

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique



**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE MECANIQUE
OPTION ENERGETIQUE**

Thème

**ETUDE DES EFFETS DE L'ENTRAINEMENT ET DU
FROTTEMENT SUR LE COMPORTEMENT D'UN
COURANT DE DENSITE**

Encadré par
Dr. Bouzid Benkoussas, MC(A), ENP
Dr. Rabah Mehaddi, ATER, AMU
Prof. Olivier Vauquelin, AMU

Présenté par
Ouardia Ait Oucheggou

Promotion 2015

ملخص

الهدف وراء أطروحة هذا الماجستير هو دراسة تأثير الاحتكاك على سلوك تيار الكثافة في حالة "بوسنسك" في وسط متجانس. وتهدف هذه الدراسة إلى تبرير افتراض إهمال آثار هذا الأخير في التجارب أو المحاكاة العددية.

للتحقق من صحة النتائج، قمنا بإجراء عمليات المحاكاة العددية مع برنامج " FDS ". وقد مكنتنا المقارنة بين النتائج النظرية (التحليلية) مع تلك المحاكاة من التحقق من صحة و كفاءة البرنامج لهذا النوع من الدراسات.

كلمات البحث: تيار كثافة، محاكاة رقمية، إحتكاك..

Résumé

L'objectif de ce mémoire de Master est d'étudier l'influence de l'entraînement et des frottements sur le comportement d'un courant de densité dans le cas Boussinesq en milieu homogène. Cette étude a pour but de justifier l'hypothèse de négliger les effets de l'entraînement et des frottements dans des expériences ou des simulations.

Afin de valider les résultats obtenus, des simulations numériques ont été menées avec le code FDS. La confrontation des résultats théoriques (analytiques) à ceux des simulations a permis de valider l'approche de résolution numérique

Mots clefs : Courant de densité – Entraînement -Frottements– Simulation numérique.

Abstract

The objective of this master thesis is to study the influence of entrainment and friction in the behavior of a density current in the Boussinesq case in a homogeneous environment. This study aims to justify the assumption of neglecting the effects of entrainment and friction in experiments or simulations.

To validate the results, numerical simulations were carried out with the FDS code. The comparison of theoretical results (analytical) with those of simulations was used to validate the numerical solving approach

Keywords: density current - Entrainment -Friction- Numerical Simulation.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À ceux qui ont toujours cru en moi et en mes capacités, à ceux qui m'ont toujours soutenu et accompagné dans les plus rudes épreuves de ma vie ...

À mes très chers parents Hamid & Ghénima, que Dieu les protège, pour leur perpétuel soutien qui m'a appris la persévérance, leur confiance qui a toujours été ma source de responsabilité et pour leur amour qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

À mes adorables sœurs, Nouara, Aldjia, Lydia et Sofia,

À mon unique grand frère Idir,

À ma grand-mère, fière et tenace Mama Bouali,

À mes petits neveux Mohammed et Abdellah,

À ma grande famille, précisément mes oncles qui ont toujours été là pour moi.

À mes amies Saïda et Soraya et tous mes autres amis et camarades qui m'ont toujours encouragé pour aller au-devant.

À mon unique source d'inspiration ;)

Si je suis là aujourd'hui vous réservant cette page, dans ce travail, C'est grâce à Dieu et à vous tous...

Un grand merci.

Je vous aime.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à remercier le Dr B. BENKOUSSAS, mon promoteur côté ENP pour son aide précieuse, ses conseils et son encouragement, voir la confiance qu'il a mis en moi dès le début.

Je remercie la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et particulièrement Mr BOURNOT pour cette bourse de mobilité qui m'a permis de m'ouvrir à plein de nouvelles choses, tant sur le volet personnel que professionnel.

Je remercie également le Pr O. VAUQUELIN et le Dr R. MEHADDI du laboratoire USTI de l'Université d'Aix-Marseille pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour m'avoir aidé à mieux mener et intégrer mon sujet en m'orientant avec leurs conseils et directives qui m'ont beaucoup aider dans mes réflexions.

Je tiens à exprimer ma gratitude pour les membres du jury, le président Mr S. LARBI, l'examineur Mr. BOUSBAI d'avoir pris la peine de bien lire mon document. Mes remerciements sont également à tous les enseignants du département génie mécanique pour la qualité de la formation qu'ils m'ont imprégné.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous mes autres camarades boursiers Med-Accueil dont tunisiens et marocains pour leur bonne humeur à toute épreuve.

Table des matières

Résumé	i
Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction	1

Chapitre 1 : Etudes théorique et analytique

1.1. Effets de l'entraînement	
1.1.1. Courant de densité sans entraînement	..... 3
1.1.1. Courant de densité avec entraînement	..... 4
1.2. Impact des frottements au niveau des parois sur les écoulements gravitaires	..... 7

Chapitre 2 : Etude numérique

2.1. Définition du logiciel FDS	..... 13
2.2. Analyse de l'influence du maillage sur les résultats des simulations FDS	..... 14
2.3. Moyens d'exploitation des résultats (Techplot, Matlab)	..... 15

Chapitre 3 : Résultats & interprétations

3.1. Résultats relatifs au cas d'entraînement	..... 17
3.2. Résultats relatifs au cas des frottements	..... 19

Conclusion & perspectives 22
--------------------------------------	----------

Bibliographie 23
----------------------	----------

Annexe

Exemple de fichier imput FDS utilisé dans les simulations

Liste des figures

Fig. 1 :	Tracé de la position du front à intervalles de temps réguliers ($Re = 8950$) de Cantero [5].	.....	2
Fig. 2 :	Box model cas sans entrainement (Model I)	.....	3
Fig. 3 :	Simulation FDS, phase de subsidence « Slumping phase », en Boussinesq.	.....	6
Fig. 4:	Illustration faisant apparaître l'importance de la hauteur du front du courant par rapport à sa queue, extraite d'une simulation FDS en Boussinesq à $t = 0.5$ s.	.....	7
Fig. 5:	Analyse de Benjamin 1968	.....	8
Fig. 6:	Iso-surface de masse volumique $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$ visualisée par Smokview à $t = 10$ s.	.....	14
Fig. 7:	Modèle géométrique adapté pour les simulations FDS (Unité « m »).	.....	17
Fig. 8:	Illustration de l'indépendance entre « g' » et le paramètre d'entrainement « E » [1].	.....	18
Fig. 9:			
Fig. 10:	Comparaison entre les deux cas : avec ou sans entrainement	.....	19
Fig. 11:	Propagation du front du courant de densité en fonction du temps, dans les deux cas : avec ou sans glissement	.....	20

Liste des tableaux

Tableau 2.1:	Récapitulatif des vitesses et pressions dans l'analyse de Benjamin (Avec glissement)	.....	22
Tableau 2.2:	Récapitulatif des vitesses et pressions (Cas sans glissement)	.....	38
Tableau 2.3:	Vitesse du front sans ou avec glissement	.....	38
Tableau 4.1:	Nombre et dimension des mailles correspondant à chaque G_i	.....	43
Tableau 4.3:	Nombre de Reynolds calculés pour différentes valeurs de la densité du courant gravitaire ρ_c , celle du milieu ambiant étant fixe à $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$	.....	51

Nomenclature

Lettres latines

E	Paramètre d'entraînement	(-)
Fr	Nombre de Froude.	(-)
g	Accélération.	(m/s ²)
g'	Accélération réduite.	(m/s ²)
h _N	Hauteur du courant au niveau de la tête.	(m)
Re	Nombre de Reynolds.	(-)
S	Facteur de forme	(-)
u _N	Vitesse de déplacement de la tête du courant de gravité.	(m/s)
u _a	Vitesse du fluide ambiant.	(m/s)
V	Volume du fluide contenu dans le milieu.	(m ³)
x	Coordonnée horizontale.	(m)
z	Coordonnée verticale.	(m)

Lettres grecques

ρ	Masse volumique.	(kg/m ³)
μ	Viscosité dynamique du fluide en déplacement.	(kg/m.s)
ϑ	Viscosité cinématique du fluide en déplacement	(m ² /s)
$\Delta\rho$	Ecart des densités	(kg/m ³)

Acronymes

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulators
NIST	National Institut of Standardisation and Technology
RANS	Reynolds-Averaged form of the Navier-Stokes equations
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation

Indices

I	Phase inertielle
V	Phase visqueuse
S	Phase d'effondrement (Slumping phase)
C	Courant de gravité
A	Milieu ambiant

Introduction

Introduction

Le travail effectué dans cette partie est appuyé essentiellement sur les investigations de Mark et al. [1]. Le courant de densité est assimilé à une boîte. Le but est de faire la distinction entre courant avec ou sans entrainement et de définir des approches permettant de quantifier au mieux l'évolution du volume au niveau du front du courant de densité.

Mais avant cela une description du moins qualitative de la forme caractéristique de la tête du courant est abordée. Cette forme est d'abord influencée par la nature de la surface sur laquelle elle se propage, solide ou libre, autrement dit conditions d'adhérence ou de glissement. Si la surface n'impose pas de cisaillement au courant, le front se situe sur celle-ci. S'il s'agit d'une surface solide, le point le plus avancé du courant s'élève au-dessus de la surface à une hauteur de l'ordre de 10% de la hauteur qu'atteint la tête lorsque $Re \rightarrow \infty$ [2]. Du fluide peu dense se retrouve alors piégé en situation instable sous le courant. Une partie de ce fluide se situant juste sous le front s'élève sous l'effet de la flottabilité, ce qui donne naissance à des petites structures tridimensionnelles qui sont ensuite amplifiées pour aboutir aux structures caractéristiques en lobes et fentes observables sur le front [3]. Ce mécanisme est très bien confirmé par la disparition de ces structures sur les courants se propageant le long d'une surface de glissement [4]. Une fois créées, les fentes ne disparaissent pas spontanément mais peuvent fusionner avec d'autres fentes voisines puisque les lobes qui les séparent sont continuellement en train de grossir ou de rétrécir et de fusionner. Ceci tend à réduire le nombre total des fentes.

D'un autre côté, il existe une taille maximale pour les lobes (proche de deux fois leur taille moyenne) mais globalement, le nombre de fentes reste à peu près constant, comme le montre la figure (Fig. 1) extraite de Cantero [5].

La forme de la tête d'un courant de gravité peut aussi être modifiée par l'écoulement dans le fluide ambiant. Si le courant se propage dans un fluide ambiant animé d'une vitesse moyenne qui lui fait face, le nez est plus bas et la tête plus allongée horizontalement. A l'inverse, s'il se propage à co-courant d'un écoulement de fluide ambiant, le nez est plus haut et la tête plus courte. Sur ce, on ferme la parenthèse, puisque dans notre cas, ce problème ne sera pas rencontré vu que le fluide ambiant est relativement au repos.

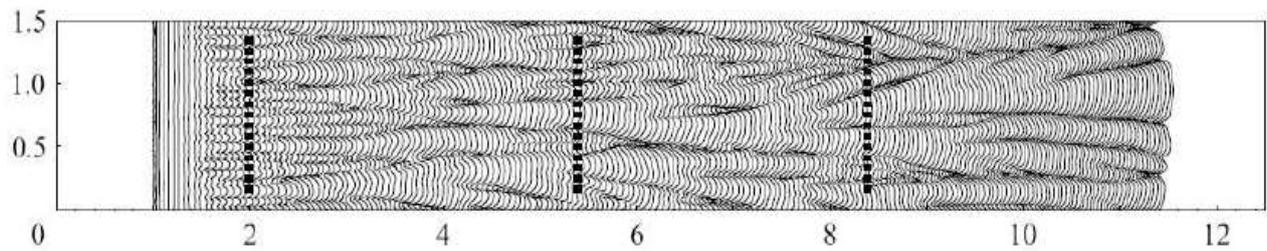


Fig. 1: Tracé de la position du front à intervalles de temps réguliers ($Re = 8950$) de Cantero, [5].

Enfin, la pente de la surface sur laquelle le courant se propage a également une grande importance à la fois sur la forme de la tête et sur sa vitesse.

On présente dans ce qui suit, le modèle géométrique adopté dans cette étude, ainsi que les différentes conditions et hypothèses prises en compte, dans les deux cas : sans entrainement et avec entrainement.

Dans la deuxième partie de ce travail, on étudie les frottements et leurs impacts sur le comportement des courants de densité, essentiellement la vitesse de propagation du front du courant de densité.

Chapitre 1 : Etude théorique

Chapitre 1: Etude théorique

1.1. Effet de l'entraînement :

1.1.1. Courant de densité sans entraînement :

Le système est considéré en Boussinesq et le fluide est assimilé à un fluide parfait.

C'est le box model ou modèle de boîte, dans une première approche, on considère que le volume du courant de densité reste constant (Voir fig. 2, le volume $A_0 = A_1 = A_n$), autrement dit, on n'a pas d'entraînement à ce niveau.

La contribution du fluide ambiant au cours de la propagation du courant est donc négligeable et on tient à étudier l'évolution de l'avancée du front $x_f(t)$ et de la hauteur de la tête à ce niveau $h_f(t)$ en fonction du temps, ce qui requiert au minimum deux équations.

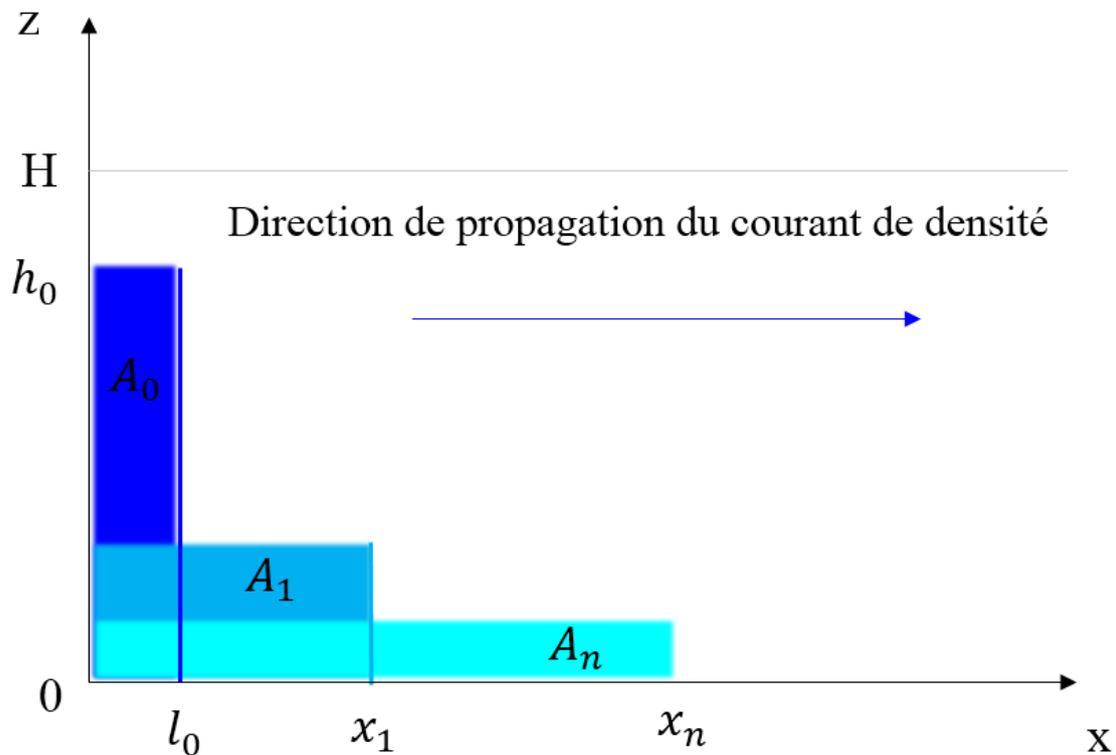


Fig. 2 : Box model cas sans entraînement (Model I)

D'après l'hypothèse, à chaque moment on a:

$$h \cdot x = A \quad (1)$$

Sachant que selon l'analyse de Benjamin [6], on l'expression de la vitesse donnée par :

$$\frac{dx}{dt} = Fr \sqrt{g'h} \quad (2)$$

En remplaçant « h » dans l'équation (2) par « $\frac{A}{x}$ » de l'équation (1), et en intégrant par rapport au temps, on obtient :

$$X_f(t) = \left(\frac{3}{2} Fr\right)^{\frac{2}{3}} (g'A)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

Par conséquent :

$$h_f(t) = \frac{A}{X_f(t)}$$
$$h_f(t) = \left(\frac{2A}{3Fr}\right)^{\frac{2}{3}} g^{-\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

1.1.2. Courant de densité avec entrainement :

Dans ce cas, le volume du courant de densité n'est plus constant au cours de sa propagation, ce qui est plus crédible en comparaison avec cette première situation.

On donc dans ce cas :

$$A = A_0 + A_a \quad (5)$$

A_0 étant le volume initiale et A_a , le volume du fluide ambiant entrainé. On s'intéresse à la détermination de l'évolution de ce volume, afin de parvenir à des expressions donnant la distance parcourue par le front du courant en fonction du temps $x_f(t)$ et la hauteur de sa tête également en fonction du temps $h_f(t)$.

Compte tenu de la reconstitution permanente du fluide à la tête par l'entrée du fluide constant non dilué à partir de la queue, il est difficile de quantifier ce volume « A », c'est pourquoi on passe d'abord par la définition d'un autre paramètre « E », paramètre

d'entraînement définie comme étant le rapport des volumes « air ambiant / fluide du courant » au niveau du front donné dans un premier lieu par l'expression :

$$E = \frac{A_a}{A_0} \quad (6)$$

Ce qui permet d'écrire:

$$A = A_0 + A_a \Leftrightarrow A = A_0(1+E) \quad (7)$$

Il est clair que d'après cette dernière expression (7), que l'étude du comportement du volume « A » revient à évaluer le comportement de « E ». Néanmoins, même la détermination de ce dernier est difficile, ainsi, la définition de la phase d'effondrement ou phase de subsidence et de certains paramètres qui ont une relation avec cette période est indispensable à ce niveau.

Dans la phase de subsidence, le courant se propage avec une vitesse relativement constante le long d'une distance « x_s » formulée empiriquement par Simpson (1983) [7] et donnée par :

$$x_s = x_0 \left(3 + 7,4 \frac{h_0}{H} \right) \quad (8)$$

x_0 et h_0 étant respectivement, la longueur et la hauteur initiales du courant de densité (Voir $t = 0s$ dans la fig. 3). Cette distance est atteinte au bout d'un temps t_s .

On cherche donc à déterminer le volume « A_s » à la fin de cette phase pour exprimer par la suite « E » en fonction de ce volume.

Avant de parler des modèles donnant une estimation sur ce volume, on se doit d'abord de définir une équation qui traduit la variation de la surface au niveau de la tête :

$$dA = (\alpha - k) S \sqrt{A} dy \quad (9)$$

Cette variation est exprimée en fonction de l'entraînement dans la tête, représenté par la constante d'entraînement « α » et les pertes depuis la queue traduites par la constante « k » qui représente le rapport: hauteur de la queue / hauteur de la tête. La hauteur de la queue étant donnée par l'expression $h = S \sqrt{A}$.

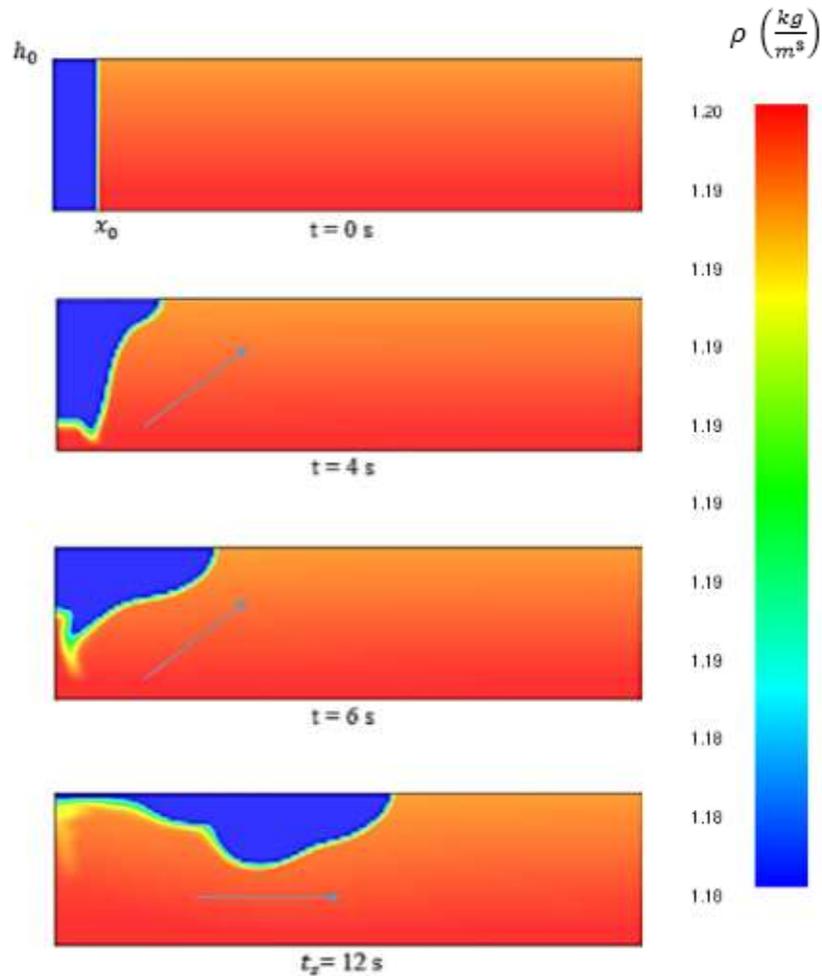


Fig. 3: Simulation FDS, phase de subsidence « Slumping phase », en Boussinesq.

Le facteur de forme S dépend de l'entraînement et change selon le model dans lequel on se situe. Ce facteur est considéré comme constant après la phase de subsidence.

Comme la détermination de A_s ne peut être très précise compte tenu des raisons citées auparavant, on se retourne vers deux modèles pour l'estimation de sa valeur.

Modèle I :

Dans ce modèle, on néglige la quantité du fluide laissée dans la queue devant celle présente au front (fig. 4).

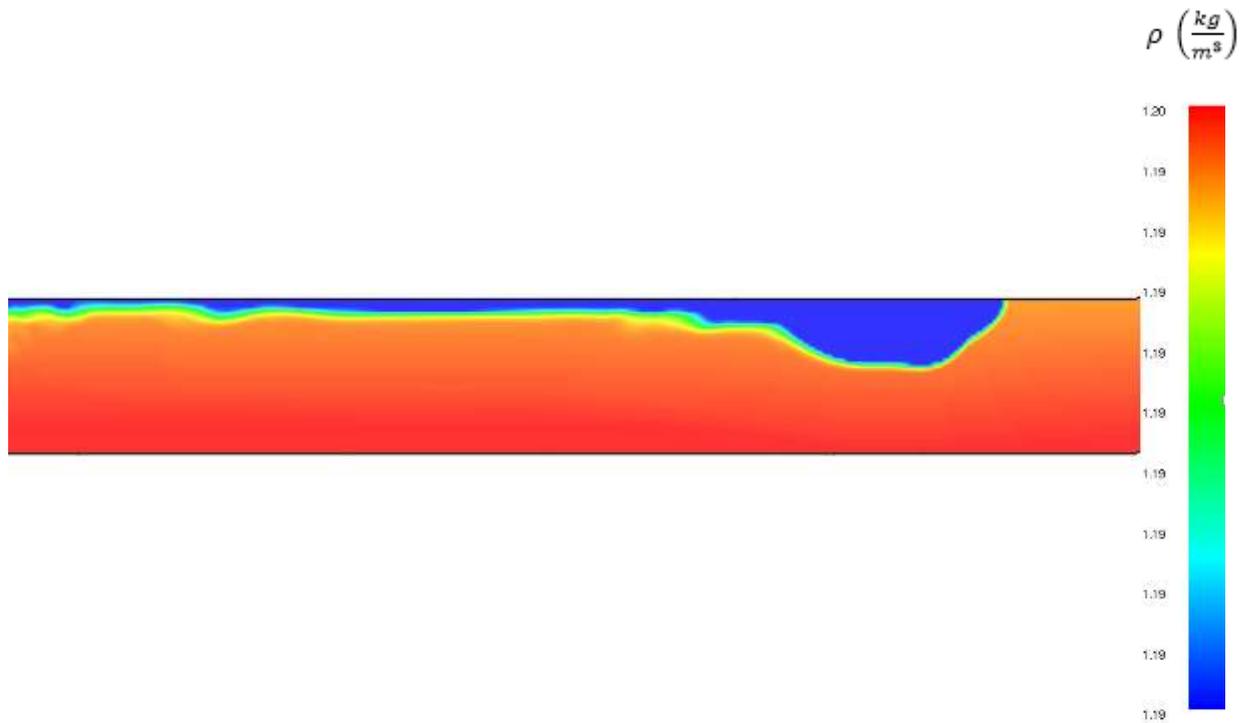


Fig. 4: Illustration faisant apparaître l'importance de la hauteur du front du courant par rapport à sa queue, extraite d'une simulation FDS en Boussinesq à $t = 0.5$ s

On peut alors dans ce cas écrire :

$$A_0 = A_s \quad (10)$$

Mais elle reste caricaturale comme hypothèse. Du coup on fait appelle à ce deuxième modèle, qui semble à priori être plus rationnel.

Modèle II :

Contrairement au premier, ce modèle prend en compte le volume du liquide laissé à la traîne et considère la queue comme étant un rectangle de côtés $(x_s ; kS\sqrt{A_s})$.

Du coup, le volume A_s peut être exprimé comme suit:

$$A_s = A_0 - x_s k S \sqrt{A_s} \quad (11)$$

En substituant l'équation (11) dans l'expression (6) et après calculs (Voir l'article de Mark et al [8]), on Obtient :

$$E = \left(\mathbf{1} + \frac{\frac{1}{2} S(\alpha-k)y}{\sqrt{A_S^{1/2}}} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha-k}} - 1 \quad (12)$$

1.2. Impact des frottements au niveau des parois sur les écoulements gravitaires :

Dans cette partie, on s'appuie sur des travaux déjà effectués par Thomas Bonometti (2008) [9] qui a fait des expériences en plus d'une étude analytique sur les effets du frottement sur les parois dans les systèmes d'écoulements de type non-Boussinesq. Ces frottements peuvent modifier largement le comportement du courant, essentiellement la forme et la vitesse de la tête du front. Après une première formulation fondée sur les équations de Navier & Stockes (Voir A1). On étudie les systèmes dont on a des grands nombres de Reynolds ($Re = O(10^2) \sim O(10^5)$). On suit l'évolution de la forme et de la vitesse du front du courant gravitaire dans les deux cas suivants ; avec glissement, sans tenir compte des frottements au niveau des parois. Un cas qui est déjà bien décrit par l'analyse de Benjamin [6] et qui ne sera pas affecter par l'effet non-Boussinesq puisque les équations retrouvées dans cette analyse sont issues de l'équation de continuité qu'est indépendante de la différence de densité entre les deux fluides.

Un autre cas est celui où les frottements au niveau des parois sont pris en compte (sans glissement). Dans ce cas, on doit prendre en considération les contraintes de cisaillement. Dans le modèle physique (Fig. 5), le volume est considéré constant, le milieu est homogène. Les nombres de Reynolds de l'ordre de 10^4 permettant d'assurer au départ que les effets inertiels sont dominants, sont considérés.

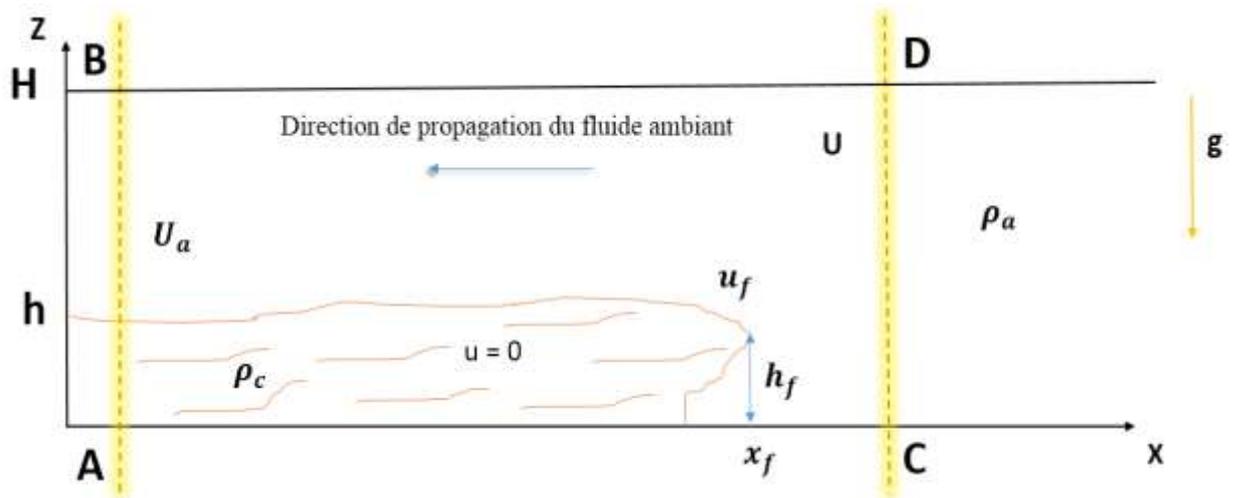


Fig.5: Analyse de Benjamin 1968

Avant de considérer l'hypothèse d'un régime établi ($u = 0$), on définit la distance parcourue par le front du courant de densité « x_f » et sa vitesse de propagation et sa hauteur « u_f » et « h_f » respectivement.

Dans la figure (5), on représente un volume de contrôle ABCD dans lequel le mouvement est considéré à partir d'un cadre de référence se déplaçant avec le fluide lourd, qui semble être au repos (d'où l'hypothèse du régime établi) tandis que le fluide léger semble circuler de façon régulière sur l'interface, s'approchant de loin avec une vitesse de propagation « U » en amont (CD) du front du courant de densité et une vitesse « U_a » en aval (AB).

La continuité du débit entre les deux extrémités gauche (AB) et droite (CD) du volume de contrôle ABCD s'étalant toutes les deux sur la hauteur H (Fig. 5), permet d'écrire :

$$UH = (H - h) U_a \quad (13)$$

Remarque : la troisième direction est simplifiée de part et d'autre de l'équation (13) vu que c 'est la même.

La vitesse U_a s'exprime alors :

$$U_a = \frac{UH}{(H-h)} \quad (14)$$

En divisant le second membre de cette équation par H, on obtient :

$$U_a = \frac{U}{(1-a)} \quad (15)$$

Avec : $a = \frac{h}{H}$ le paramètre géométrique défini auparavant.

L'équilibre dynamique suivant la direction x se traduit par une compensation entre les forces de l'écoulement sur les deux extrémités verticales du volume de contrôle (AB) et (CD).

L'expression de l'équilibre dynamique suivant x d'un courant non-visqueux ou inertiel, issue des équations de Navier & Stokes (Voir Annexe –A-) est donnée par :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (16)$$

En régime établie, on écarte toute variation par rapport au temps ainsi $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$. De plus les variations de vitesse selon la verticale « w » sont négligeables devant celles suivant l'horizontale, ce qui permet de simplifier le troisième terme à gauche de l'équation (16) et ce qui donne au final :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + P) = 0$$

C'est à dire : $\rho u^2 + P = \text{constante}$.

Ce qui permet d'écrire entre les deux extrémités verticales du volume de contrôle ABCD :

$$\int_A^B (\rho u^2 + P) dz = \int_C^D (\rho u^2 + P) dz \quad (17)$$

En ajoutant les termes des contraintes de cisaillement faisant référence aux frottements pris en compte dans l'équation (17), on obtient :

$$\int_C^D (\rho u^2 + P) dz = \int_A^B (\rho u^2 + P) dz + \int_B^D \tau_{xz} dx - \int_A^C \tau_{xz} dx + \int_C^D \tau_{xx} dz - \int_A^B \tau_{xx} dz \quad (18)$$

Comme les contraintes de cisaillement verticales sont négligeables par rapport à celles horizontales, l'équation (18) devient :

$$\int_C^D (\rho u^2 + P) dz = \int_A^B (\rho u^2 + P) dz + \int_B^D \tau_{xz} dx - \int_A^C \tau_{xz} dx \quad (19)$$

De plus, on considère que les contraintes de cisaillement dans le côté de la propagation du courant (où les deux fluides se rencontrent) sont plus importantes devant celles d'en face, ce qui réduit encore l'équation précédente en :

$$\int_C^D (\rho u^2 + P) dz = \int_A^B (\rho u^2 + P) dz + \int_B^D \tau_{xz} dx \quad (20)$$

Avec : τ_{xy} la contrainte de cisaillement donnée par la loi semi-empirique de Chézy-type :

$$\tau_{xy} = \tau_b = -\frac{1}{2} k \max(\rho_a, \rho_c) U_f^2 \quad (21)$$

k: étant le coefficient de perte d'énergie.

En considérant que la pression est hydrostatique le long de AB, on obtient les résultats réunis dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1: Récapitulatif des vitesses et pressions (Cas sans glissement).

Côté AB		Côté CD	
$0 \leq z \leq h$	$h \leq z \leq H$	$0 \leq z \leq h$	$h \leq z \leq H$
Vitesse			
0	$U_a = \frac{UH}{(H-h)}$	U	
Pression			
$P_A - \rho_a g z$	$P_A - \rho_a g z - \rho_a g (z - h)$	$P_C - \rho_a g z$	

Après calcul, on obtient :

$$\frac{1}{2} g h (\rho_c - \rho_a) (h - 2H) = (P_C - P_A)H - \rho_a u_a^2 (H - h) + \rho_a u_c^2 H \quad (22)$$

L'application du théorème de Bernoulli le long de AC donne:

$$P_C - P_A = -\frac{1}{2} \rho_a u_f^2 \quad (23)$$

Ce qui donne au final, pour ce cas sans glissement :

$$u_f = \sqrt{\frac{g |\rho_c - \rho_a| h (2H - h)}{\rho_a H \left(\frac{H+h}{H-h} + \frac{k}{\rho_a} \max(\rho_a, \rho_c) \right)}} \quad (24)$$

Un récapitulatif donc de cette partie est présenté dans ce tableau dont on retrouve les expressions de vitesse du front dans les deux cas : avec et sans glissement :

Tableau 2: Vitesse du front sans ou avec glissement.

Vitesse du front (u_f)	
Avec glissement	Sans glissement
$\sqrt{\frac{g |\rho_c - \rho_a| h (2H - h)}{\rho_a H \left(\frac{H+h}{H-h} \right)}}$	$\sqrt{\frac{g |\rho_c - \rho_a| h (2H - h)}{\rho_a H \left(\frac{H+h}{H-h} + \frac{k}{\rho_a} \max(\rho_a, \rho_c) \right)}}$

On remarque qu'il y a que le terme positif, relatif aux contraintes de cisaillement qui est en plus dans le cas « sans glissement ». Il est donc trivial que dans ce cas, la vitesse soit moins importante.

Remarque : l'expérience justifie le fait de travailler en non-Boussinesq plutôt qu'en Boussinesq. En effet, les frottements aux parois sont plus visibles et mieux observés pour les larges différences de densité (Non-Boussinesq). Dans ce cas le passage au cas sans glissement, réduit la vitesse de propagation de plus de 30% contre 5% dans le cas Boussinesq.

Chapitre 2 : Etude numérique

Chapitre 2 : Etude numérique

2.1. Définition du logiciel FDS

Le code FDS est un programme écrit en langage Fortran [10]. Il effectue la lecture d'un fichier d'entrée que l'utilisateur rédige suivant une syntaxe bien déterminée.

Dans notre analyse analytique, on utilise ce logiciel basé sur la simulation des grandes échelles ou Large Eddy Simulation (LES) en anglais. Le but est de parvenir à suivre le comportement des écoulements des courants de densité. FDS travaille sur la résolution des équations de Navier & Stokes à faible nombre de Mach, c'est un logiciel gratuit développé par l'institut national des normes et de la technologie (NIST) des états unis, en collaboration avec VTT, le centre des recherches techniques de Finlande. La première version de FDS a été publiée en février 2000. C'est un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) qui consiste à étudier les mouvements des fluides par la résolution des équations les régissant (les équations de Navier & Stokes dans le cas présent).

FDS comme son nom l'indique (Fire Dynamics Simulators) a été conçu sur la base pour la résolution des problèmes pratiques des feux dans le cadre des études d'ingénieries de la sécurité incendie, et a grandi d'une curiosité de comprendre le « feu » ou du moins les phénomènes associés à ce derniers. Et c'est au cours du temps que cet outil s'est avéré un moyen efficace pour la modélisation des écoulements en dehors des feux et dans les études relatives à la combustion également. Ce code est donc le fruit d'un effort important puisqu'il permet l'accès à toutes les informations de manière instantanée (pression, densité, vitesse, température) pour chaque point du domaine de calcul et ce pour un coût global négligeable par rapport à celui des expériences correspondantes.

Smokview est un programme annexe qui permet la visualisation des données en sortie de FDS : des animations en 2D, la possibilité de faire des isobares, isothermes, ... en 3D (Figure (6)) Il dispose d'une interface de menus (FDS n'en possède aucune).

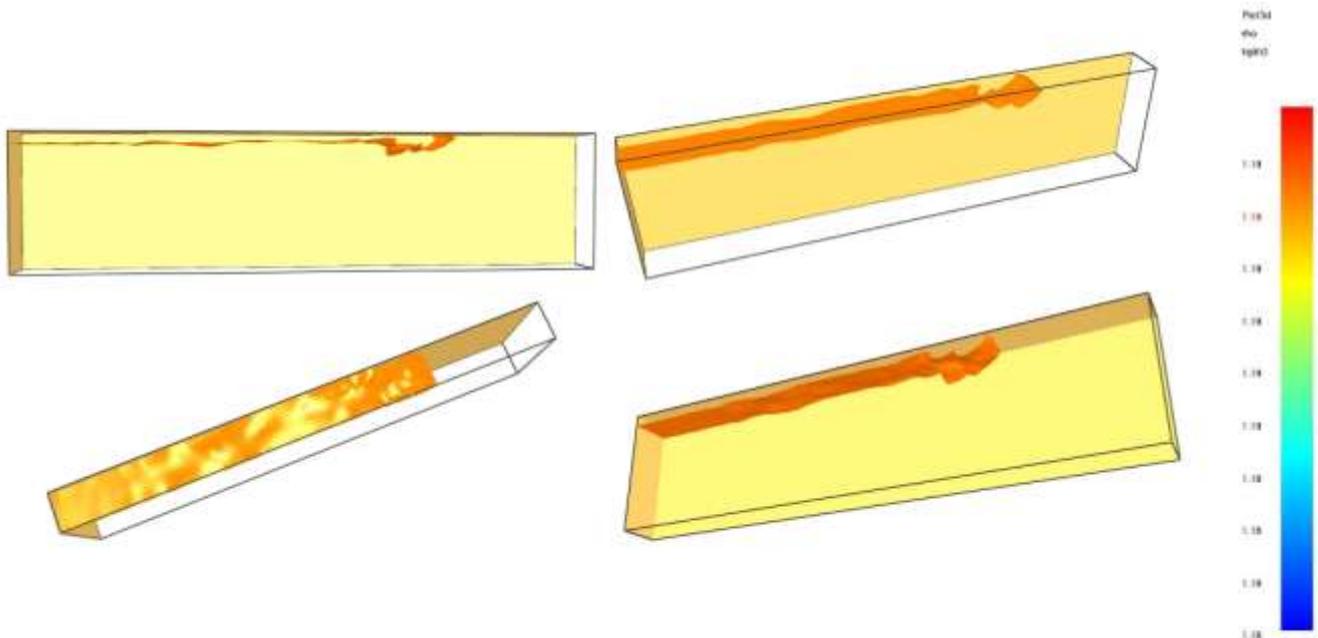


Fig.6: Iso-surface de masse volumique $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$ visualisée par Smokview à $t = 10 \text{ s}$.

On peut également obtenir des Iso-surfaces de vitesse, ce qui permet de savoir à quel endroit, la vitesse est maximale ou minimale et sa distribution à un instant donné.

2.2. Analyse de l'influence du maillage sur les résultats des simulations FDS

Dans ce rapport, plusieurs simulations sont effectuées dans le but de vérifier et valider l'utilisation du code FDS en confrontant les résultats des simulations à ceux élaborés théoriquement ou expérimentalement. Il est évident que plusieurs paramètres peuvent altérer ces résultats ou les rendre moins crédibles dont le type de maillage adopté.

Comme mentionnée précédemment, dans FDS, le modèle de sous-maillage est celui de Smagorinski [11]. La définition d'un bon maillage, nécessite de répondre à plusieurs interrogations. Il est toujours conseillé d'adapter un maillage cubique dans la mesure du possible bien que la longueur des mailles peut valoir jusqu'à deux ou trois fois leur largeur. L'objectif est de trouver un compromis entre le nombre de mailles à considérer et le temps de

calcul que cela peut prendre de sorte à ce que le nombre de mailles donne des résultats auxquels on peut faire confiance mais sans pour autant rendre le temps de calcul prohibitif.

Les discrétisations spatiales des domaines de calcul dans cette étude sont présentées dans le chapitre qui suit. Notamment, dans le cadre de ce travail, tous les maillages adoptés sont raffinés dans la direction « x », permettant d'un côté d'avoir plus de précision sur les résultats obtenus dans cette direction auquel on s'intéresse le plus, et de minimiser le temps de calcul d'un autre côté.

2.3. Moyens d'exploitation des résultats (Tecplot, Matlab) :

Dans le but de présenter les résultats des simulations FDS de façon à ce que leur interprétation soit facile et abordable, on utilise les deux logiciels Tecplot et Matlab, sur lesquels des petits éclaircissements seront présentés dans ce paragraphe.

Tecplot :

Un outil de visualisation graphique bien adapté à la simulation numérique de mécanique des fluides (CFD). Ses fonctionnalités sont relativement étendues et son utilisation est particulièrement simple. Il peut globalement réaliser des visualisations 1D, 2D et 3D à partir de champs issus de maillages structurés ou non.

Matlab :

Un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, Matlab permet de manipuler des matrices, afficher des courbes et des données, mettre en œuvre des algorithmes, créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de Matlab sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. En plus, des séquences de commandes peuvent être sauvegardés dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur Matlab, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction. Certaines commandes sont bien détaillées dans l'annexe C.

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Chapitre 3 : Résultats & interprétations

3.1. Résultats relatifs au cas d'entraînement :

Dans cette partie, on compare les résultats des simulations à ceux d'une série d'expériences effectuées dans l'article de Mark et al [1] sur des configurations en 2D.

Dans ce cas, un nombre importants de simulations ont été également effectuées (Tableau 3) dans le but de vérifier la validité du code FDS en comparant ses résultats à ceux obtenus expérimentalement, en étant le plus fidèle possible à la modélisation géométrique en particulier. Dans ce tableau, les valeurs de « x_s », la distance à la fin de la phase d'effondrement, sont issues d'une visualisation directe de la fin de cette phase par Smokview, alors que dans l'article ces valeurs ont été calculées par l'expression (8) qui montre qu'il n'y'a pas une grande différence avec celles observées sur les simulations. Quant à « A_s », et « A_0 » : le premier on le calcule avec l'expression (11) en injectant les valeurs de « x_s » issues des simulations et le second vaut :

$$A_0 = x_0 h_0$$

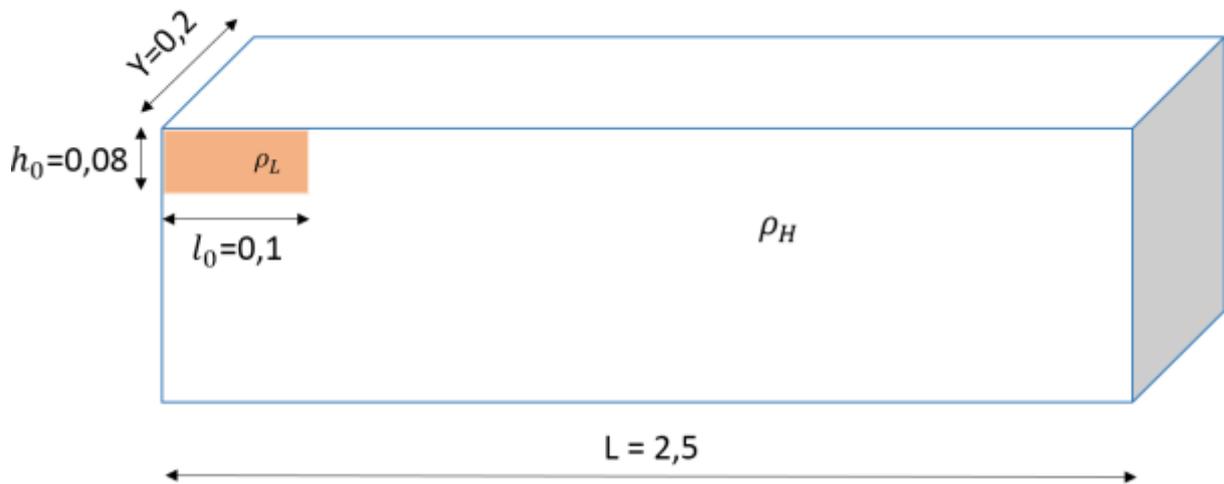


Fig. 7: Modèle géométrique adapté pour les simulations FDS (Unité « m »).

Tableau 3 : Conditions géométriques initiales des simulations FDS et des expériences de Mark et al. [20]

Simulation	x_0 (cm)	h_0 (cm)	H	A_0 (cm ²)	x_s (cm)	A_s (cm ²)
1	5	6	6	30	52	7.615
2	2.5	9.3	9.3	23.25	26	5.04
3	5	9.3	9.3	46.5	52	15.04
4	10	6.5	6.5	65	104	24.69

Concernant l'accélération réduite « g' », une série de quatre expériences avec différentes valeurs initiales de « g' » pour la même géométrie ont montré que le paramètre « E » est indépendant de la valeur de l'accélération réduite considérée (Fig. 8).

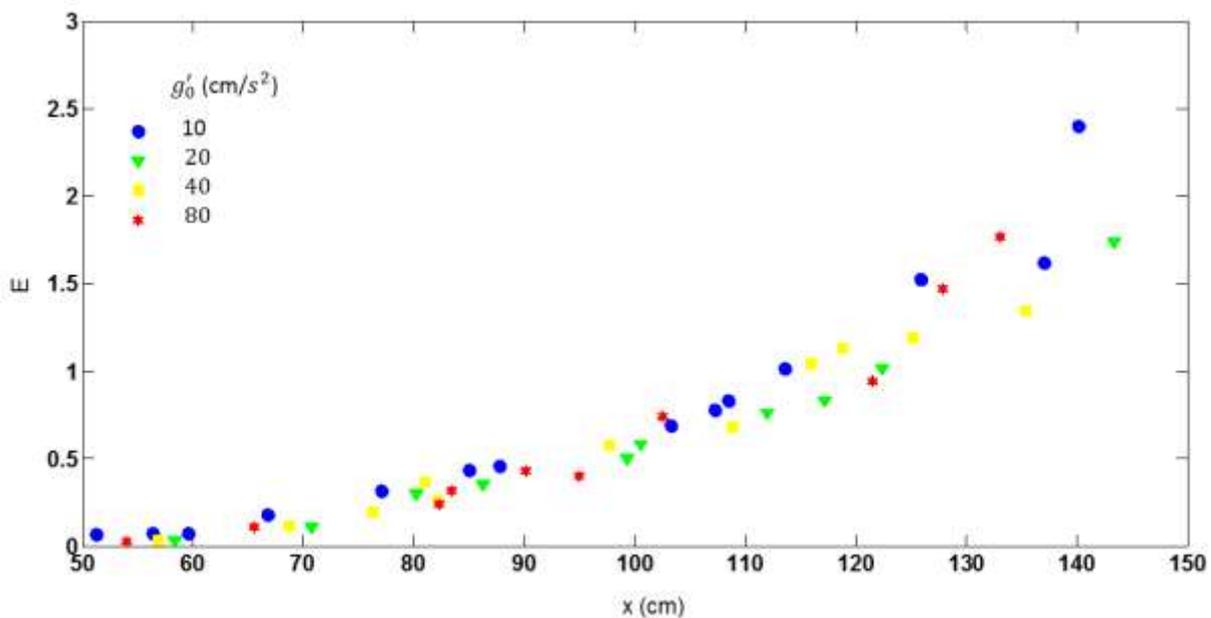


Fig. 8: Illustration de l'indépendance entre « g' » et le paramètre d'entraînement « E » [1].

Le tracé des valeurs du paramètre d'entraînement « E » données par (12) issue d'une analyse sur le modèle II, en fonction de la distance de l'avancée « x » dans une configuration de système Boussinesq, avec une densité de 1.1 kg/m³ pour le courant de densité et de l'air comme fluide ambiant (par défaut dans FDS), ($\rho_a = 1.2$ kg/m³), donne une évolution exponentielle. Cela dit, la surface en coupe transversale après la phase d'effondrement augmente par l'entraînement du fluide dans la tête mais diminue simultanément en laissant du fluide à la traine dans la queue.

On trace dans la figure (9) les deux courbes correspondantes au deux cas, avec et sans entrainement, afin de pouvoir mieux observer la différence entre les deux. Pour ce faire, on

introduit les deux paramètres adimensionnels X et T , tels que : $T = \frac{t}{\frac{x_0}{\sqrt{g'a h_0}}}$ et $X = \frac{x}{x_0}$.

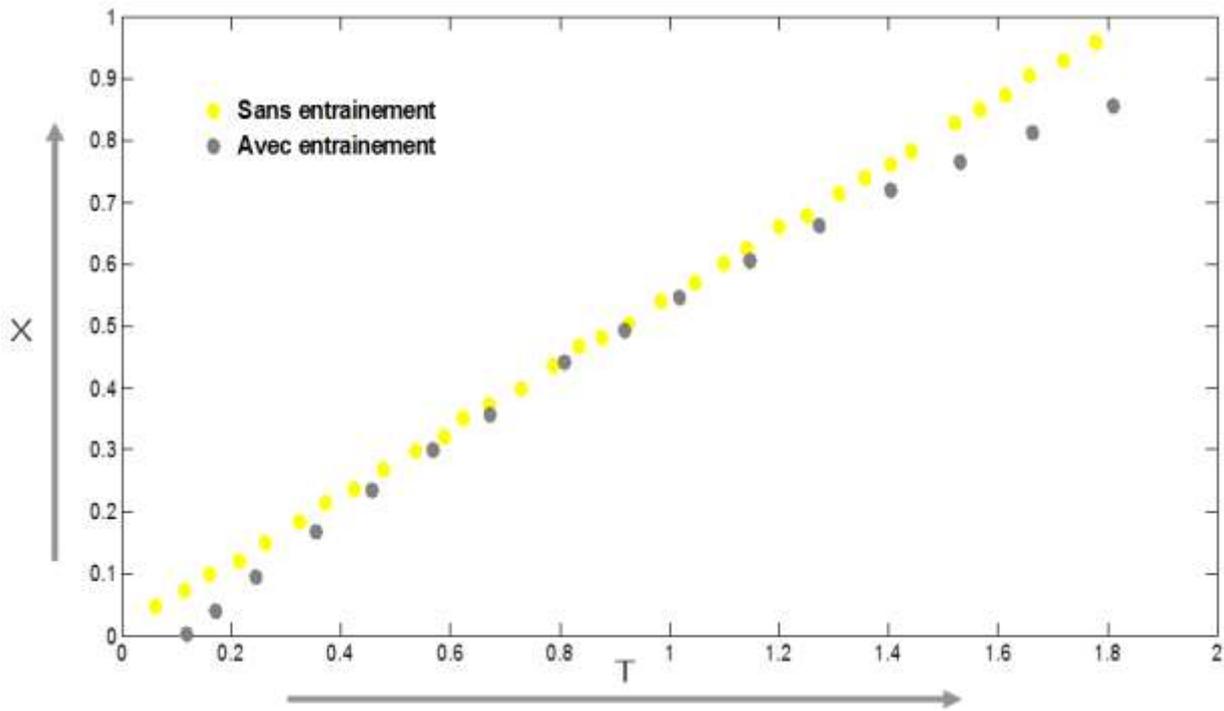


Fig. 9: Comparaison entre les deux cas : avec ou sans entrainement.

Cette figure montre qu'il n'y a pas une grande différence entre ces deux cas, avec ou sans entrainement. Il sera donc justifié de négliger les effets de ce dernier dans les études relatives écoulements des courants de densité.

3.2. Résultats relatifs au cas des frottements :

Dans cette partie, on peut exploiter une simulation (cas Non-Boussinesq) en référence aux travaux de Bonometti et al. 2008 [9] pour en extraire deux informations (cas de glissement ou non-glissement). On travaille un modèle géométrique 3D. Pour avoir les résultats concernant le cas sans glissement (avec frottement), on considère les résultats dans le plan $y = 0$ i.e. au niveau de la paroi. Et pour avoir les résultats du cas avec glissement (sans frottement), on considère les résultats du plan médium $y = 20$, très loin des parois.

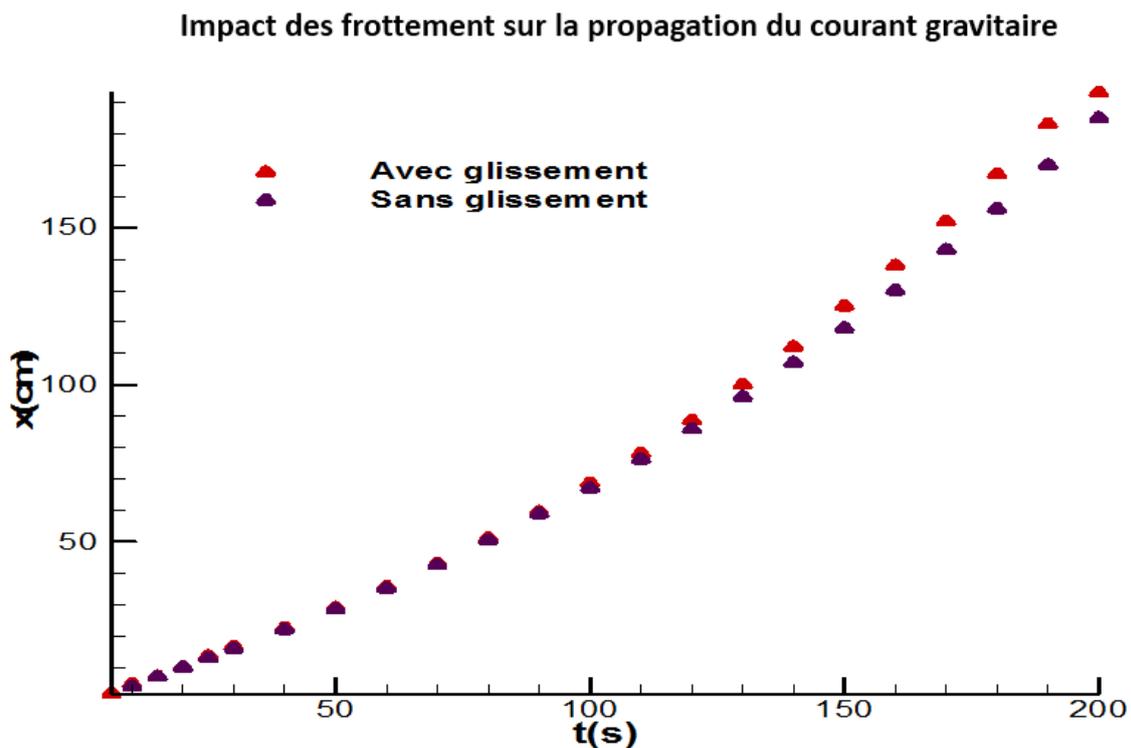


Fig.10: Propagation du front du courant de densité en fonction du temps, dans les deux cas : avec ou sans glissement.

Les résultats (fig. 10) sur le tracé de la propagation temporelle de l'avancée « x » dans les deux cas montrent qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux, du moins dans la phase d'effondrement et la phase inertielle, puisqu'on remarque quand même qu'il y a une légère différence entre les deux courbes, une fois le régime visqueux atteint, puisqu'à ce niveau, les vitesses de propagation deviennent moins importantes. Dans l'équation (24), le terme relatif au

frottement à tendance à réduire la vitesse, puisque, plus on va vers le régime visqueux, plus le courant gravitaire devient moins rapide, cela étant justifié par l'augmentation des pertes, ce qui entraîne l'augmentation du coefficient de perte d'énergie « k » dans cette relation et donc une diminution de la vitesse.

Conclusion & Perspectives

Nous avons présenté dans ce rapport des résultats de simulations numériques sur les écoulements des courants de gravité Boussinesq dans un milieu homogène en configuration horizontale. Un bon accord a été retrouvé entre les simulations et les autres résultats de la littérature. Il est donc possible de réaliser des simulations fiables sur les courants de gravité grâce à notre outil numérique.

Les résultats obtenus dans ce mémoire montrent que les effets de l'entraînement et ceux des frottements ne sont pas importants, ce qui permet d'adopter cette hypothèse de négliger ces effets dans les études où l'on se trouve dans ces mêmes conditions dans lesquelles on s'est situé dans le cadre de ce travail.

Dans la suite, il serait intéressant de faire des essais expérimentaux pour valider ces résultats analytiques ou encore de travailler dans d'autres configurations plus complexes (milieu stratifié, courant de densité non-Boussinesq, ...) en tenant compte d'autres hypothèses.

Ce mémoire dont l'orientation est plus, recherche que professionnel s'ouvre à plusieurs sujets de recherche, dans cette configuration Boussinesq et éventuellement la configuration non-Boussinesq, rarement traitée dans la littérature.

Référence bibliographique

- [1] E. Hallworth, J. Huppert & A. Mark, Hallworth, «Entrainment into twodimensional and axisymmetric turbulent gravity currents,» pp. 289-311, 1995.
- [2] Y. Hallez, Mélange gravitationnel de fluides en géométrie confinée, pp. 620-654, 2007.
- [3] N. Härtel, Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head part 1. flow topology and front speed for slip and non-slip boundaries. *J. Fluid Mech*, 189–212, 2000.
- [4] J. Simpson, «Effects of the lower boundary on the head of a gravity current,» *Fluid Mech*, pp. 759-768, 1972.
- [5] M. Lee, J. Balachandar & S. Cantero, On the front velocity of density currents, pp. 225-285, 2007.
- [6] Benjamin, «Gravity Current and Related Phenomena,» *J. Fluid. Mech*, pp. 209-248, 1968.
- [7] J. Rottman & J. Simpson. 1983 Gravity currents produced by insantaneous releases of a heavy fluid in a rectangular channel. *J. Fluid Mech*. 135, 95–110..
- [8] E. Hallworth, J. Huppert & A. Mark, Hallworth, «Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents,» pp. 289-311, 1995.

- [9] S. Balachandar, Jacques Magnaudet & Thomas Bonometti, Wall effects in non-Boussinesq density currents, pp. 315-360, 2008

- [10] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, Kristopher Overholt, Fire Dynamics Simulator User's Guide 2013

- [11] M. Larocca, «Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. Phys. Fluids.» pp. 118-202, 2010.

Annexe

Exemple de fichier input FDS utilisé dans les simulations.

On présentera dans cette partie, un seul exemple de code parmi plusieurs, en plus des commentaires illustrant l'insertion de chacune des instructions dans le programme ci-joint. A savoir que d'une simulation à une autre, on apporte des modifications sur la géométrie (Dimensions), le maillage, la densité du courant de gravité et l'emplacement des coupes (slices).

L'exemple ci-présent correspond au modèle géométrique G3, une des expériences d'Albert Dai.

- *Initialisation du programme*

```
&HEADCHID='SimulationA_DAI', TITLE='Simulation A_DAI' /
```

- *Maillage + Dimensions de la géométrie contenant le milieu ambiant*

```
&MESH IJK=1000,10,200 ,XB=0,2.5, 0,0.2, 0.00,0.6 /
```

- *Fixation du temps de calcul*

```
&TIME T_END=100 /
```

- *Dimension de la géométrie contenant le fluide léger + sa densité*

```
INIT XB=0,0.1, 0,0.2, 0.52,0.6 DENSITY= 0.12 /
```

- *Définition des plans de coupe suivant « y »*

```
&SLCF PBY=0, QUANTITY='VELOCITY' /
```

```
&SLCF PBY=0, QUANTITY='DENSITY' /
```

```
&SLCF PBY=0.1, QUANTITY='VELOCITY' /
```

```
&SLCF PBY=0.1, QUANTITY='DENSITY' /
```

- *Définition des conditions aux limites (Surfaces ouvertes)*

&VENT MB='XMAX' , SURF_ID='OPEN'/

&VENT MB='ZMIN' , SURF_ID='OPEN'/

- *Emplacements des capteurs de vitesse*

&DEVC XYZ=0.1,0.10,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=0.1'/

&DEVC XYZ=0.50,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=0.5'/

&DEVC XYZ=1.00,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=1'/

&DEVC XYZ=1.5,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=1.5'/

&DEVC XYZ=0.1,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=0.1'/

&DEVC XYZ=0.50,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=0.5'/

&DEVC XYZ=1.00,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=1'/

&DEVC XYZ=1.5,0.1,0.59 QUANTITY='VELOCITY', ID='x=1.5'/

- *Ajoutée afin de générer des fichiers .xyz et .q nous permettons par la suite de visualiser en 3D les résultats des simulations sur Tecplot ou extraire des ISO-Surface de densité et de vitesse sur Smokview également.*

&DUMP PLOT3D_QUANTITY(1)='DENSITY',

WRITE_XYZ= .TRUE.,DT_PL3D=5.0 /

- *Emplacements des capteurs de densité*

&DEVC XYZ=0.1,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.1'/

&DEVC XYZ=0.12,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.12'/

&DEVC XYZ=0.14,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.14'/

&DEVC XYZ=0.16,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.16'/

&DEVC XYZ=0.18,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.18'/

&DEVC XYZ=0.2,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.2'/

&DEVC XYZ=0.22,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.22'/

&DEVC XYZ=0.24,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.24'/

&DEVC XYZ=0.26,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.26'/

&DEVC XYZ=0.28,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.28'/

&DEVC XYZ=0.3,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.3'/
&DEVC XYZ=0.32,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.32'/
&DEVC XYZ=0.34,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.34'/
&DEVC XYZ=0.36,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.36'/
&DEVC XYZ=0.38,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.38'/
&DEVC XYZ=0.4,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.4'/
&DEVC XYZ=0.42,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.42'/
&DEVC XYZ=0.44,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.44'/
&DEVC XYZ=0.46,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.46'/
&DEVC XYZ=0.48,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.48'/
&DEVC XYZ=0.50,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.5'/
&DEVC XYZ=0.52,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.52'/
&DEVC XYZ=0.54,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.54'/
&DEVC XYZ=0.56,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.56'/
&DEVC XYZ=0.58,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.58'/
&DEVC XYZ=0.6,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.6'/
&DEVC XYZ=0.62,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.62'/
&DEVC XYZ=0.64,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.64'/
&DEVC XYZ=0.66,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.66'/
&DEVC XYZ=0.68,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.68'/
&DEVC XYZ=0.70,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.70'/
&DEVC XYZ=0.72,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.72'/
&DEVC XYZ=0.74,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.74'/
&DEVC XYZ=0.8,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.8'/
&DEVC XYZ=0.9,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=0.9'/
&DEVC XYZ=1.00,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1'/
&DEVC XYZ=1.2,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.2'/
&DEVC XYZ=1.4,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.4'/
&DEVC XYZ=1.5,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.5'/
&DEVC XYZ=1.6,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.6'/

&DEVC XYZ=1.7,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.7/'
&DEVC XYZ=1.8,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.8/'
&DEVC XYZ=1.9,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=1.9/'
&DEVC XYZ=2.00,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=2/'
&DEVC XYZ=2.2,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=2.2/'
&DEVC XYZ=2.4,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=2.4/'
&DEVC XYZ=2.5,0.1,0.59 QUANTITY='DENSITY', ID='x=2.5/'

- *Fin du programme*

&TAIL/