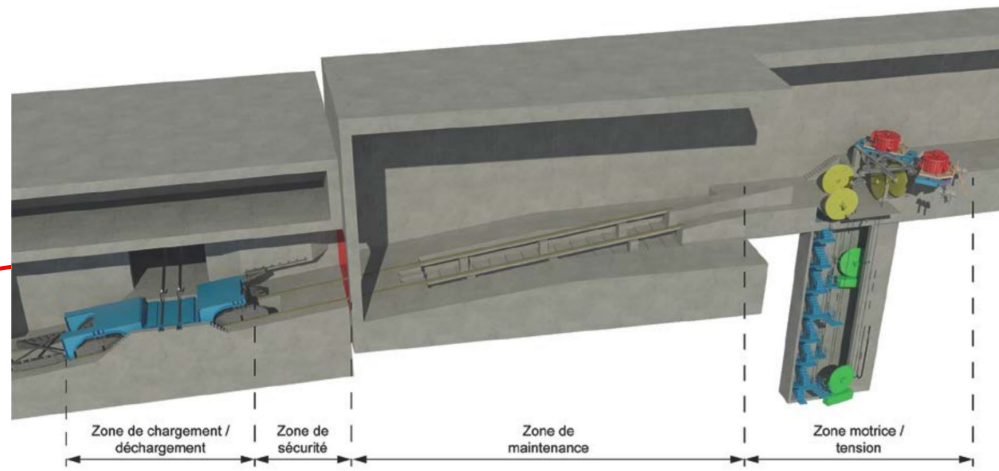
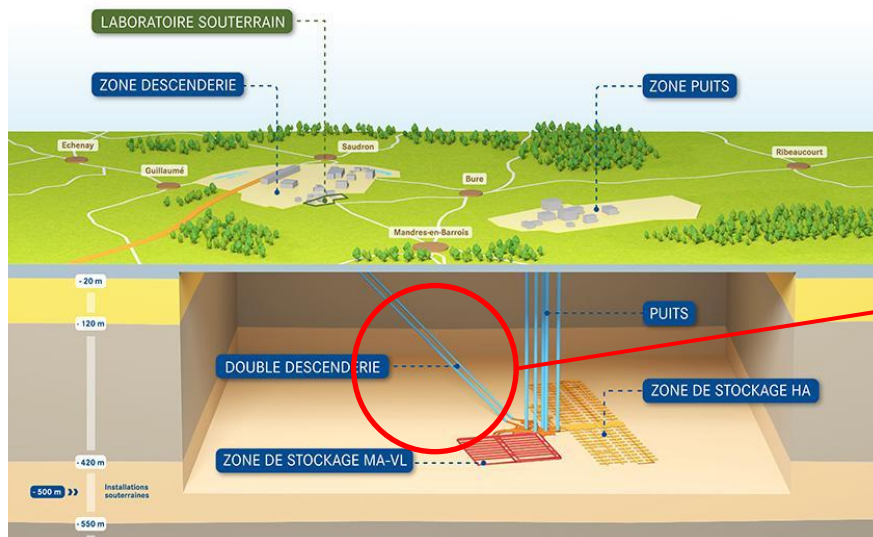
2015 : Plan directeur d'exploitation

2019 : Demande d'autorisation de création

2022 : Lancement de la construction

2030 : Phase industrielle pilote

Cigéo



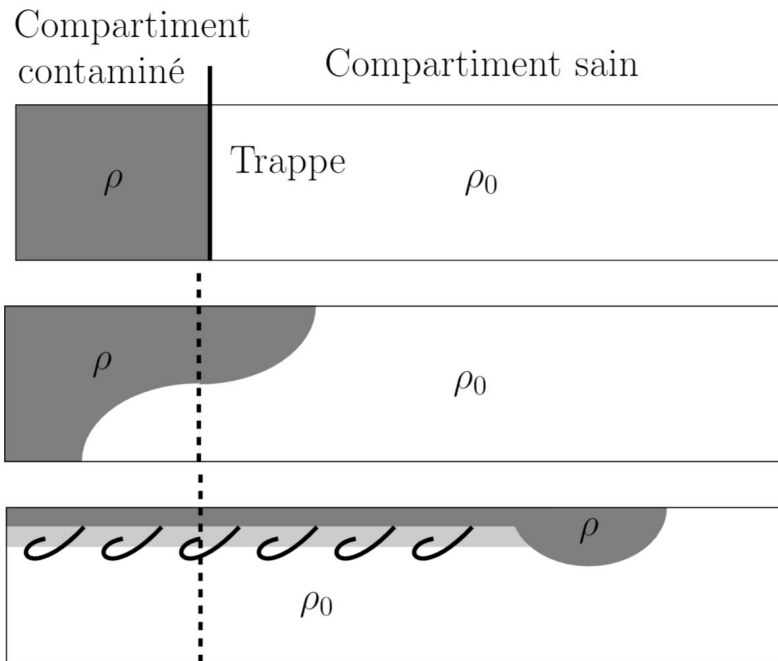
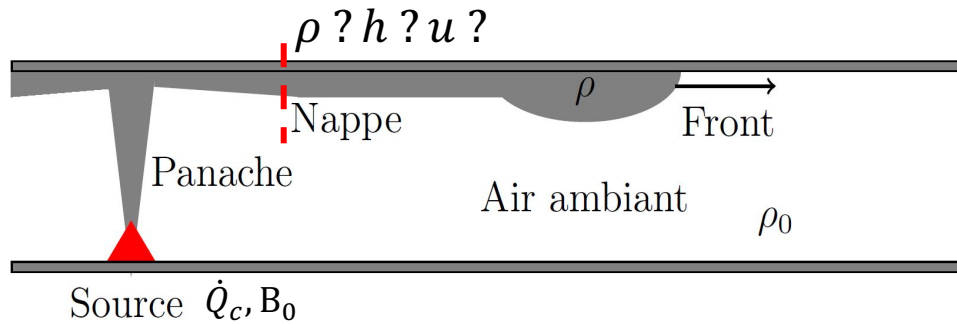
Propriétés de la descenderie :

- Dénivelé 500 m
- Pente **10-15 % (~12 %)**
- ~4 200 m de long
- Ventilation en pleine section ascendante

Objectifs

- Améliorer la connaissance des phénomènes physiques sur les écoulements transitoires en tunnel incliné
- Réaliser des essais paramétriques pour quantifier l'impact combiné de :
 - Confinement
 - Forts écarts de températures
 - L'inclinaison du tunnel
- Construire des modèles semi-empiriques pour l'ingénierie

2) Présentation bibliographique



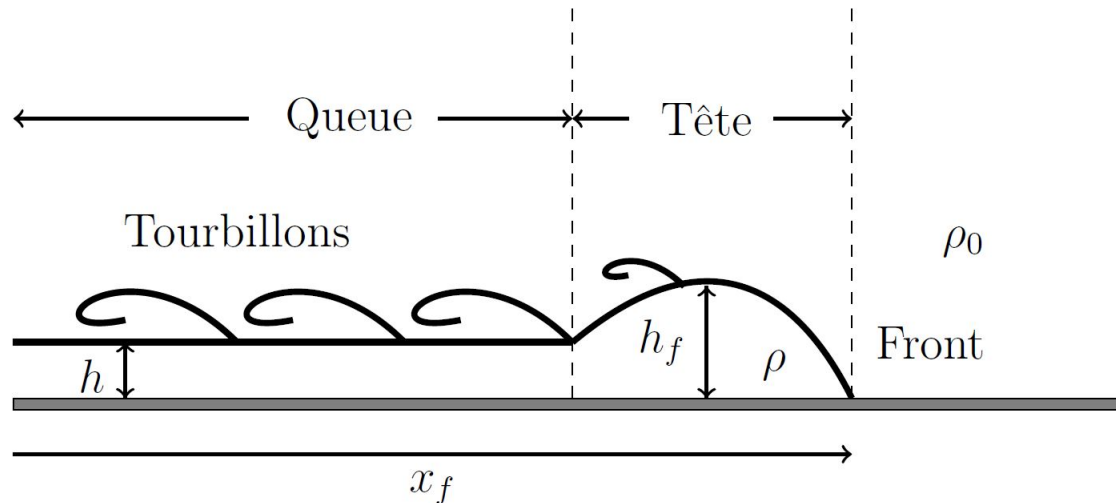
Cas représentatif :

- Détermination de ρ , h et u délicate

Cas académique :

- Maîtrise des conditions initiales
- Phénomènes abordés séparément ou de manière couplés

Présentation d'un courant de densité



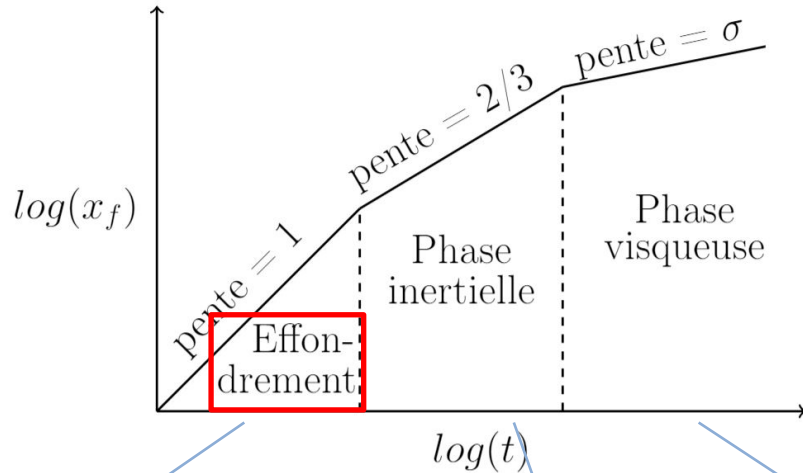
Ecoulement à densité variable se propageant principalement dans la direction horizontale (ou sur des parois faiblement inclinées)

Paramètres d'intérêts :

- La position de son front x_f
- La hauteur de la tête du courant de densité h_f
- La masse volumique ρ

Théorie sur les courants de densité

l_0, h_0, w_0 dimensions du volume initial

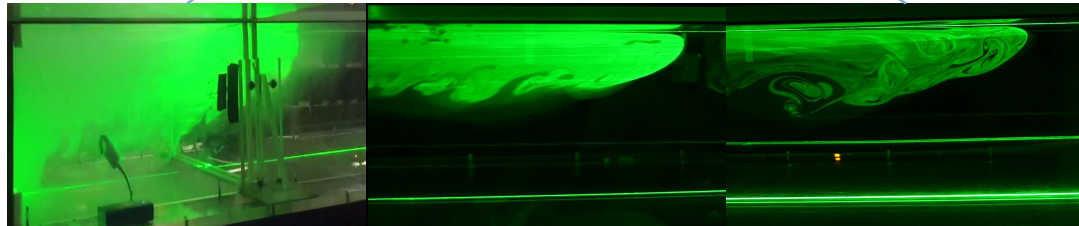


- Effondrement :
Equilibre énergie potentielle et cinétique

$$\frac{1}{2} \rho V u_f^2 \propto \Delta \rho V g h_0$$

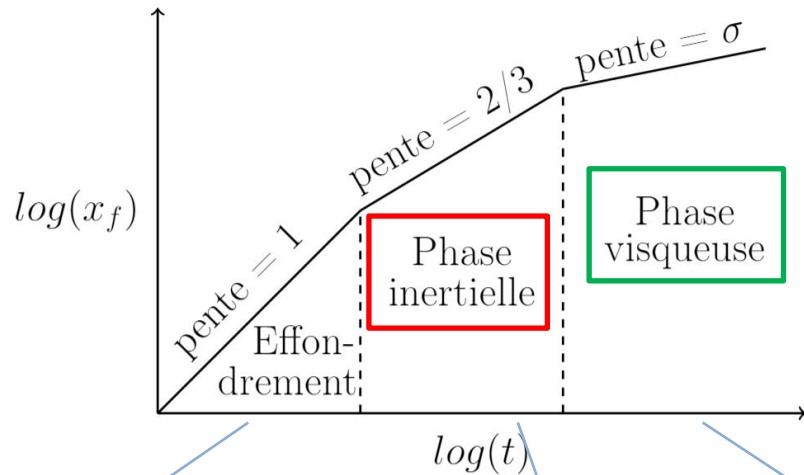
A volume constant :

$$x_f \propto \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} g h_0 \right)^{1/2} t$$



Théorie sur les courants de densité

l_0, h_0, w_0 dimensions du volume initial



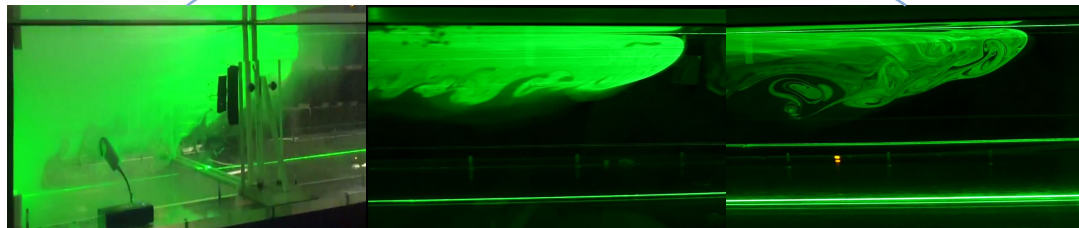
■ Huppert (1982) comparaison des forces :

Flottabilité	$F_g \sim \Delta \rho g h_0^2 w_0$
--------------	------------------------------------

Inertie	$F_i \sim \rho u_f^2 h_0 w_0$
---------	-------------------------------

Viscosité	$F_v \sim \frac{\mu u_f x_f w_0}{h_0}$
-----------	----------------------------------------

En phase visqueuse $\sigma = 1/5$



A volume constant, dans un milieu ambiant infini, pour un écoulement sur une surface horizontale et sous l'hypothèse d'écoulement Boussinesq

Qu'en est-il de ces lois comportementales dans le cadre non-Boussinesq (fort $\Delta\rho$), dans un tunnel (confinement) incliné ?

Quelques expériences récentes de la littérature

Auteurs	$\epsilon = \Delta\rho/\rho$	Confinement	Pente (%)	Phases	Expériences principalement réalisées en milieu aqueux
Shin et al (2004)	$0.01 \leq \epsilon \leq 0.02$	Confiné	Horizontal	Eff/in	Expériences principalement réalisées en milieu aqueux
Lowe et al. (2005)	$0.1 \leq \epsilon \leq 0.4$	Confiné	Horizontal	Eff	
Marino et al. (2005)	$0.01 \leq \epsilon \leq 0.1$	Confiné et <i>partial depth</i>	Horizontal	Eff/in/vis	Avec nos expériences :
Birman et al. (2007)	$\epsilon = 0.012$	Confiné	$0 \leq \theta \leq 57\%$	Eff	
Maxworthy (2010)	$0.02 \leq \epsilon \leq 0.12$	Milieu ambiant infini	$10.3 \leq \theta \leq 18.7\%$	Eff/in	
Dai (2014)	$0.05 \leq \epsilon \leq 0.15$	Milieu ambiant infini	$0 \leq \theta \leq 15.8\%$	Eff/in/vis	
Sher & Woods (2015)	$0.02 \leq \epsilon \leq 0.15$	Confiné	Horizontal	Eff/in	
Ottolenghi et al (2016)	$0.02 \leq \epsilon \leq 0.06$	Confiné	Horizontal	Eff/in	

3) Présentation des résultats expérimentaux



Tunnel en plexiglas

- $H = 0,25 \text{ m}$; $W = 0,5 \text{ m}$; $L = 10 \text{ m}$;
- Pente $\pm 17 \%$

Volume initial

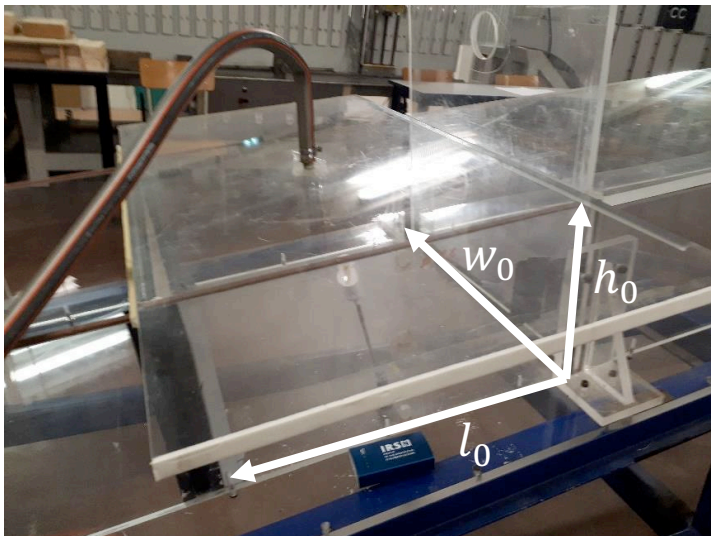
- $h_0 = 0,25 \text{ m}$; $w_0 = 0,5 \text{ m}$; $l_0 = 0,25 \text{ m}$;

Source : mélange air/hélium

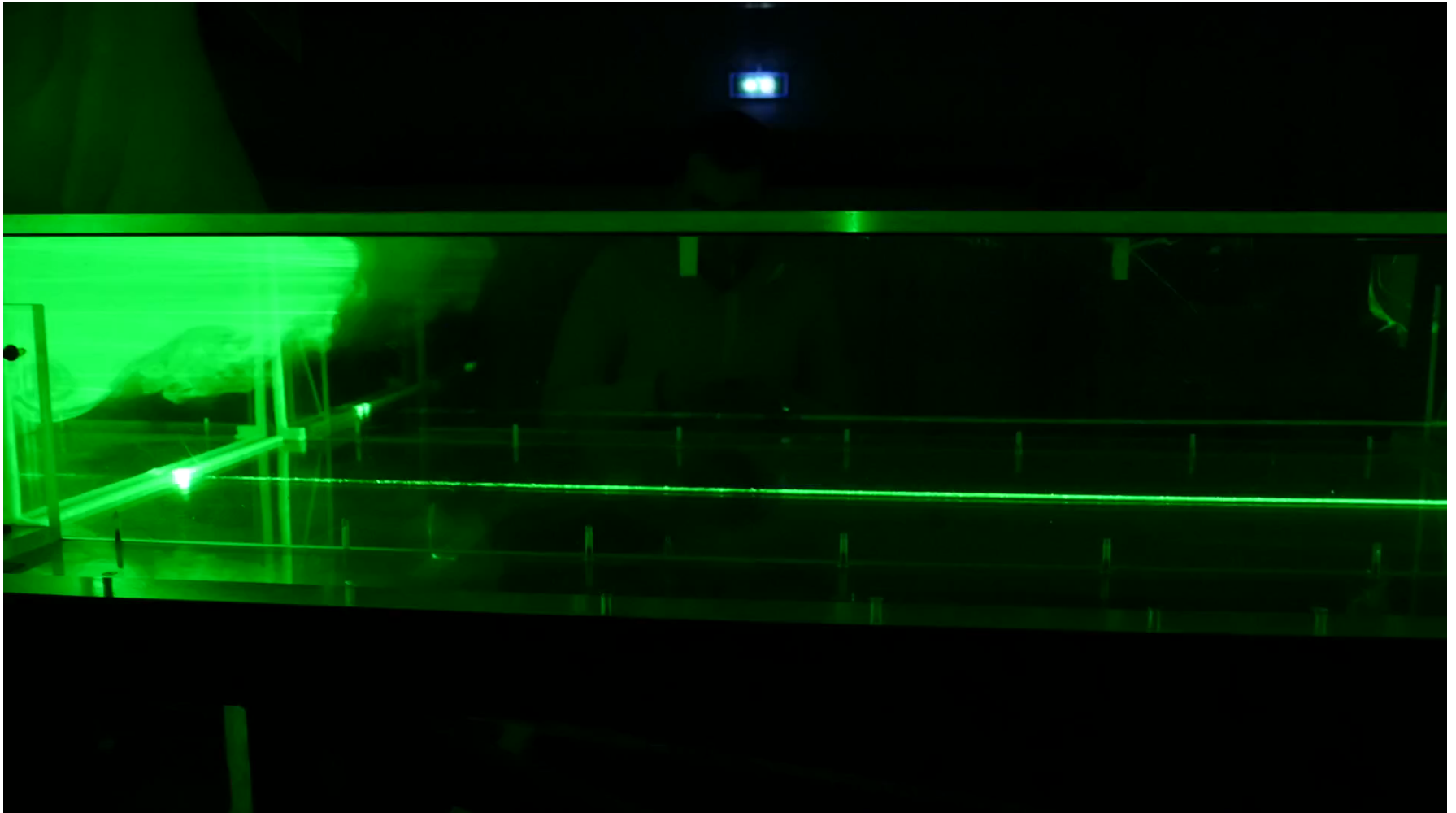
Propagation du courant de densité sur le longueur totale de 9 m

3 paramètres peuvent être modifiés :

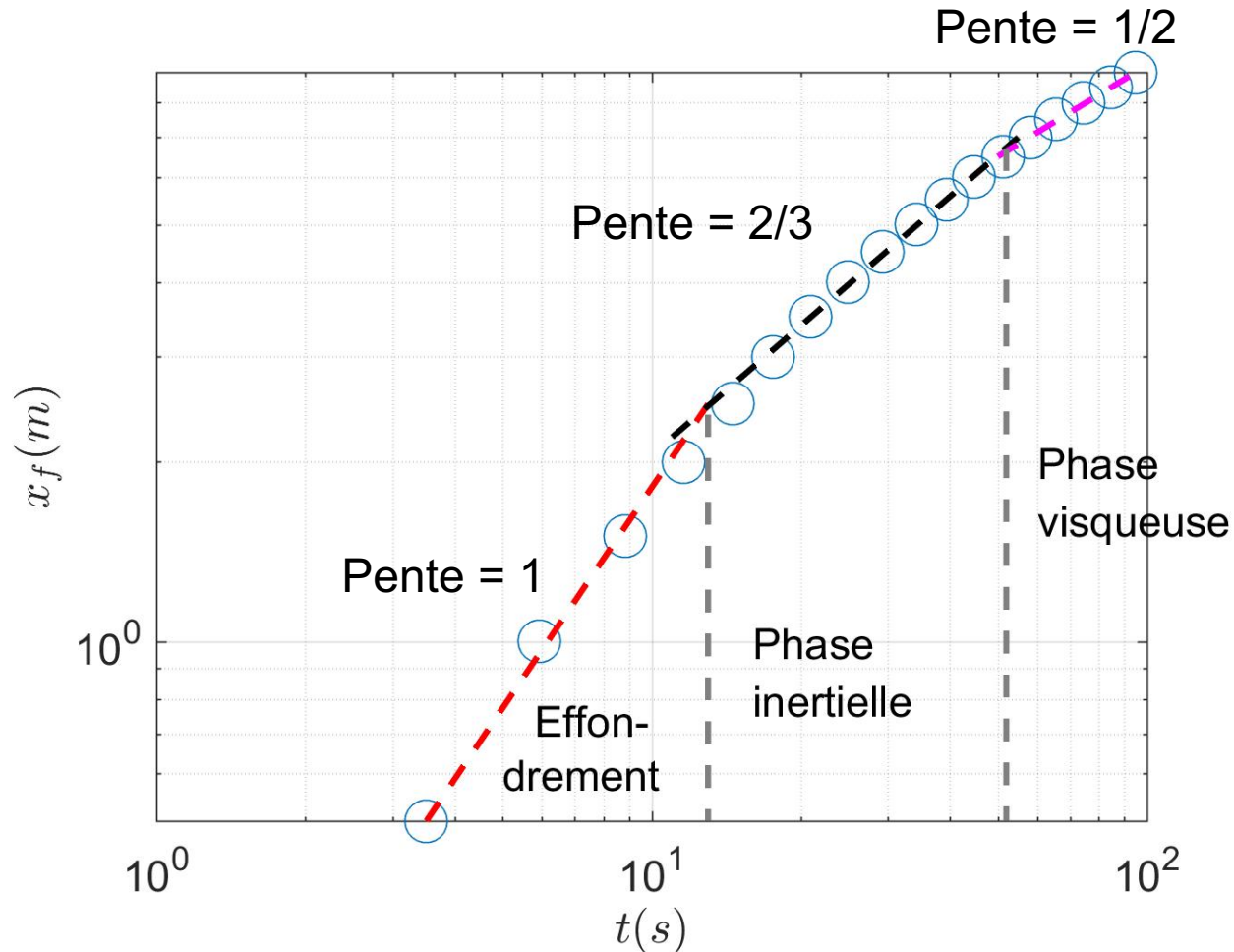
- La masse volumique initiale ρ
- La pente du tunnel θ
- Le volume initialement relâché V_0



Dispositif expérimental



Effet du confinement



Essai « Boussinesq » :

$$\rho = 1,07 \text{ kg/m}^3$$

$$\theta = 0 \%$$

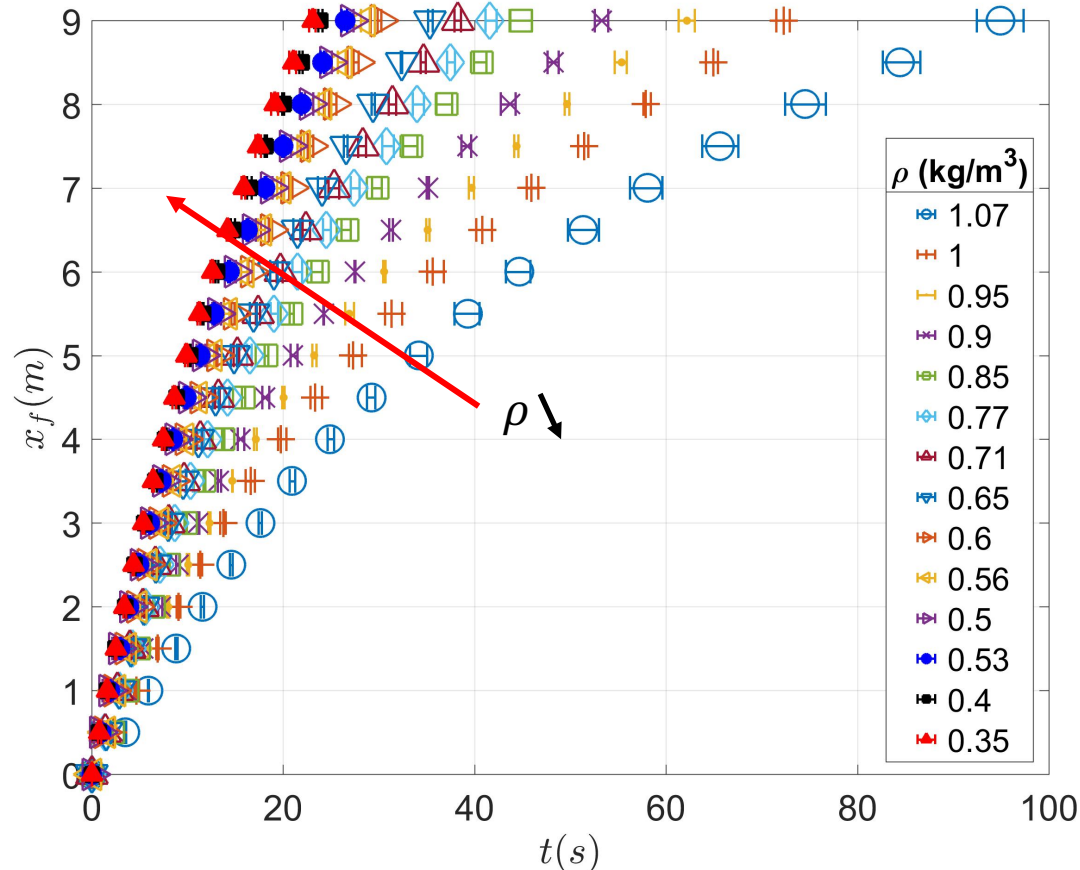
Propagation du courant de densité **dans les 3 phases** décrites en milieu ambiant infini

Phase visqueuse :

$$x_f \propto t^{1/2}$$

Position du front de courant de densité en fonction du temps pour une masse volumique $\rho = 1.07 \text{ kg/m}^3$ ($\epsilon = 0,71$) et pour un tunnel horizontal

Effet de la masse volumique



■ Tunnel horizontal

$$\theta = 0 \%$$

■ Masse volumique initiale

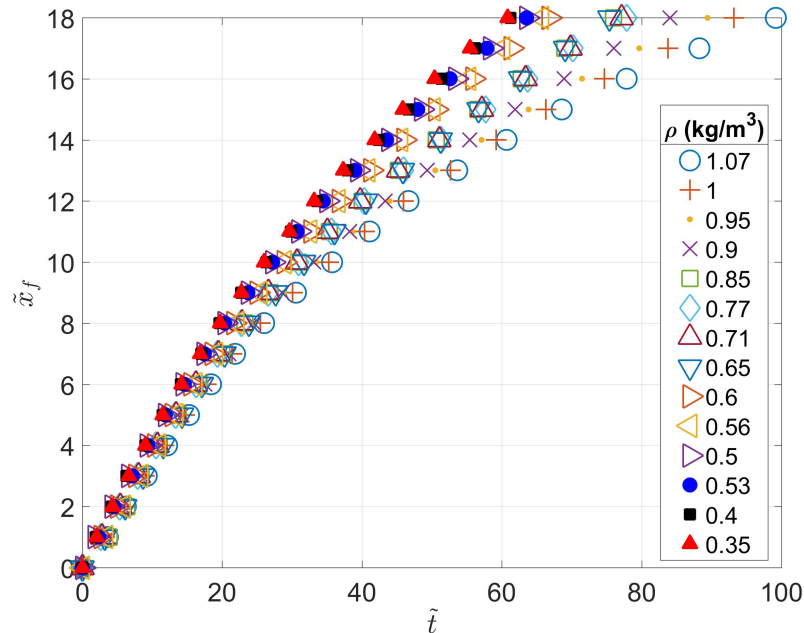
$$0,35 \leq \rho \leq 1,07 \text{ kg/m}^3$$

$$(0,12 \leq \epsilon \leq 0,71)$$

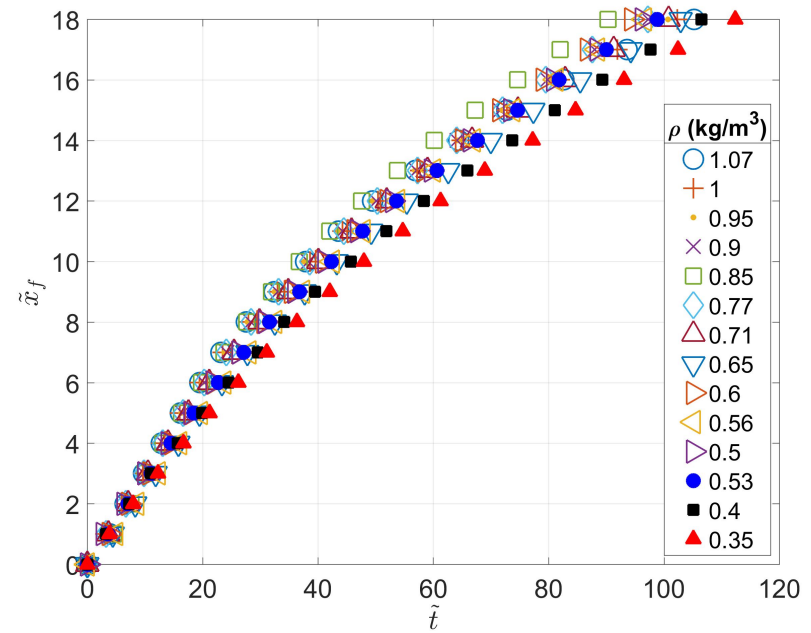
■ Vitesse moyenne de propagation variant de
0,13 ($1,07 \text{ kg/m}^3$) à
0,63 m/s ($0,35 \text{ kg/m}^3$)

Effet de la masse volumique

(a)



(b)



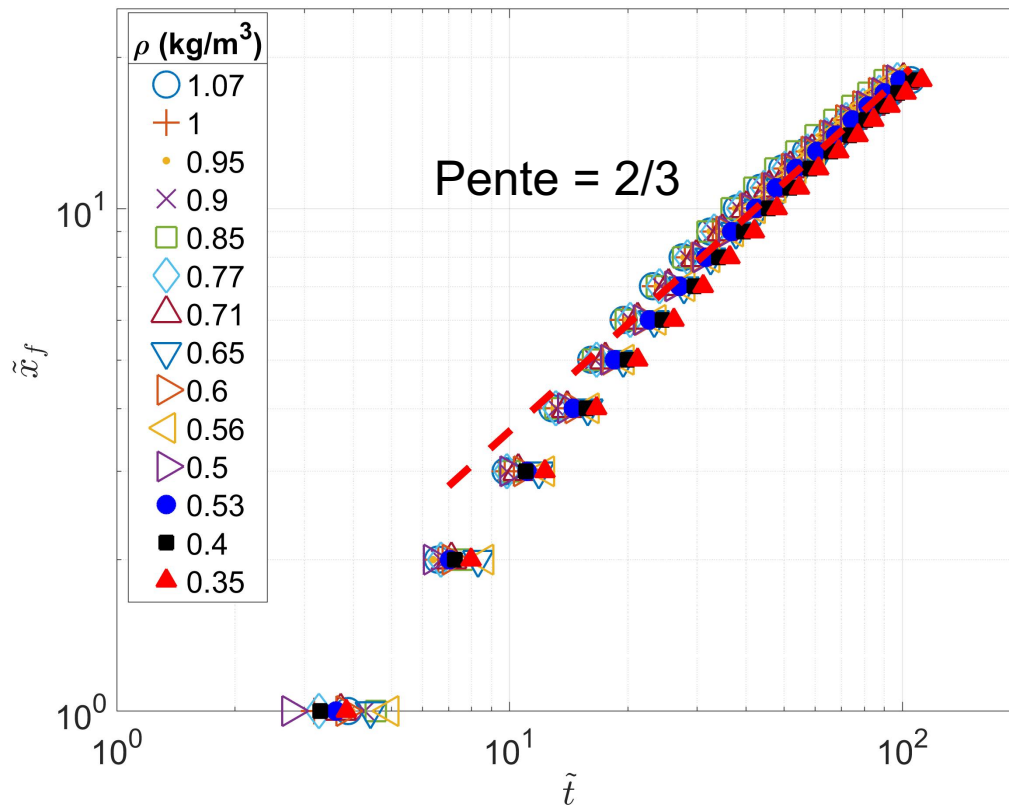
Position adimensionnée du front de courant de densité en fonction du temps adimensionné pour différentes masses volumiques avec (a) adimensionnement Boussinesq et (b) adimensionnement non-Boussinesq

$$\text{Boussinesq : } \tilde{x}_f = \frac{x_f}{l_0} \text{ et } \tilde{t} = \frac{t \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} h_0}}{l_0}$$

Variables adimensionnées

$$\tilde{x}_f = \frac{x_f}{l_0} \text{ et } \tilde{t} = \frac{t \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} h_0}}{l_0}$$

Effet de la masse volumique



Position adimensionnée du front de courant de densité en fonction du temps adimensionné pour différentes masses volumiques en échelle logarithmique

$$\tilde{x}_f = \frac{x_f}{l_0}$$

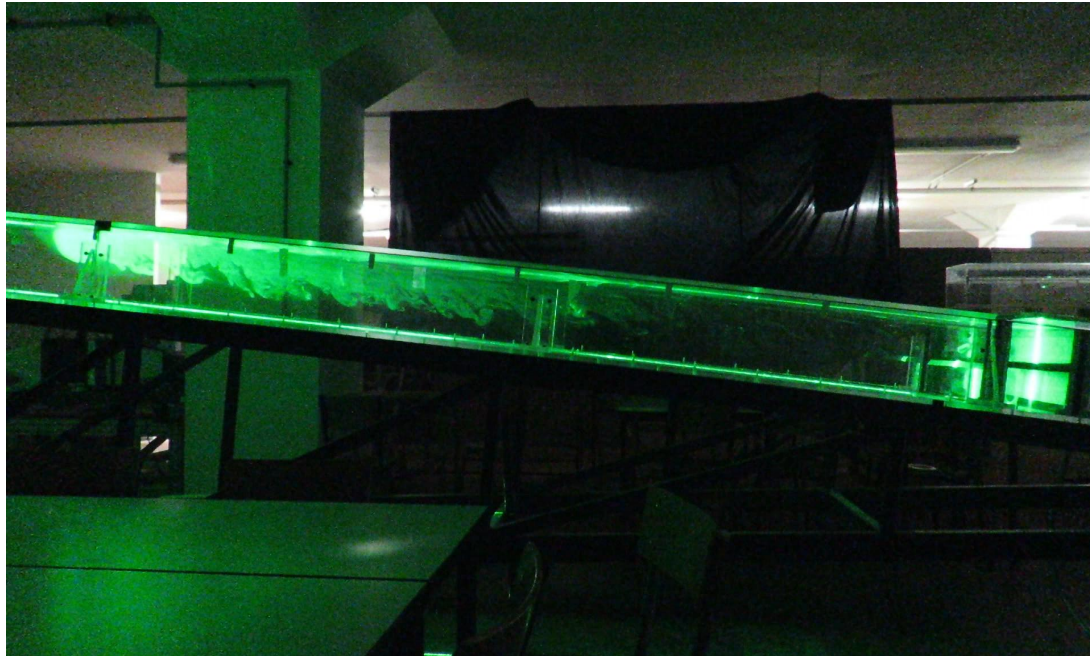
$$\tilde{t} = \frac{t \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0}}{l_0}$$

Dans la phase inertielle, pour de **grands écarts de masse volumique (non-Boussinesq)** et dans le cas d'une propagation **en tunnel (confinement)** :

$$\tilde{x}_f = k_i \tilde{t}^{2/3}$$

Avec $k_i = 0,82^{+0,05}_{-0,07}$

Effet de la pente



Volume initial fixé avec

- $l_0 = 0.25$ m
- $h_0 = 0,25$ m
- $w_0 = 0,5$ m

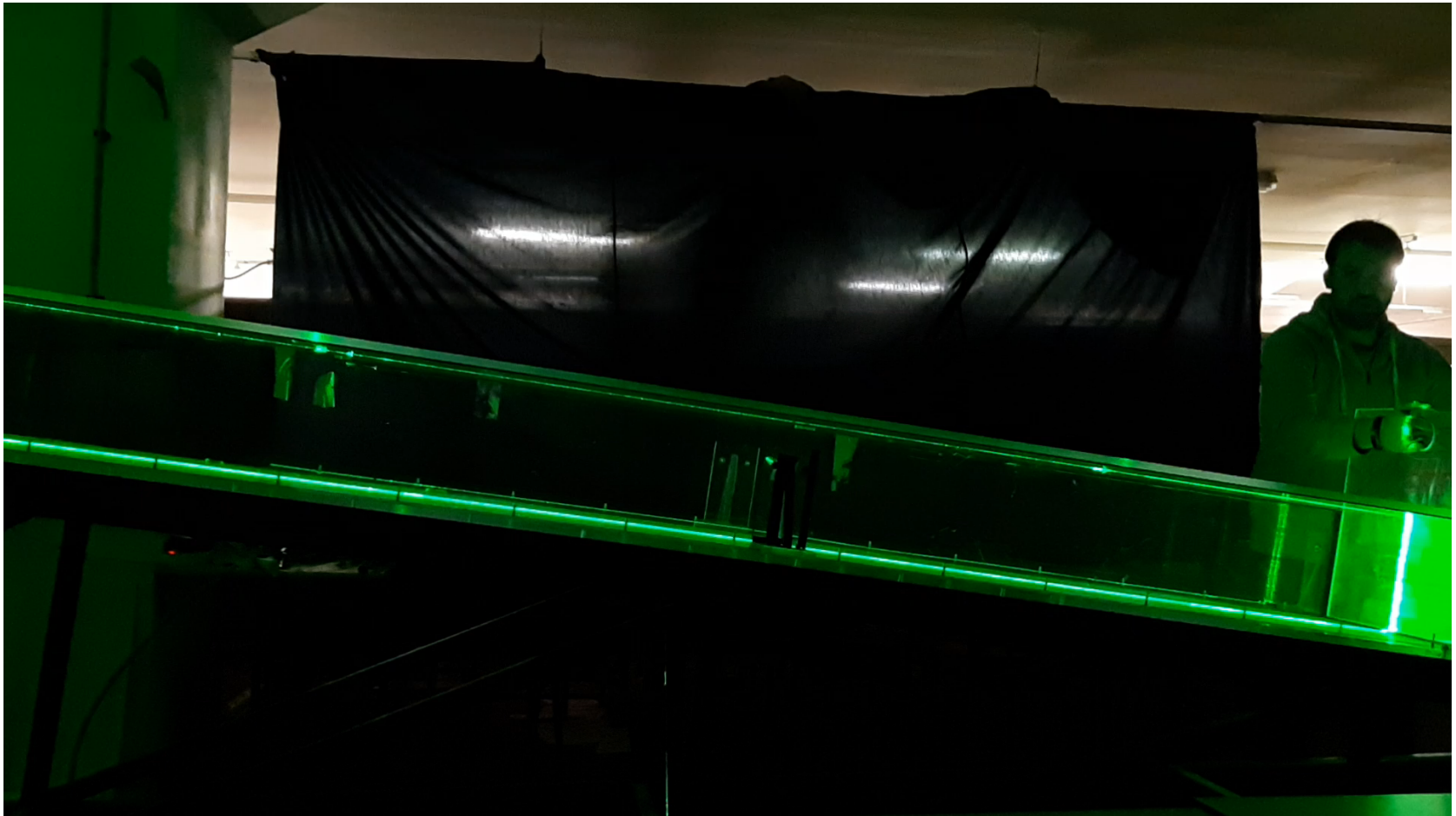
Masse volumique initiale

$\rho = 0,5, 0,71$ ou 0.95 kg/m³

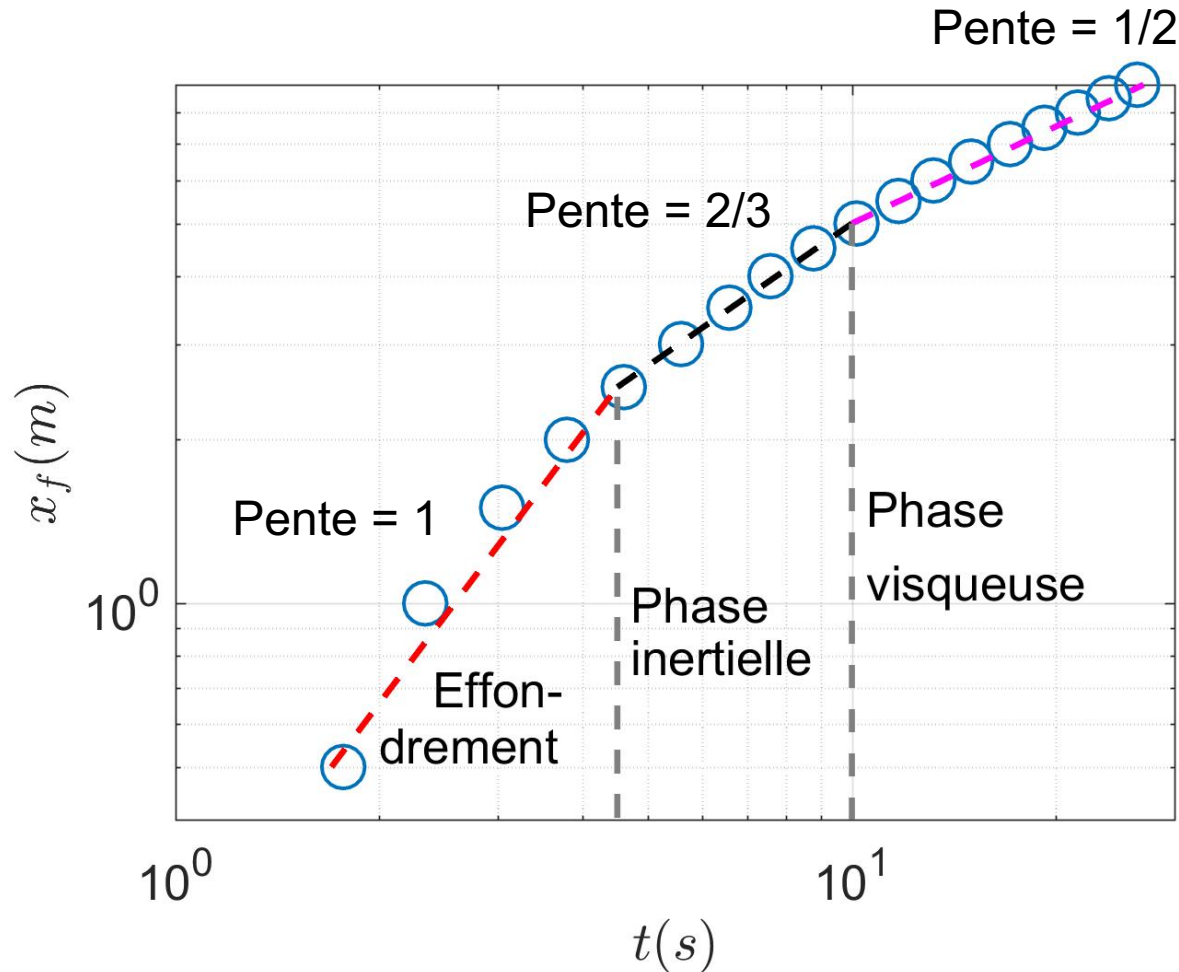
Pente

- $1\% \leq \theta \leq 17\%$

Effet de la pente



Effet de la pente



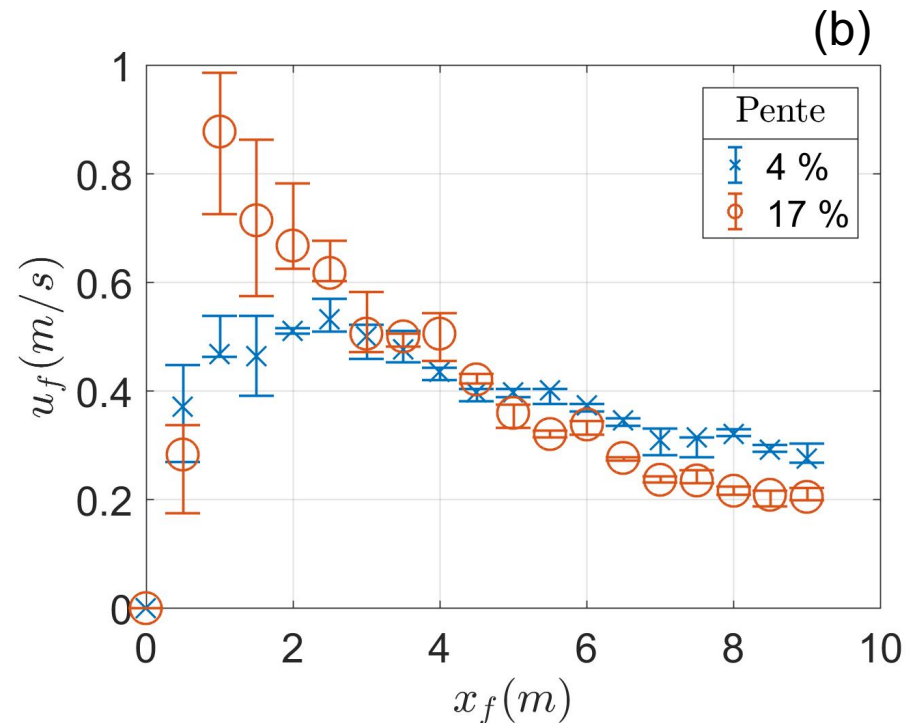
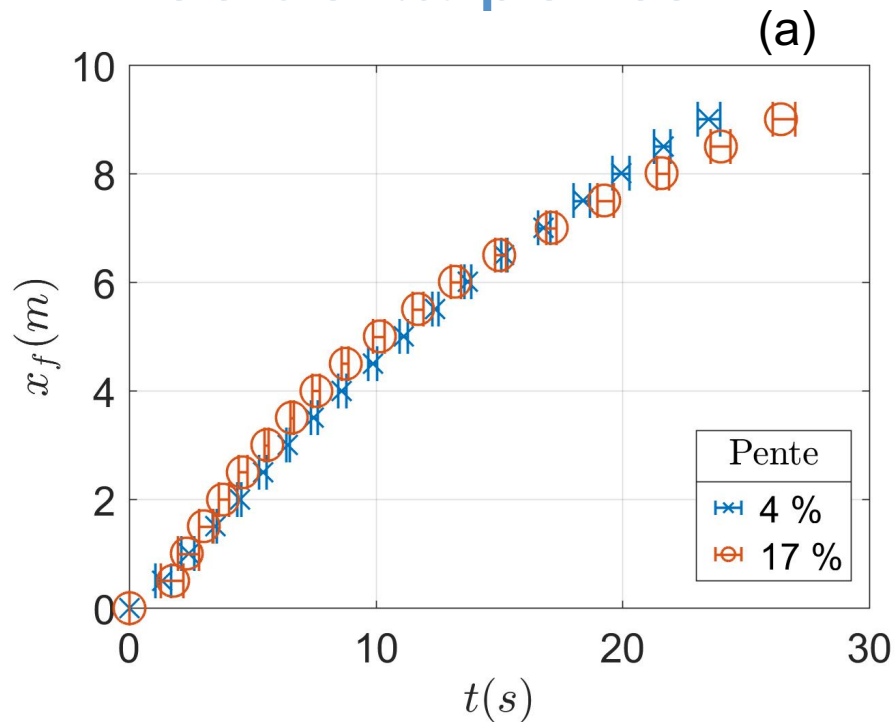
$$\rho = 0.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\theta = 17 \%$$

Propagation selon les 3 phases définies dans le cadre d'un courant de densité horizontal en milieu ambiant infini

Position du front de courant de densité en fonction du temps pour une masse volumique $\rho = 0,5 \text{ kg/m}^3$ et pour un tunnel incliné à $\theta = 17 \%$

Effet de la pente

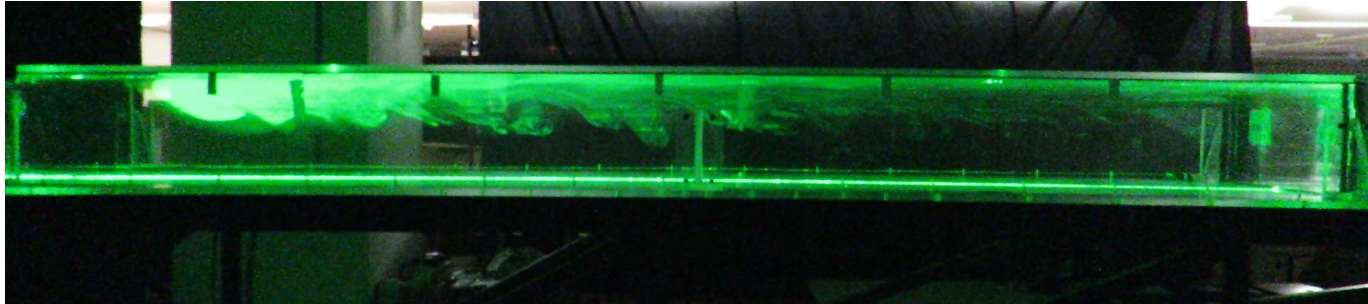


(a) Position du front, x_f , en fonction du temps t , et
 (b) vitesse du courant de densité, u_f , en fonction
 de la position du front, x_f , pour une pente de (x) 4
 % et (o) 17 % et une masse volumique initiale
 $\rho = 0,5 \text{ kg/m}^3$

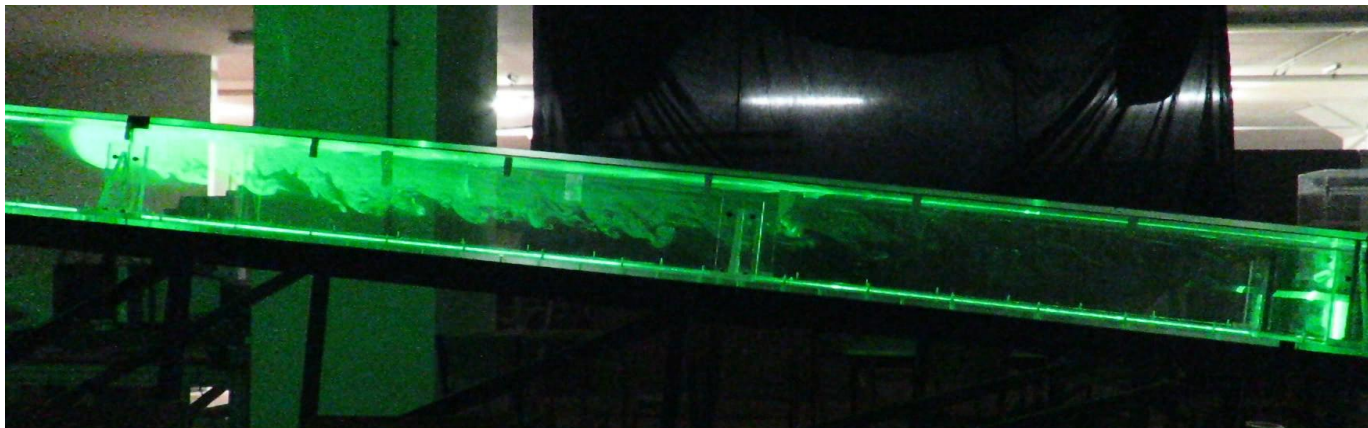
L'inclinaison du tunnel peut freiner la propagation d'un courant de densité pour des distances importantes

Effet de la pente

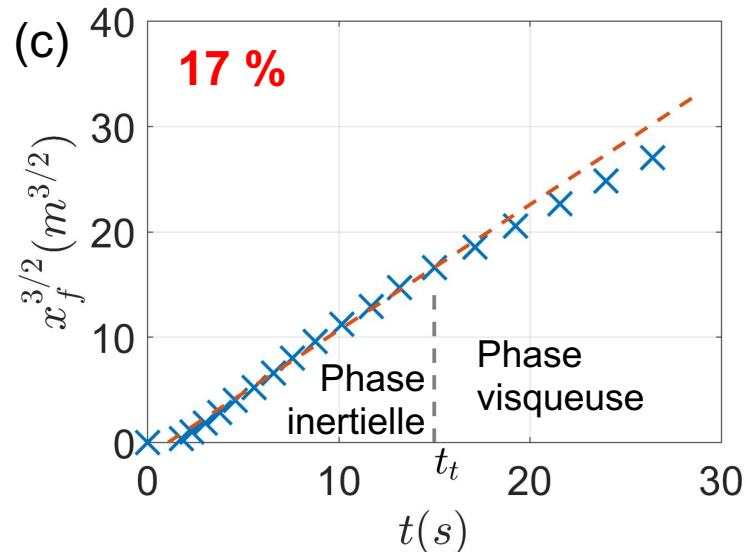
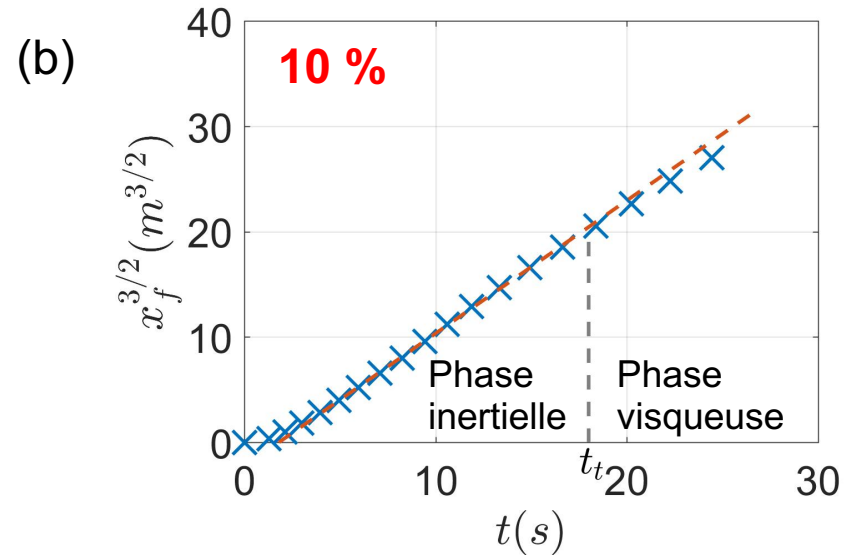
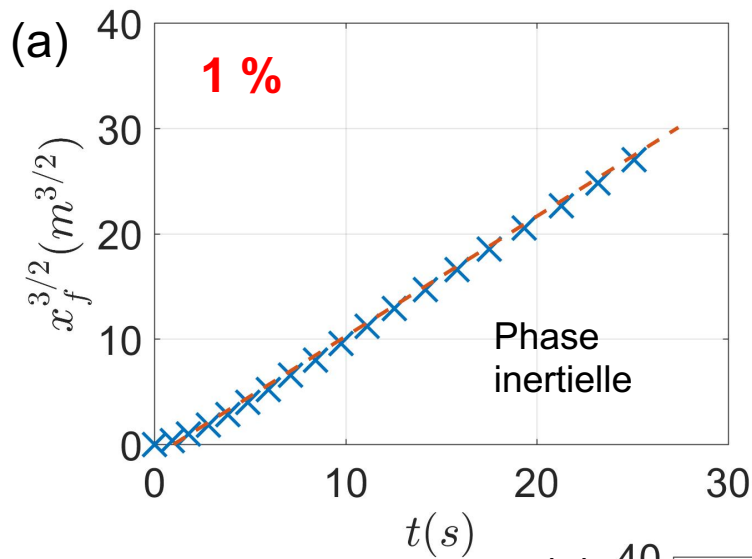
$\theta = 0 \%$



$\theta = 5 \%$



Effet de la pente



$x_f^{3/2}$ en fonction du temps t
pour des pentes de (a) 1
%, (b) 10 % et (c) 17 %.
La masse volumique
initiale est $\rho = 0,5 \text{ kg/m}^3$.

4) Conclusions

- Réalisation d'expériences sur les écoulements transitoires de type courant de densité en tunnel incliné
- 3 paramètres impactent la propagation d'un courant de densité
 - Le confinement
 - La différence de masse volumique $\Delta\rho$: adimensionnement non-Boussinesq proposé
 - L'inclinaison du tunnel θ : génère un cisaillement important, raccourcit la transition entre les phases inertielles et visqueuses et peut diminuer la vitesse de propagation

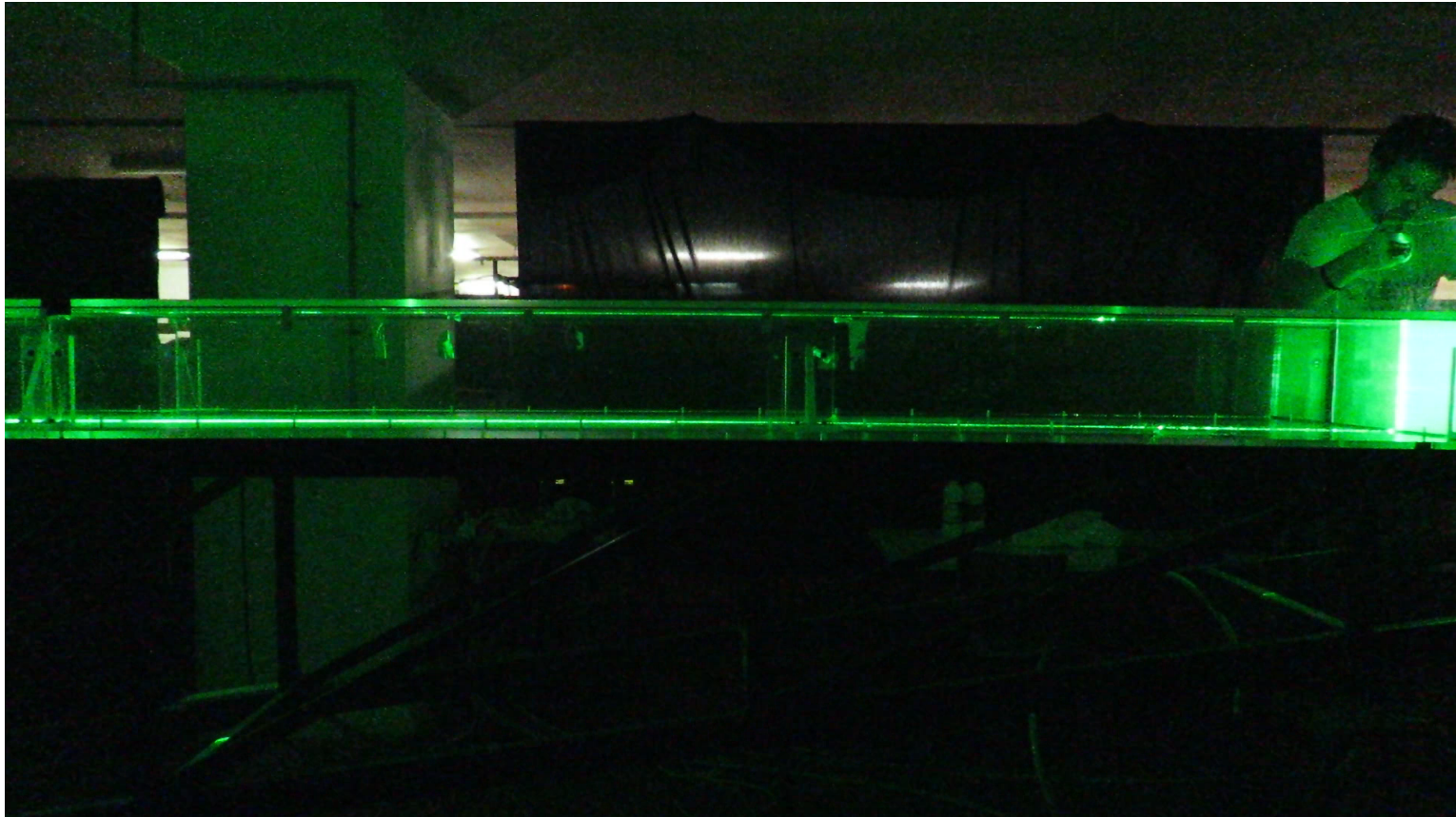
Perspectives

- Etudier numériquement la propagation d'un fluide léger sur des distances plus importantes
- Déterminer théoriquement l'impact de la pente sur la dynamique des courants de densité
- Apporter des éléments de réponses techniques sur les stratégies de ventilation

Quelques références bibliographiques

- Benjamin (1967). Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 31, pp. 209-248,
- Houtt (1972). Oil spreading on the sea. *Annual review of Fluid Mechanics*, vol. 4, pp. 341-368.
- Huppert (1982). Propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 121, pp. 785-799
- Lowe et al. (2005). The non-Boussinesq lock-exchange problem. Part 1. Theory and experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 537, pp. 101-124.
- Dai (2013). Experiments on gravity currents propagating on different bottom slopes. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 731, pp. 117-141.

Théorie sur les courants de densité



Objectifs :

Caractériser ces régimes de propagation

$$x_f = f(t)$$

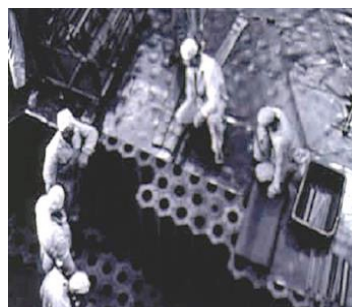
Type de déchets



Très Faible
Activité (**TFA**)



Faible et
Moyenne Activité
– Vie Courte
(**FMA-VC**)



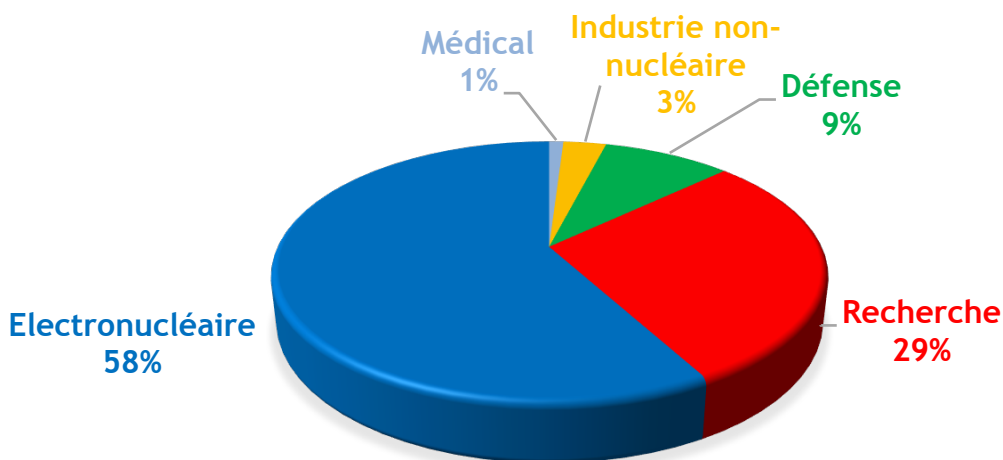
Faible Activité –
Vie Longue (**FA-
VL**)



Moyenne
Activité– Vie
Longue (**MA-VL**)



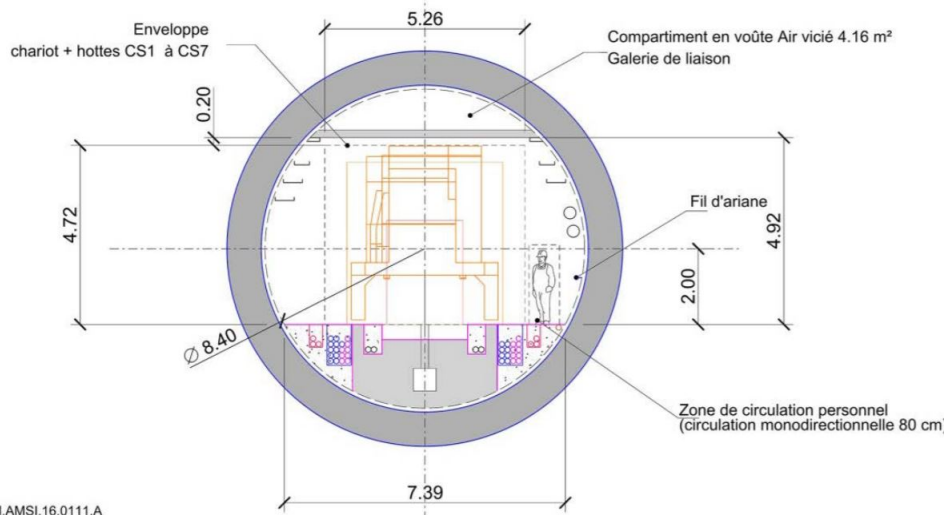
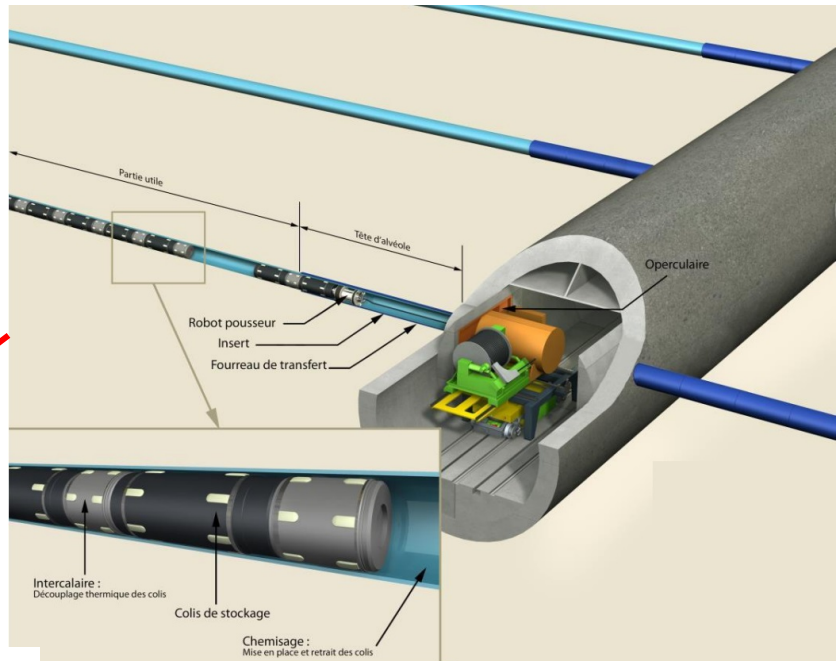
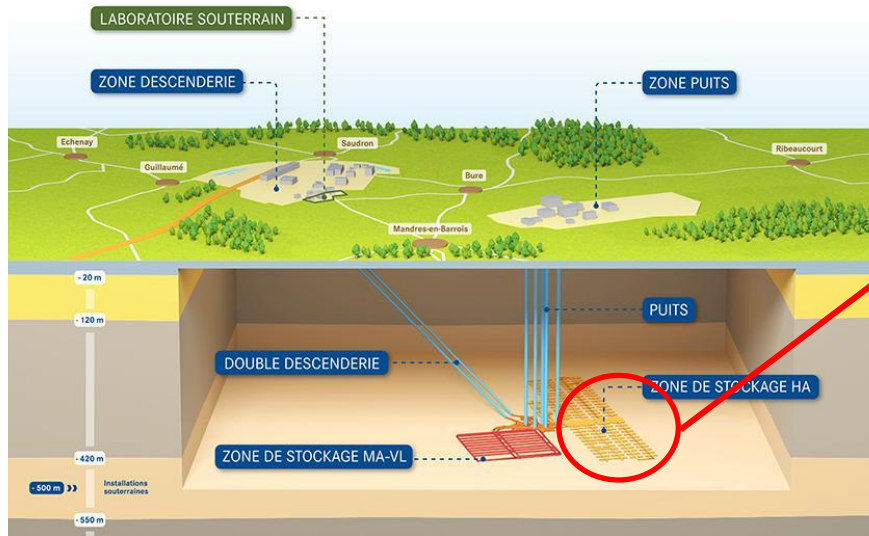
Haute Activité
(**HA**)



Déchets MA-VL et HA :

- **4 %** du volume des déchets
- **99 %** de la radioactivité

Cigéo



Galerie de liaison + alvéole HA

Alvéole bouchée lorsque complètement remplie

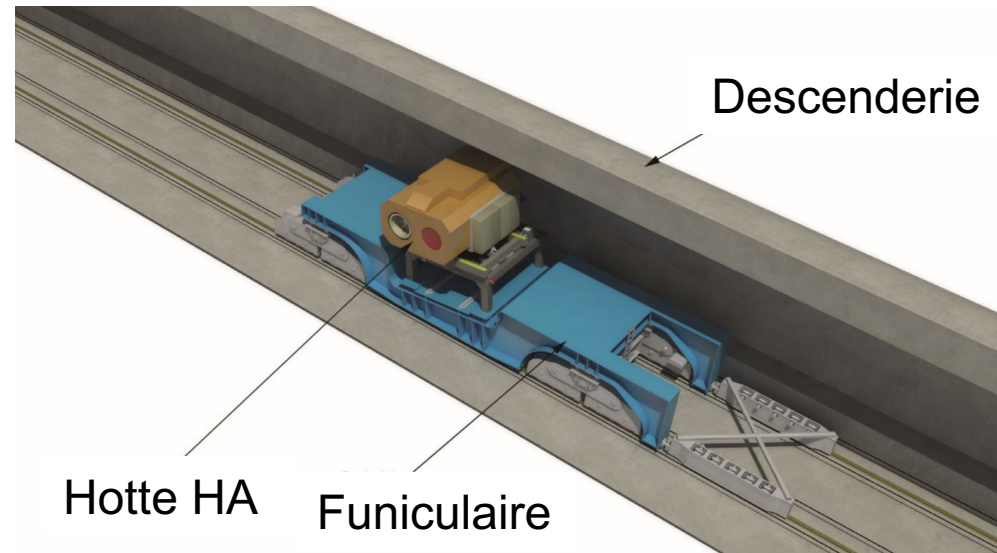
Galerie de liaison :

- Ventilation transverse

C.IM.AMSI.16.0111.A

Cigéo

Risque incendie dans la descenderie



Principales sources d'incendie dans la descenderie :

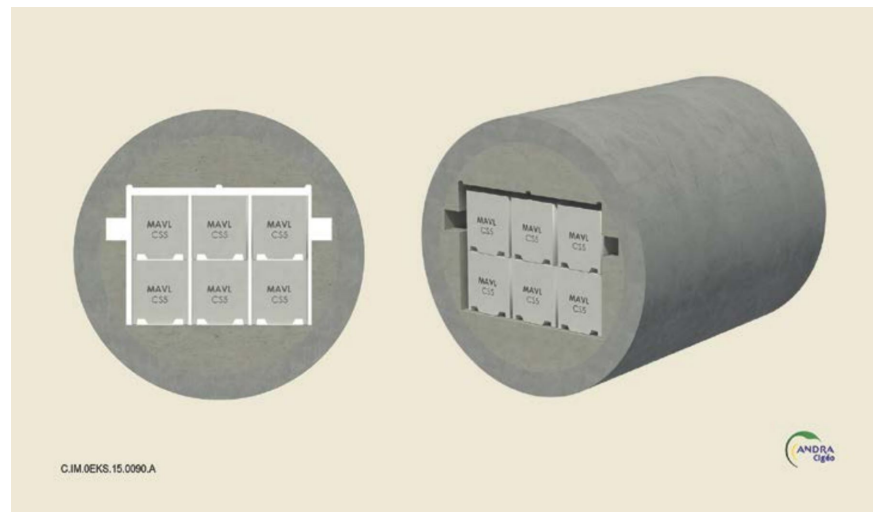
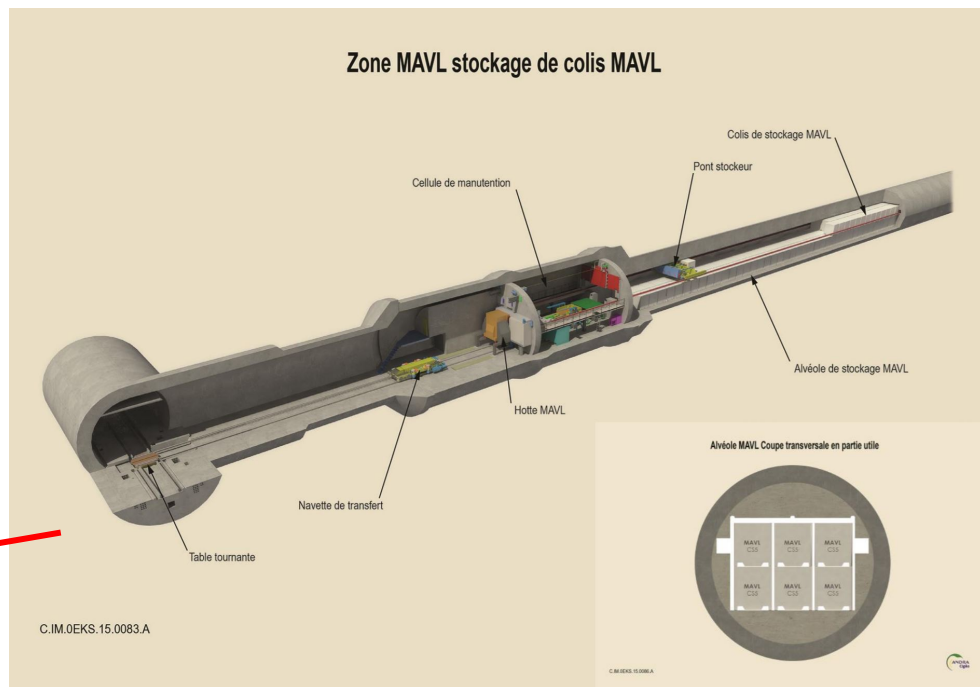
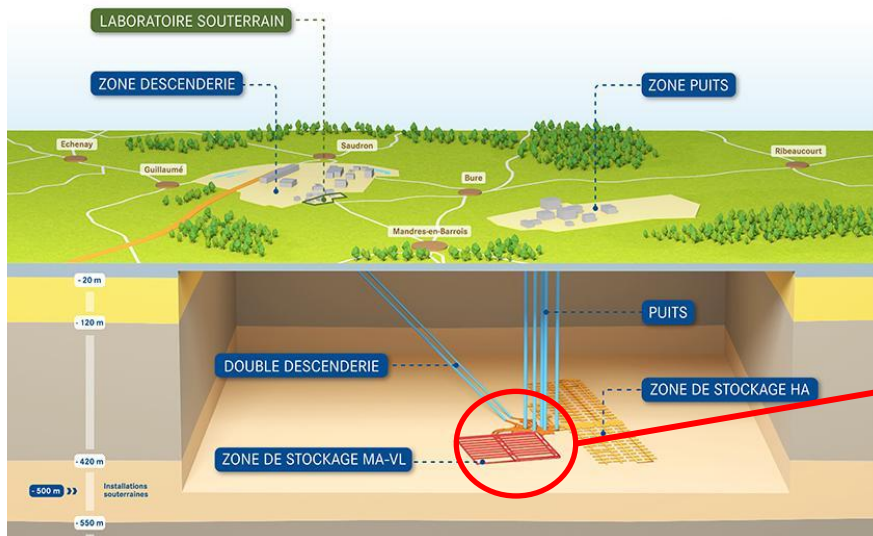
- Funiculaire
- Câbles électriques

Charge calorifique du funiculaire + Hotte HA :
~ 3 000 MJ

Stratégie de ventilation :

- Ventilation longitudinale ascendante à vitesse critique u_{crit}

Cigéo



Galerie de liaison + alvéole MAVL

Alvéole MAVL :

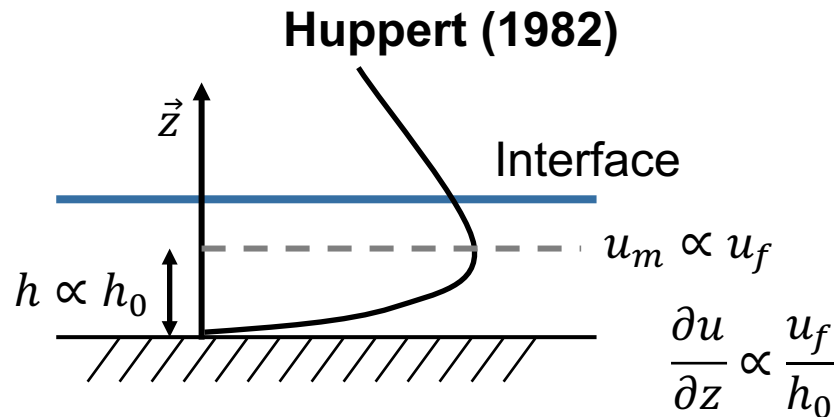
- Circulation d'air en pleine section
- Air vicié évacué après filtration

Galerie de liaison :

- Ventilation transverse

Théorie sur les courants de densité

■ Non-consensus sur la loi proposée en phase visqueuse $\vec{F}_v = \mu S \frac{\partial \vec{u}}{\partial z}$

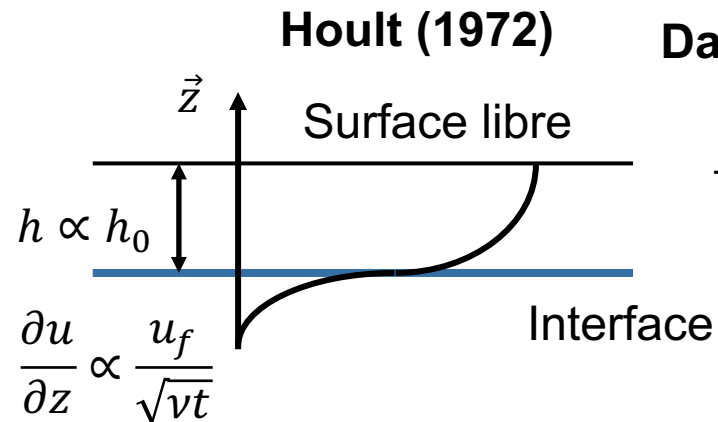


Force visqueuse estimée :

$$F_v \propto \mu(x_f w_0) \frac{x_f}{t h_0}$$

Equilibre flottabilité viscosité :

$$x_f \propto \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{V^3}{\nu} \right)^{1/5} \underline{t^{1/5}}$$



Force visqueuse estimée :

$$F_v \propto \mu(x_f w_0) \frac{x_f}{\nu^{1/2} t^{3/2}}$$

Equilibre flottabilité viscosité :

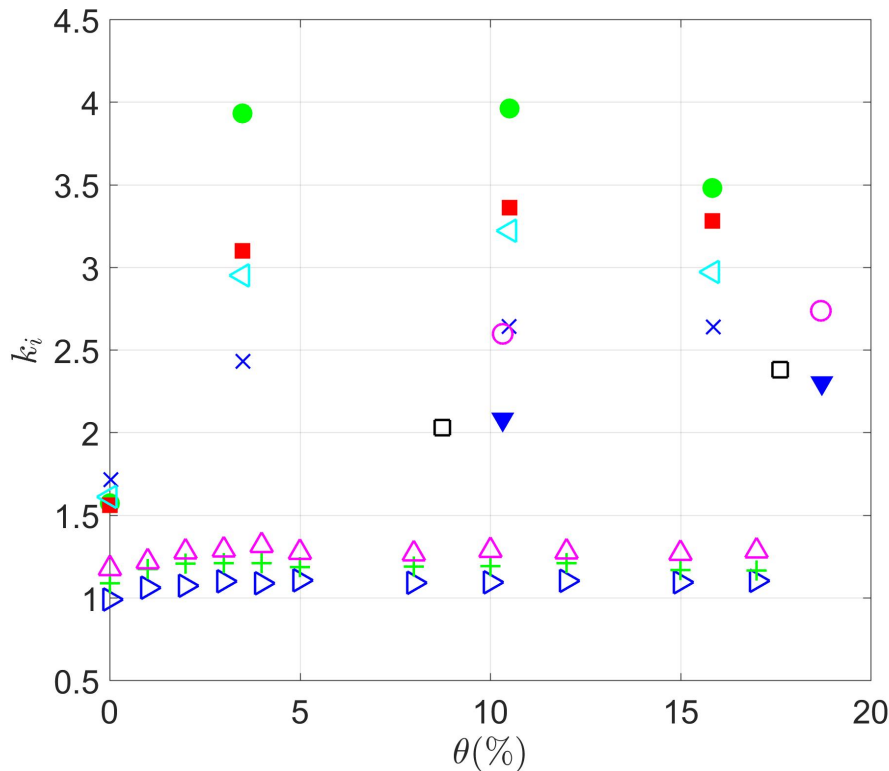
$$x_f \propto \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{V^2}{\nu^{1/2}} \right)^{1/4} \underline{t^{3/8}}$$

Dai (2013) :

$$S = \sqrt{A_0}$$

$$\rightarrow x_f \propto \underline{t^{1/2}}$$

Effet de la pente sur le coefficient k_i

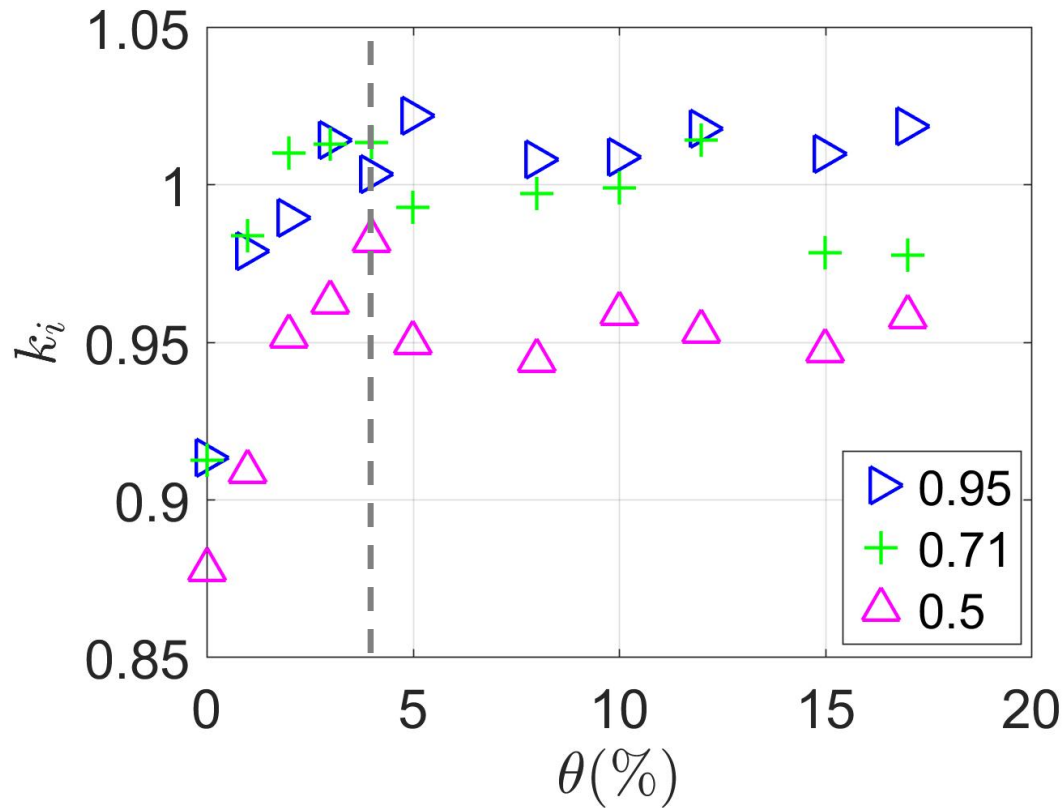


Effet de la pente sur le coefficient k_i de la loi de propagation en phase inertielle :

$$\tilde{x} = k_i \tilde{t}^{2/3}$$

Coefficient de la phase inertielle k_i en fonction de l'inclinaison de la plaque θ en %. Les coefficients k_i sont déterminés en utilisant l'adimensionnement Boussinesq (i.e. $\Delta\rho/\rho_0$). Les résultats expérimentaux de cette thèse sont présentés pour des masses volumiques initialement relâchées de (\triangleright) $\epsilon = 0.21$ ($\rho_i = 0.95 \text{ kg/m}^3$), ($+$) $\epsilon = 0.41$ ($\rho_i = 0.71 \text{ kg/m}^3$) et (\triangle) $\epsilon = 0.58$ ($\rho_i = 0.5 \text{ kg/m}^3$). Ils sont comparés aux données de (\square) Beghin & Britter (1981) avec $\epsilon = 0.02$, (\circ) Maxworthy (2010) avec $\epsilon = 0.013$, (\times) Dai (2013) avec $\epsilon = 0.0175$, (\blacktriangledown) Dai (2014) avec $\epsilon = 0.05$, (\blacksquare) $\epsilon = 0.10$ et (\triangleleft) $\epsilon = 0.17$ et Steenhauer et al. (2017) avec $\epsilon = 0.013$.

Effet de la pente sur le coefficient k_i



Pour des faibles pentes
($0 \leq \theta \leq 4\%$) :

k_i augmente

Pour des pentes plus
importantes ($\theta \geq 4\%$) :

k_i quasi-constant

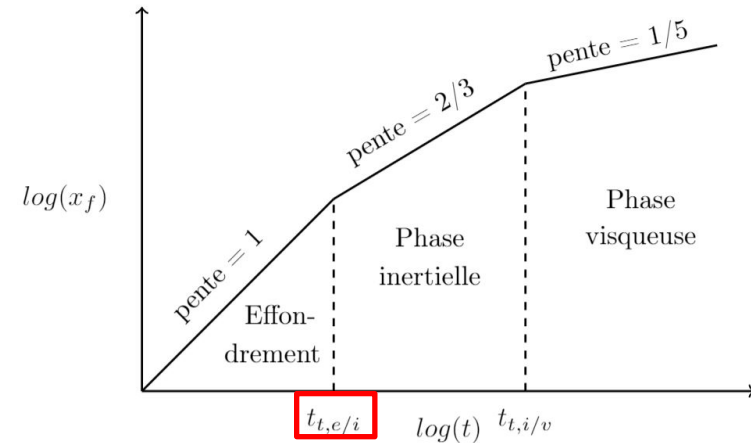
Coefficient de la phase inertielle k_i en fonction de
l'inclinaison du tunnel θ (%)

Effet de la masse volumique - Transitions

Transition entre les phases d'effondrement, inertielle et visqueuse déterminée théoriquement par Huppert (1982)

Effondrement : $x_f \propto \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0\right)^{1/2} t$

Phase inertielle : $x_f \propto \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0 l_0\right)^{1/3} t^{2/3}$



Transition effondrement/inertie :

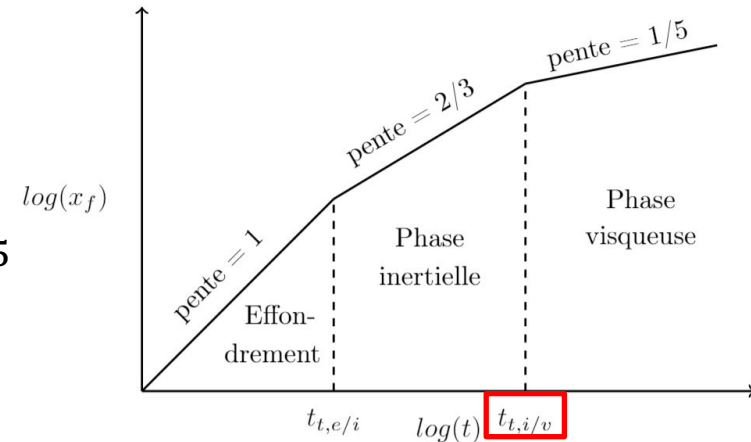
$$\underbrace{t_{t,e/i} \propto \frac{l_0}{\left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0\right)^{1/2}}}_{\tilde{t}} \quad \text{et} \quad \underbrace{x_{t,e/i} \propto l_0}_{\tilde{x}_f}$$

Effet de la masse volumique - Transitions

Transition entre les phases d'effondrement, inertielle et visqueuse déterminée théoriquement par Huppert (1982)

Phase inertielle : $x_f \propto \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0 l_0 \right)^{1/3} t^{2/3}$

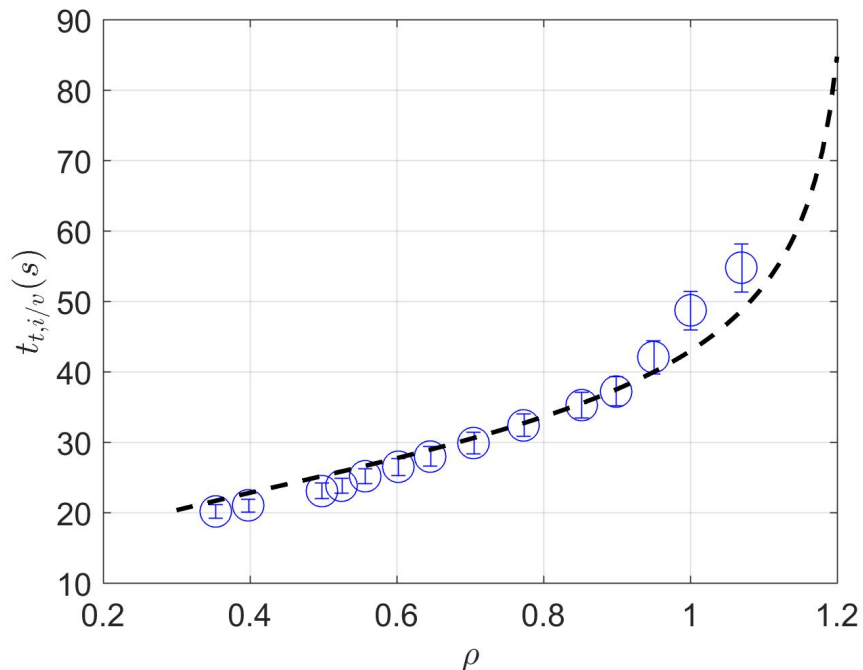
Phase visqueuse : $x_f \propto \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{(h_0 l_0)^3}{\nu} \right)^{1/5} t^{1/5}$



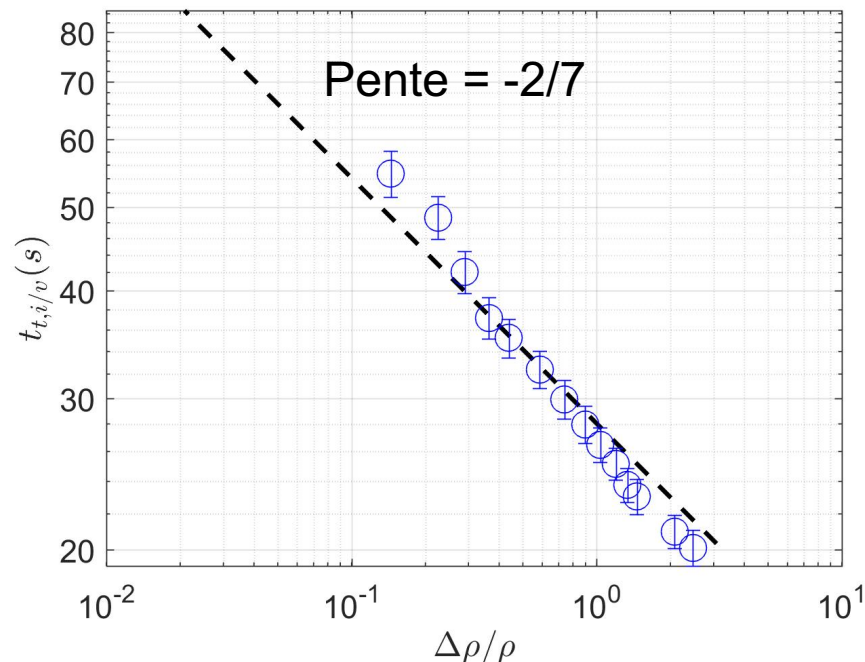
Transition inertie/visqueux :

$$t_{t,i/v} \propto \left(\frac{(h_0 l_0)^4}{\nu^3 \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^2} \right)^{1/7} \propto \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{-2/7} \quad \text{et} \quad x_{t,i/v} \propto \left(\frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho} (h_0 l_0)^5}{\nu^2} \right)^{1/7}$$

Effet de la masse volumique - Transitions



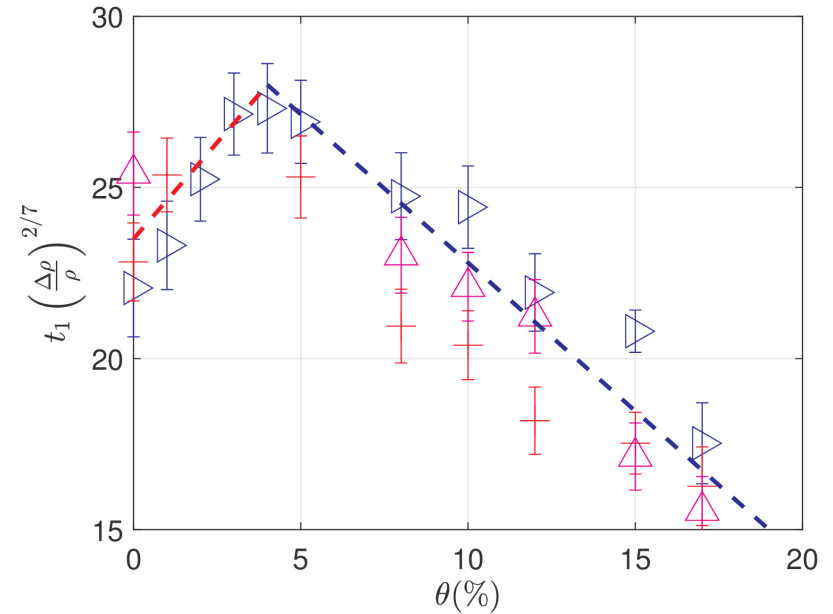
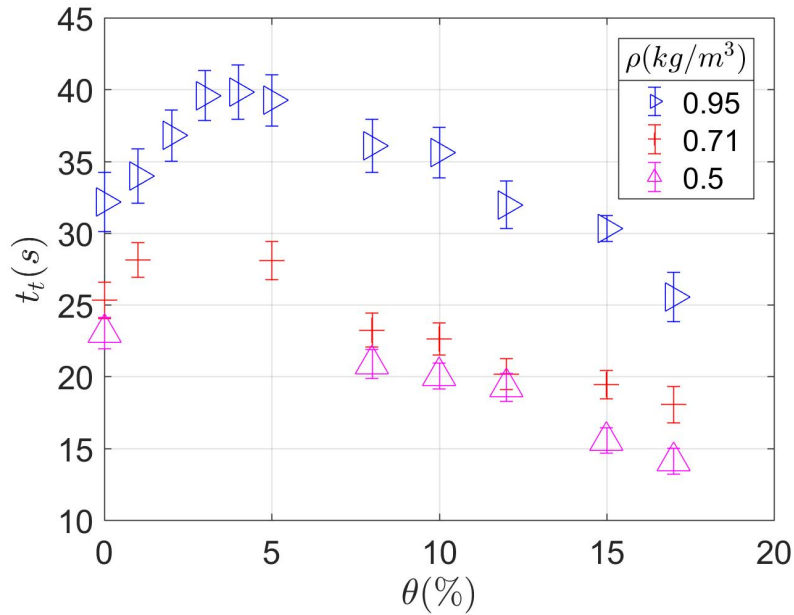
Temps de transition entre le régime inertiel et visqueux en fonction de la masse volumique. La droite en pointillée représente l'équation déterminée par Hault (1972) et Huppert (1982) avec (----) $k_t = 1.5$



Temps de transition entre le régime inertiel et visqueux en fonction de $\Delta\rho/\rho$. La droite en pointillée représente l'équation déterminée par Hault (1972) et Huppert (1982) avec (----) $k_t = 1.5$

La loi de transition proposée par Hault (1972) et Huppert (1982) est assez proche des résultats expérimentaux

Effet de la pente

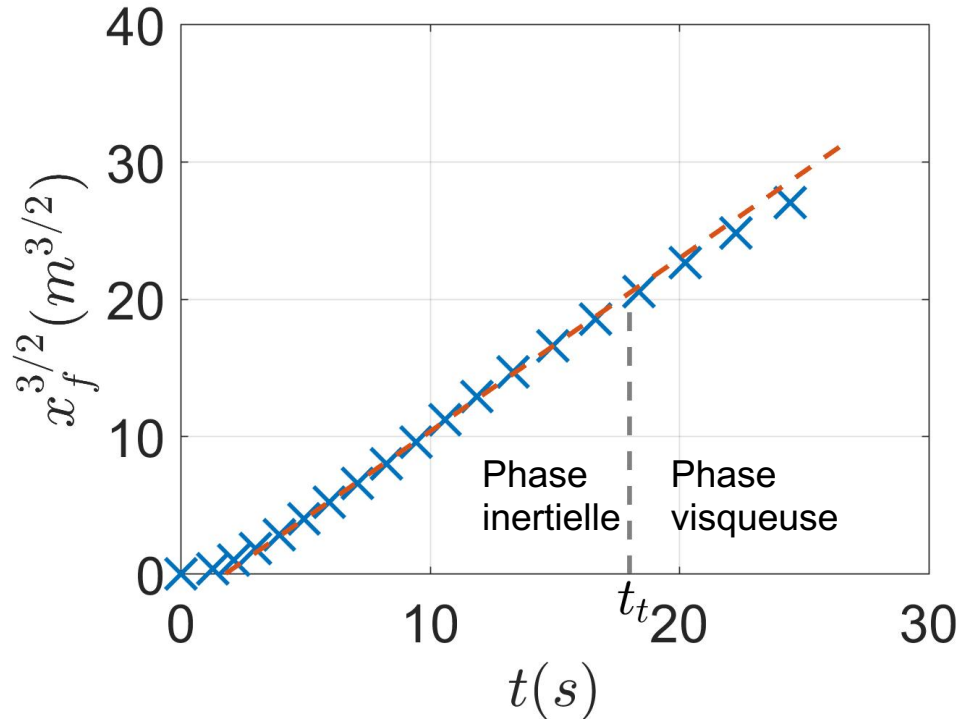


Temps de transition en fonction de la pente du tunnel pour des masses volumiques de **0.95**, **0.71** et **0.5 kg/m³**

Le temps de transition entre la phase inertielle et visqueuse est fortement dépendant de la pente

$$\theta_{opt} = 4\%$$

Effet de la pente

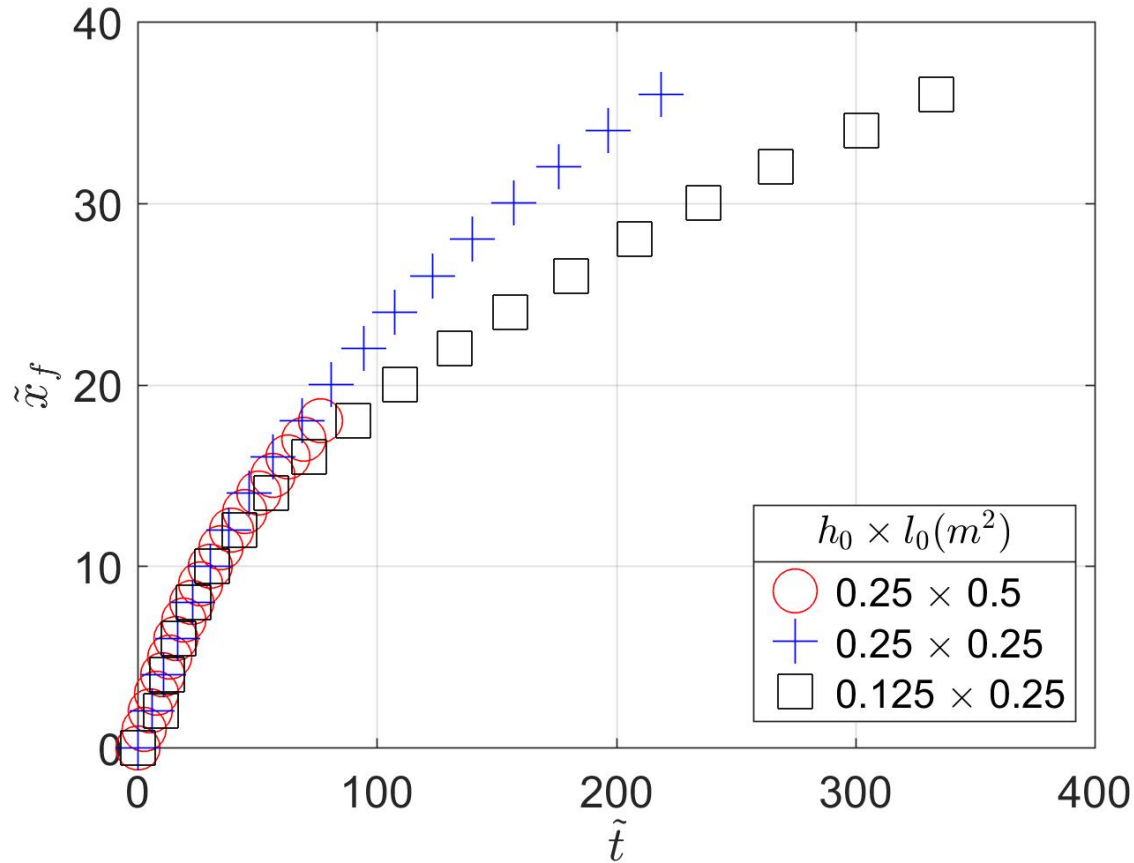


Détermination de :

- Temps de transition entre les phases inertielle et visqueuse t_t
- Coefficient de la phase inertielle k_i

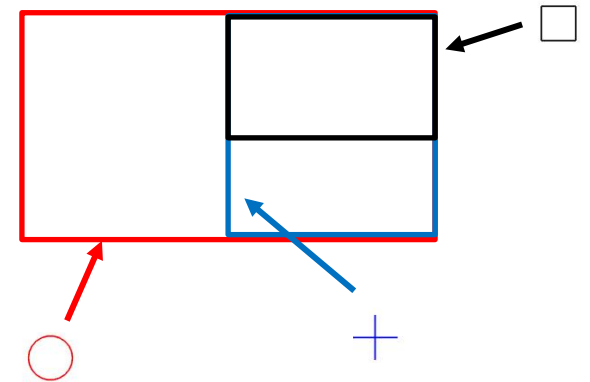
$x_f^{3/2}$ en fonction du temps t pour une pente de **10 %** et une masse volumique initiale de $\rho = 0,5 \text{ kg/m}^3$

Effet du volume initial



$$\tilde{x}_f = \frac{x_f}{l_0}$$

$$\tilde{t} = \frac{t \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_0}}{l_0}$$



L'adimensionnement proposé absorbe l'effet de l_0 mais pas de h_0

Essais de *Partial-depth*

Relation de similitude pour les maquettes aérauliques

Conversion puissance convective en débit de flottabilité

- Puissance convective : $\dot{Q}_c = \rho c_p Q_0 (T - T_0)$
- Débit de flottabilité : $B_0 = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g Q_0$
- Fumées -> Gaz parfait + Pression constante : $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T_0}$

$$B_0 = \frac{g \dot{Q}_c}{\rho_0 T_0 c_p} \quad \text{et en faisant intervenir } q_{He} : q_{He} = \frac{\dot{Q}_c}{c_p T_0 (\rho_0 - \rho_{He})}$$

Réduction d'échelle (notée ω) hypothèse de conservation du nombre de Froude, Fr et non distorsion de la masse

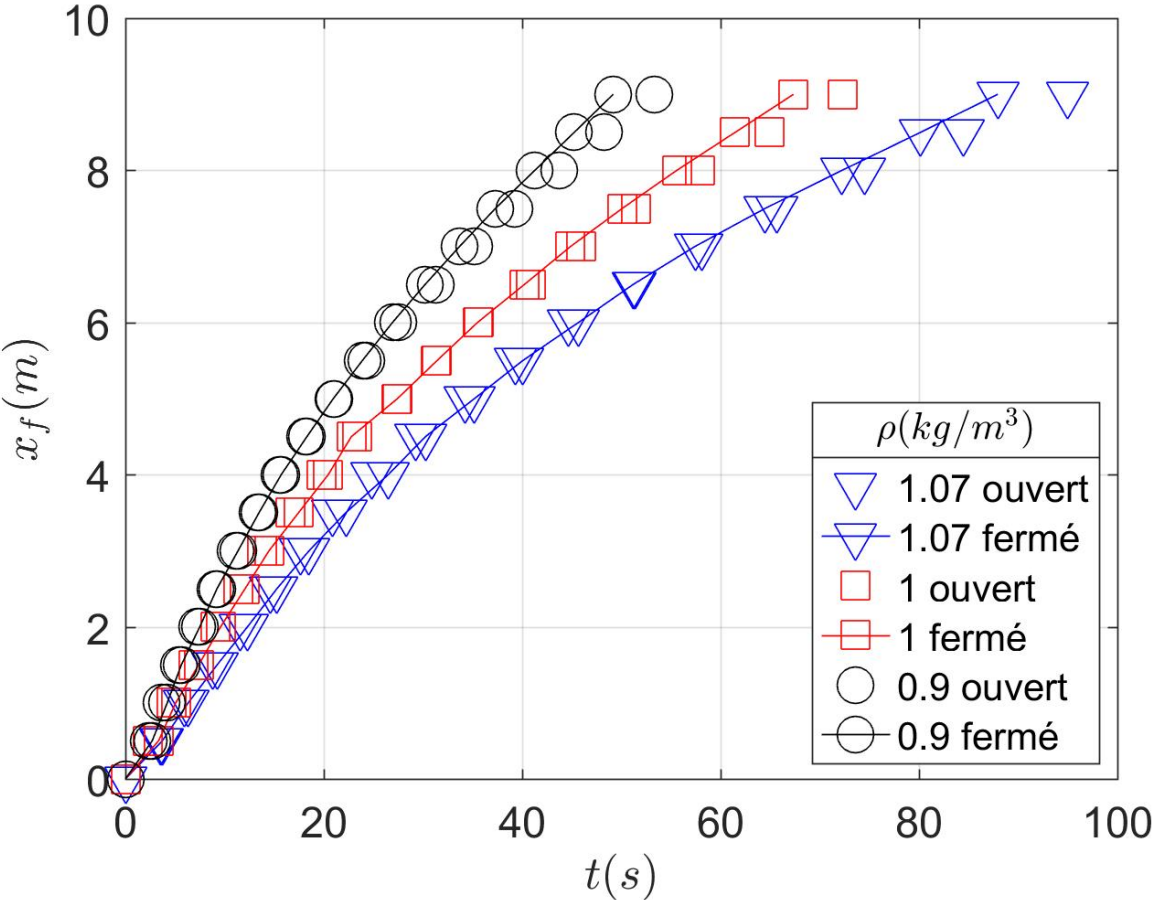
Grandeurs	Facteur d'échelle
Longueur	ω
Vitesse	$\omega^{1/2}$
Temps	$\omega^{1/2}$
Débit volumique	$\omega^{5/2}$

$$q_{He} = \frac{\omega^5 \dot{Q}_c}{c_p T_0 (\rho_0 - \rho_{He})}$$

$$\rho \in [0,35 ; 1,07] \text{ kg/m}^3$$

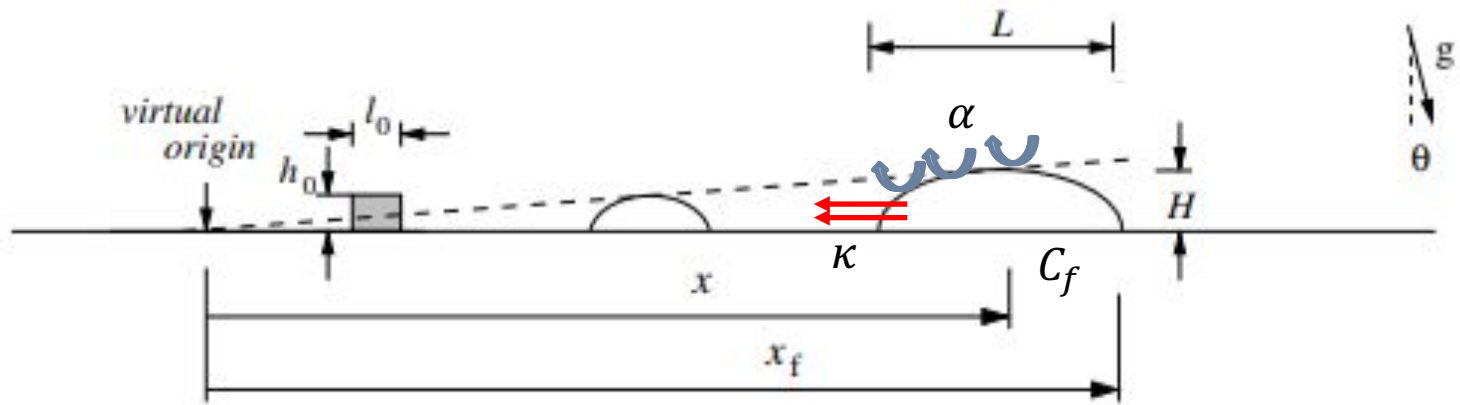
$$\rightarrow T \in [55 ; 730] \text{ }^\circ\text{C}$$

Effet de confinement total du tunnel



Faible écart entre le tunnel ouvert en bout et fermé

Thermal theory adapté au tunnel incliné

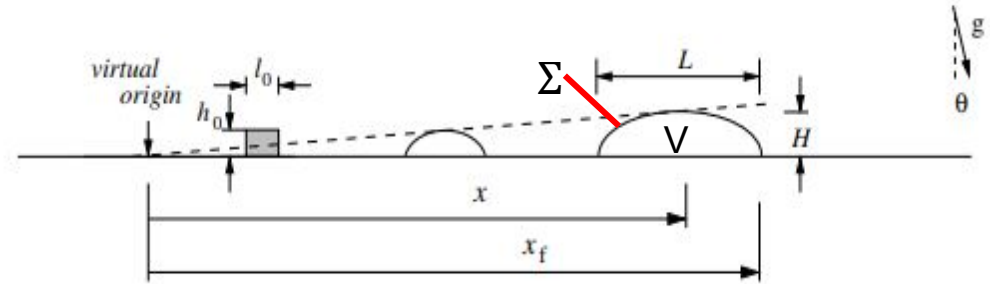


Bilan sur la masse, la flottabilité et la quantité de mouvement

Hypothèses de base :

- Ecoulement Boussinesq (faible $\Delta\rho$)
- Inclinaison $> 5^\circ$
- Milieu ambiant infini
- Rapport $k = H/L$ conservé

Thermal theory adapté au tunnel incliné



$$\frac{d\rho V}{dt} = \underbrace{\alpha \rho_0 \Sigma U}_{\text{Entraînement d'air}} - \underbrace{\kappa \rho \Sigma U}_{\text{Désentraînement de fluide}}$$

Conservation de la masse

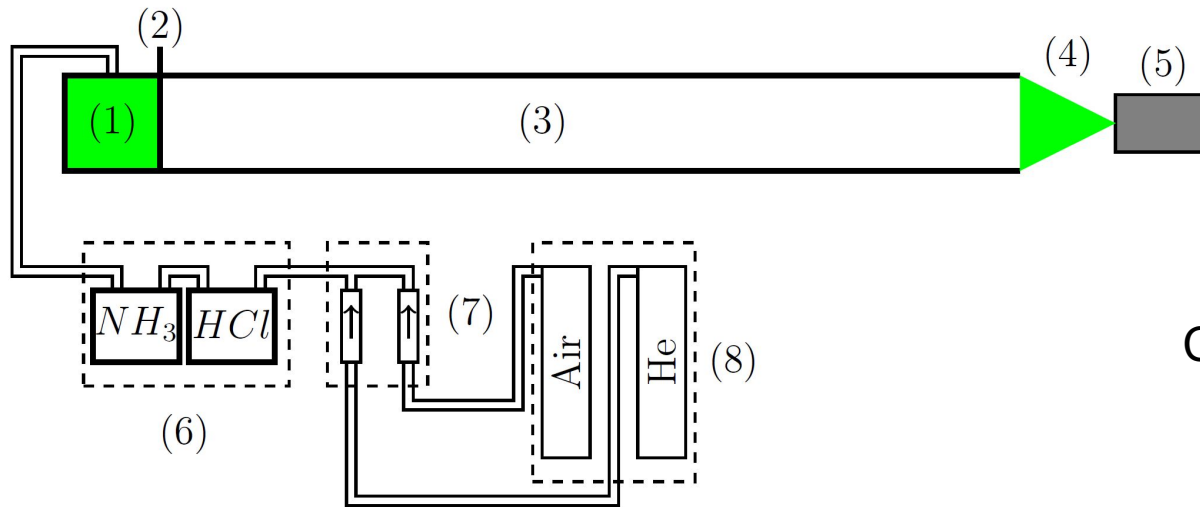
$$\frac{d\Delta\rho V}{dt} = \underbrace{-\kappa(\rho_0 - \rho)\Sigma U}_{\text{Perte de flottabilité par désentraînement}}$$

Conservation de la flottabilité

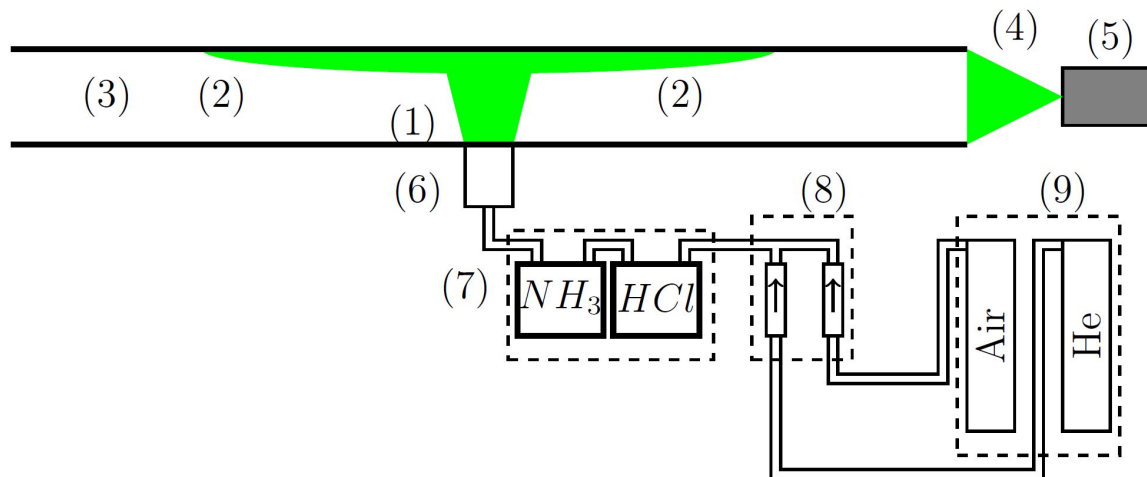
$$\frac{d\rho V U}{dt} = \underbrace{g(\rho_0 - \rho)V \sin(\theta)}_{\text{Force motrice de flottabilité induite par pente}}$$

Conservation de la quantité de mouvement

Dispositif expérimental détaillé



Cas académique

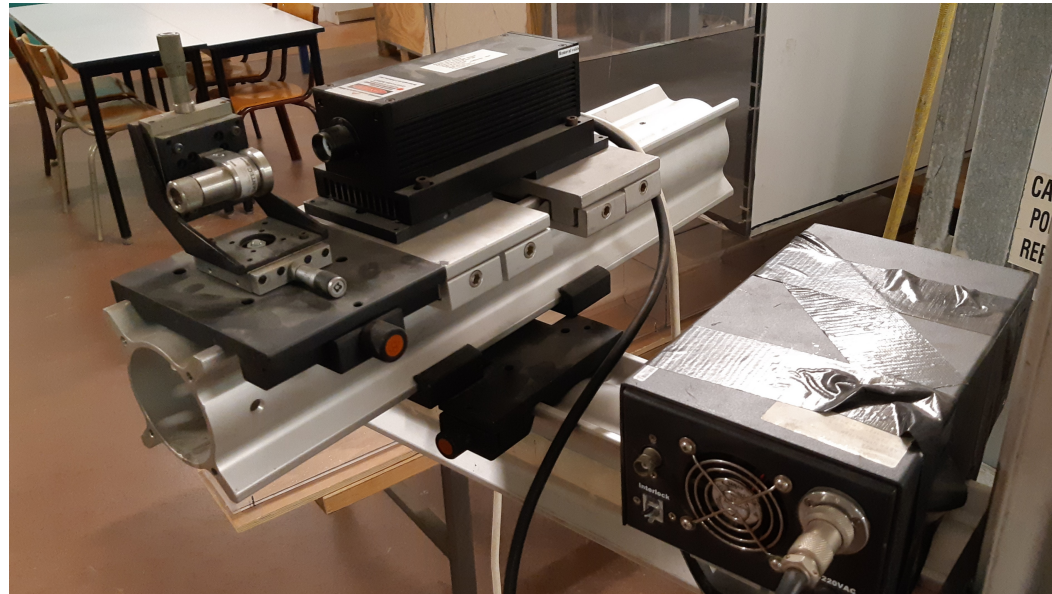


Cas représentatif

Dispositif expérimental détaillé



Débitmètres



Laser à Argon plan

Contrôle de la masse volumique initiale du mélange

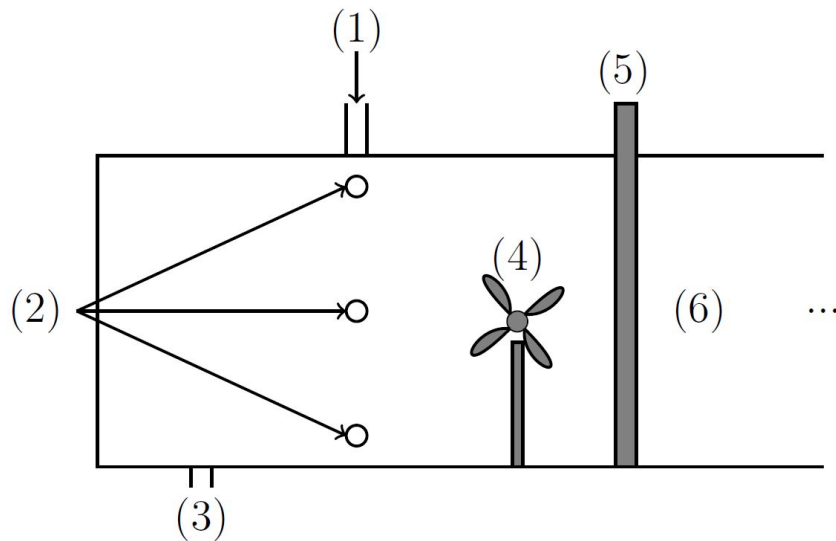
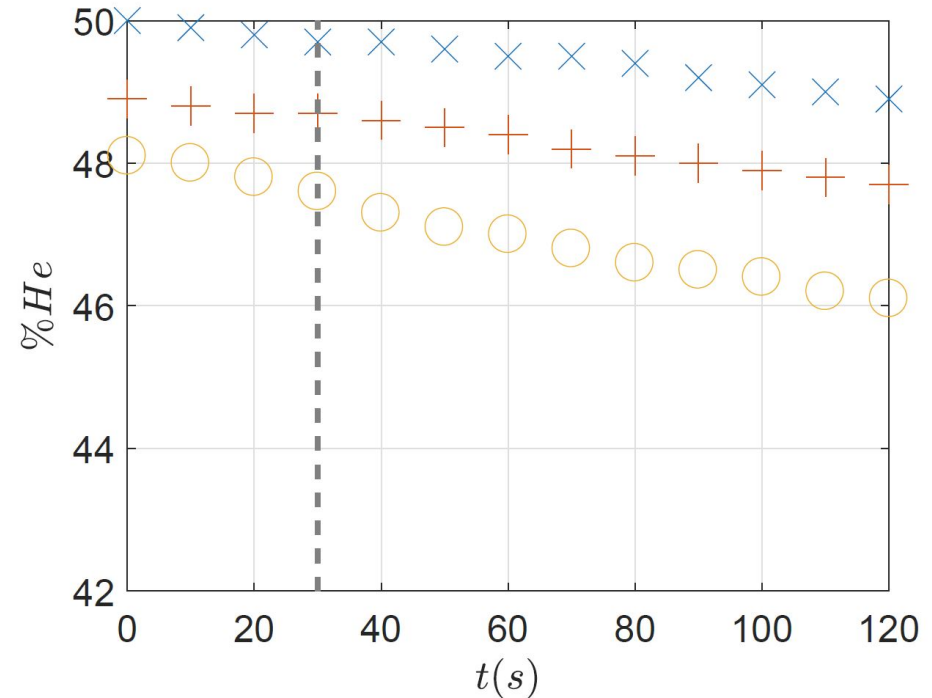


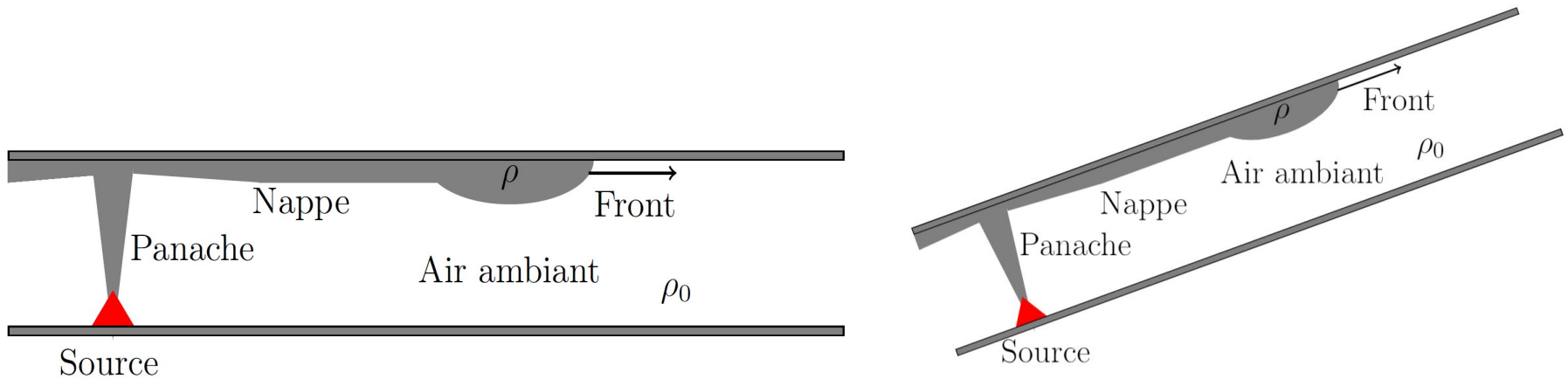
Schéma représentant le volume initial relâché avec (1) l'injection d'hélium pur (2) les points de mesure de la concentration en hélium (3) la sortie d'air (4) le ventilateur (5) la trappe et (6) le tunnel.



Exemple de mesure de concentration pendant le temps de repos

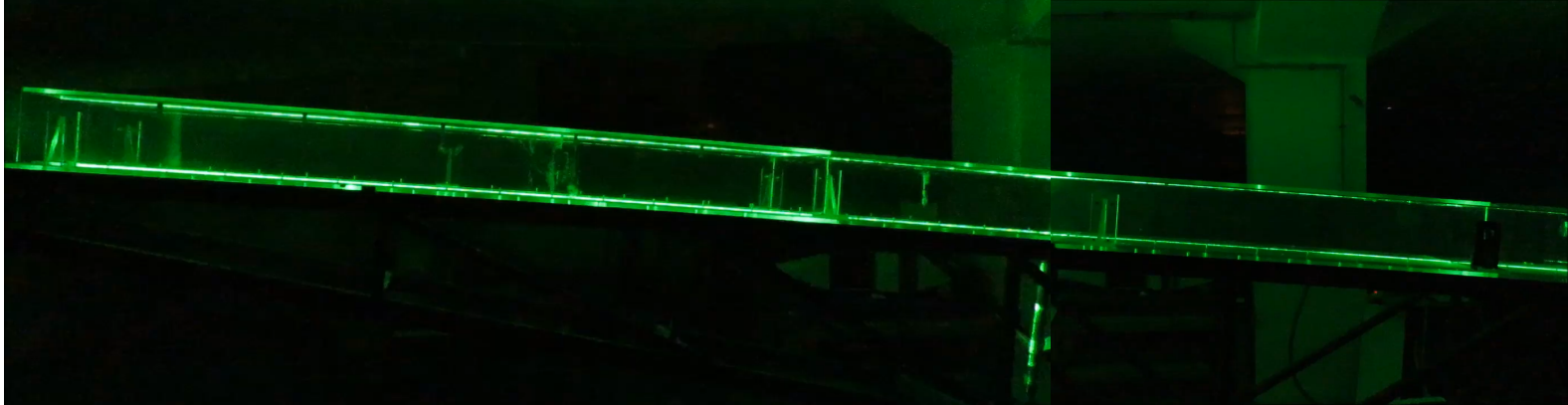
Masse volumique retenue : $\rho = 0.71 \pm 0.02 \text{ kg/m}^3$

Cas représentatif



- Ecoulements transitoires en tunnel incliné sans ventilation peu abordé
- Problématique : Comment l'inclinaison va influencer la propagation des fumées en amont et en aval ?

Objectifs



Aval de la source

Amont de la source

Objectifs :

- Caractériser la propagation des fronts montant et descendant
- Déterminer l'impact de l'inclinaison du tunnel et de la masse volumique de la source sur ces propagations

Dispositif expérimental

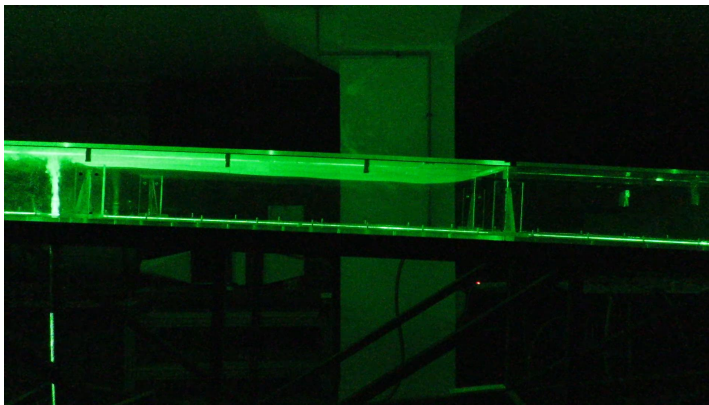


Tunnel en plexiglas

- $H = 0,25 \text{ m} ; W = 0,5 \text{ m} ; L = 8 \text{ m} ;$
- $0 \leq \theta \leq 17 \%$

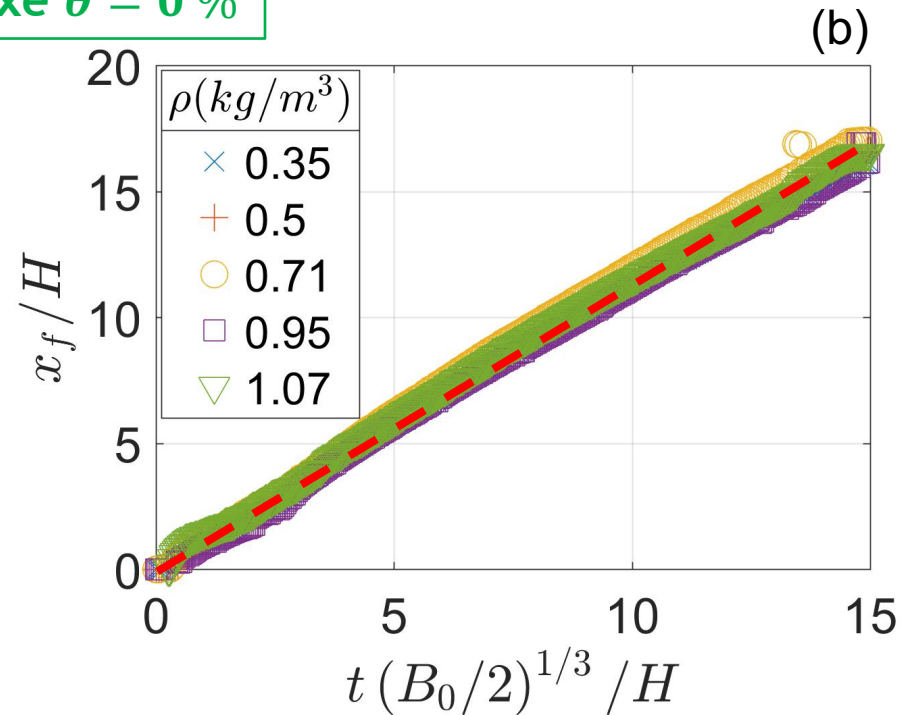
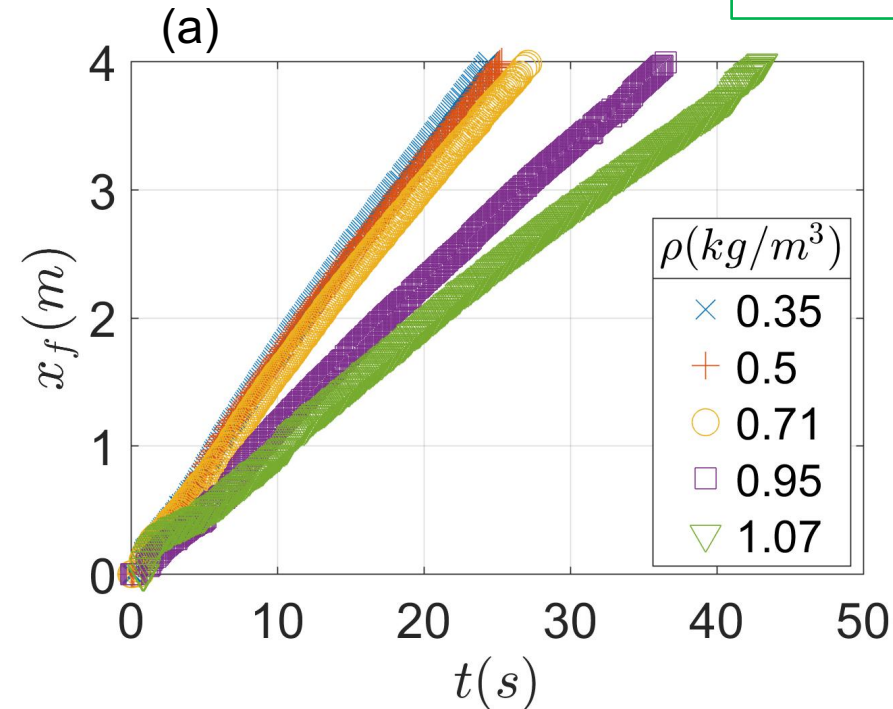
Source

- Centrée à 4 m de chaque extrémité
- Diamètre : 3 cm
- Injection à débit volumique fixé à 30 l/min
- Masse volumique de la source :
 $\rho \in [0,35 ; 1,07] \text{ kg/m}^3$



Effet de la masse volumique pour un tunnel horizontal

Pente fixe $\theta = 0\%$



(a) Position du front du courant de densité x_f en fonction du temps dans le cas d'une injection continue dans un tunnel horizontal et (b) position adimensionnée en fonction du temps adimensionné

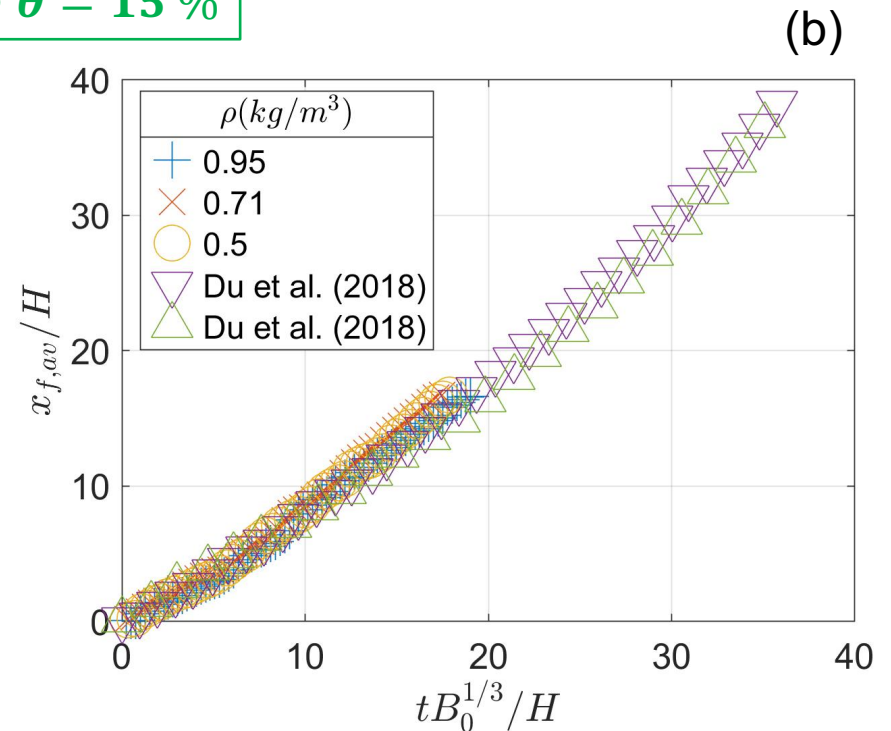
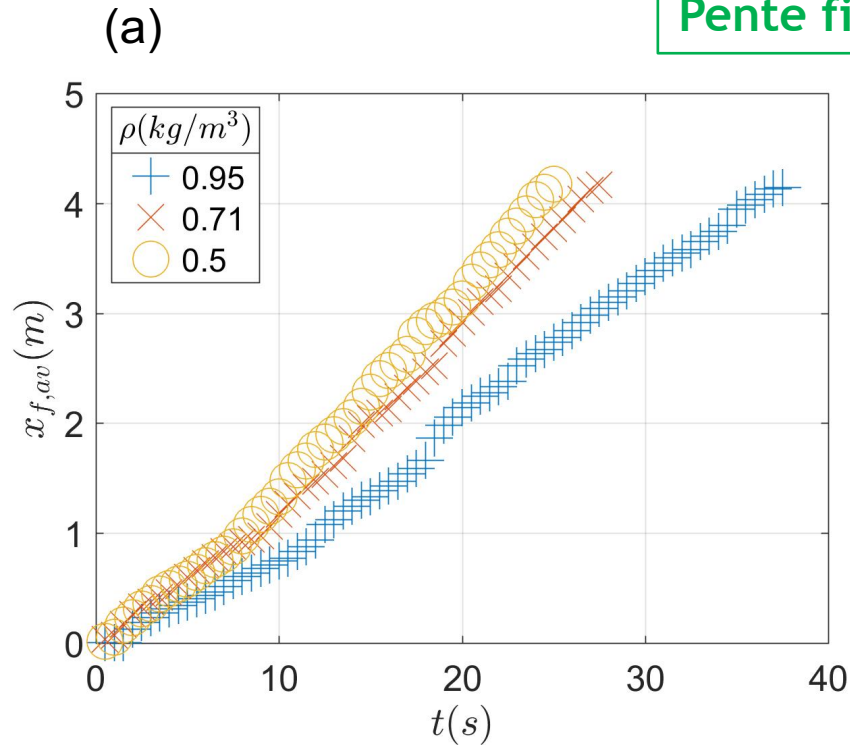
Expérimentalement :

$$\bar{u}_f = 1.05 \left(\frac{B_0}{2} \right)^{1/3}$$

Comparable avec Sher & Woods (2017)

Effet de la masse volumique en aval

Pente fixe $\theta = 15\%$



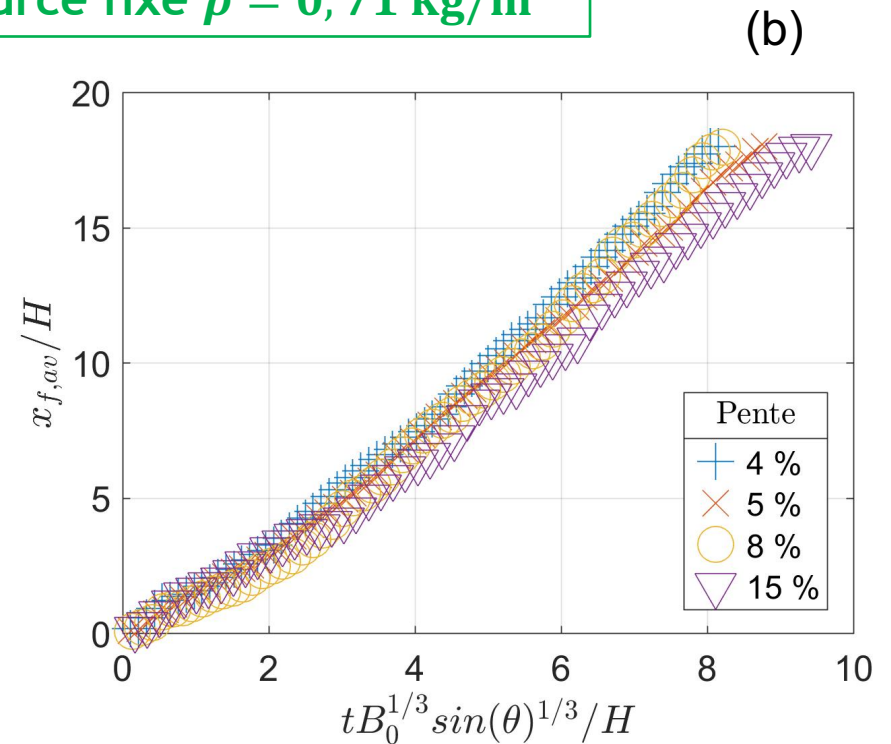
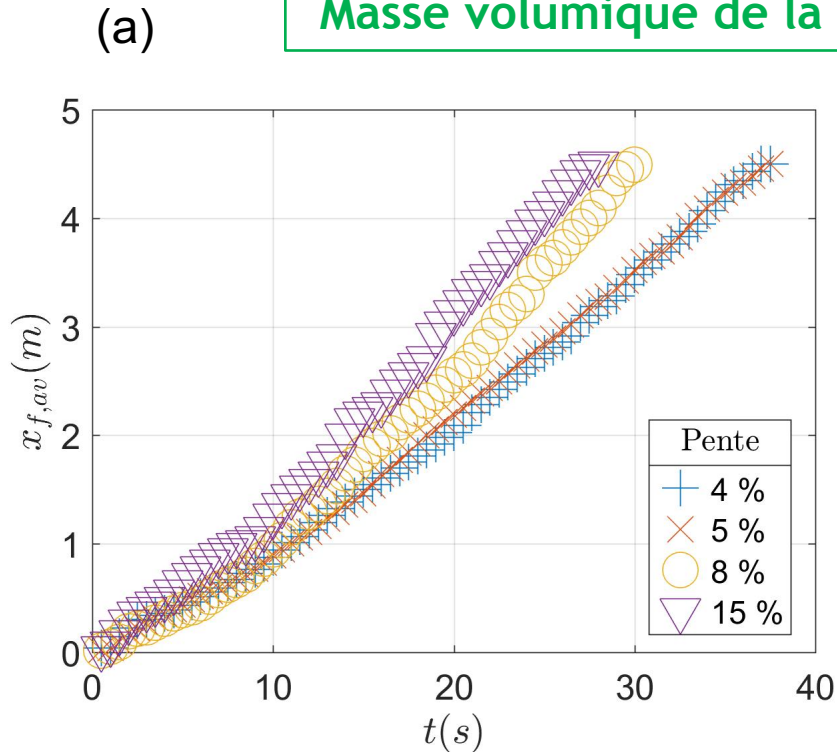
(a) Position du front de la nappe en aval de la source en fonction du temps et (b) position adimensionnée en fonction du temps adimensionné

L'adimensionnement proposé :

$$\tilde{x}_f = \frac{x_{f,av}}{H} \quad \text{et} \quad \tilde{t} = \frac{tB_0^{1/3}}{H}$$

Effet de la pente en aval

Masse volumique de la source fixe $\rho = 0,71 \text{ kg/m}^3$



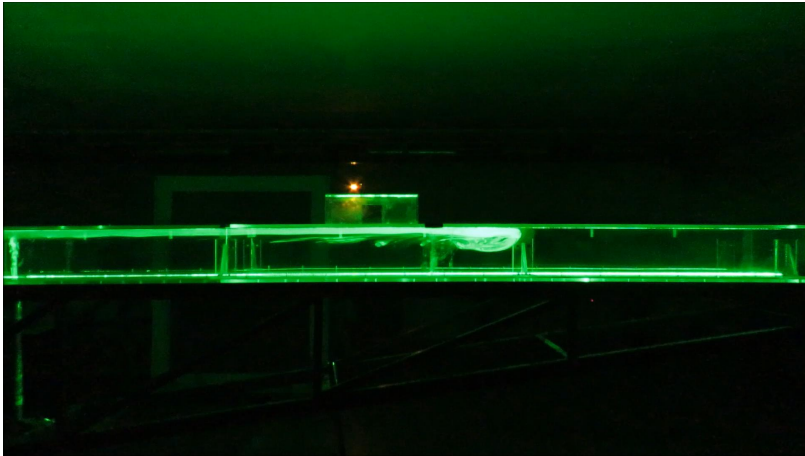
(a) Position du front de la nappe montante en aval de la source en fonction du temps et (b) position adimensionnée en fonction du temps adimensionné

Nouvel adimensionnement proposé :

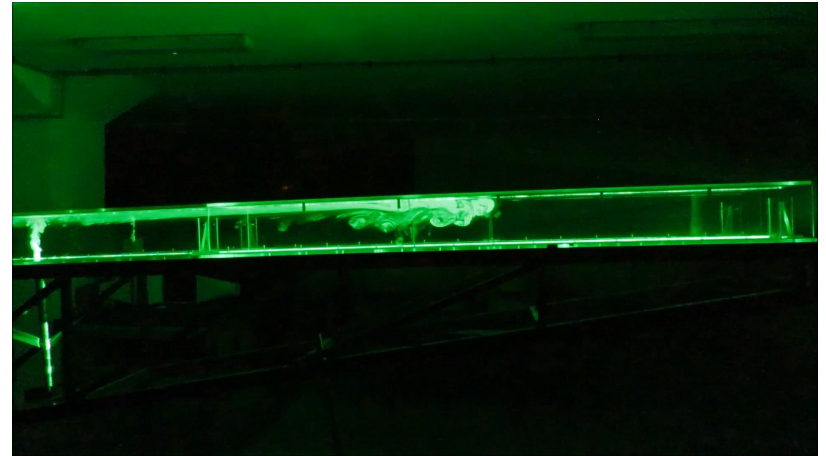
$$\tilde{x}_f = \frac{x_{f,av}}{H} \quad \text{et} \quad \tilde{t} = \frac{t(B_0 \sin(\theta))^{1/3}}{H}$$

Déstratification de la nappe en aval

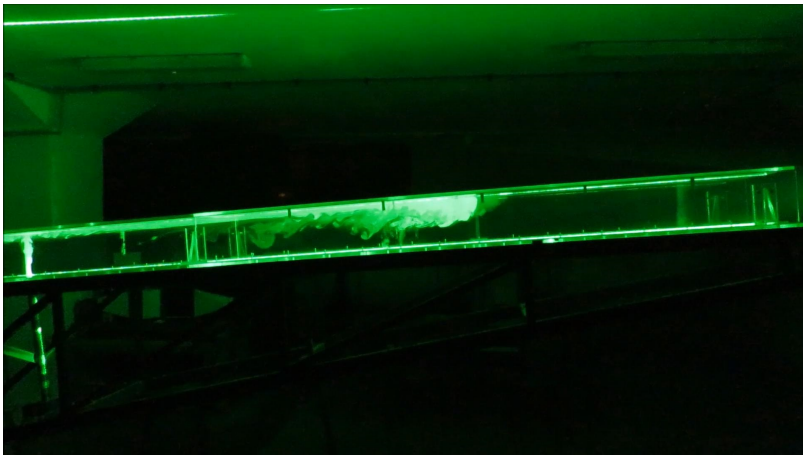
$\theta = 0 \%$



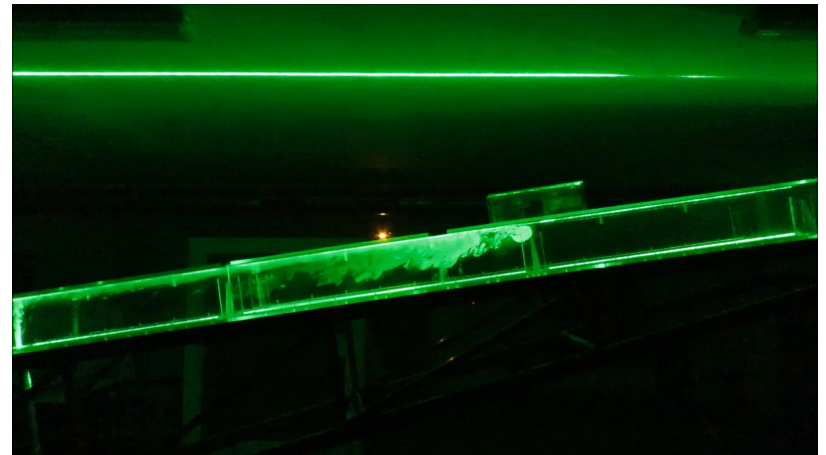
$\theta = 4 \%$



$\theta = 8 \%$

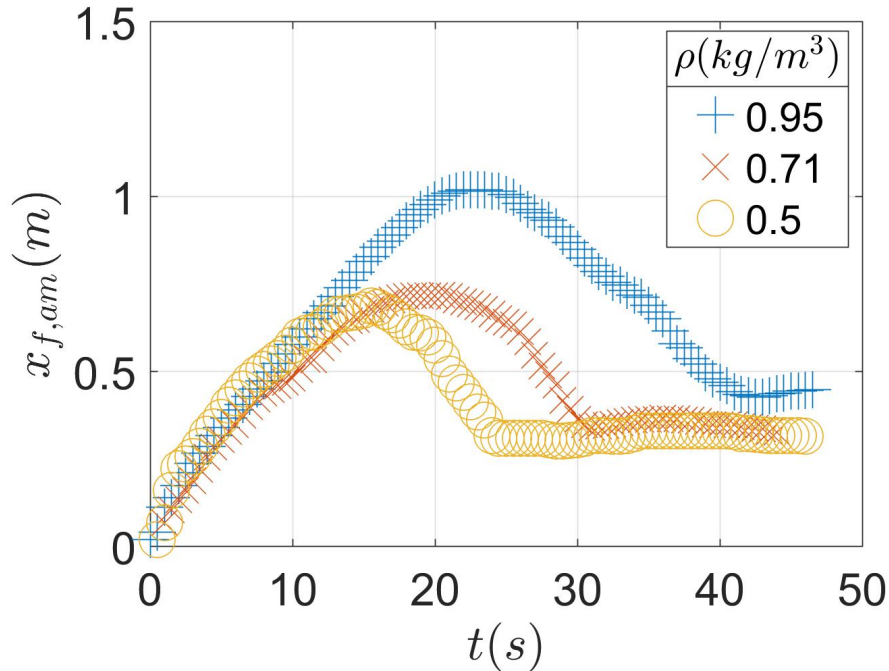


$\theta = 15 \%$



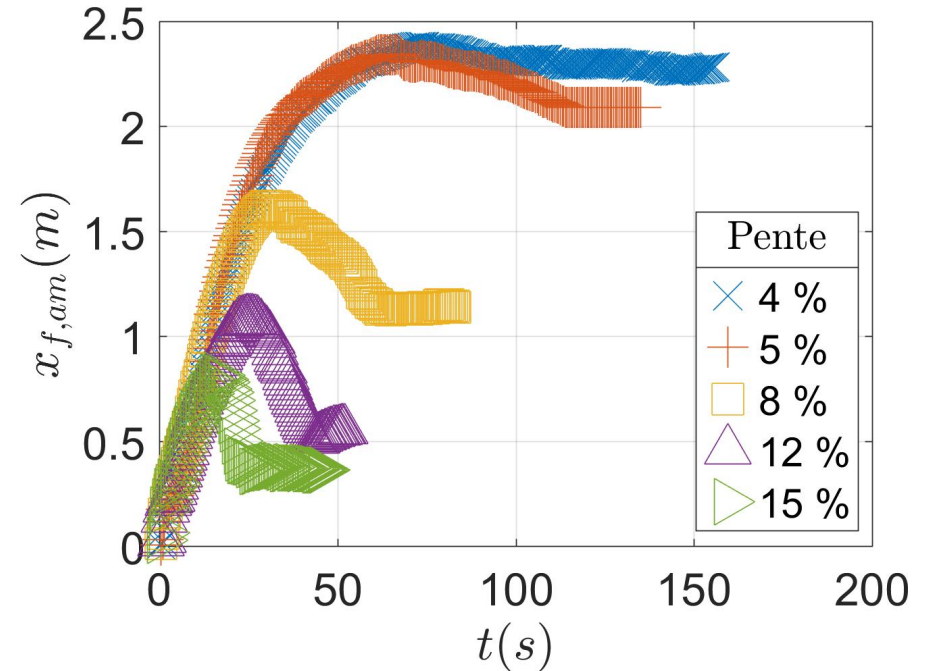
Effet de la pente en amont

Pente fixe $\theta = 15\%$



Position du front de la nappe de retour en amont de la source en fonction du temps à pente fixe

Masse volumique de la source fixe
 $\rho = 0,71 \text{ kg/m}^3$



Position du front de la nappe de retour en amont de la source en fonction du temps à masse volumique de la source fixe

La pente a un effet prédominant sur la longueur de nappe en amont