

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat

Année 2017

Département de Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

CARACTERISATION ET ETUDE DU DEBIT ET DE LA DISTRIBUTION DE VITESSE D'ECOULEMENT D'UNE MATIERE GRANULAIRE DANS UN SILO

Présenté par :

Amira GRARA

DIRECTEUR DE MEMOIRE : LAKHDAR TIFOUTI, Professeur Université Badji Mokhtar- Annaba

Devant le jury :

Président : SAMAR Med elhadi,

Professeur, Université Badji Mokhtar-Annaba

Membre : SAOUD Nassim,

MAA, Université Badji Mokhtar-Annaba

SOMMAIRE

Résumé.....	IV
Introduction	V

Partie bibliographique

CHAPITRE 1 : ASPECT THEORIQUE DU MATERIAU GRANULAIRE

1.1 Généralités sur les matériaux granulaires	1
1.1.1 Introduction.....	1
1.1.2 Etat de la matière des matériaux granulaires	2
1.1.3 Importance des matériaux granulaires	2
1.2 Caractérisation d'un matériau granulaire	3
1.2.1 Approche physique de milieu granulaire	3
1.2.1.1 Taille des particules et distribution granulométrique	3
1.2.1.2 Forme des particules.....	3
1.2.2 Approche physico mécanique de milieu granulaire	4
1.2.2.1 Porosité et compacité.....	4
1.2.2.2 Masse volumique	5
1.2.2.3 Ségrégation	5
1.2.3 Approche mécanique de milieu granulaire	7
1.2.3.1 Dilatance de Reynolds.....	7
1.2.3.2 Essai de cisaillement	8
1.2.3.3 l'angle d'éboulement.....	11

CHAPITRE 2 : ECOULEMENT DES MATIERES GRANULAIRES DANS LES SILOS

2.1 Introduction.....	13
2.2 Différents modes d'écoulement	13
2.3 Débit d'écoulement.....	14
2.4 Distribution de la vitesse	18
2.4.1 Modélisation cinématique	18
2.4.2 Modélisation par la théorie de plasticité.....	22
2.5 Techniques de mesure de la distribution de vitesse des grains	22

2.5.1 Méthodes 2D.....	22
2.5.2 Méthodes 3D.....	23

Partie expérimentale

CHAPITRE 3 : DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DU BLE

3.1 Introduction.....	24
3.2 Caractérisation	24
3.2.1 Matériau utilisé.....	24
3.2.2 Granulométrie.....	25
3.2.3 Masse volumique	25
3.2.4 Calcul de la porosité et de la fraction de solide	28
3.2.5 Mesure de l'angle de talus (ou d'éboulement)	29
3.2.6 Mesure de l'angle de frottement interne et de coulabilité	30

CHAPITRE 4 : ETUDE DU DEBIT D'ECOULEMENT ET LA DISTRIBUTION DE VITESSE DES GRAINS

4.1 Mesure de débit	33
4.1.1 Matériel utilisé	33
4.1.2 Les essais de mesure de débit.....	34
4.1.2.1 Mesure de débit dans le cas d'absence de la trémie	34
4.1.2.2 Mesure du débit dans le cas de présence de la trémie (35°,45°,55°)	37
4.1.3 Estimation de la valeur du débit	37
4.2 Distribution de vitesse	39
4.2.1 Distribution de vitesse des grains dans le cas d'absence de la trémie	39
4.2.2 Distribution de vitesse des grains dans le cas de la présence de la trémie	39
4.2.3 Comparaison entre les résultats pratiques et théoriques	46
4.2.3.1 Zone de convergence.....	46
a) En absence de la trémie.....	46
b) En présence de la trémie	51
4.2.3.2 Zone d'écoulement	56
a) Absence de la trémie	56
b) En présence de la trémie	58
4.2.3.3 Représentation et comparaison de la distribution de vitesse des grains par les contours et les vecteurs de vitesse	60
a) Définition d'une équation de la vitesse v_0	60

b) Cas d'absence de la trémie pour les ouvertures 40 mm, 50 mm, 60 mm.....	63
c) Cas de présence de la trémie pour l'ouverture 40 mm, avec les angles 35°, 45° et 55° de la trémie	64
CONCLUSION.....	67
BIBLIOGRAPHIE	68
ANNEXES.....	70

Résumé

Les matériaux granulaires désignent l'assemblage des grains indépendants ils sont utilisés dans plusieurs et différents champs industriels : agroalimentaire, pharmaceutique, etc. Nous avons fait un travail sur l'écoulement gravitaire d'un matériau granulaire qui est le blé dans un silo parallélépipédique en plexiglas. Ce travail début par une caractérisation du matériau granulaire. Ainsi nous avons fait une étude du débit d'écoulement, et on termine par une étude de distribution de vitesse des grains en utilisant une technique de mesure moderne qui est la technique PIV (*particule Image Velocimetry*). Finalement nous avons terminé ce travail par une comparaison entre les résultats théoriques et pratiques du débit et de la distribution de vitesse des grains. Après nous avons fait une modification pour les équations de distribution de vitesse des grains afin d'approcher l'écoulement réel observé.

Mot clés : matériaux granulaires, l'écoulement gravitaire, caractérisation, silo, distribution de vitesse, PIV (*particule Image Velocimetry*).

Abstract

Granular materials refer to the assembly of independent grains. They are used in several industrial fields: agro-food, pharmaceutical, etc.

We have done a work on the gravity flow of a granular material which is the wheat in a parallelepipedal silo made of Plexiglas. This work begins with a characterization of the granular material. Thus, we studied the flow rate, and ended with a study of grain velocity distribution using a modern measurement technique, the PIV (Image Velocimetry particle) technique.

Finally, we have completed this work by comparing the theoretical and practical results of flow and grain velocity distribution. We made a modification for the equations of grain velocity distribution in order to approach the observed real flow.

Key words: granular materials, gravity flow, characterization, silo, velocity distribution of granular, PIV (particle Image Velocimetry)

INTRODUCTION

Introduction

Cette étude est consacrée au phénomène d'écoulement gravitaire d'un matériau granulaire lors de la vidange d'un silo parallélépipédique. Un silo est un réservoir de grande capacité destiné pour le stockage commercial ou industriel des grandes quantités des produits ; où on trouve le phénomène d'écoulement du matériau granulaire. Ce travail a consisté au une caractérisation du matériau étudié qui est le blé, puis une étude de l'écoulement gravitaire des grains selon la démarche suivante :

La première partie qui est la partie bibliographique englobant des diverses approches théorique qui se présente en deux chapitres : Le premier chapitre concerne les notions propres du milieu granulaire, puis la caractérisation de ce dernier peut se scinder en trois parties : les propriétés physiques, les propriétés physico-mécaniques et les propriétés mécaniques ; et le deuxième chapitre concerne l'écoulement de la matière granulaire dans les silos. Dans ce chapitre il y'a des équations utilisées pour l'estimation du débit d'écoulement gravitaire et des équations de la distribution de vitesse des grains avec l'utilisation d'une technique de mesure moderne qui est la technique PIV (*particle Image Velocimetry*).

La deuxième partie qui concerne la partie expérimentale. Elle regroupe les expérimentations réalisées au laboratoire de génie de l'environnement du département de Génie des Procédés. Elle est divisée en deux chapitres ; le chapitre trois résume la caractérisation du matériau utilisé (blé), et pour le dernier chapitre nous avons fait des mesures de la valeur du débit, et de la distribution de vitesse des grains par la technique PIV. Ainsi nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et les résultats théoriques et finalement nous avons faite une corrélation donnée par "Excel". Afin d'approcher l'écoulement réel observé.

CHAPITRE 1

ASPECT THEORIQUE DU MATERIAU GRANULAIRE

1.1 Généralités sur les matériaux granulaires

1.1.1 Introduction

Un système composé d'un grand nombre des particules macroscopiques est appelé matériau granulaire. La dénomination des matériaux granulaires varie en fonction de la taille des particules qui les composent. [1]

Les milieux granulaires d'une taille relativement grande (supérieure à $100\ \mu\text{m}$), comme le sable, ont un comportement physique lié essentiellement aux forces de contact entre les grains et l'effet des autres forces est négligé comme les forces de Van der Waals.

A des échelles plus petites, les poudres et les colloïdes sont des milieux dont le diamètre des grains est respectivement compris dans l'intervalle $[1\ \mu\text{m}; 100\ \mu\text{m}]$ et $[1\ \text{nm}, 1\ \mu\text{m}]$. Les interactions de Van der Waals non négligeables pour les poudres très fines, tandis que dans le cas des colloïdes, l'agitation thermique joue un rôle important. (Figure 1.1).

Le milieu granulaire sec est un milieu dans lequel l'interaction des grains avec le fluide environnant est négligeable. Quand un milieu granulaire est complètement immergé dans un fluide et que celui-ci a une influence sur le comportement du milieu granulaire qui ne peut plus être négligée, on parlera de milieu granulaire mouillé. Entre ces deux extrêmes, il existe les milieux granulaires humides qui sont composés, en plus de granulats, de deux fluides non miscibles. Le milieu est alors plus cohésif grâce à la présence de réseaux de ponts capillaires. [2]

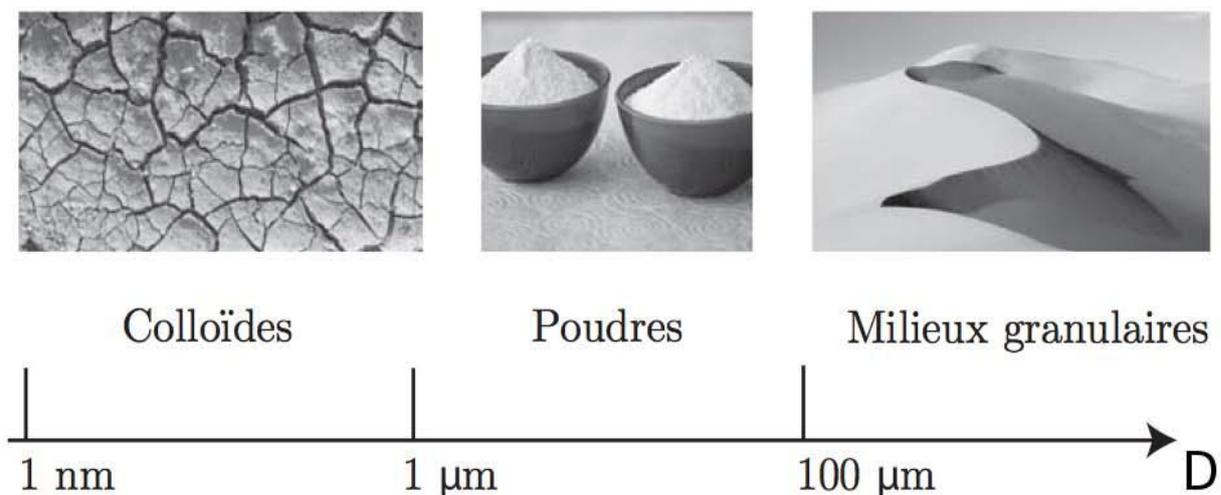


Figure 1.1. Position des milieux granulaires dans les milieux divisés.

1.1.2 Etat de la matière des matériaux granulaires

Un milieu granulaire est constitué d'un ensemble des particules discrètes. Il présente des propriétés différentes des trois phases standards (gaz, liquide, solide). Les particules sont caractérisées par leur taille, forme, densité. Toutes ces propriétés physicochimiques influencent fortement l'arrangement des particules, ce qui change le comportement dynamique et statique du milieu granulaire. Quand la structure interne du tas granulaire est modifiée, le milieu peut se comporter à la fois comme un liquide avec des particules qui s'écoulent et à la fois comme un solide. Dans le cas où il y a très peu de grains (milieu très dispersé), la possibilité de contact entre particules est si faible que le milieu se comporte comme un gaz.

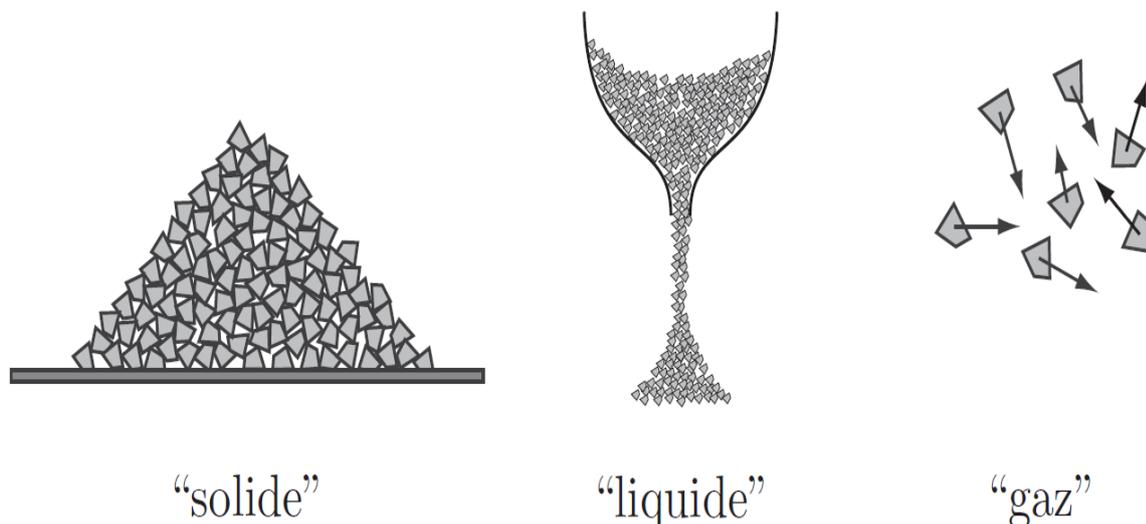


Figure 1.2. Trois états des matériaux granulaires (solide, liquide et gaz).

1.1.3 Importance des matériaux granulaires

Les poudres et les matériaux granulaires sous forme divisées sont omniprésents. Nous pouvons en trouver :

- 1) autour de nous dans notre cuisine (sel, poivre, café...).
- 2) Dans les industries du bâtiment et travaux publics (sables, graviers), l'agro-alimentaire (céréales, sucre) ainsi que le secteur pharmaceutique, celui de la cosmétique, et bien d'autres encore.
- 3) les phénomènes géophysiques tels que la neige, les avalanches de glace et de roche...etc.

1.2 Caractérisation d'un matériau granulaire

La caractérisation d'un matériau granulaire peut se scinder en trois parties :

- Les propriétés physiques individuelles : taille des particules, forme des particules,....
- Les propriétés physico-mécaniques et hydrauliques d'ensemble : porosité, masse volumique...
- Les propriétés mécaniques : cisaillement, angle d'écoulement ...

Certaines de ces propriétés permettent d'appréhender le comportement d'un matériau granulaire. Lorsque l'on s'intéresse au comportement des matériaux granulaires, on entend parler de la coulabilité qui est la capacité d'un matériau granulaire à s'écouler librement lors d'une manutention. [3]

1.2.1 Approche physique de milieu granulaire

Il s'agit d'un certain nombre de paramètres physiques liés directement au matériau.

1.2.1.1 Taille des particules et distribution granulométrique

La taille des particules a une forte influence sur les propriétés du milieu granulaire. Elle est facile à déterminer si les grains ont une forme régulière. La détermination de la taille conduit à la détermination des autres propriétés géométriques comme la surface, le volume, etc.

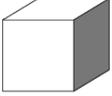
La granulométrie est la proportion des différentes grosseurs des grains dans la masse totale. Il y'a plusieurs techniques pour la détermination de la granulométrie d'un système granulaire. Parfois la nature du matériau oblige l'utilisation de certaines techniques. On trouve dans plusieurs références (comme exemple [4] une discussion détaillée de ces techniques).

- Le tamisage.
- La granulométrie par diffraction Laser.
- La microscopie couplée à l'analyse d'image.

1.2.1.2 Forme des particules

On distingue sept formes de grains différentes qui sont désignées par un chiffre romain conformément au tableau 1.1 [1].

Tableau 1.1. Classification des formes des grains.

Symbole	Désignation	Croquis
I	Arêtes vives de dimension à peu près égales dans les trois sens géométriques. Exemple : CUBE	
II	Arêtes vives dont l'une est nettement plus longue que celles dans les deux autres sens. Exemple : PRISME OBLONG	
III	Arêtes vives dont l'une est nettement plus petite que celle dans les deux autres sens. Exemple : CARREAU, ECAILLE	
IV	Arêtes arrondies de dimensions à peu près égales dans les trois sens géométriques. Exemple : SPHERE	
V	Arêtes arrondies dont l'une est nettement plus longue que celle dans les deux autres sens. Exemple : CYLINDRE, BATONNET	
VI	Arêtes arrondies dont l'une est nettement plus petite que celles dans les deux autres sens. Exemple : RONDELLE, LENTILLE, DISQUE	
VII	Fibreux, filamenteux, bouclé, entrelacé. Exemple : FIBRE, FILL	

1.2.2 Approche physico mécanique de milieu granulaire

1.2.2.1 Porosité et compacité

❖ Porosité

On peut définir la porosité comme le rapport du volume du vide au volume total. La porosité est donné par la relation suivante : [5]

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume totale}} \quad (1.1)$$

❖ Compacité

Elle est un paramètre essentiel caractérisant les milieux granulaires, il s'agit du rapport de volume de solide au volume total. La porosité (ε) et la compacité (ν) sont liées par la relation :

$$\varepsilon + \nu = 1 \quad (1.2)$$

1.2.2.2 Masse volumique

Elle est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. On peut distinguer plusieurs valeurs de la masse volumique pour la même masse.

- **Masse volumique réelle ρ_r**

La détermination de la masse volumique réelle est faite par la mesure de la masse et du volume du solide.

Premièrement, on obtient la valeur de la masse par une simple pesée mais la détermination du volume nécessite des méthodes appropriées.

Le volume du solide peut être déterminé en retranchant du volume total le volume du vide. Ce dernier peut être déterminé par un fluide capable de remplir tout le vide externe et interne (pores).

$$\rho_r = \frac{m}{V_s} \quad (1.3)$$

Il existe des pores internes inaccessibles dans le matériau, et dans ce cas, les mesures de la masse volumique réelle ne sont pas précises et l'utilisation d'un échantillon finement broyé peut résoudre le problème.

- **Masse volumique apparente ρ_p**

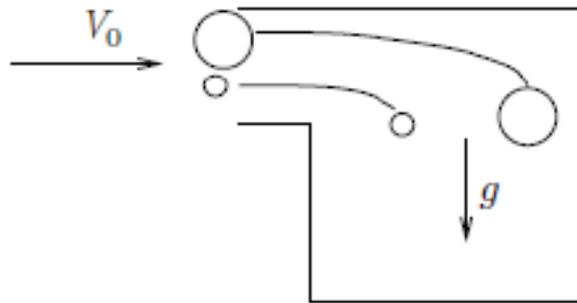
La masse volumique apparente est une grandeur utilisée essentiellement avec les substances se présentant sous forme de granulés, par exemple : dans l'agroalimentaire a fin de rendre compte de la masse de matériau contenue dans un volume donnée, comprenant le volume d'air interstitiel.

La masse volumique apparente d'un matériau granulaire peut varier en fonction de mode de manutention, selon qu'il est plus ou moins tassé. On peut définir la masse volumique apparente ρ_p comme le rapport de la masse au volume total.

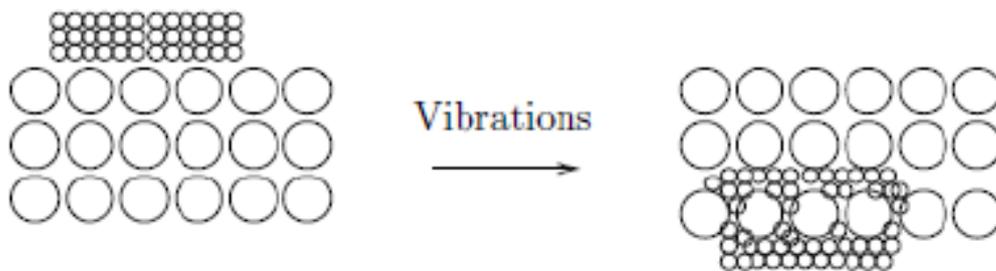
1.2.2.3 Ségrégation

La ségrégation constitue un mécanisme très important dans les applications industrielles des granulaires. Il existe de nombreuses méthodes qui permettent de séparer des

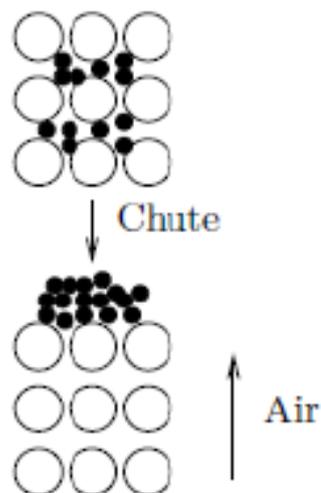
particules de tailles différentes. On a trois mécanismes de ségrégation : la ségrégation due aux trajectoires, la ségrégation par percolation et la ségrégation par élutriation. (Figure 1.3). Beaucoup d'études ont été faites pour le phénomène de ségrégation (voir [6], [7], [8])



(a) Ségrégation due aux trajectoires



(b) Ségrégation par percolation des fines



(c) Ségrégation par élutriation

Figure1.3. Schéma des différents mécanismes de ségrégation.

Ségrégation due aux trajectoires

Dans ce cas les particules peuvent se déplacer librement, exemple la vitesse de chute des particules dans un silo de stockage est fortement influencée par le diamètre des particules. C'est pourquoi les plus grosses particules s'écoulent plus loin que les petites.

Ségrégation par percolation des fines

Le deuxième mécanisme invoqué est la percolation des petites particules dans les vides entre les grosses particules lors de la vibration, en même temps que les grosses sont repoussées vers la surface libre. La pression exercée par les grosses particules a ensuite pour conséquence de consolider l'arrangement des particules fines.

Ségrégation par élutriation

Dans ce cas les particules très fines coexistent avec des grosses particules, lors de la chute du milieu granulaire, les particules fines peuvent être chassées vers le haut à cause du flux d'air qui résulte de la chute des grosses particules.

1.2.3 Approche mécanique de milieu granulaire

1.2.3.1 Dilatance de Reynolds

Afin de mieux cerner le rôle de la fraction volumique, Rowe imagine un assemblage granulaire très simple, on considère un disque R soumis à un effort vertical N reposant sur des disques J et H. Et on suppose que R ne peut pas rouler mais seulement glisser et on cherche à déterminer l'effort horizontal T nécessaire pour déclencher son mouvement. Ce petit modèle peut être vu comme l'étude de la résistance au cisaillement, et pour déclencher la rupture par cisaillement de la maille on doit appliquer un effort tangentiel proportionnel à l'effort normal.

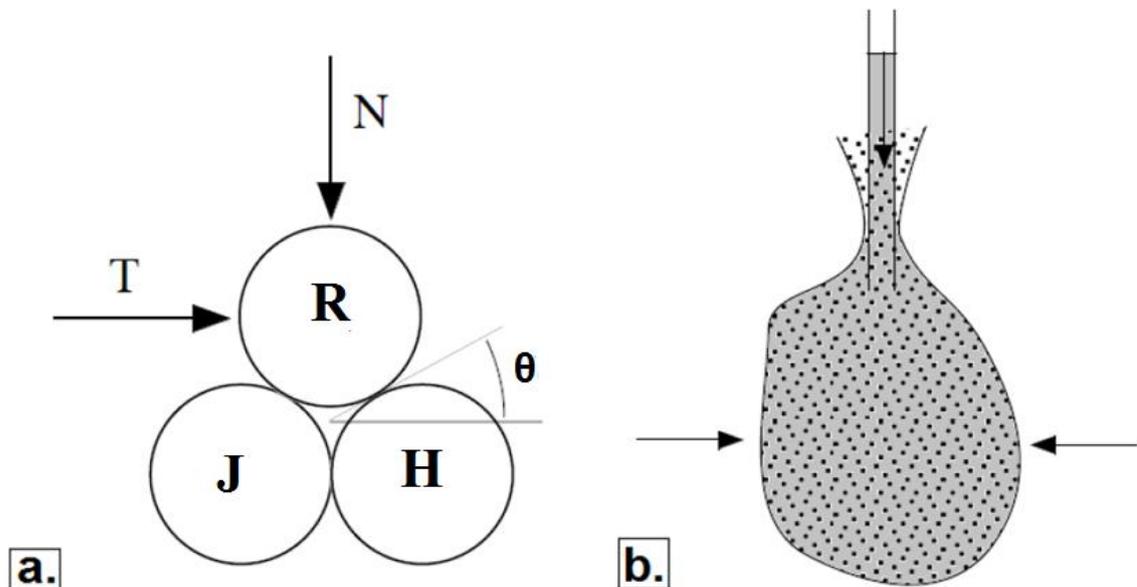


Figure 1.4. Dilatance de Reynolds. a. Explication heuristique ; b. Mise en évidence expérimentale.

Pour que l'assemblage dense se déforme, les grains doivent d'abord s'écarter. Le mouvement relatif des grains va donc induire une diminution de la fraction volumique au cours de la déformation. Le premier à mettre en évidence ce phénomène fut Reynolds en 1885.

Son expérience consiste en une poche élastique pleine de sable compacté et saturé d'eau, surmontée d'un tube capillaire (Figure 1.4. (b)). Si on appuie sur la poche, on constate contre toute attente que le niveau d'eau baisse dans le capillaire le sable aspire l'eau au lieu de la repousser vers l'extérieur. En appuyant sur la poche, on déforme en réalité l'assemblage granulaire. Le milieu se dilate donc, et l'eau descend remplir les pores ainsi créés. [9]

1.2.3.2 Essai de cisaillement

Cet essai permet de déterminer les paramètres intrinsèques du matériau tels que : l'angle de frottement interne, et la cohésion. On trouve trois types de cellules de cisaillement utilisées pour les matériaux granulaires qui sont :

➤ **Les cellules de cisaillement par translation** (la boîte de Casagrande) :

L'essai de cisaillement consiste à soumettre un échantillon de matériau granulaire dans une éprouvette placée à l'intérieur de deux demi-boîtes qui peuvent coulisser horizontalement l'une par rapport à l'autre (Figure 1.5). Un piston permet d'exercer sur l'échantillon une force verticale N , La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure, avec un comparateur qui mesure la déformation verticale de l'échantillon. [10]

Lors du cisaillement, on mesure la force horizontale T , et les contraintes normale σ et tangentielle τ le long du plan cisailé sont calculées comme suit :

$$\sigma = \frac{N}{S_0} \quad (1.4)$$

$$\tau = \frac{T}{S_0} \quad (1.5)$$

S_0 : Est la section de la cellule.

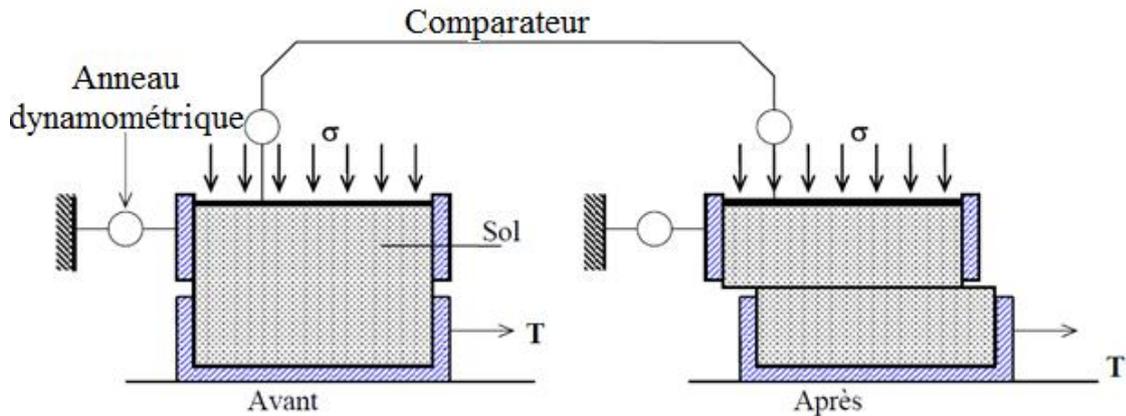


Figure 1.5. Schéma d'une boîte de cisaillement de type Casagrande.

➤ **Les cellules rotationnelles circulaires:**

Elles fonctionnent selon le même principe que la première technique sauf que le cisaillement est créé par un mouvement rotationnel horizontal entre deux blocs de poudres superposés (figure 1.6 (b) et (c)). Pour ce type de cellule on peut appliquer le cisaillement à des grandes vitesses avec une course infinie.

➤ **Les cellules rotationnelles annulaires :**

Elles sont les même que les cellules circulaires sauf que la partie centrale laissée vide, donc la matière granulaire est cisailée entre deux cylindres par rotation (figure 1.6 (d)).

L'avantage de l'essai annulaire est que l'échantillon peut être cisailé indéfiniment, ce qui permet l'étude des propriétés résiduelles du matériau.

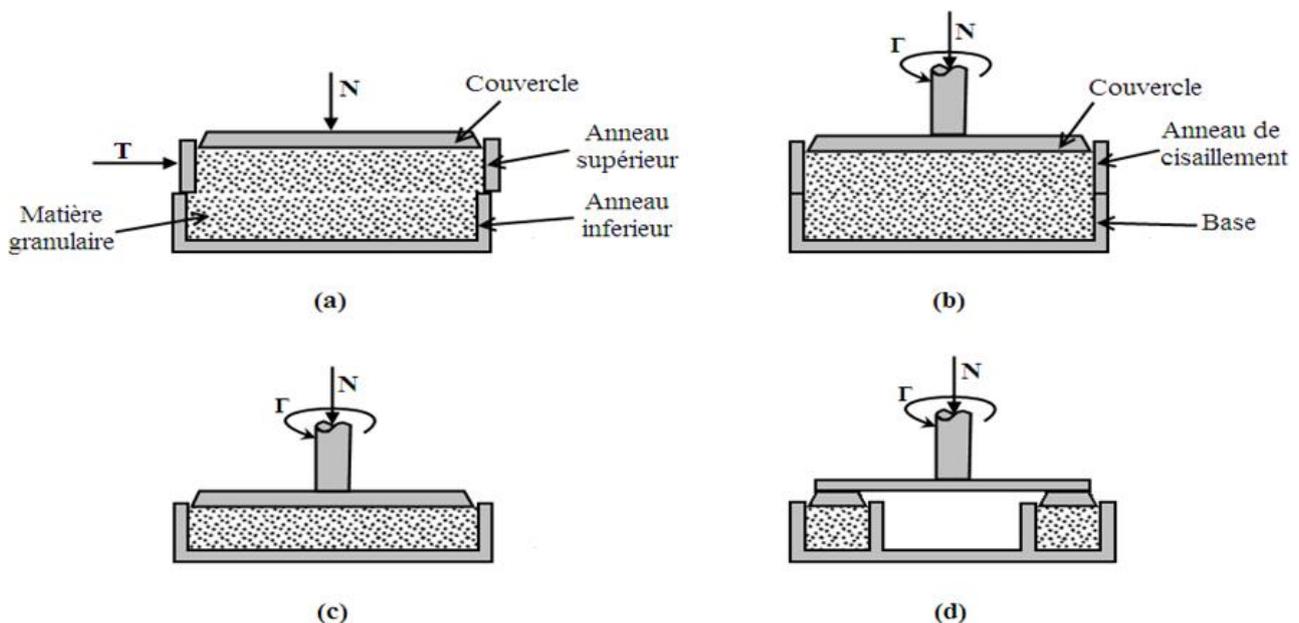


Figure 1.6. Différents types des cellules de cisaillement, cellule de cisaillement par translation (a), cellules rotationnelles circulaires (b) et (c), cellule rotationnelle annulaire (d).

❖ Caractéristiques obtenues

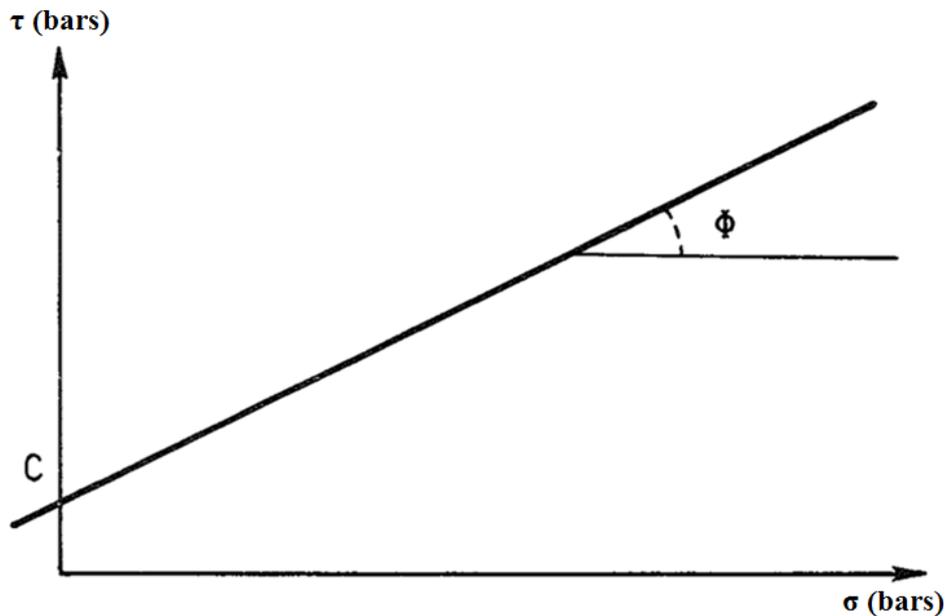


Figure 1.7. Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale.

La représentation graphique de $\tau = f(\sigma)$ permet d'obtenir les caractéristiques suivantes :

• Angle de frottement interne

L'angle de frottement interne est l'angle entre la droite et l'horizontale. Elle caractérise le frottement entre les particules se déplaçant les unes par rapport aux autres.

• Cohésion

La cohésion C , est la résistance au cisaillement pur d'un matériau granulaire. Elle est obtenue par extrapolation de la droite $\tau = f(\sigma)$ à l'origine. Elle a des effets sur le comportement physique des milieux granulaires le stockage des matériaux cohésifs sont pleins de difficultés. Par exemple, elle peut conduire au bouchage (voûtage) pendant l'écoulement de la matière granulaire.

❖ Critère de Coulomb

La mécanique des sols classique utilise la condition de rupture de Coulomb ([11], [12]) qui dit que la contrainte tangentielle τ d'un matériau dépend linéairement de la contrainte normale σ .

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1.6)$$

Avec :

φ : Angle de frottement interne.

c : Est un coefficient de la cohésion entre les grains, ce paramètre peut être considéré nul pour des milieux granulaire sec formés des grains suffisamment grands.

1.2.3.3 l'angle d'éboulement

L'angle d'éboulement Θ , souvent appelé angle de talus que fait avec l'horizontale et la pente du tas conique formé par le matériau granulaire lorsqu'il tombe librement et régulièrement d'une faible hauteur. Il est indiqué en degrés (figure 1.8). C'est une propriété intrinsèque de matériau, cet angle peut prendre des valeurs de l'ordre de 40 à 45° pour des matériaux très anguleux avec une granulométrie très étalée.

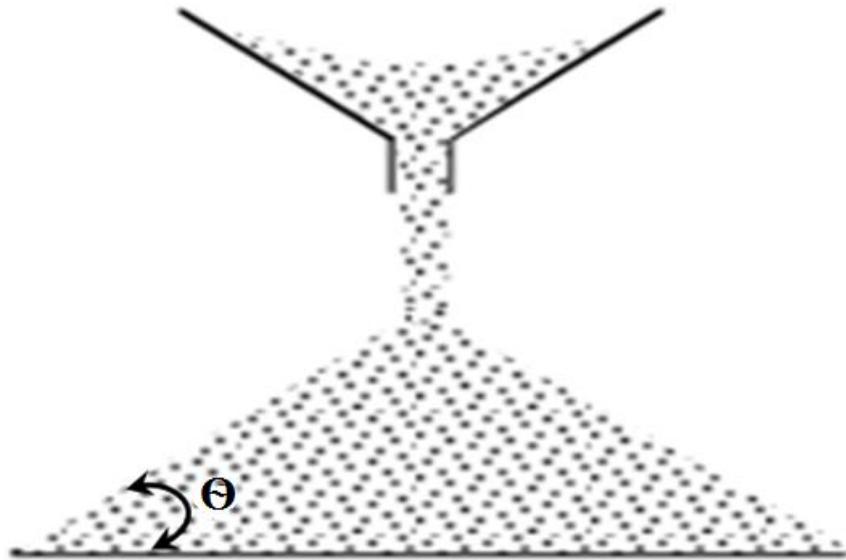


Figure 1.8. Constitution d'un tas à partir d'un entonnoir.

- **le principe de la méthode de mesure de l'angle d'éboulement**

Conformément à la définition précédente, le produit en vrac est versé lentement et régulièrement d'une faible hauteur sur le plan horizontal.

Le but à atteindre est d'obtenir un tas de forme conique, aussi abrupt et régulier que possible. Il est procédé à la mesure des diamètres D_1 et D_2 ainsi que la hauteur h (figure 1.9). L'angle d'éboulement Θ est calculé à partir des valeurs mesurées h , D_1 , D_2 .

$$\Theta = \arctan \frac{4 \times h}{D_1 + D_2} \quad (1.7)$$

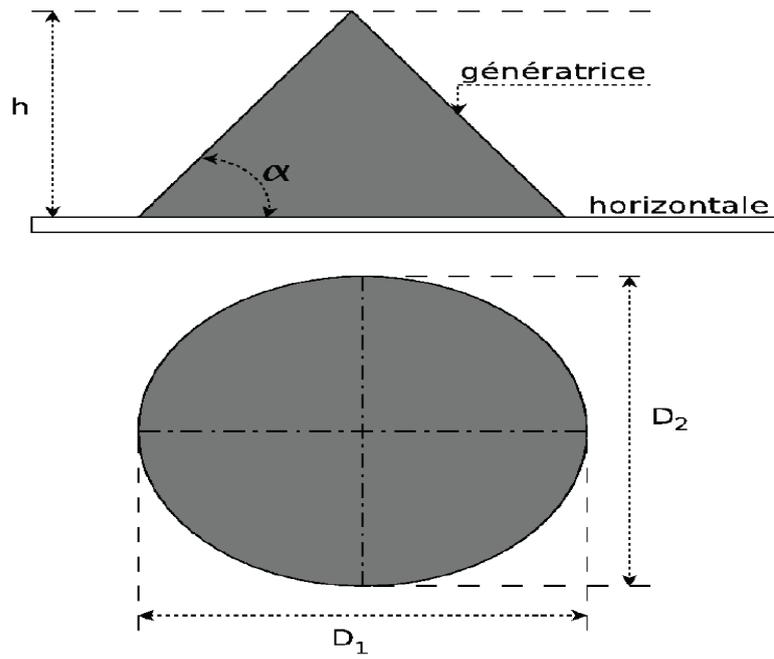


Figure 1.9. Représentation des paramètres à relever lors de la mesure de l'angle d'éboulement.

CHAPITRE 2

ÉCOULEMENT DES MATIÈRES GRANULAIRES DANS LES SILOS

2.1 Introduction

L'étude de l'écoulement des grains lors de la vidange d'un silo est une partie importante des recherches effectuées dans le domaine des silos. L'essentiel des recherches entreprises jusqu'à maintenant se sont intéressées à la définition de la nature d'écoulement : l'écoulement en masse ou en cheminée.

L'écoulement de la matière granulaire contient toujours des problèmes, l'apparition de ces problèmes dépend de la géométrie du silo et la nature d'écoulement de la matière granulaire, la considération des propriétés de la matière granulaire est importante à cause des forces de frottement entre les grains qui contrôlent la nature de l'écoulement.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents types d'écoulement et les différentes équations utilisées qui concernent le débit et la distribution de vitesse des grains ainsi que les techniques utilisées pour l'étude de l'écoulement.

2.2 Différents modes d'écoulement

Pendant la vidange d'un silo, on a deux modes principaux d'écoulement : l'écoulement en masse et l'écoulement en cheminée (Jenike, 1964; Schewedes, 1998; Zhong et al., 2001) (figure 2.1).

Pour l'écoulement en masse tout le matériau dans le silo est en mouvement lors de la vidange (Figure 2.1(a)) la surface libre de matériau descend régulièrement. Ce mode d'écoulement permet une exploitation optimale du silo.

Et l'écoulement en cheminée se fait dans une zone confinée au dessus de l'orifice de vidange, alors une partie du matériau reste stagnante le long de la paroi. La zone d'écoulement peut rejoindre les parois à un certain niveau dans le silo, ou remonter jusqu'à la surface libre. (Figure 2.1(b)).

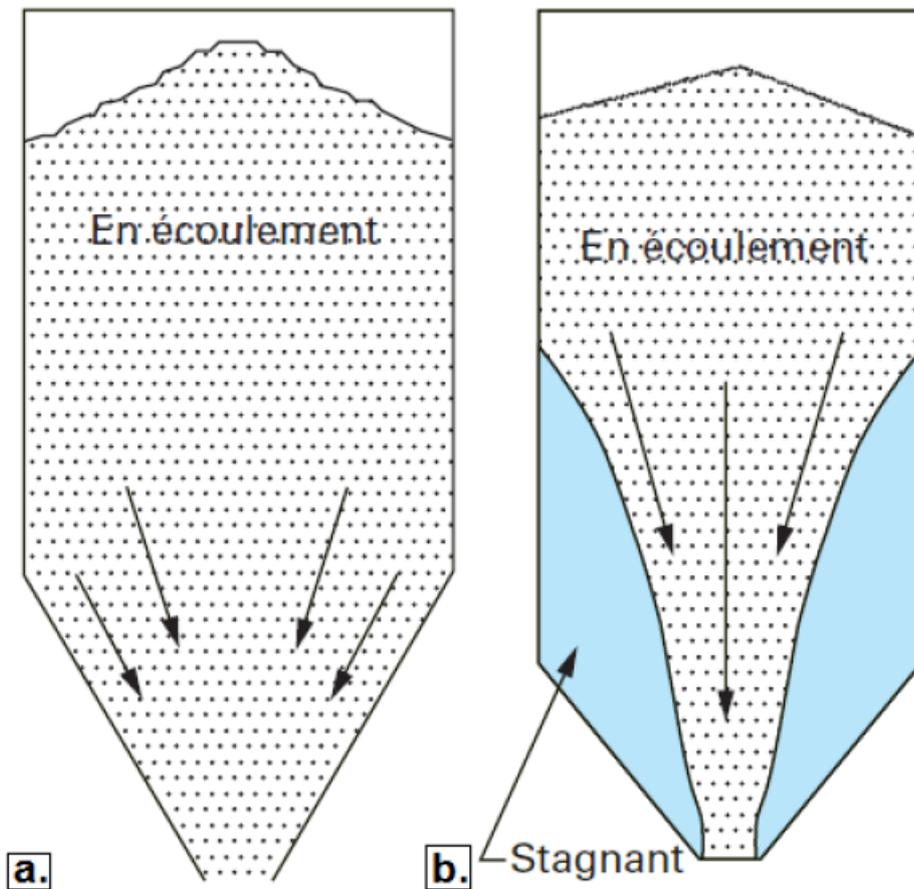


Figure 2.1. Représentation des modes d'écoulement ; (a) Écoulement en masse, (b) Écoulement en cheminée.

2.3 Débit d'écoulement

A la sortie d'un silo le débit massique d'un matériau granulaire est indépendant de la hauteur de la matière dans le silo ([13], [14]), mais ce dépend du diamètre de l'orifice D , du diamètre de particule d_p , de la masse volumique du matériau ρ , de l'accélération de la pesanteur g , du coefficient de la friction grain-grain et grain-paroi des particules ainsi que de la forme du silo.

Une analyse dimensionnelle sur ces paramètres donne une relation empirique pour le débit massique d'un matériau granulaire de la forme suivante :

$$\dot{M} = C \rho \sqrt{g} D^{5/2} \quad (2.1)$$

C : étant une constante adimensionnelle dépendant essentiellement des caractéristiques géométriques du silo.

Après des expériences sur l'écoulement gravitaire du sable et des semences, Beverloo et al. (1961) trouvent que le débit de sable et de semences est respectivement proportionnel à

$D^{2,77}$ et $D^{2,95}$, ils ont trouvé aussi que la déviation de l'exposant par rapport à la valeur de 2,5 et a cause de l'existence d'une zone vide adjacent au bord de l'orifice, et l'existence de cette zone n'est pas vérifiée expérimentalement (figure 2.2). Ils ont proposé la corrélation suivante : [14]

$$\dot{M} = C \rho \sqrt{g} (D - k d_p)^{5/2} \quad (2.2)$$

d_p : Est le diamètre moyen des particules

k : Une constante empirique et adimensionnelle qui dépend seulement de la forme des particules. Égale 2,9 pour le sable et qui vaut entre 1,3 et 1,4 pour les semences.

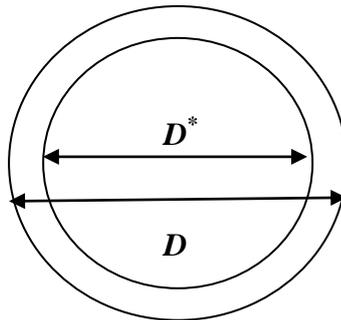


Figure 2.2. La zone vide adjacente au bord de l'orifice.

Avec : $D^* = D - k d_p$

L'équation 2.2 est obtenue pour un silo à fond plat et elle est valable pour des silos avec une trémie de faible angle, mais cette équation n'est plus valable pour des grandes valeurs d'angle de la trémie.

❖ l'effet de l'angle de la trémie α pour un silo cylindrique et orifice circulaire

Rose et Tanaka(1959) [15], ont trouvé que le débit massique est proportionnel à $F(\alpha, \beta)$ où :

$$F(\alpha, \beta) = (\tan \alpha / \tan \beta)^{-0.35}, \quad \alpha \leq \beta \quad (2.3)$$

$$F(\alpha, \beta) = 1, \quad \alpha > \beta \quad (2.4)$$

α : L'angle de la trémie. (Figure 2.3 (A)).

β : Est l'angle entre l'axe vertical est la limite de la zone stagnante dans un silo à fond plat (figure 2.3 (B)).

Et Nedderman (1992) combine le résultat de Rose et Tanaka avec la corrélation de Beverloo pour obtenir l'équation suivante :

$$\dot{M} = 0.58 \rho \sqrt{g} (D - k d_p)^{5/2} F(\alpha, \beta) \quad (2.5)$$

L'équation 2.5 est appelée la corrélation RTBN (Rose-Tanaka-Beverloo-Nedderman). Si on n'a pas la valeur de β Nedderman (1992) [16] propose l'utilisation de $\beta = 45^\circ$.

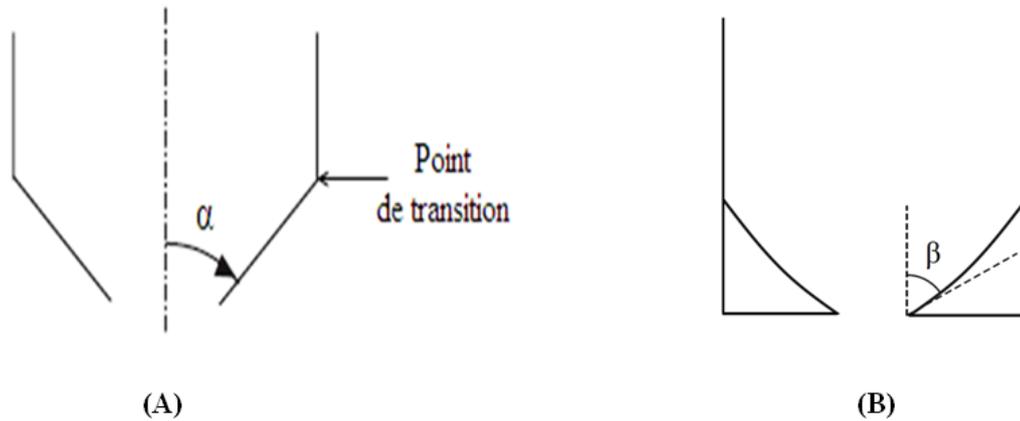


Figure 2.3. L'angle de la trémie α (A), l'angle β (B).

❖ **l'effet de l'angle de la trémie α pour un silo cylindrique et orifice non circulaire**

Fowler et Glastonbury (1959) [17] et Brown et Richards (1959) [18] proposent l'utilisation d'une échelle de la vitesse basée sur le diamètre hydraulique D_h .

Avec : $D_h = 4A/P$

A : est la section de l'orifice.

P : le périmètre de l'orifice. Avec la conception de la zone vide et l'équation 2.5 devient

$$\dot{M} = 0.74 \rho A_* \sqrt{g D_{h*}} F(\alpha, \beta) \quad (2.6)$$

L'étoile indique la considération de la zone vide.

❖ **Pour un orifice rectangulaire**

Pour $B \gg D \gg d_p$

D, B : Sont la largeur et la longueur de l'orifice respectivement (Figure 2.4(a)).

Selon l'équation 2.6 le débit massique varie avec une échelle de $BD^{3/2}$ au lieu de $D^{5/2}$.

L'équation 2.6 peut être écrite pour une valeur adimensionnelle V_D selon l'équation suivante :

$$V_D = \frac{\dot{M}}{\rho A \sqrt{g D}} \quad (2.7)$$

A : est la section de l'orifice

D : la largeur pour un orifice rectangulaire ou le diamètre pour un orifice circulaire, l'équation (2.7) devienne [19] :

$$V_D = 0.74 F(\alpha, \beta) G(kd_p, B, D) \quad (2.8)$$

Où G est une fonction adimensionnelle donnée par la relation suivante :

$$G = \sqrt{2} [1 - (kd_p/D)] [1 - (kd_p/B)] \sqrt{\frac{[1 - (kd_p/D)] [1 - (kd_p/B)]}{1 + \left(\frac{D}{B}\right) - \left(\frac{2kd_p}{B}\right)}} \quad (2.9)$$

Pour une trémie rectangulaire (Figure 2.4(a)), et par :

$$G = [1 - (kd_p/D)]^{5/2} \quad (2.10)$$

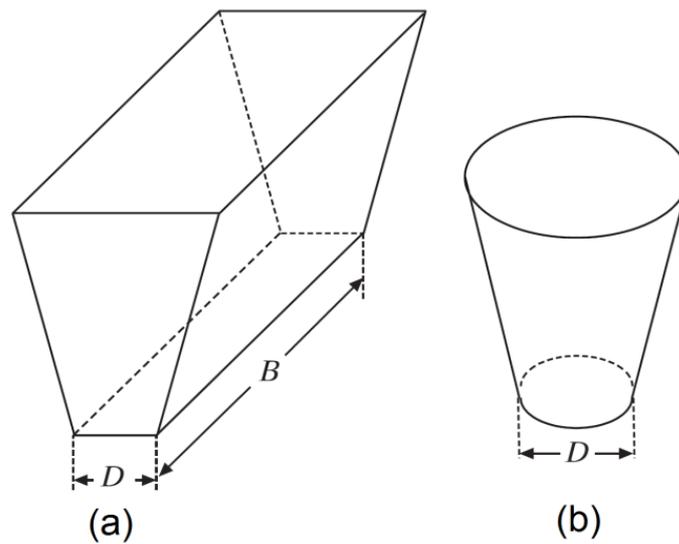


Figure 2.4. Trémie rectangulaire (a), trémie conique (b).

Il y'a d'autres corrélations comme :

➤ **La corrélation d'Al-Din et Gunn (1984) [20] pour un orifice rectangulaire**

$$\dot{M} = 0.5684 F_p \rho \sqrt{g} \left(\frac{A}{D^2}\right) (D - d_p)^{2.5} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0.154} \quad (2.11)$$

$F_p = 1$ pour les particules sphériques.

$F_p = 0,75$ pour des particules angulaires.

$F_p = 0,32$ pour des particules plates.

➤ **La corrélation de Brown et Richards (1970) [21] pour un silo avec trémie**

- **Orifice circulaire**

$$\dot{M} = \rho\sqrt{g} \pi(D - kd_p)^{2.5} \frac{1 - \cos^{1.5} \alpha}{6 \sin^{2.5} \alpha} \quad (2.12)$$

- **Orifice rectangulaire**

$$\dot{M} = \rho\sqrt{g} \pi B(D - kd_p)^{1.5} \frac{\sqrt{\alpha}}{2 \sin \alpha} \quad (2.13)$$

2.4 Distribution de la vitesse

L'analyse de la distribution de la vitesse nécessite la connaissance du mécanisme qui contrôle l'écoulement pour la détermination des équations gouvernantes. Il y a deux types de modélisation : la première est la modélisation cinématique, le principe de cette modélisation est que les particules sont écoulées par l'occupation de l'espace laissé par la particule située dans la couche inférieure. Dans ce cas les profils de vitesse dépendent des facteurs géométriques, et ils sont indépendants de la distribution des contraintes. La deuxième modélisation est basée sur la théorie de plasticité où on suppose que les vecteurs des vitesses et les tenseurs des contraintes sont liés par une certaine loi d'écoulement.

2.4.1 Modélisation cinématique

Litwiniszyn (1971) [22] a supposé que les particules sont prisonnières dans une configuration des cages théoriques (figure 2.5), et si la particule quitte la cage 3 elle doit être remplacée par une des deux particules dans les cages 1 et 2. Ces deux cages ont une probabilité p et q ($q=1-p$), le calcul de la probabilité p pour que la cage à du coordonnées (x,y) soit évacuée donnée l'équation suivante:

$$E \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial P}{\partial y} = \gamma \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (2.14)$$

E et γ sont des coefficients.

➤ **Pour le cas où $p=q=0.5$ et $E=0$ cette équation devient :**

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \gamma \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

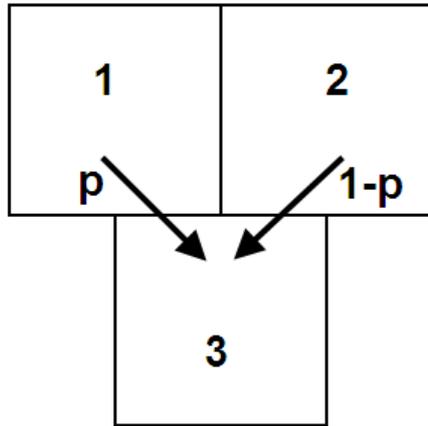


Figure 2.5. Les cages théoriques de Litwiniszyn.

Nedderman et Tüzün (1978) [23], ont introduit une proposition pour ce modèle. Le principe de ce modèle peut être expliqué par trois particules 1, 2 et 3 (figure 2.6), si la vitesse vers le bas de la particule 1 est plus grande que la particule 2 il y aura une tendance de la particule 3 pour se déplacer vers la place de la particule 1, cela peut être écrit par cette équation :

$$u = f\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{2.16}$$

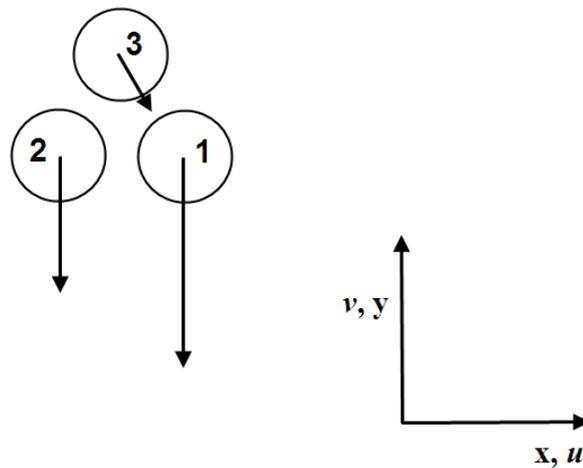


Figure 2.6. Le modèle cinématique de Nedderman et Tüzün.

La forme la plus simple de l'équation 2.16 est la suivante :

$$u = -B \frac{\partial v}{\partial x} \tag{2.17}$$

B : Est une constante qui dépend de la nature de la matière.

u et v : Les valeurs du module de vitesse horizontale et verticale respectivement selon les axes x et y .

Pour un fluide incompressible dans un cas bidimensionnel on peut écrire une équation de continuité à deux dimensions :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

La substitution de u par sa valeur dans l'équation 2.17 donne la relation suivante :

$$\frac{\partial v}{\partial y} = B \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2.19)$$

On peut voir qu'il y a une similitude entre les trois propositions.

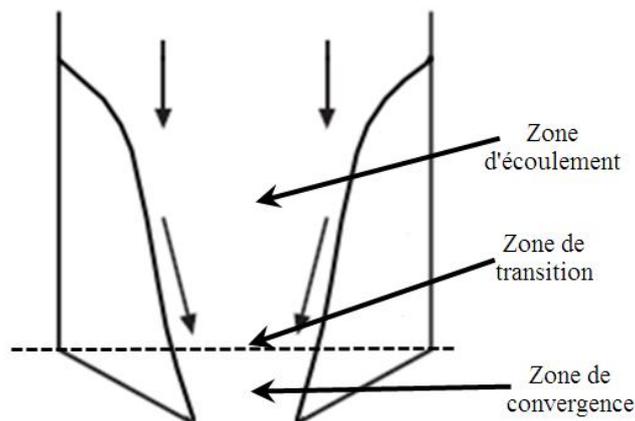


Figure 2.7. Les différentes zones d'écoulement.

La forme de l'équation 2.19 est identique aux formes des équations de diffusion dont les solutions sont disponibles pour beaucoup de situations géométriques.

• **La solution dans la zone de convergence** (figure 2.7) [16].

$$v = -\frac{Q}{\sqrt{4\pi B y}} \exp\left(-\frac{x^2}{4B y}\right) \quad (2.20)$$

Q : Le débit volumique par unité de longueur pour un orifice rectangulaire étroit [$\text{m}^3/\text{s.m}$], alors de l'équation 2.17, on a

$$u = -\frac{Q}{\sqrt{(4\pi By)}} \frac{x}{2y} \exp\left(-\frac{x^2}{4By}\right) \quad (2.21)$$

• **La solution dans la zone d'écoulement de l'équation 2.19** [16].

Pour la zone d'écoulement dans un silo à fond plat avec une largeur $2a$ et un orifice d'une largeur $2b$, on considère que la vitesse des grains uniforme égale ($\frac{aV_0}{b}$) à des grandes valeurs de hauteur de silo, avec V_0 la vitesse à partir de l'orifice, les conditions aux limites doivent être les suivantes :

1. Au niveau de la base, la valeur de la vitesse verticale v est nulle sauf à l'orifice où elle est considéré constante, alors :

$$y = 0, v = \frac{aV_0}{b} \text{ pour } 0 < x < \pm b; v = 0 \text{ pour } \pm b < x < \pm a$$

2. Au niveau des parois et dans la ligne centrique la valeur de la vitesse horizontale u est nulle, de l'équation 2.17.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ à } x = 0 \text{ et } x = a$$

Par la méthode de séparation de variable (méthode Fourier), on obtient les deux valeurs de vitesse horizontale u et verticale v [16] :

$$v = \frac{V_0 b}{a} + \sum_n \frac{2V_0}{n\pi} e^{-\frac{n^2 \pi^2 B y}{a^2}} \sin \frac{n\pi b}{a} \cos \frac{n\pi x}{a} \quad (2.22)$$

Et

$$u = \sum_n \frac{2BV_0}{a} e^{-\frac{n^2 \pi^2 B y}{a^2}} \sin \frac{n\pi b}{a} \sin \frac{n\pi x}{a} \quad (2.23)$$

Pour un profil de vitesse de sortie triangulaire on a :

$$v = 2V_0 \left(1 - \frac{x}{b}\right) \text{ pour } 0 < x < \pm b, \text{ et } v = 0 \text{ } \pm b < x < \pm a$$

Et les vitesses u et v sont données par :

$$v = \frac{V_0 b}{a} + \sum_n \frac{4V_0 a}{bn^2 \pi^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 B y}{a^2}} \left(1 - \cos \frac{n\pi b}{a}\right) \cos \frac{n\pi x}{a} \quad (2.24)$$

Et

$$u = \sum_n^{\infty} \frac{4V_0B}{bn\pi} e^{-\frac{n^2\pi^2By}{a^2}} \left(1 - \cos \frac{n\pi b}{a}\right) \sin \frac{n\pi x}{a} \quad (2.25)$$

Les équations de la modélisation cinématique montrent que ce modèle ne dépend pas de la distribution des contraintes au sein du silo et elle dépend d'un coefficient de diffusion et des facteurs géométriques du silo.

2.4.2 Modélisation par la théorie de plasticité

La distribution de vitesse par la théorie de plasticité nécessite la connaissance de la distribution des contraintes au cours d'écoulement par des relations gouvernantes contrairement au modèle cinématique qui ne tient pas compte de cette distribution, qui sont l'objet de beaucoup d'études approfondies.

2.5 Techniques de mesure de la distribution de vitesse des grains

2.5.1 Méthodes 2D

➤ La Méthode visuelle :

Cette méthode consiste à repérer à travers une paroi transparente des particules marquées pour suivre leur position pendant l'écoulement. Elle nécessite un silo quasi-2D, La détermination des champs de vitesses nécessite l'utilisation de caméras, (méthode utilisée par Medina et al., 1998a; Chou et al., 2002).

C'est une méthode qui est relativement simple à mettre en œuvre, mais il est très difficile de travailler sur beaucoup de particules à la fois. De plus l'influence des parois sur l'écoulement est difficilement quantifiable.

➤ PIV : Particle Image Velocimetry

La PIV est une amélioration de la méthode visuelle, où les traceurs ne sont pas obligatoires. La mesure de la vitesse par la technique PIV est faite par la différence de position d'une particule dans deux images successives avec un intervalle de temps déterminé. Cette différence permet de déterminer un vecteur de vitesse entre les deux positions dans un système de coordonnées (x,y).

La surveillance de la déformation est obtenue par des caméras modernes de haute sensibilité avec un système de luminosité spécial. Ces caméras permettent l'acquisition des images digitales par la projection de l'image sur des capteurs numériques sensibles à la lumière appelés pixels, chaque capteur transforme le signal optique en un signal numérique et

l'image obtenue se décompose selon le nombre de pixels, ce concept conduit à la résolution d'image qui est le nombre de pixels par pouce au carré. La résolution d'image doit être suffisante. L'image d'une particule individuelle doit être composée de quelques pixels. On a une autre propriété importante de la caméra réside dans la vitesse d'obtention d'image mesurée en image par seconde fps (*frame per second*).

➤ **Radiographie**

Les rayons X pénètrent facilement la «matière molle» (matière solide peu dense et constituée d'éléments légers), ils sont fortement absorbés par la «matière dure» (matière solide dense constituée d'éléments lourds). Cette méthode a été utilisée avec des silos quasi-2D (Tüzün et al., 1982) [15].

2.5.2 Méthode 3D

➤ **IRM : Imagerie par Résonance Magnétique**

Cette méthode permet de faire des images en coupes dans différents plans et de reconstruire en trois dimensions la structure analysée. L'IRM nécessite un ensemencement ; celui-ci peut-être réalisé avec des traceurs. Chevoir et al. (2001) ont introduit des graines de moutarde. Il est aussi possible de recouvrir certaines particules du matériau granulaire utilisé avec une substance adéquate (de l'huile silicone à été utilisée par Porion et al, 2004).

L'analyse permet d'obtenir des résultats sur l'ensemble de l'écoulement en trois dimensions. Par contre, l'IRM n'est pas envisageable pour des silos de grandes dimensions.

➤ **PEPT : *Position émission particule tracking***

Dans la technique PEPT une particule émettrice de positron serve comme un traceur et elle est suivie par une caméra spéciale appelée « *positron camera* ». Le rayonnement envoyé par le traceur est détecté par les deux côtés de la caméra et avec un algorithme de traitement des données on peut obtenir le parcours de la particule traceur et les données obtenues sont des structures des parcours en trois dimensions des grains en écoulement.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DU BLE

3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est l'étude de l'écoulement gravitaire de blé dans un silo parallélépipédique en plexiglas. Pour mener à bien ce travail, nous avons commencé par une caractérisation du matériau, puis une étude de débit par la mesure de débit d'écoulement avec des différents paramètres qui sont l'inclinaison de la trémie et le diamètre de l'orifice de silo. Et on termine ce travail par une étude de la distribution de vitesse des grains par une technique moderne qui est la technique PIV (*particule image velocimetry*).

3.2 Caractérisation

3.2.1 Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans cette étude est le blé qui est un matériau largement utilisé dans le domaine d'agriculture et d'alimentation. De par sa forme homogène et de sa taille, il rend cette étude plus facile. Le blé est considéré comme un matériau granulaire sec, se présente sous la forme des grains cylindriques arrondi de couleur jaune paille (figure 3.1), sa taille est clairement supérieure à 100 μm .

Les forces de cohésion peuvent être négligées, ceci implique que nous pouvons négliger les effets dû aux forces de Van der Waals et d'Humidité.



Figure 3.1. Échantillon de blé.

3.2.2 Granulométrie

Nous avons mesuré à l'aide d'un pied à coulisse la taille des grains de blé choisis aléatoirement, en déterminant la longueur **l** et le diamètre **d** représentés sur la (figure 3.2).

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.1.

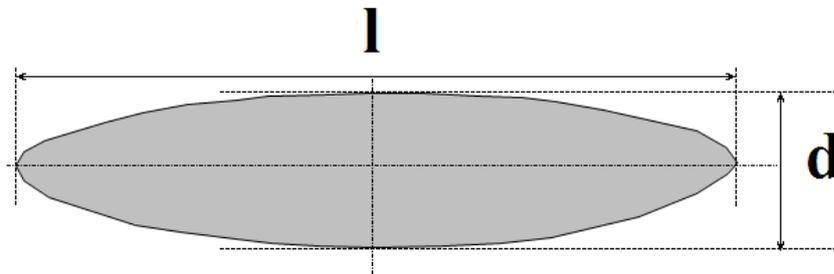


Figure 3.2. Les deux grandeurs **l** et **d**.

Tableau 3.1. Résultats des mesures des deux grandeurs **l** et **d**.

N° d'essai	Mesure I (grain 1)	Mesure II (grain 2)	Mesure III (grain 3)
l (mm)	7,7	7,5	8,6
l_m	7,93 mm		
d (mm)	3,0	3,3	3,8
d_m	3,37 mm		

Nous avons calculé la moyenne entre **l_m** et **d_m** et le résultat obtenu sont 5,65 mm pour **d_{moy}**.

3.2.3 Masse volumique

A l'aide d'une éprouvette graduée nous avons mesuré les deux masses volumiques réelle et apparente en vrac de notre matériau.

➤ Masse volumique apparente en vrac :

On distingue deux types de la masse volumique apparente en vrac : la masse volumique apparente en vrac non tassée et tassée.

Pour déterminer ces valeurs il faut remplir l'éprouvette par une quantité des grains pour un volume bien déterminé. Pour cela nous choisissons un volume de 100 ml que l'on remplit aléatoirement par le matériau, puis nous avons pesé la masse de blé. Et par une simple

division de la masse par le volume nous obtiendrons la masse volumique apparente en vrac pour une quantité non tassée. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Résultats des essais de mesure de la masse volumique apparente en vrac non tassée.

N° d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
V (ml)	100	100	100
M (g)	79,92	78,2	79,2
Masse volumique apparente en vrac (g / cm ³)	0,799	0,782	0,792
Masse volumique apparente en vrac moyenne	0,791 (g/cm ³)		

Par la même méthode que précédemment nous avons déterminé la masse volumique apparente en vrac tassée. Nous avons effectué un tassement du blé par compression (la compression est faite par un bâton de bois avec une tête plate). Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Résultats des essais de mesure de la masse volumique apparente en vrac tassée.

N° d'essai	Essais 1	Essai 2	Essai 3
V (ml)	100	100	100
M (g)	84,52	85,80	85,09
Masse volumique apparente en vrac (g / cm ³)	0,845	0,858	0,850
Masse volumique apparente en vrac moyenne	0,851 (g/ cm ³)		

On remarque d'après ces résultats que la variation de la masse volumique apparente en vrac du blé n'est pas grande.

➤ **Masse volumique réelle**

Pour la détermination de la masse volumique réelle on remplit une éprouvette graduée avec un volume $V_1 = 140$ ml d'eau et on pèse un échantillon sec $M = 60$ g de blé choisi aléatoirement puis on l'introduit dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette, on lit le nouveau volume V_2 (Figure 3.3), la masse volumique réelle (ou de solide) est calculée par la relation suivante:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (3.1)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.4.

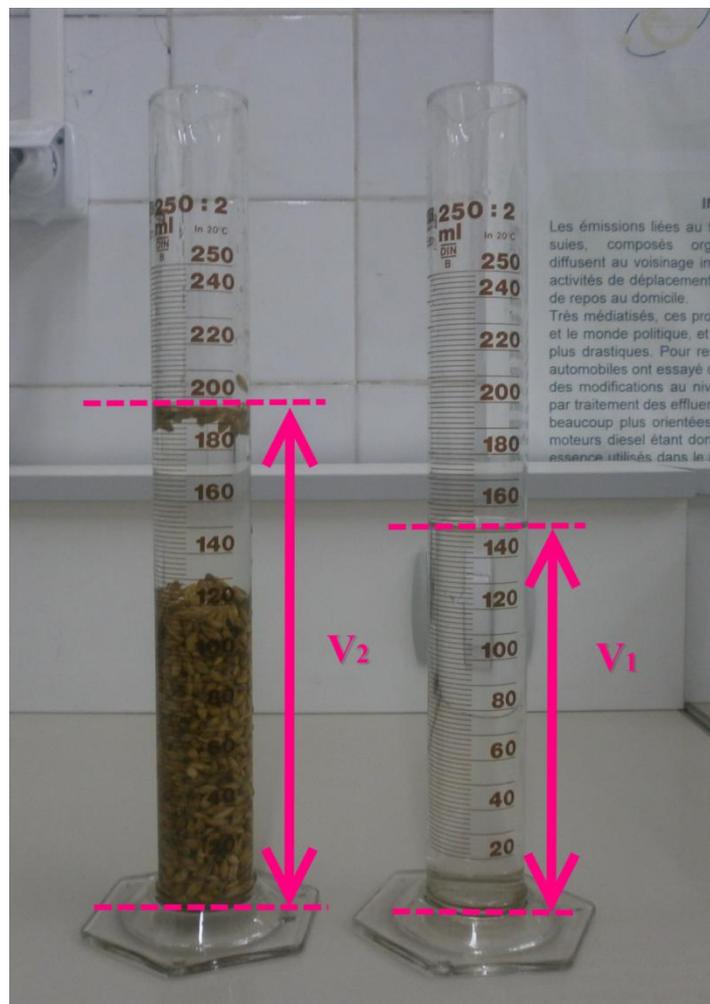


Figure 3.3. Essai de mesure de la masse volumique réelle.

Tableau 3.4. Résultats des essais de mesure de la masse volumique réelle.

N° d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M (g)	60	60	60
V₁ (ml)	140	140	140
V₂ (ml)	186	185	186
Masse volumique réelle (g/cm³)	1,30	1,33	1,30
Masse volumique réelle moyenne	1,31(g/cm³)		

La masse volumique réelle (ou de solide) est une quantité constante et dépendante de la nature de matériau granulaire, contrairement à la masse volumique apparente.

3.2.4 Calcul de la porosité et de la fraction de solide

À partir de la masse volumique réelle on peut calculer la porosité et la fraction de solide pour les deux cas non tassé et tassé. On peut écrire :

$$\varepsilon = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \quad (3.2)$$

ρ_r : La masse volumique de solide.

ρ_a : La masse volumique apparente.

Selon l'équation 1.2 on peut calculée la fraction de solide :

$$v = 1 - \varepsilon \quad (3.3)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Résultats de calculs de la compacité et la porosité pour les deux cas tassé et non tassé.

	Non tassé	Tassé
Compacité	0,604	0,65
Porosité	0,396	0,350

3.2.5 Mesure de l'angle de talus (ou d'éboulement)

Pour déterminer cet angle on réalise une expérience qui consiste à fixer un entonnoir sur un support, on remplit l'entonnoir avec du blé, il va se déverser régulièrement sur le plan horizontal ; la mesure du diamètre du tas a été faite deux fois et celle de la hauteur du tas une seule fois (Figure 3.4). L'angle de talus (ou d'éboulement) θ est calculée par la relation suivante :

$$\theta = \arctan \frac{4 \times h}{D_1 + D_2} \quad (3.4)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 3.6.

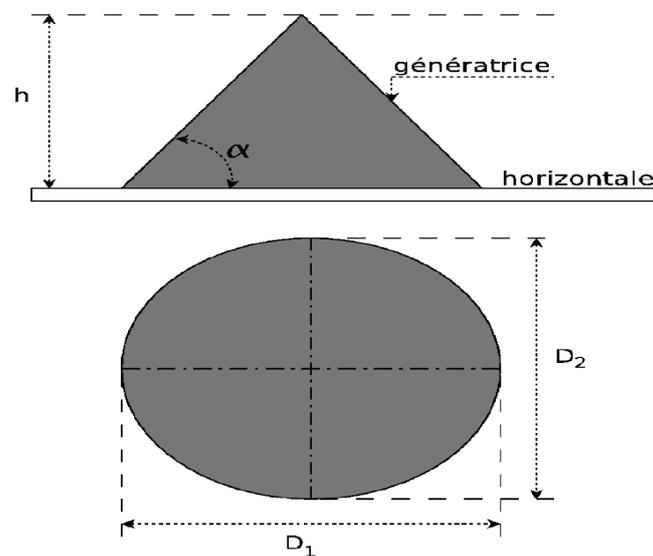


Figure 3.4. Représentation des paramètres à relever lors de la mesure de l'angle d'éboulement.

Tableau 3.6. Résultats de mesure de l'angle de talus.

N° d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
H (cm)	8	7,11	7,58
D ₁ (cm)	32	28,7	30,3
D ₂ (cm)	32,3	28,8	30,2
θ	26,4°	26,3°	26,6°
θ_{moy}	26,43°		

3.2.6 Mesure de l'angle de frottement interne et de la coulabilité

L'essai de cisaillement consiste à déterminer deux paramètres intrinsèques du blé : l'angle de frottement interne φ et la coulabilité. Les mesures sont effectuées par une cellule de cisaillement par translation de type Casagrande (figure 3.5). Il est réalisé dans le laboratoire de travaux publics de l'Est (LTPE) situé à la ville d'Annaba.

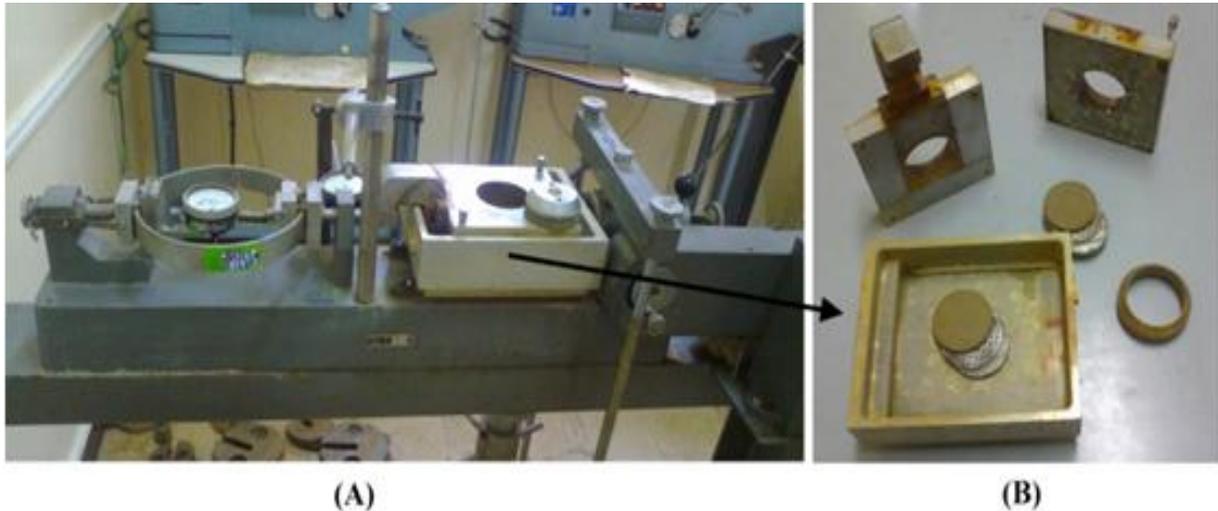


Figure 3.5. Machine de cisaillement de LTPE (A) ; boîte de cisaillement (B).

L'essai consiste à soumettre le blé à un cisaillement direct, la boîte de cisaillement est composée de deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Après on applique une charge normale (0,250 bars, 0,5 bars et 0,750 bars). La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse de 1,2 mm/min. Et des lectures de la charge tangentielle τ sont prélevées à chaque déplacement de 0,25 mm. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure.

Après l'obtention des valeurs des contraintes de cisaillement sous les différentes charges normales, la valeur de l'angle de frottement interne et de coulabilité sont obtenues par le traçage d'une droite de tendance entre les valeurs des contraintes obtenues dans un plan (τ, σ) . La pente de cette droite est la tangente de l'angle de frottement interne et l'intersection de cette droite avec l'axe des τ est la valeur de coulabilité.

Les valeurs obtenues sont : 11° pour l'angle de frottement et 0,112 bars pour la coulabilité.

Tableau 3.7. Valeurs des contraintes de cisaillement des trois essais (fourni par LTPE).

S ₀ (mm ²)	0.25 bars		0.5 bars		0.75 bars	
	anneau	contrainte	anneau	contrainte	anneau	contrainte
28.1	18,0	0,076	18	0,076	49	0,209
28.0	28	0,120	26	0,111	64	0,274
27.9	33	0,141	31	0,133	73	0,314
27.7	35	0,151	33	0,142	82	0,355
27.5	36	0,157	38	0,165	91	0,397
27.4	37	0,162	41	0,179	96	0,420
27.2	36	0,158	38	0,167	98	0,432
27.1	33	0,146	41,5	0,163	101	0,447
27.0	32	0,142	44		103	0,457
26.8			47		110	0,492
26.7					113	0,507
26.5					115	0,520
26.3					116	0,529
26.2					118	0,540
26.0					119	0,549
25.9					120	0,556
25.7					121	0,544
25.4					120	0,539
25.3						
25.2						
25.0						
24.8						
24.7						

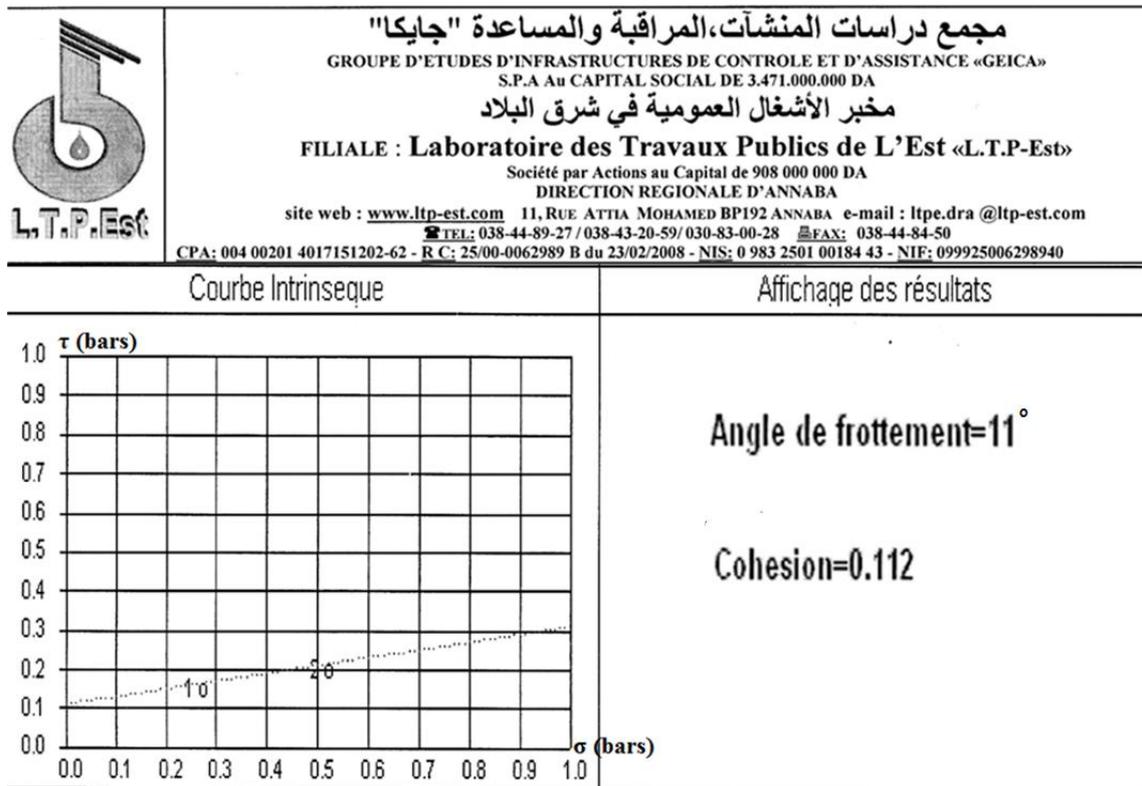


Figure 3.6. Traçage de la droite de la tendance par LTPE.

Les résultats obtenus pour la caractérisation de blé sont résumés dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8. Résultats de caractérisation de blé.

Propriété	Valeur	
Taille des grains	d_{moy}	5,65 mm
Masse volumique apparente en vrac	Non tassé	0,791g/cm ³
	Tassé	0,851g/cm ³
Masse volumique réelle	1,31g/cm ³	
Porosité de la couche	Non tassé	0,396
	Tassé	0,350
Compacité	Non tassé	0,604
	Tassé	0,65
Angle de talus	26,46°	
Angle de frottement interne	11°	
Coulabilité	0,0112 bars	

CHAPITRE 4

ETUDE DU DEBIT D'ECOULEMENT
ET LA DISTRIBUTION DE VITESSE
DES GRAINS

4.1 Mesure de débit

Nous avons fait une étude de débit par la mesure de débit d'écoulement avec des différents paramètres qui sont l'inclinaison de la trémie et le diamètre de l'orifice de silo.

4.1.1 Matériel utilisé

Le matériel utilisé est un silo parallélépipédique en plexiglas de dimension (largeur = 83cm, hauteur = 100 cm, épaisseur = 10 cm) a été fabriqué à Alger pour le laboratoire de génie de l'environnement du département de Génies des Procédés.

Le silo contient un orifice rectangulaire avec la possibilité de réglage à différents diamètre et différents trémies et des plaques en plexiglas (Figure 4.1).

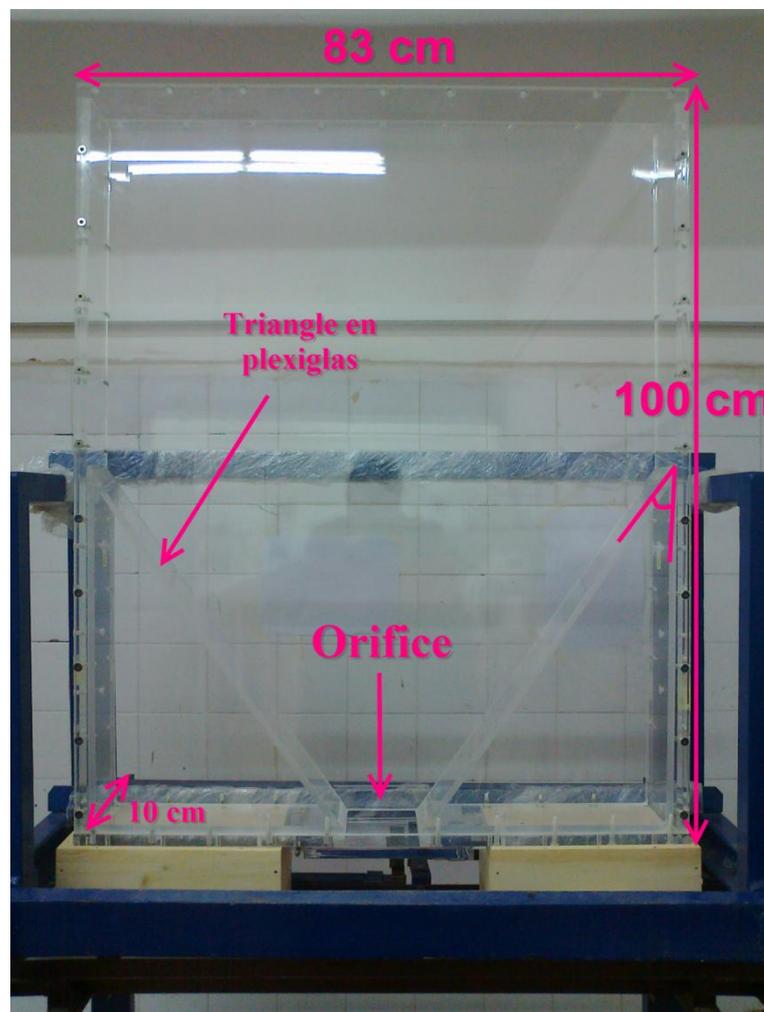


Figure 4.1. Silo utilisé.

Le chargement du silo se fait manuellement, lors de vidange le blé est récupérée dans un bac situé sur une balance, cette dernière est connectée à un ordinateur branché avec l'ordinateur qui permet d'afficher le poids de blé versé dans le bac et de calculer le débit.

4.1.2 Les essais de mesure de débit

L'expérience consiste à remplir le silo par une masse de blé bien définie en faisant varier l'angle de la trémie de 35°, 45° à 55° et le diamètre de l'orifice.

Pour le cas d'absence de la trémie: Les ouvertures sont de 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm et 100 mm. Et pour chaque valeur d'angle (35°, 45°, 55°) de la trémie nous avons considéré les ouvertures suivantes : 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, et 100 mm.

Premièrement nous avons effectué une mesure de l'angle des zones mortes, qui forment pendant l'écoulement du blé sur les cotés de l'ouverture du silo pour le cas d'absence de la trémie ces dernières forment deux angles ϕ_1 et ϕ_2 , l'angle de vidange ϕ_{moy} est calculé par la moyenne des deux angles. Les angles sont calculés par la relation suivante :

$$\tan \phi_i = \frac{h_i}{a_i} \quad (4.1)$$

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 4.1.

Tableau 4.1. L'angle de la zone morte.

N° d'essais	Essais 1	Essais 2	Essais 3
ϕ	30,31°	30,4°	29,76°
ϕ_{moy}	30,10°		

Après l'obtention de valeur de l'angle de la zone morte nous avons entamé la mesure de débit. Avec une mode opératoire qui réalise plusieurs écoulements, par la variation de diamètre de l'orifice pour chaque valeur de l'angle de la trémie.

4.1.2.1 Mesure de débit dans le cas d'absence de la trémie

Nous avons tamisé auparavant le blé pour enlever toutes les impuretés (verre, bois, paille... etc.) et après nous avons rempli manuellement le silo par une masse de blé supérieure à 40 kg puis nous avons libéré le blé en ouvrant l'orifice, l'enregistrement est fait d'une façon automatique par l'ordinateur qui lié au calculateur et une balance électrique. Pour chaque diamètre de l'orifice nous avons réalisé trois essais. Et après nous avons traité les résultats et représentés se forme graphiques. La valeur du débit est obtenue par le calcul de la pente d'une droite de tendance pour chaque graphe puis le calcul de la valeur moyenne des pentes des trois graphes.

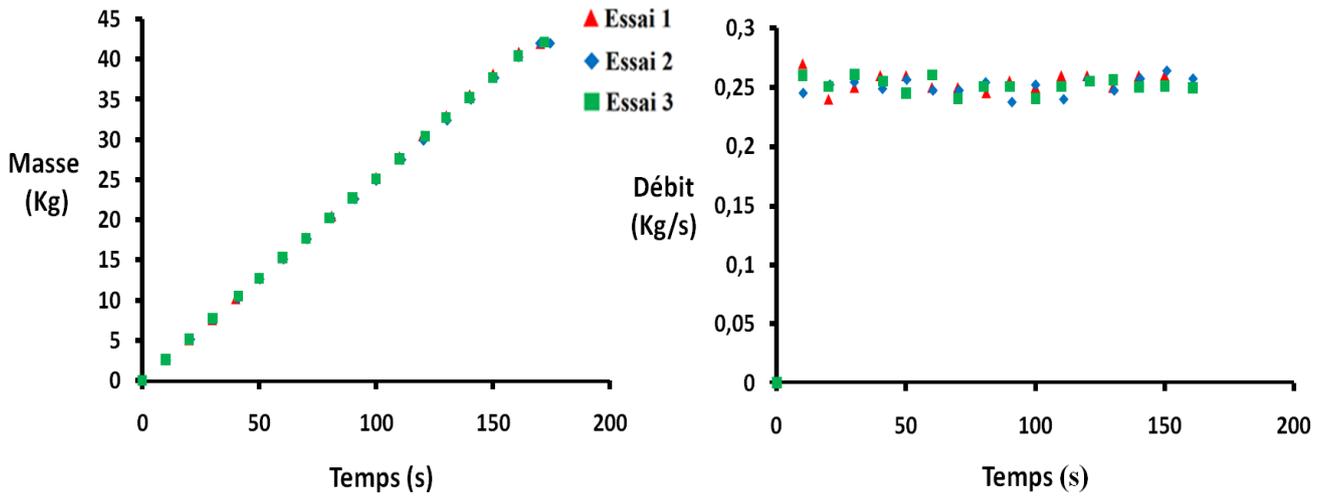


Figure 4.2. Variation de la masse et du débit en fonction du temps. D=20mm, $\dot{m}= 0,248\text{kg/s}$.

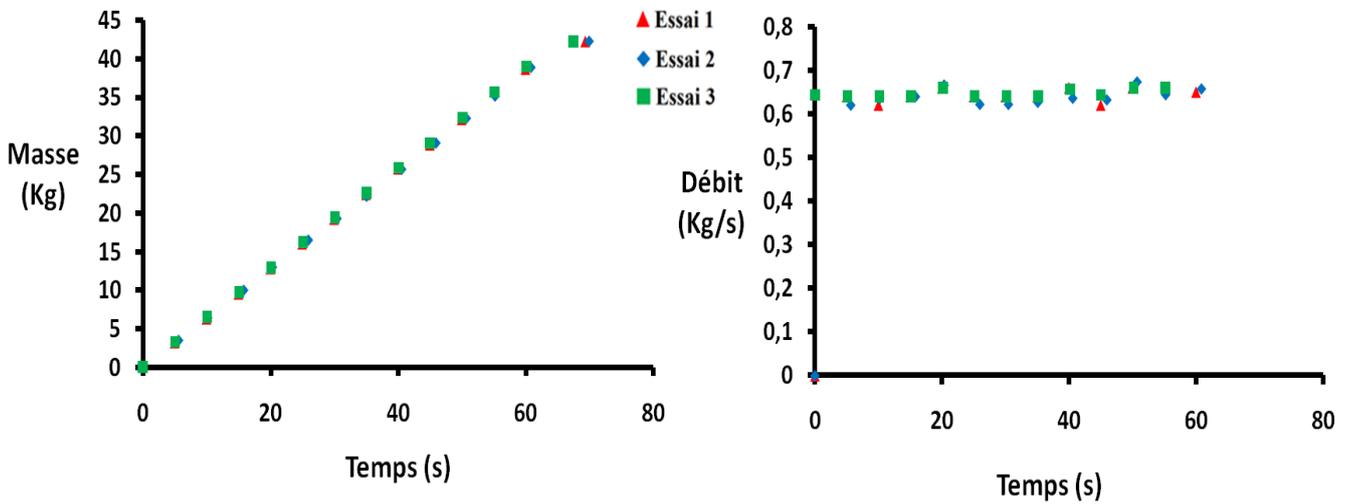


Figure 4.3. Variation de la masse et du débit en fonction du temps. D=30mm, $\dot{m}= 0,641\text{ kg/s}$

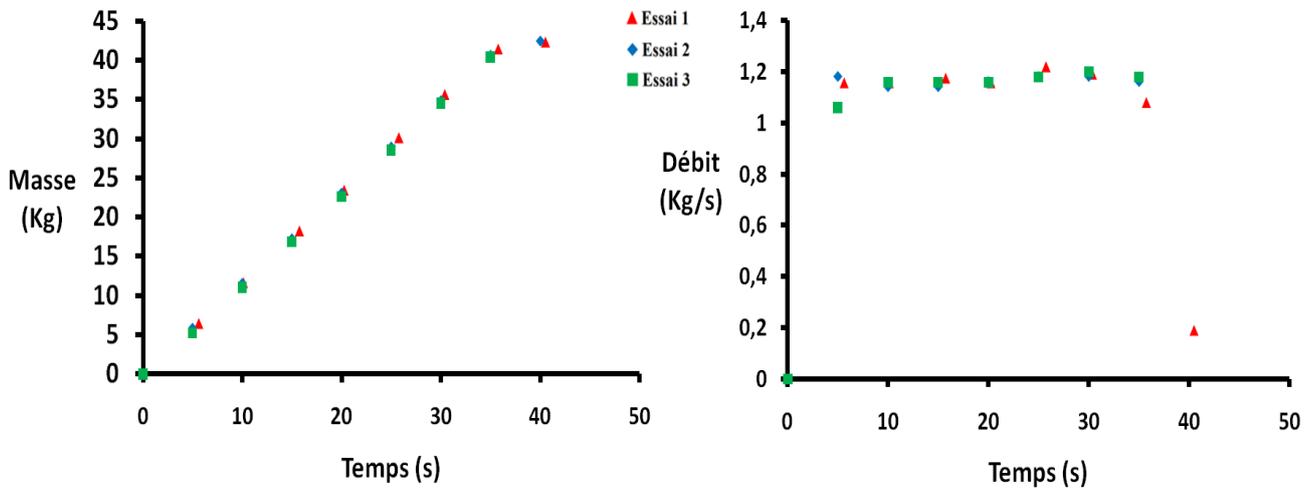


Figure 4.4. Variation de la masse et du débit en fonction du temps. D=40mm, $\dot{m}= 1,167\text{ kg/s}$.

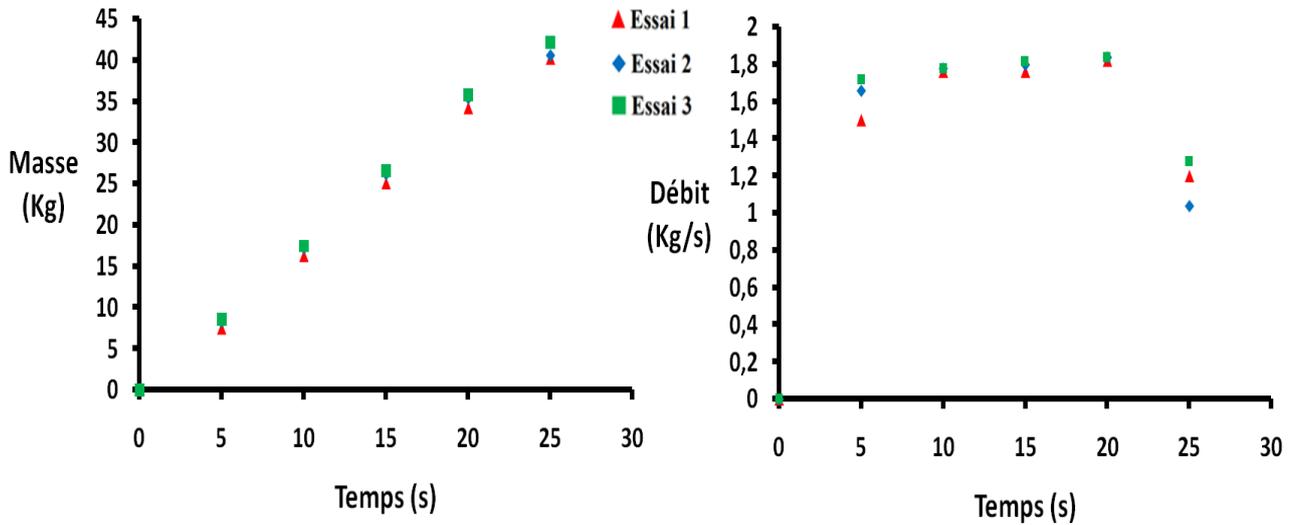


Figure 4.5. Variation de la masse et du débit en on fonction du temps. D=50mm, $\dot{m}=1,77\text{kg/s}$.

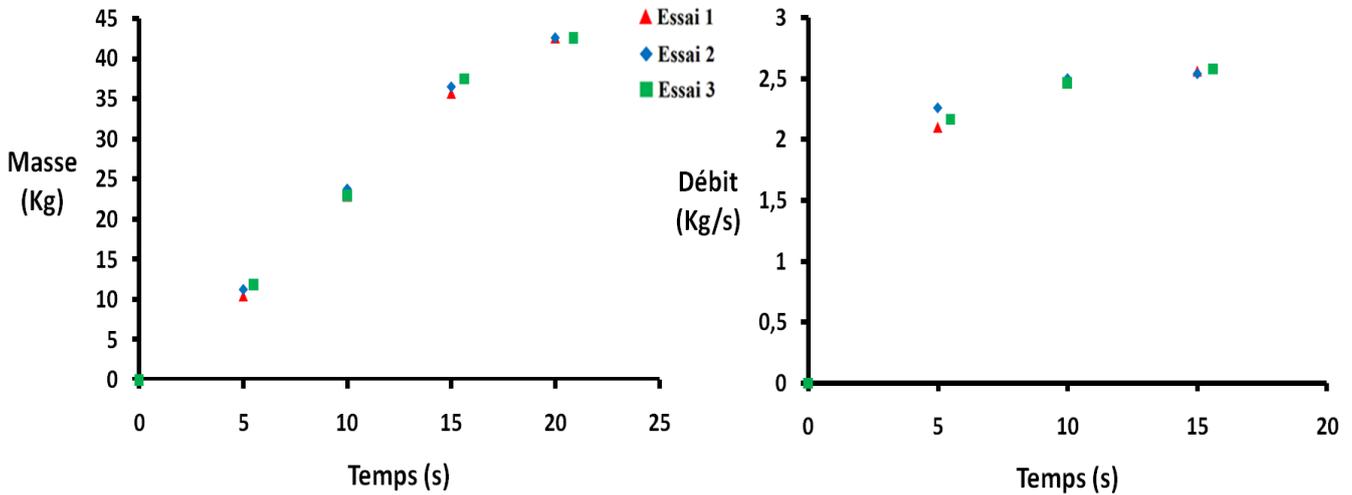


Figure 4.6. Variation de la masse et du débit en on fonction du temps. D=60mm $\dot{m}=2,436\text{kg/s}$.

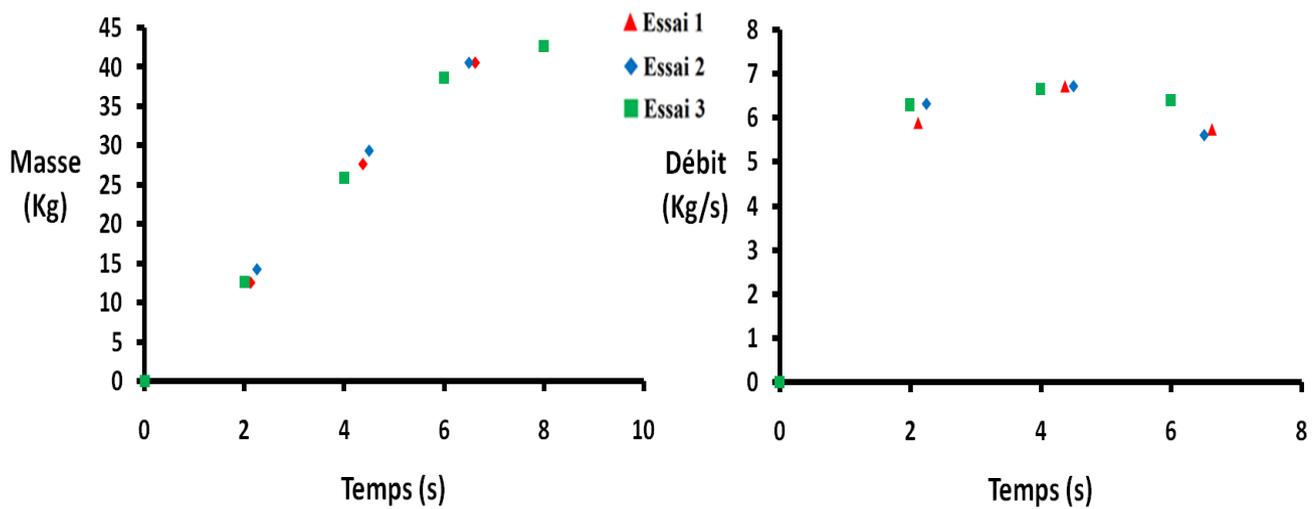


Figure 4.7. Variation de la masse et du débit en on fonction du temps. D=100, $\dot{m}=6,553\text{kg/s}$.

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Valeurs des débits obtenus (sans trémie).

D (mm)	20	30	40	50	60	100
\dot{m} (kg/s)	0,248	0,641	1,167	1,77	2,436	6,553

4.1.2.2. Mesure du débit dans le cas de présence de la trémie (35°,45°,55°)

Après la mesure du débit pour le cas d'écoulements dans un silo à fond plat nous avons entamé la mesure du débit dans le cas de la présence de la trémie, c'est le même mode opératoire que la première, grâce à la bonne reproductibilité des résultats obtenus nous avons limité le nombre des essais a deux pour chaque diamètre (Annexe 1). Les valeurs du débit pour chaque angle sont représentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Valeurs des débits obtenus pour les différentes trémies 35°,45° et 55° et pour chaque diamètre.

35°	D (mm)	20	40	60	80	100
	\dot{m} (kg/s)	0,43	1,52	2,78	4,81	7,20
45°	D (mm)	20	40	50	80	100
	\dot{m} (kg/s)	0,36	1,40	1,85	4,69	6,98
55°	D (mm)	20	40	60	80	100
	\dot{m} (kg/s)	0,33	1,20	2,49	4,32	6,21

4.1.3 Estimation de la valeur du débit

Après le calcul de débit par les équations données dans le paragraphe 2.3, nous avons fait un calcul supplémentaire pour l'équation (B&R) par le remplacement de la valeur de α par son complément. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 4.8.

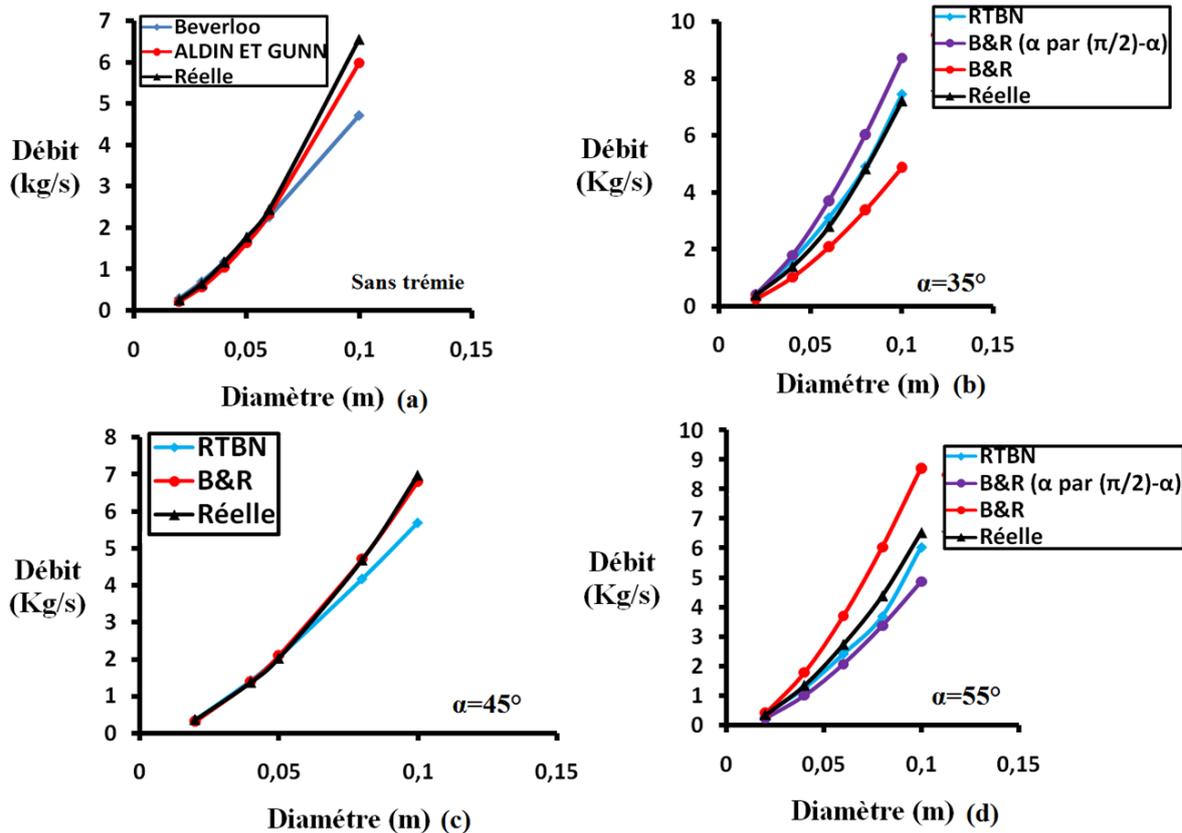


Figure 4.8. Comparaison entre la variation du débit (réel) avec le diamètre de l'orifice D ; (a) sans trémie, (b) trémie 35° , (c) trémie 45° , (d) trémie 55° .

➤ Interprétation des résultats

A partir du tableau n°2 et n°3 nous avons remarqué que le débit a une valeur constante et elle augmente avec l'augmentation de diamètre de l'orifice de silo. Ainsi pour le cas de présence de la trémie nous avons remarqué que avec l'augmentation de l'angle de la trémie on obtient une démunissions de la valeur de débit d'écoulement pour chaque valeur de diamètre de l'orifice de silo. D'après le calcul de débit et selon la comparaison des valeurs de débit théoriques qui sont obtenues par les équations (2.2, 2.6, 2.11 et 2.13) et représentées sur la (figure 4.8) nous avons remarqué que dans le cas d'absence de la trémie et pour un diamètre inférieure à 60 mm les résultats théoriques des modèles et pratiques sont très proches, et pour un diamètre plus grande à 60 mm les valeur de l'équation de modèle d'Al-Din et Gunn sont plus proches de la valeurs réelle que celle de l'équation de modèle de Beverloo (figure 4.8 courbe (a)). Ainsi nous avons constaté que dans le cas de la présence de la trémie, l'équation de modèle de RTBN donne des valeurs proches de la valeur réelle avec une décalage de faible variation (figure 4.8 courbes (b),(c) et (d)). Les valeurs de l'équation de modèle B&R présenté un décalage de forte variation de la valeur réelle pour les valeurs d'angle égale $35^\circ, 55^\circ$; et

pour l'angle de 45° elle est plus proche de la réalité (figure 4.8 courbe (c)). Ainsi pour réduire l'intervalle de décalage nous avons remplacé la valeur de α par son complément dans l'équation de B&R (figure 4.8 courbes (b), (d)).

4.2. Distribution de vitesse

A l'aide d'une caméra vidéo d'une vitesse de 30 fps avec une résolution HD de 1024x1920 pixel, nous avons fait une étude sur la distribution de la vitesse pendant l'écoulement et pour différents ouvertures de silo.

La méthode consiste à prendre une paire d'images extraites depuis la vidéo quand le régime est établi, et les traiter par la technique PIV (*Particle Image Velocimetry*), nous avons utilisé le programme «*PIV view*».

4.2.1 Distribution de vitesse des grains dans le cas d'absence de la trémie

Nous avons présenté sur les figures 4.9, 4.10, 4.11, la distribution de vitesse horizontale u et la vitesse verticale v des grains selon trois niveaux Y (10 cm, 25cm et 40 cm) et pour différentes ouvertures: 20 mm, 40 mm, 50 mm. (La valeur négative des deux vitesses est dû au choix des coordonnées). Nous avons observé qu'il ya une fluctuation dans les deux vitesses horizontale u et verticale v des grains cette dernière est dû au filtre utilisé par la caméra qui crée un bruit. La distribution de vitesse pour d'autres ouvertures est représentée en Annexe 2.

4.2.2 Distribution de vitesse des grains dans le cas de la présence de la trémie

Nous présentons la distribution de vitesse horizontale u et verticale v des grains pour l'ouverture 40 mm et avec les trois angles 55° , 45° , 35° , la représentation est faite selon trois niveaux Y (10 cm ,25 cm ,40 cm) sur les figures 4.12, 4.13, 4.14.

Selon la capacité de la caméra nous avons choisies ce cas parce qu'à des grands diamètres de l'orifice de silo les grains ne sont pas captés. Les résultats obtenus avec les autres ouvertures sont présentés en Annexe 2.

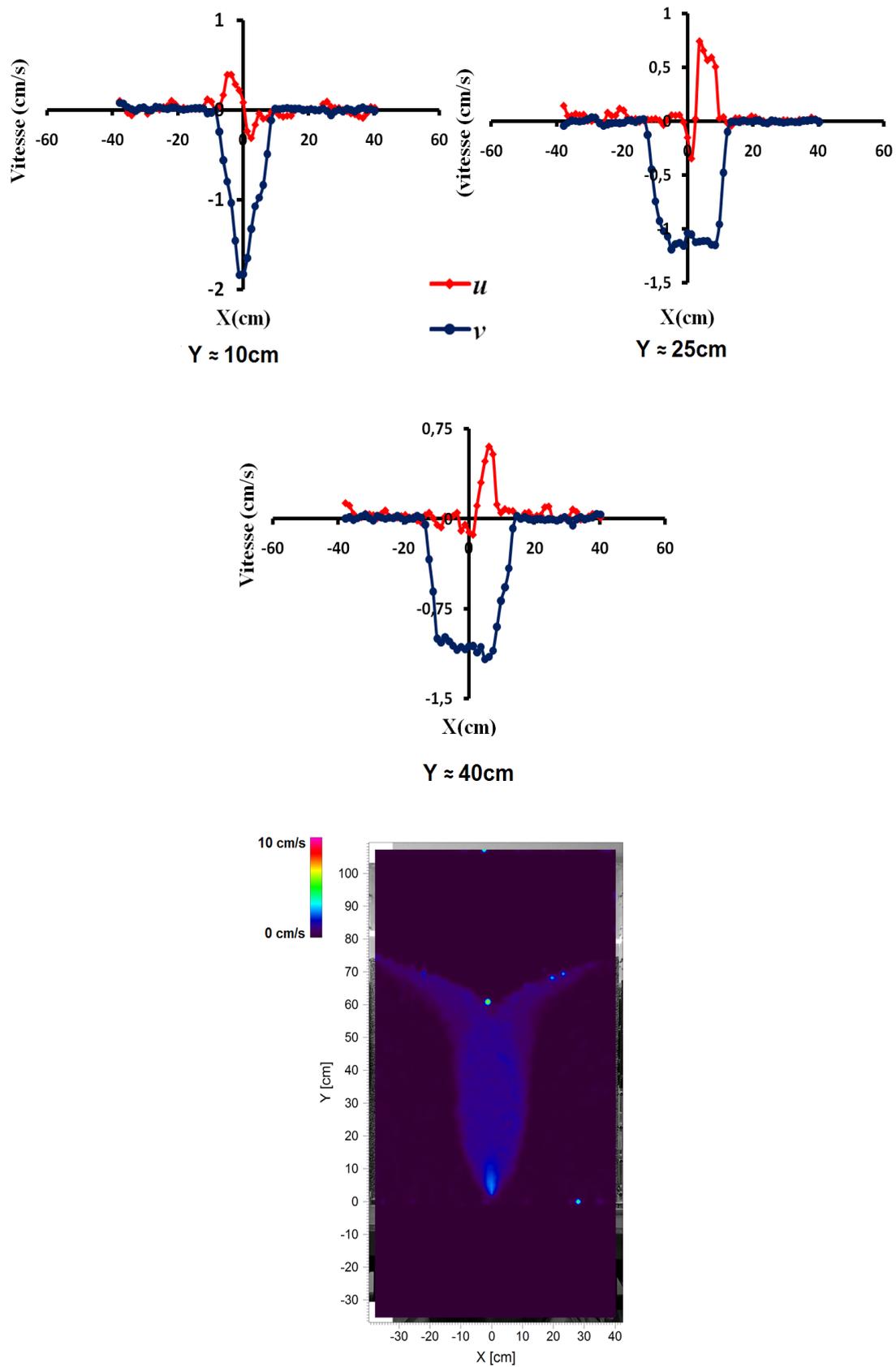


Figure 4.9. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 20\text{ mm}$.

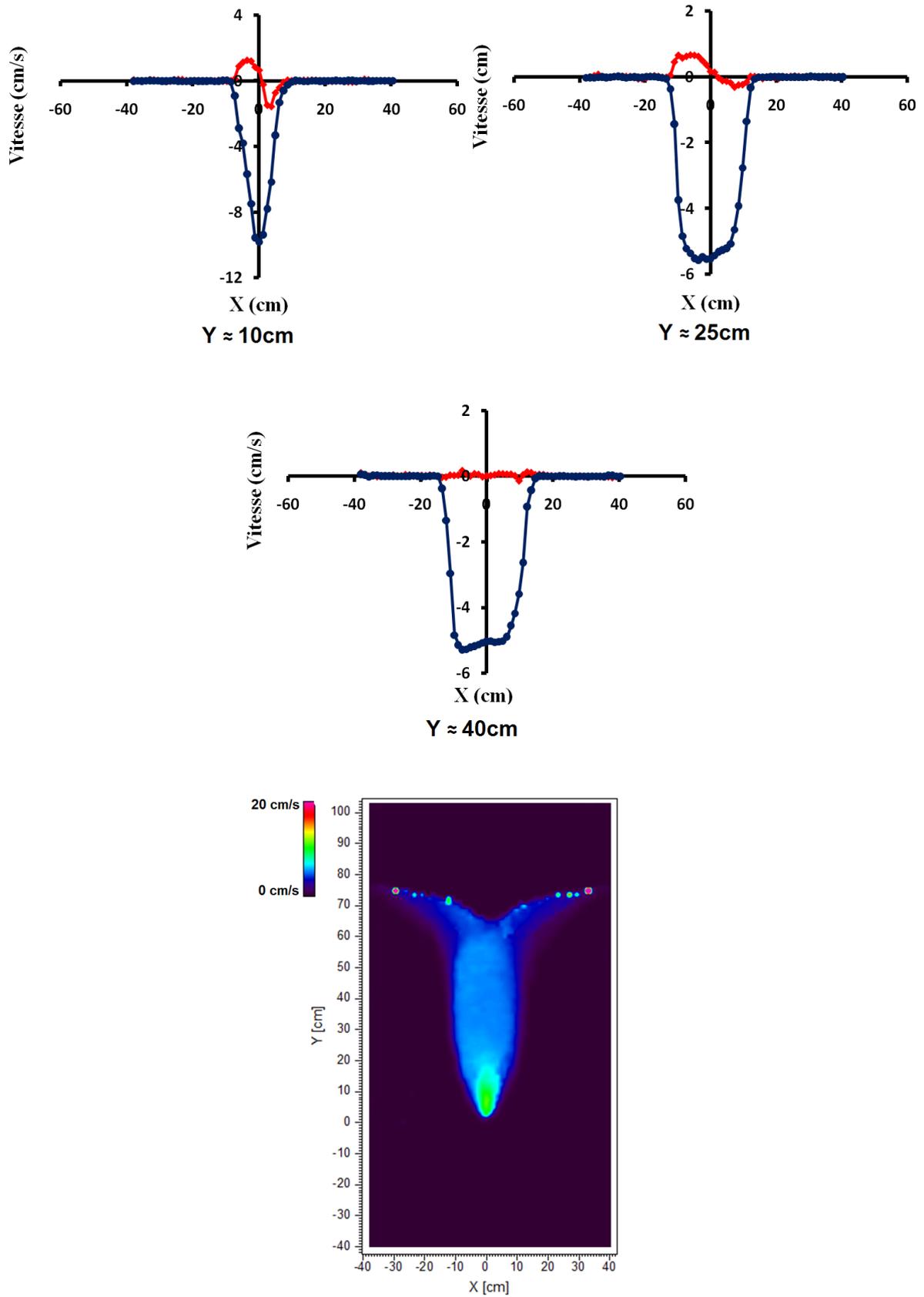


Figure 4.10. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 40\text{ mm}$.

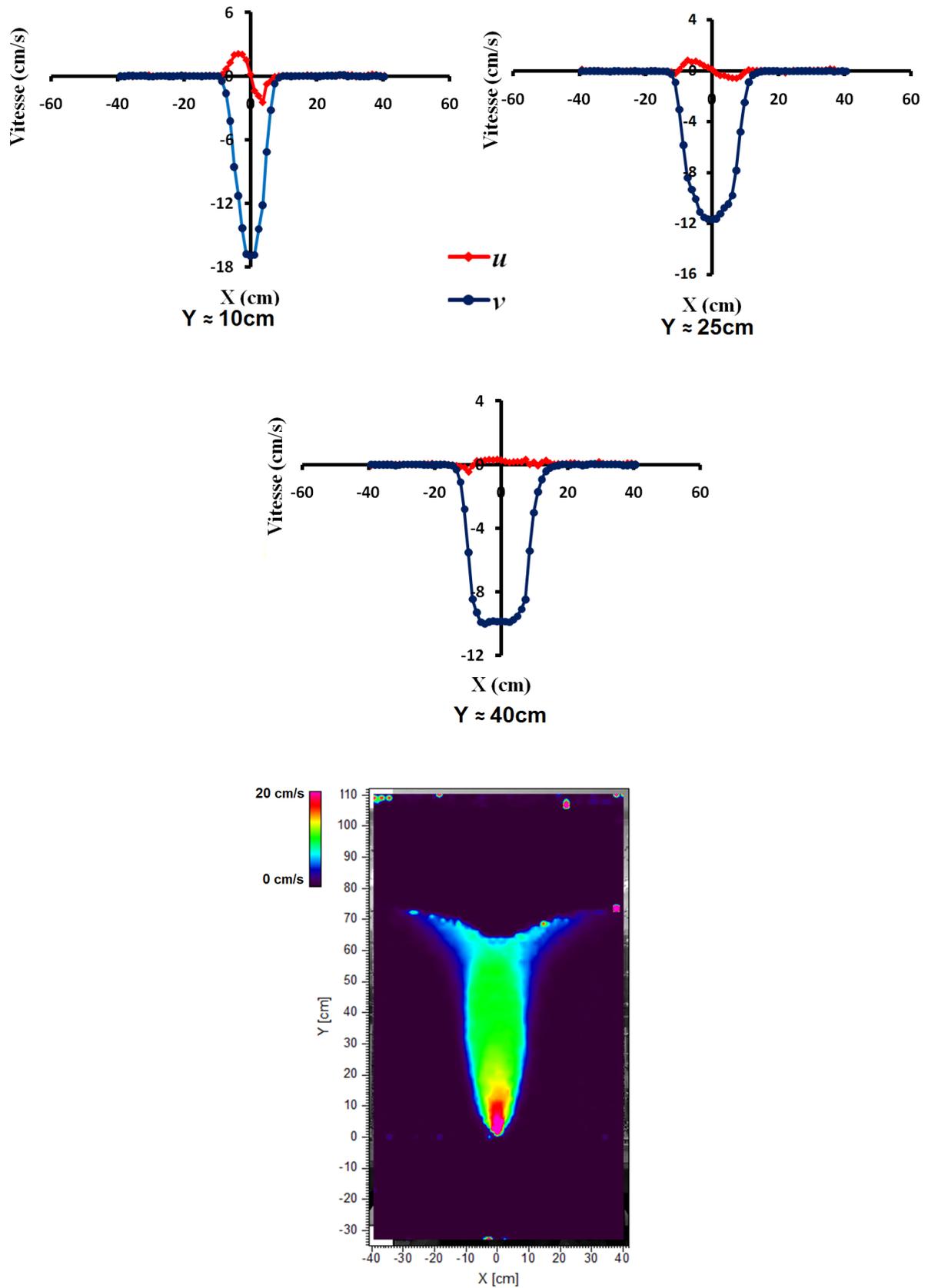


Figure 4.11. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 50\text{ mm}$.

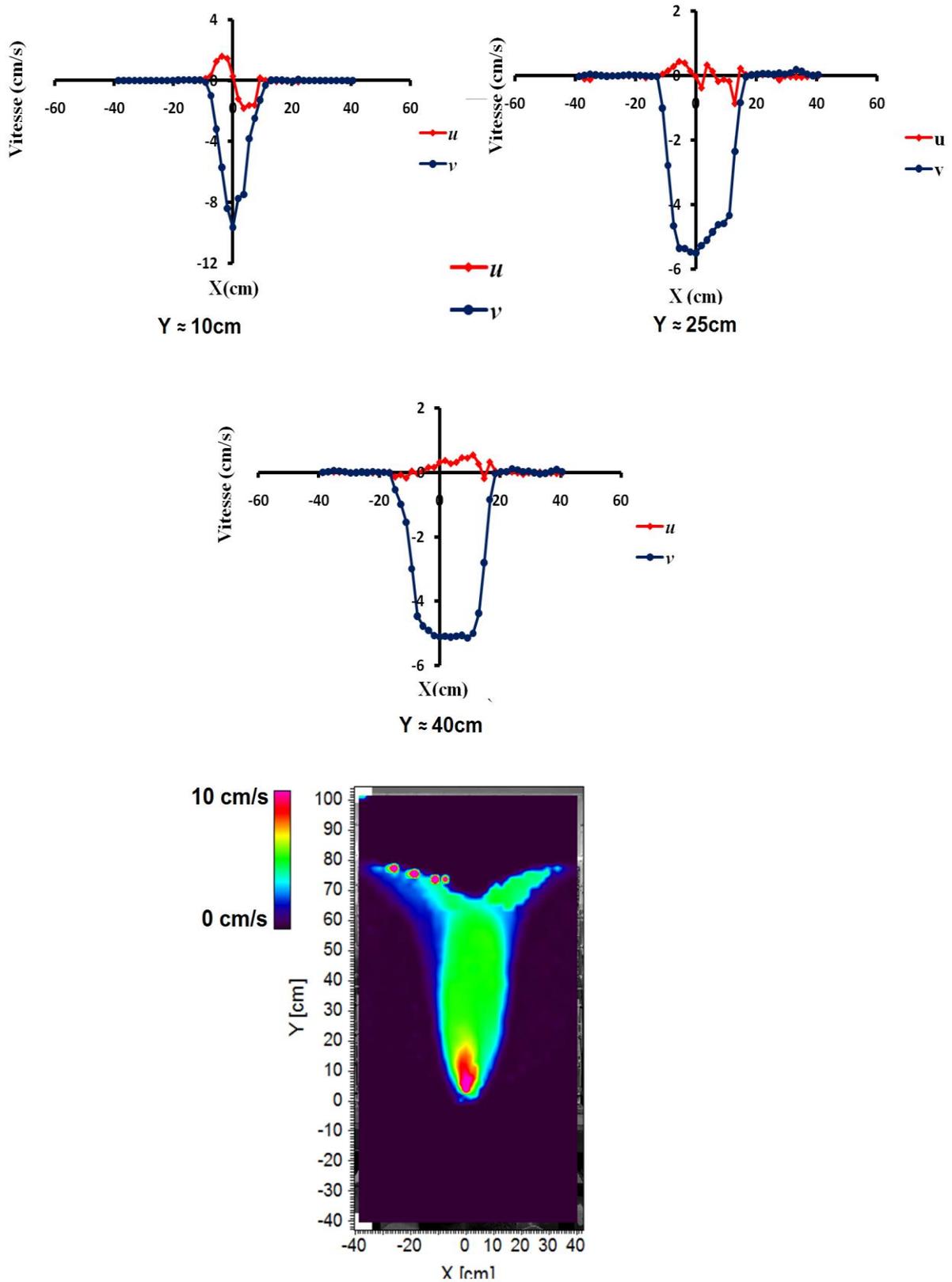


Figure 4.12. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 40$ mm et

$$\alpha = 55^\circ.$$

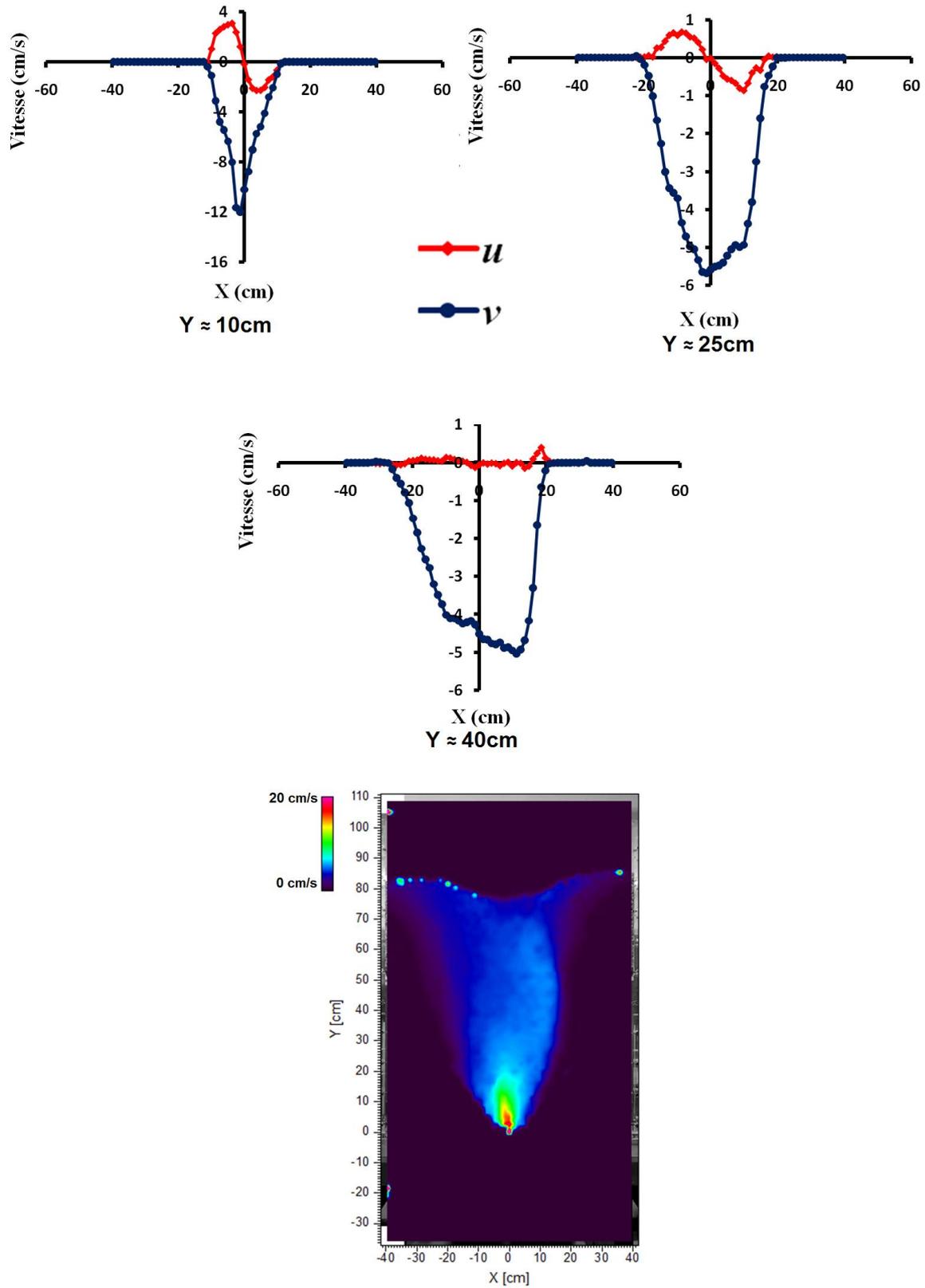


Figure 4.13. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 40$ mm et

$$\alpha = 35^\circ.$$

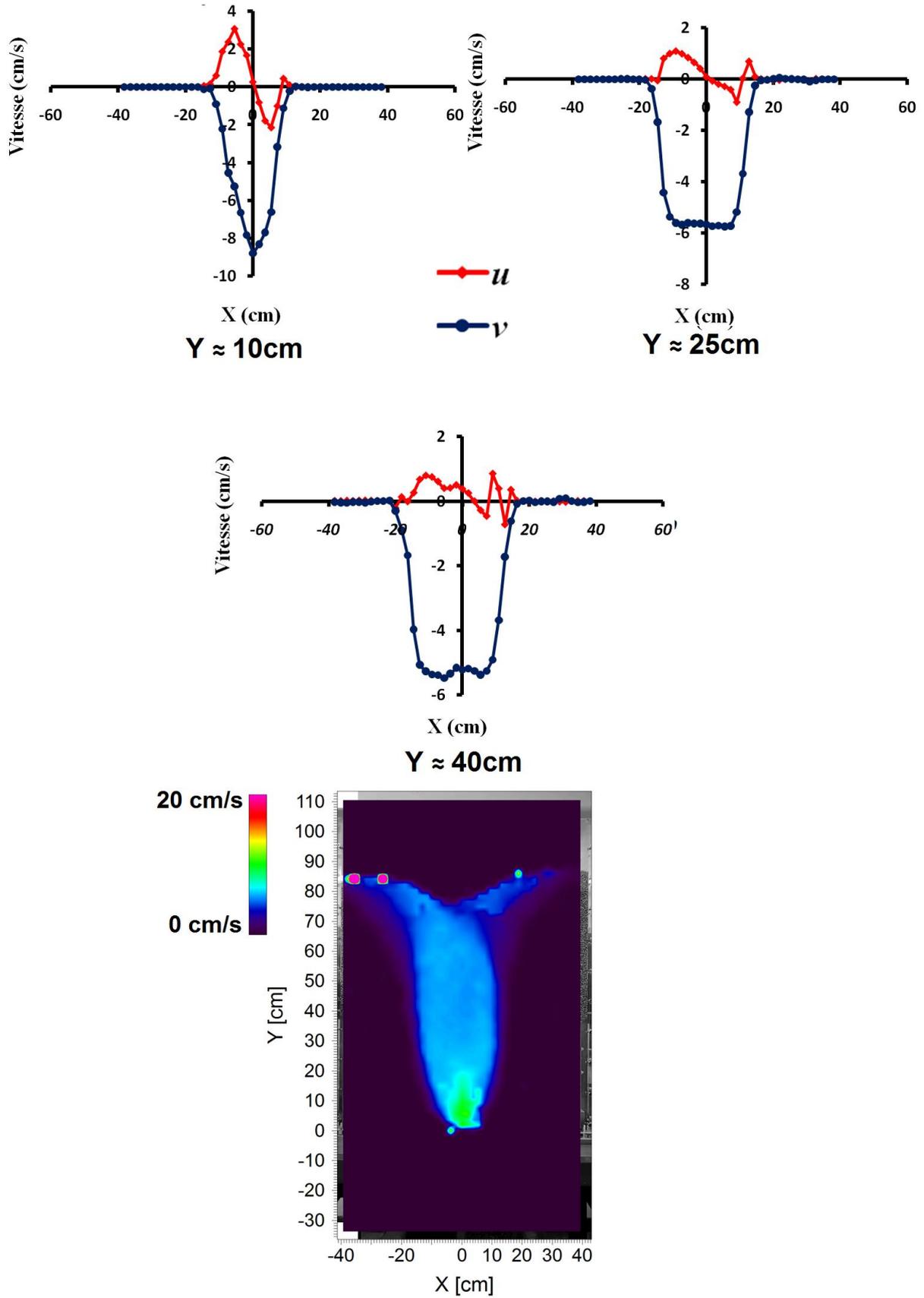


Figure 4.14. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 40\text{ mm}$ et

$\alpha = 45^\circ$.

❖ Conclusion

On peut voir d'après les graphes de la distribution de vitesse horizontale u et verticale v dans la zone de convergence ($Y= 10$ cm) pour le cas de l'absence de la trémie (Figure.4.9, 4.10 et 4.11) qu'il y a une variation importante des vitesses u et v . Et pour la zone d'écoulement ($Y = 40$ cm) nous avons remarquées qu'il y a des petites valeurs de la vitesse horizontale u avec une légère variation de la vitesse verticale v au tour de centre de la zone d'écoulement.

Pour le cas de la présence de la trémie on a les mêmes observations que le premier cas. Le mode de vue en contour de vitesse des grains pour chaque position donne une bonne présentation de distribution réelle de la vitesse.

4.2.3. Comparaison entre les résultats pratiques et théoriques

Nous avons fait une comparaison entre les résultats théoriques et pratiques dans les deux zones : la zone de convergence et la zone d'écoulement (figure 2.7).

4.2.3.1. Zone de convergence

Après le calcul des deux vitesses u et v par les équations 2.20 et 2.21 de Nedderman données dans le paragraphe 2.4.1 nous avons trouvé un décalage entre la valeur réelle de la vitesse v_0 (la vitesse verticale des grains sur l'axe des Y , $X=0$) et la valeur donnée par l'équation 2.20. Pour cette raison nous avons remplacé la valeur réelle de cette vitesse dans les équations 2.20 et 2.21. Nous avons calculé le coefficient de diffusion B par l'équation 2.21 de Nedderman et la valeur du B choisie est celle qui correspond aux résultats les plus proches du cas réel. Les résultats obtenus sont les suivants :

a) En absence de la trémie

Pour le cas d'absence de la trémie nous avons choisi la représentation de trois diamètres 40 mm, 50 mm et 60 mm.

Et pour les autres diamètres les valeurs de vitesses obtenues ne sont pas précises, pour les petits diamètres à cause de faible vitesse les mesures ne sont pas fiables, et pour des grands diamètres la vitesse de la caméra n'est pas compatible avec la vitesse des grains

➤ D = 40 mm

Tableau 4.4. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses horizontale u et v selon l'axe X pour D = 40 mm.

X (cm)	B							
	0,545 cm							
	Y				Y			
	8,57 cm				15,92 cm			
	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)
-37,97	0,06	-0,02	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
-12,24	0,03	-0,01	0,00	0,00	0,06	0,05	0,03	-0,09
-6,12	0,76	-1,88	0,51	-1,45	0,95	-5,15	0,47	-2,44
-2,44	1,57	-7,38	1,12	-7,83	0,76	-6,27	0,46	-6,05
0,00	0,58	-10,8	0,00	-10,80	-0,35	-7,20	0,00	-7,20
2,44	-0,83	-6,96	-1,12	-7,83	-1,07	-6,58	-0,46	-6,05
6,12	-0,29	-0,73	-0,51	-1,45	-1,02	-4,24	-0,47	-2,44
12,24	0,00	0,00	-0,00	-0,00	0,02	-0,01	-0,03	-0,09
37,97	-0,02	0,03	0,00	0,00	-0,00	0,02	0,00	0,00

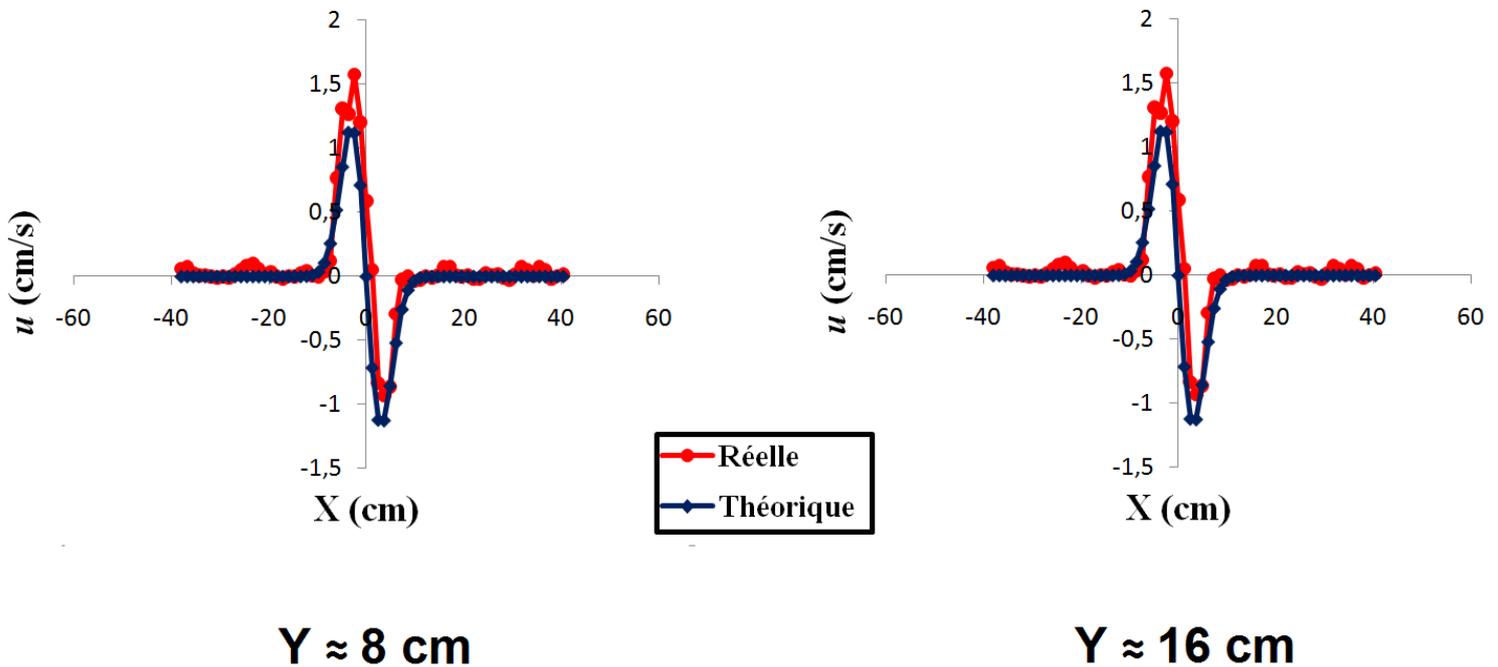


Figure 4.15. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour D = 40 mm.

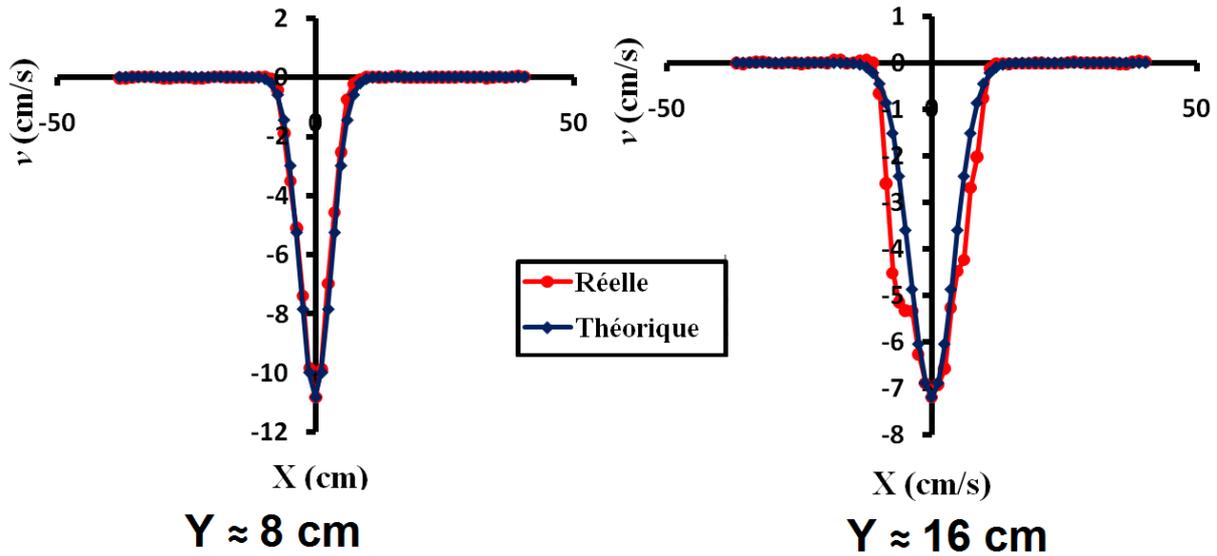


Figure 4.16. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $D = 40$ mm.

➤ $D = 50$ mm

Tableau 4.5. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $D = 50$ mm.

X (cm)	B							
	0,81 cm							
	Y				Y			
	8,57 cm				15,92 cm			
	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)
-37,97	-0,10	-0,04	0,00	0,00	0,03	-0,07	0,00	0,00
-12,24	0,03	-0,02	0,05	-0,07	-0,03	-0,02	0,29	-0,75
-6,12	-3,68	3,90	1,6	-4,48	-0,00	-0,00	1,28	-6,70
-2,44	2,71	-14,97	1,99	-13,94	0,74	-12,53	0,95	-12,35
0,00	-0,00	-17,3	0,00	-17,3	-0,13	-13,87	0,00	-13,87
2,44	-2,83	-13,36	-1,99	-13,94	-0,68	-13,82	-0,95	-12,35
6,12	-0,65	-1,93	-1,60	-4,48	-0,96	-8,01	-1,28	-6,70
12,24	-0,02	-0,03	-0,05	-0,07	0,06	-0,07	-0,29	-0,75
37,97	-0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,04	0,02	0,00	0,00

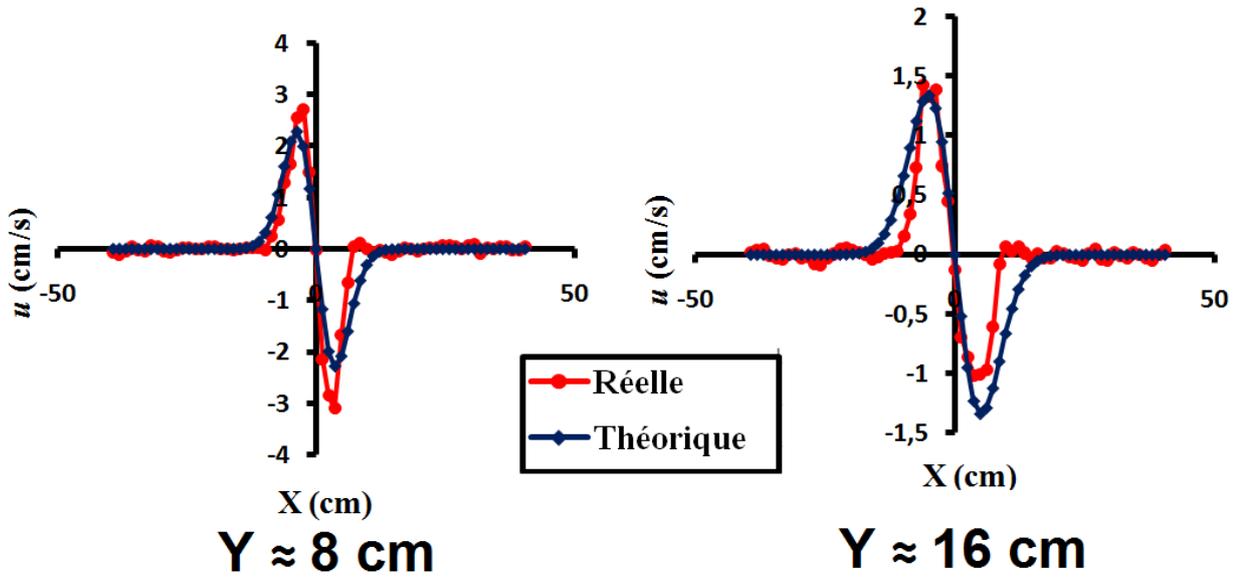


Figure 4.17. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $D = 50$ mm.

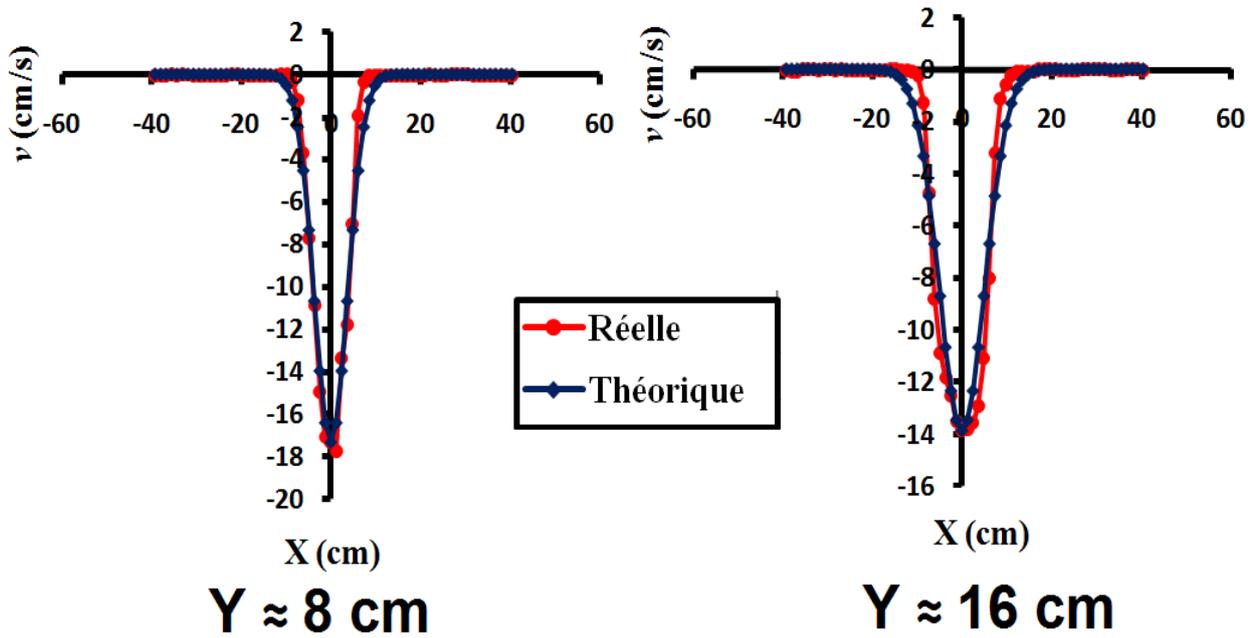


Figure 4.18. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour l'ouverture $D = 50$ mm.

➤ $D = 60 \text{ mm}$

Tableau 4.6. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $D = 60 \text{ mm}$.

X (cm)	B							
	1,14 cm							
	Y				Y			
	8,45 cm				16,90 cm			
	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)
-38,64	-0,17	0,03	0,00	0,00	-0,17	0,07	0,00	0,00
-12,07	-0,01	0,02	0,26	-0,36	0,01	0,00	0,75	-2,10
-6,03	1,51	-5,88	2,25	-6,32	1,87	-12,23	1,55	-8,72
-2,41	3,71	-15,47	2,00	-14,01	1,96	-14,11	0,92	-12,98
0,00	1,35	-16,31	0,00	-16,31	1,26	-14,01	0,00	-14,01
2,41	-2,85	-14,11	-2,00	-14,01	0,23	-12,25	-0,92	-12,98
6,03	-2,06	-5,52	-2,25	-6,32	-1,42	-9,90	-1,55	-8,72
12,07	0,00	0,00	-0,26	-0,36	0,00	-0,11	-0,75	-2,10
37,64	-0,07	0,02	0,00	0,00	-0,10	0,03	0,00	0,00

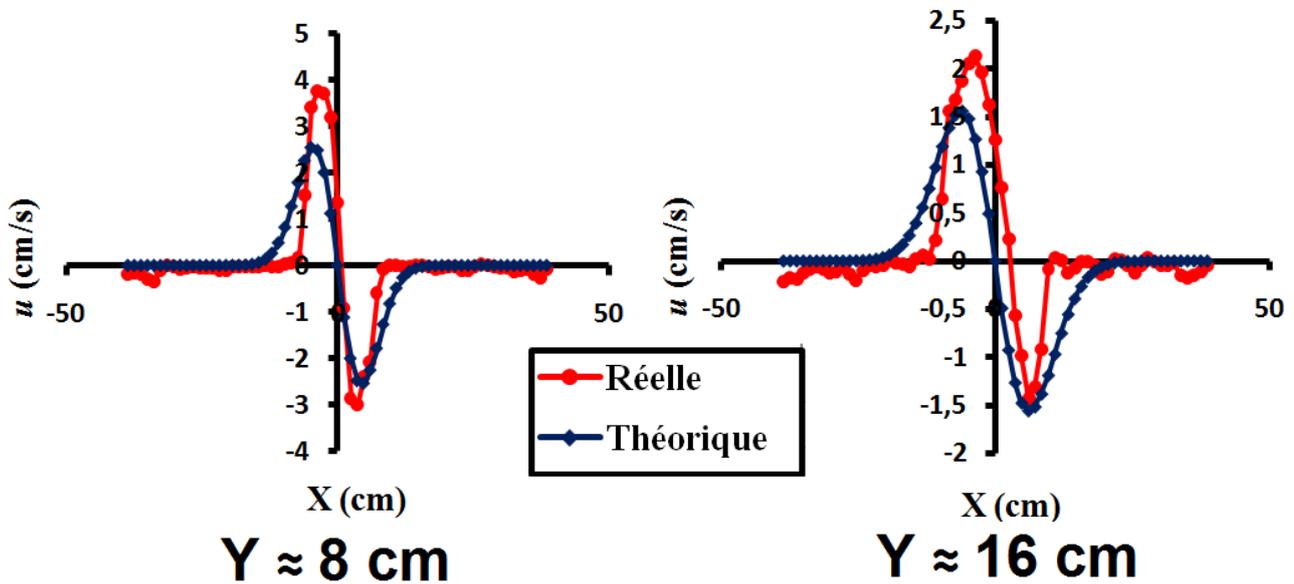


Figure 4.19. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $D = 60 \text{ mm}$.

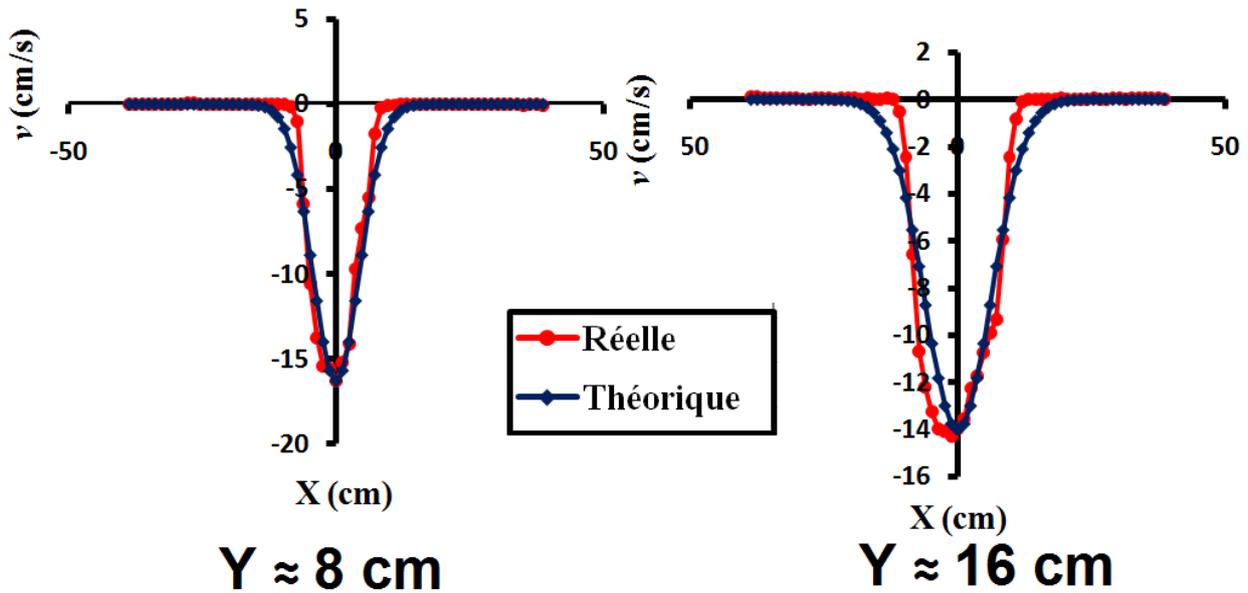


Figure 4.20. Distribution de vitesse v selon l'axe pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour l'ouverture $D = 60$ mm.

b) En présence de la trémie

Pour le cas de la présence de la trémie les représentations de la distribution des vitesses u et v selon l'axe X sont limitées uniquement au $D = 40$ mm pour ($35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$).

➤ $\alpha = 35^\circ, D = 40$ mm

Tableau 4.7. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $\alpha = 35^\circ$ et $D = 40$ mm.

X (cm)	B							
	1,8 cm							
	Y				Y			
	8,65 cm				16,07 cm			
	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)
-38,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-12,36	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78	-3,12	8,22	-2,14
-4,94	2,99	-5,64	2,52	-8,82	1,23	-5,23	9,98	-6,49
-2,47	2,60	-12,62	1,69	-1,18	0,21	-8,01	5,85	-7,60
0,00	-0,12	-11,27	-1,69	-1,18	-1,00	-7,07	0,00	-8,01
2,47	-2,32	-7,03	-1,04	-7,29	-1,82	-6,54	-5,85	-7,60
4,94	-2,12	-4,78	-2,52	-8,82	-2,01	-5,26	-9,98	-6,49
12,36	0,00	0,00	-8,02	-1,12	-0,10	-0,75	-8,22	-2,14
38,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

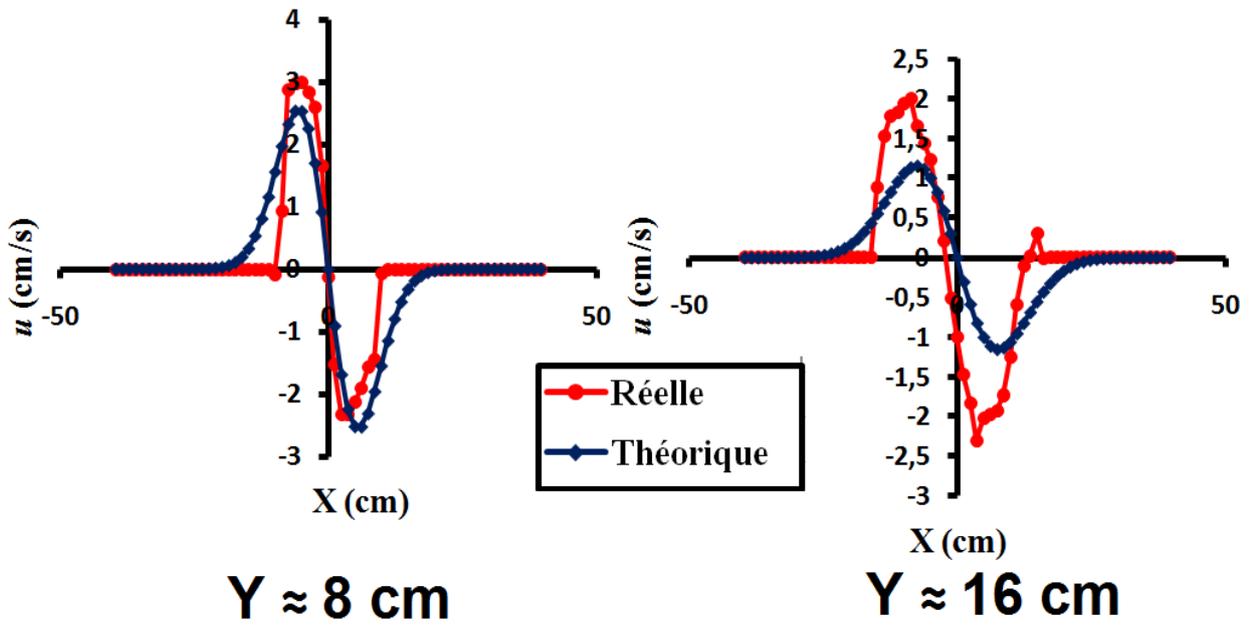


Figure 4.21. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 35^\circ$ et $D = 40$ mm.

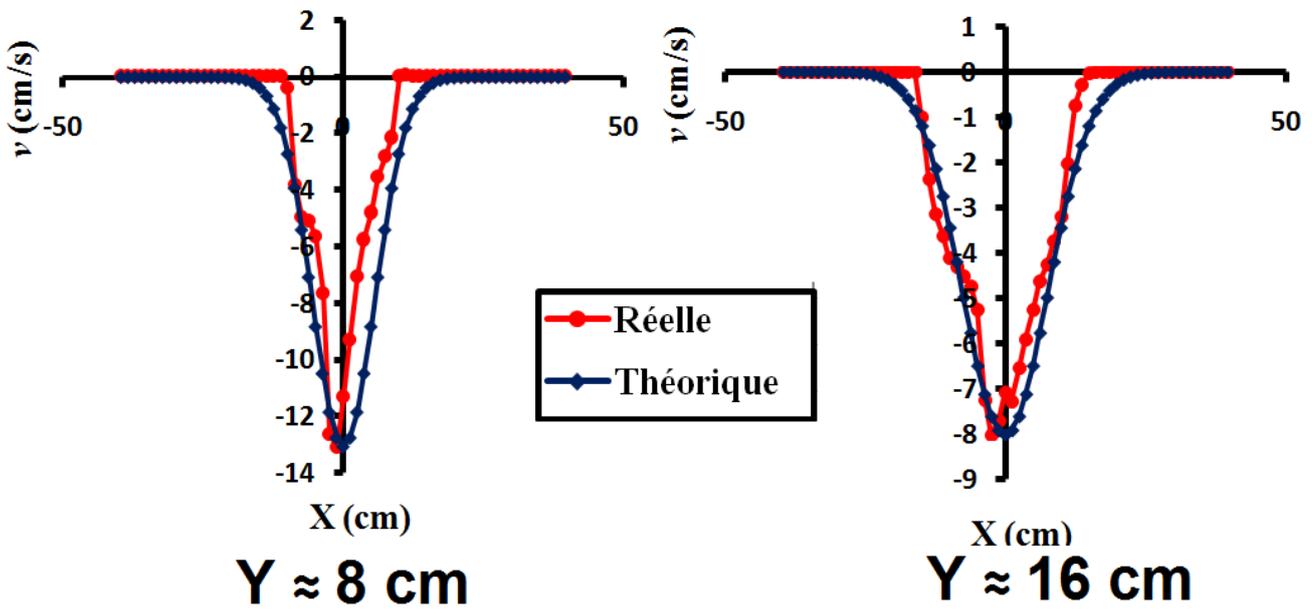


Figure 4.22. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour différents niveau dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 35^\circ$ et $D = 40$ mm.

➤ $\alpha = 45^\circ$, $D = 40$ mm

Tableau 4.8. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $\alpha = 45^\circ$ et $D = 40$ mm.

		B							
		1,25 cm							
		Y				Y			
		7,27 cm				16,37 cm			
X (cm)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	
-38,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
-12,73	0,03	0,01	0,10	-0,12	-0,21	-1,45	0,38	-0,99	
-5,45	2,31	-5,00	1,73	-4,62	1,46	-5,60	0,83	-5,02	
-1,81	1,65	-7,79	1,19	-9,56	1,00	-6,50	0,38	-6,94	
0,00	0,28	-10,46	0,00	-1,05	0,10	-7,22	0,00	-7,23	
1,81	-1,56	-8,49	-1,19	-9,56	-0,84	-6,76	-0,38	-6,94	
5,45	-1,43	-3,31	-1,73	-4,62	-1,47	-5,35	-0,83	-5,02	
12,73	0,00	0,00	-0,10	-0,12	0,20	-0,41	-0,38	-0,99	
38,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

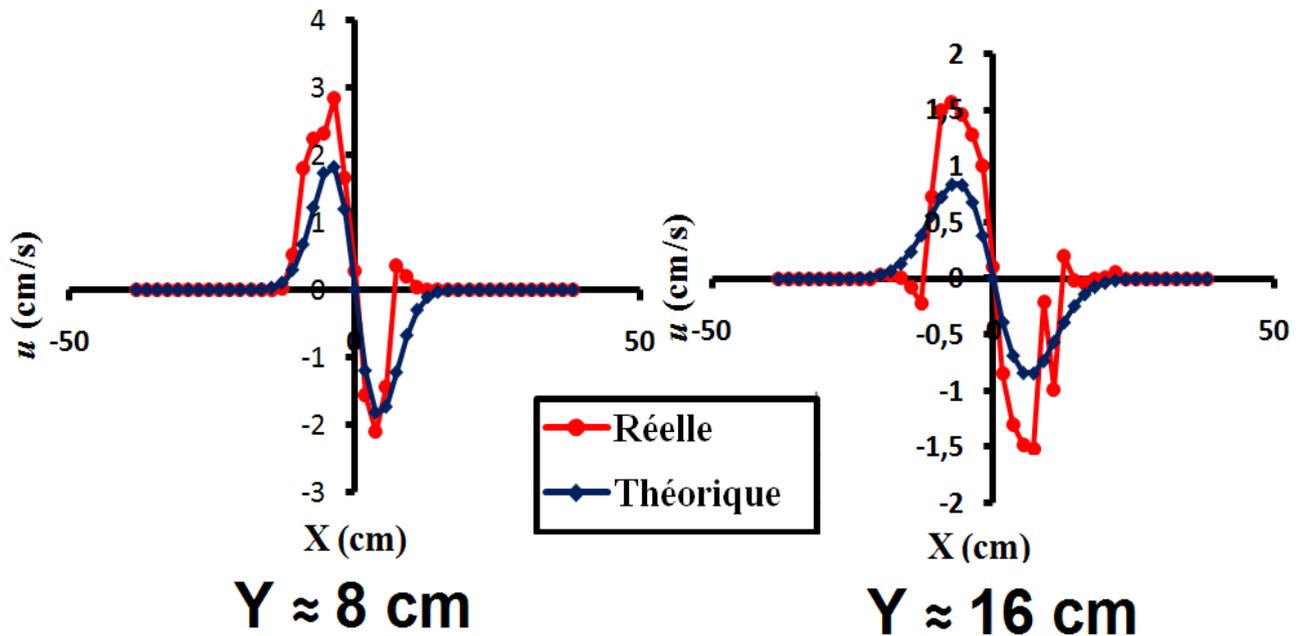


Figure 4.23. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 45^\circ$ et $D = 40$ mm.

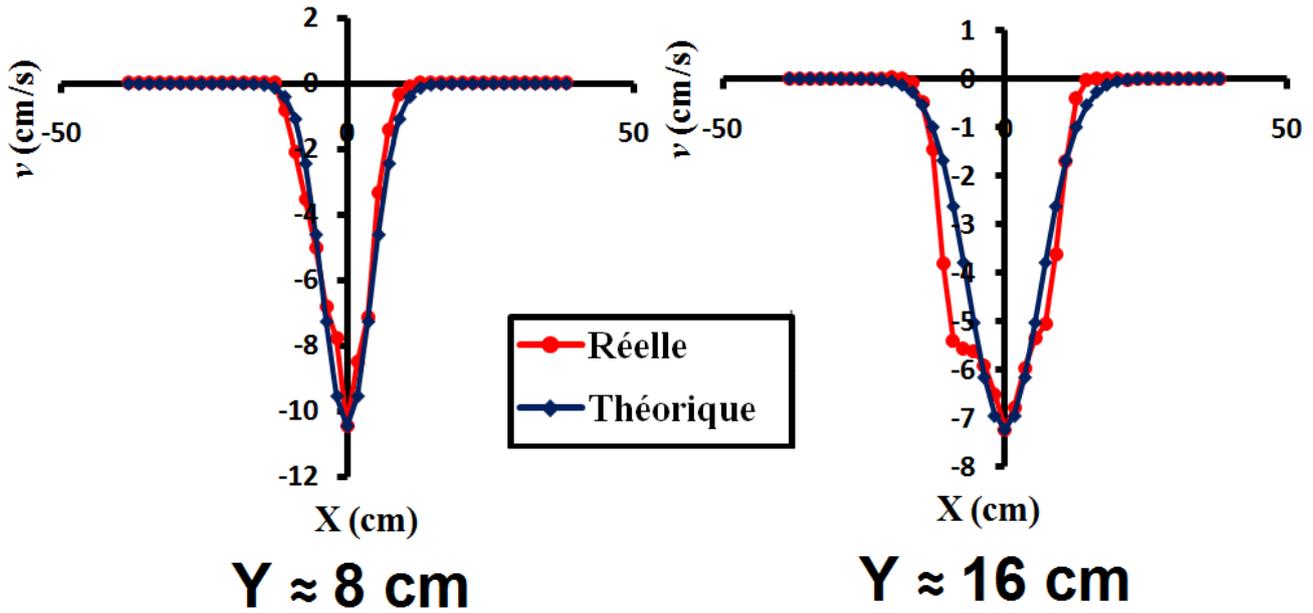


Figure 4.24. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 45^\circ$ et $D = 40$ mm.

➤ $\alpha = 55^\circ$, $D = 40$ mm

Tableau 4.9. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $\alpha = 55^\circ$ et $D = 40$ mm.

X (cm)	B							
	0,17 cm							
	Y				Y			
	7,36 cm				16,56 cm			
	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)	u réelle (cm/s)	v réelle (cm/s)	u théorique (cm/s)	v théorique (cm/s)
-38,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-12,88	0,05	0,02	7,36	-0,08	0,01	0,00	0,00	0,00
-5,52	0,86	-2,12	1,61	-4,30	1,20	-5,10	0,33	-0,86
-1,84	1,49	-8,45	1,18	-9,44	0,31	-7,05	0,39	-7,08
0,00	0,81	-10,41	0,00	-10,41	-0,36	-7,40	0,00	-7,41
1,84	-2,29	-9,95	-1,18	-9,43	-0,89	-6,73	-0,39	-7,09
5,52	-1,65	-3,04	-1,61	-4,29	-1,18	-4,36	-0,83	-4,99
12,88	0,00	0,06	-7,36	-0,08	0,19	-0,72	-0,34	-0,86
38,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

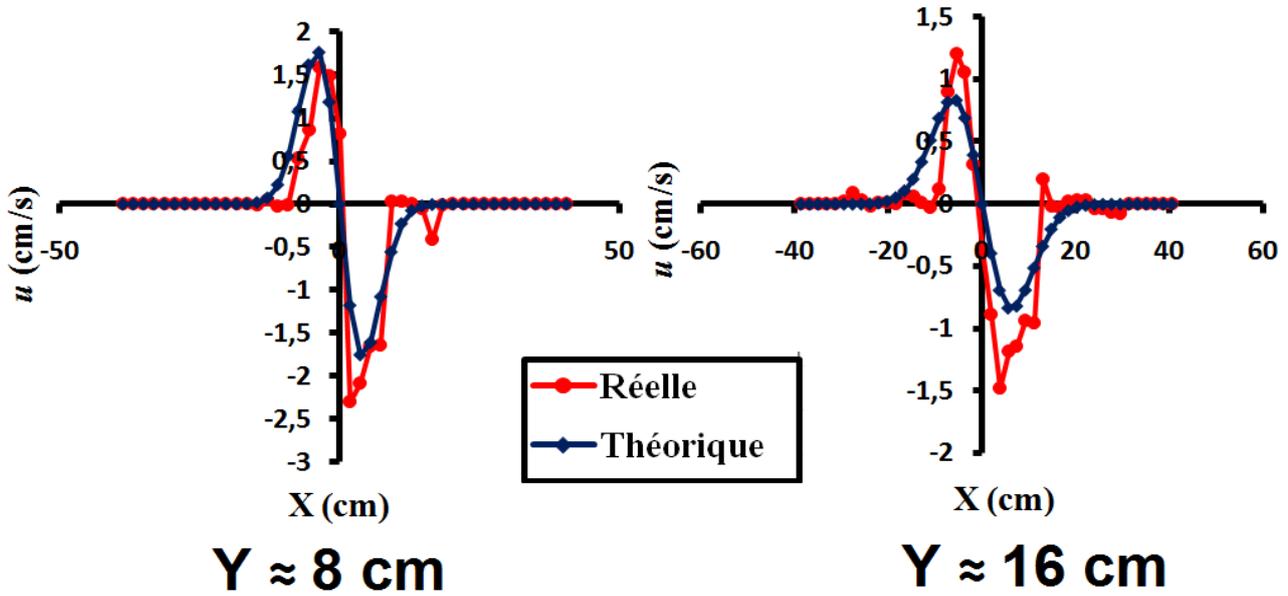


Figure 4.25. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 55^\circ$ et $D = 40$ mm.

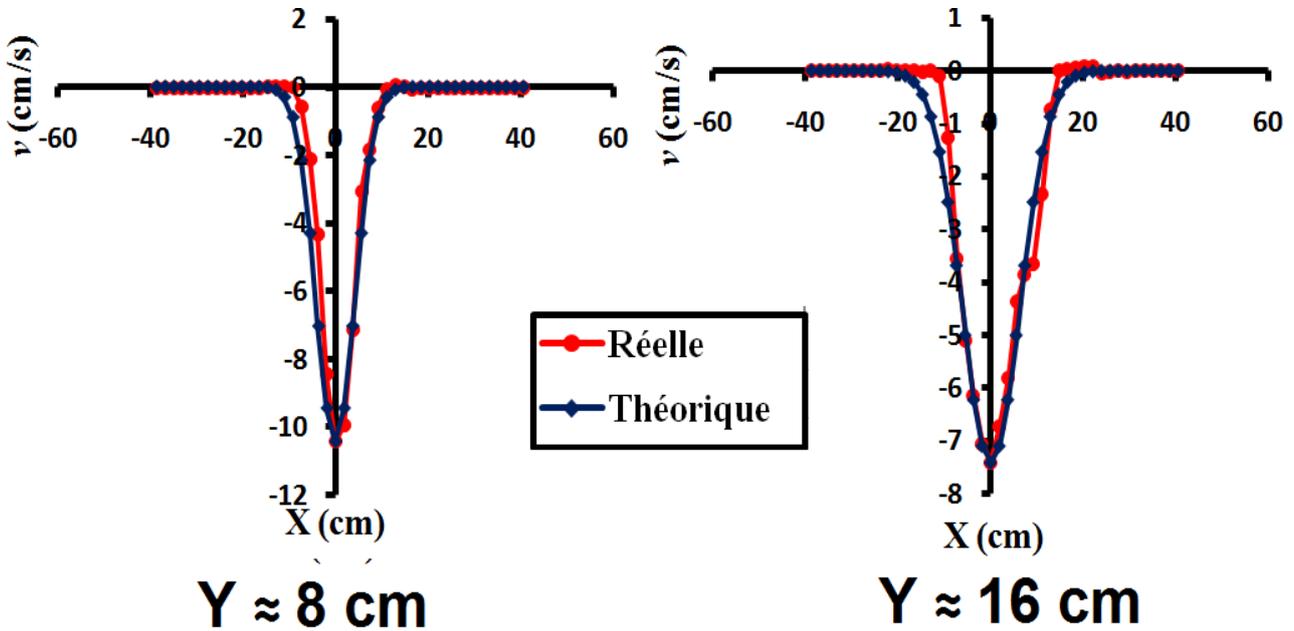


Figure 4.26. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour différents niveaux dans le cas réel et théorique pour $\alpha = 55^\circ$ et $D = 40$ mm.

❖ Conclusion

Après la représentation des graphes de la distribution des deux vitesses horizontale et verticale dans la zone de convergence (Figures 4.15 jusqu'à 4.26); on peut remarquer qu'il y a une variation très proche du cas réel surtout pour la vitesse verticale v , et un petit décalage pour la vitesse horizontale u entre les deux valeurs réelles et théoriques dès qu'on s'éloigne de l'orifice. Mais elles sont proches des valeurs réelle pour $D = 40$ mm, 50 mm. Et pour les autre cas les valeurs extrêmes de la vitesse u théorique sont plus petite que les valeurs réelles.

4.2.3.2. Zone d'écoulement

Pour la zone d'écoulement nous avons appliqué les équations 2.22 et 2.23 de Nedderman données par le paragraphe 2.4.1 Nous avons fait une comparaison entre les deux vitesses horizontales u et verticale v réelle et théorique des grains, en appliquant les équations 2.20, 2.21 pour la zone de convergence et les équations 2.22 et 2.23 pour la zone d'écoulement. Nous avons choisi de travailler avec des grandes ouvertures ($D = 50$ mm) est évité les petites ouvertures car la vitesse des grains est très faible dans la zone d'écoulement. et pour le coefficient de diffusion B considère comme une constante. Les résultats obtenus sont les suivants :

a) Absence de la trémie

➤ $D = 50$ mm

Tableau 4.10. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $D = 50$ mm

B								
0.81 cm								
Y								
45.32 cm								
Réelle			Théorique par les équations de la zone d'écoulement 2.22 et 2.23			Théorique par les équations de la zone de convergence 2.20 et 2.21		
X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)	X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)	X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)
-34.29	-0,03	-0,02	-35,00	0,00	0,00	-34.29	0,00	0,00
-12.24	-0,04	-1,33	-24,00	0,10	-0,35	-12.24	0,45	-3,38
-4.89	0,19	-9,88	-18,00	0,31	-1,56	-4.89	0,43	-7,97
-2.44	0,14	-9,79	-4,00	0,37	-9,67	-2.44	0,24	-9,01
0.00	0,00	-9,39	0,00	0,00	-10,63	0.00	0,00	-9,39
2.44	0,08	-9,79	4,00	-0,37	-9,67	2.44	-0,24	-9,01
4.89	0,09	-9,25	18,00	-0,31	-1,56	4.89	-0,43	-7,97
12.24	-0,23	-1,51	24,00	-0,10	-0,35	12.24	-0,45	-3,38
34.29	-0,02	0,02	35,00	0,00	0,00	34.29	0,00	0,00

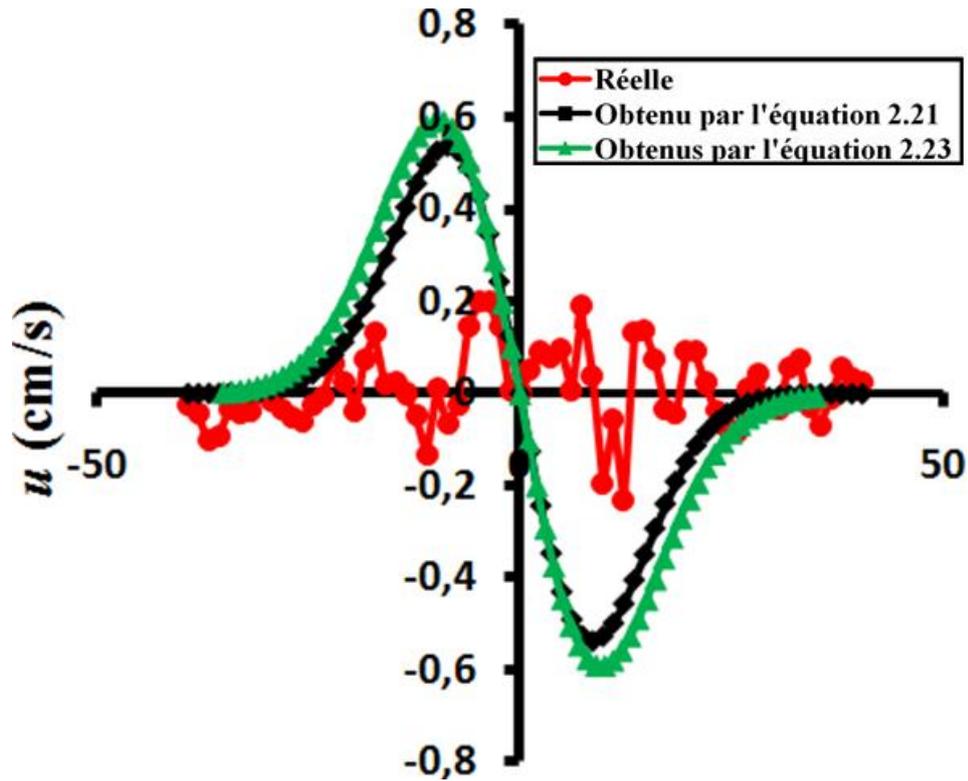


Figure 4.27. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour $Y = 45,32$ cm dans le cas réel et théorique pour $D = 50$ mm.

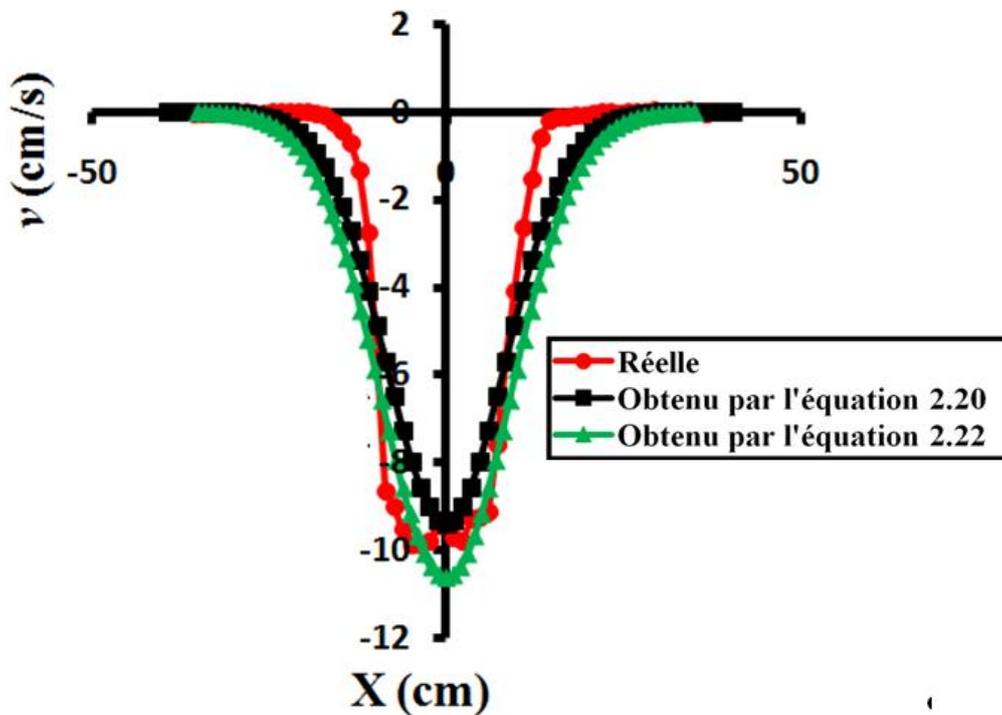


Figure 4.28. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour $Y = 45,32$ cm dans le cas réel et théorique pour $D = 50$ mm.

b) En présence de la trémie

Pour le cas de la présence de la trémie nous avons limité la présentation pour $D = 50$ mm et $\alpha = 45^\circ$. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 4.11. Valeurs réelles et théoriques obtenues pour les vitesses u et v selon l'axe X pour $D = 50$ mm et $\alpha = 45^\circ$.

B								
0.91 cm								
Y								
45.17 cm								
Réelle			Théorique par les équations de la zone d'écoulement 2.22 et 2.23			Théorique par les équations de la zone de convergence 2.20 et 2.21		
X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)	X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)	X (cm)	u (cm/s)	v (cm/s)
-34.33	-0,02	-0,00	-35,00	0,00	0,00	-34.33	0,00	0,00
-12.64	0,57	-3,57	-24,00	0,05	-0,22	-12.64	0,38	-2,78
-5,42	0,64	-5,49	-18,00	0,23	-1,20	-5,42	0,36	-6,16
-1.80	0,32	-6,61	-4,00	0,39	-9,23	-1.80	0,14	-7,22
0.00	0,14	-7,36	0,00	0,00	-10,27	0.00	0,00	-7,36
1,80	0,11	-7,46	4,00	-0,39	-9,23	1,80	-0,14	-7,22
5,42	0,16	-7,47	18,00	-0,23	-1,20	5,42	-0,36	-6,162
12.64	-0,26	-3,42	24,00	-0,05	-0,22	12.64	-0,38	-2,78
34.33	0,00	0,00	35,00	0,00	0,00	34,33	0,00	0,00

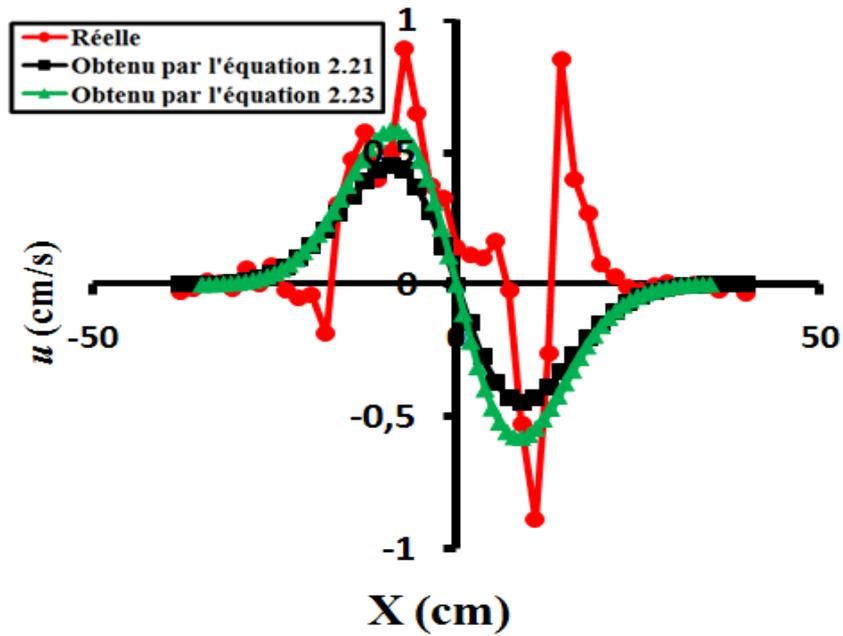


Figure 4.29. Distribution de vitesse u selon l'axe X pour $Y = 45,17$ cm dans le cas réel et théorique pour $D = 50$ mm et $\alpha = 45^\circ$.

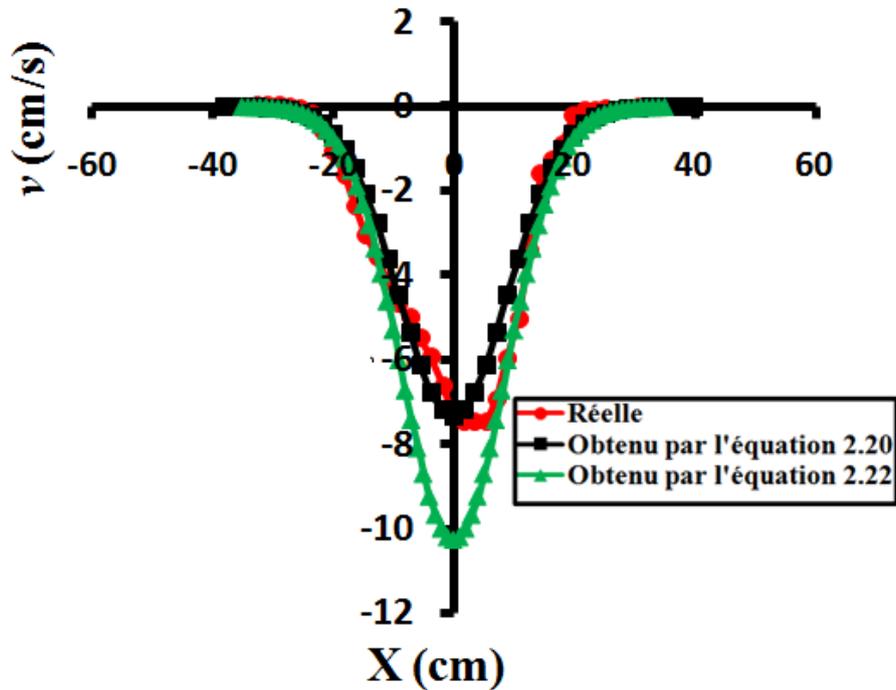


Figure 4.30. Distribution de vitesse v selon l'axe X pour $Y = 45,17$ cm dans le cas réel et théorique pour $D = 50$ mm et $\alpha = 45^\circ$.

Nous avons remarqué d'après la représentation des graphes réelle et théorique de la distribution de vitesse dans la zone d'écoulement pour le cas de présence et d'absence de la trémie que les deux équations 2.20 et 2.21 donnent des valeurs des vitesses verticale v et horizontale u plus proches que les équations 2.22 et 2.23 dans la zone d'écoulement. On peut voir aussi qu'on a une mauvaise prédiction des valeurs de vitesse horizontale u .

4.2.3.3. Représentation et comparaison de la distribution de vitesse des grains par les contours et les vecteurs de vitesses

Pour établir une comparaison entre les deux cas pratique et théorique, nous avons fait une représentation de la distribution de vitesse des grains par contours et vecteurs de vitesse. Pour le cas théorique nous avons utilisé un programme mathématique appelé "Mathematica" [20].

a) Définition d'une équation de la vitesse v_0

Nous avons défini une équation par "Excel". Qui donne les valeurs de la vitesse v_0 des grains dans la ligne centrique ($X=0$). Ainsi nous avons tracé trois courbes : $v_0 = f(y)$ dans le cas réel, la deuxième courbe tracée par les valeurs données par l'équation 2.20, et la dernière courbe tracée par la rectification proposée par "Excel". Et pour l'obtention de la dernière courbe nous avons remplacé la valeur de v_0 dans les deux équations de la zone de convergence 2.20, 2.21 par la valeur $a x^3 + b x^2 + c x + d$, les équations 2.20 et 2.21 deviennent :

$$v = [a x^3 + b x^2 + c x + d] \exp\left(-\frac{x^2}{4By}\right) \quad (4.2)$$

$$u = [a x^3 + b x^2 + c x + d] \frac{x}{2y} \exp\left(-\frac{x^2}{4By}\right) \quad (4.3)$$

Avec :

a, b et c : Des coefficients donnés par "Excel".

On obtient les graphes suivants

➤ Sans trémie

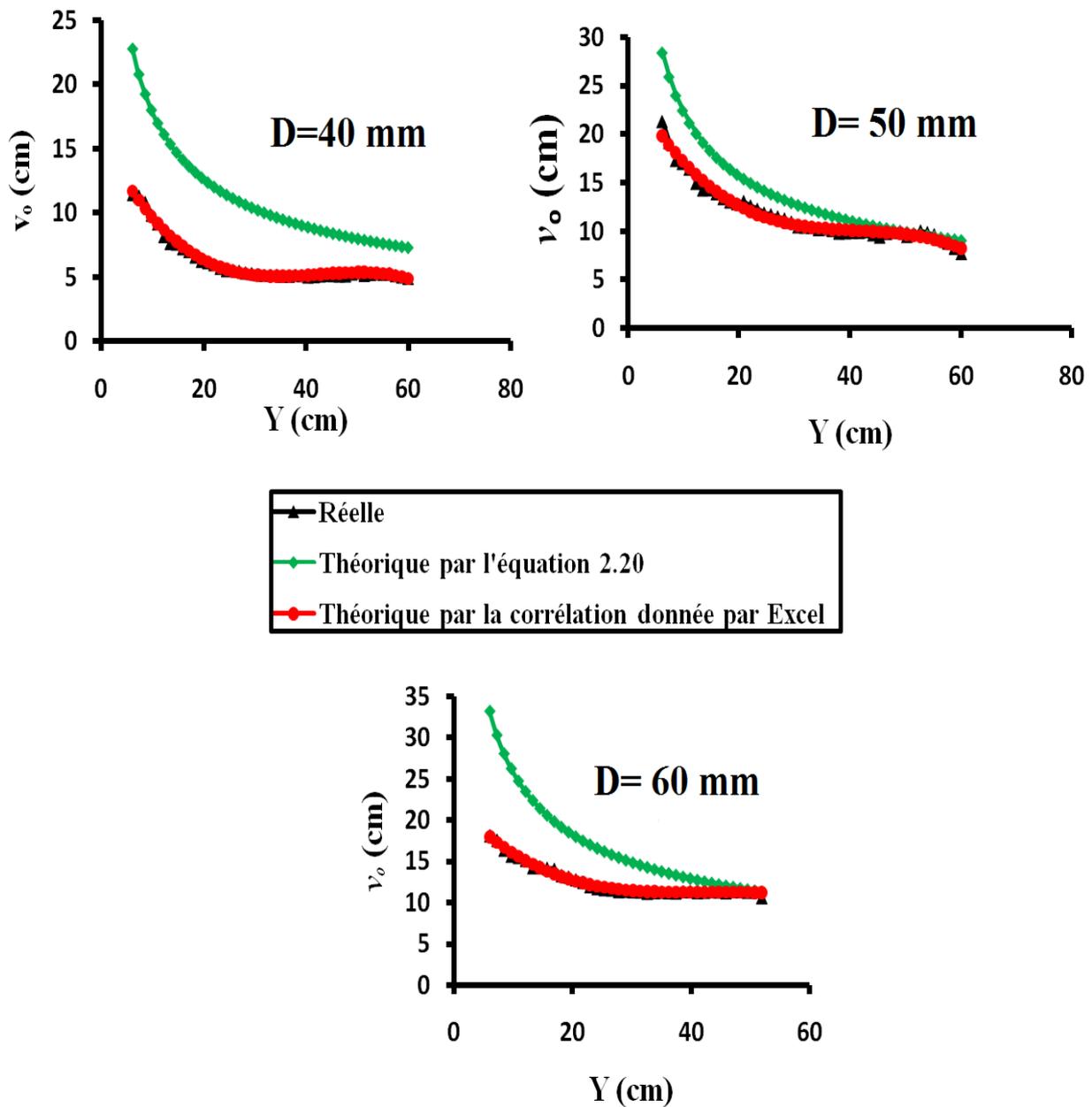


Figure 4.31. Variation de la vitesse v_0 réelle et théorique en fonction de la hauteur Y pour $D = 40, 50$ et 60 mm en absence de la trémie.

➤ Avec trémie

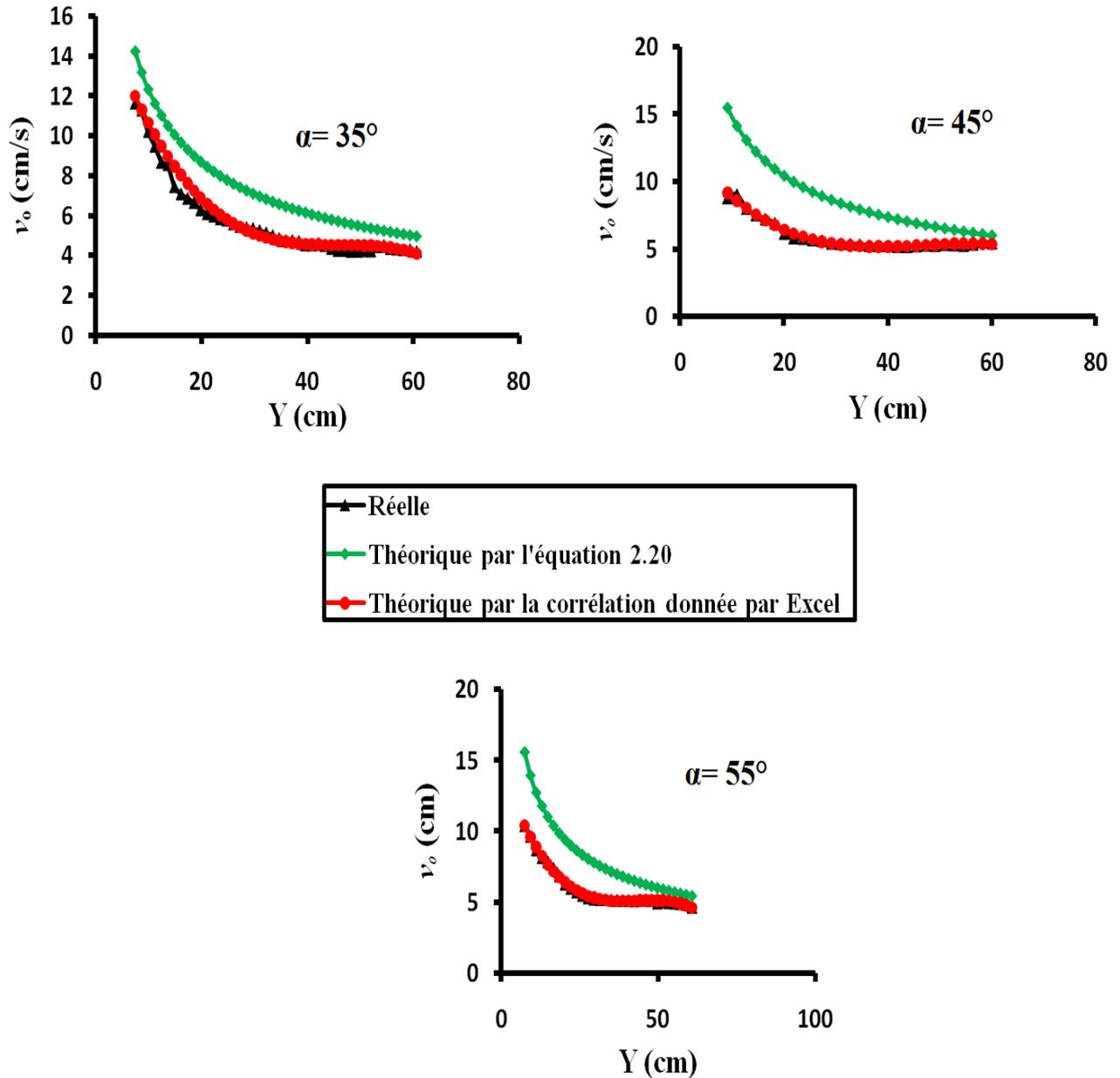


Figure 4.32. Variation de la vitesse v_0 réelle et théorique en fonction de la hauteur Y pour $D = 40$ mm, avec $\alpha = 35^\circ, 45^\circ$ et 55° .

Après la représentation de variation de la vitesse v_0 réelle et théorique en fonction de la hauteur Y pour les deux cas de présence et en absence de la trémie (figure 4.31, 4.32) on remarque qu'il y a une bonne prédiction des valeurs de vitesse v_0 des grains par la correction proposée par "Excel".

Nous avons représentée la distribution de vitesse des grains pour les deux cas d'absence et de présence de la trémie (Figure 4.33 jusqu'à 4.38); par les contours et les vecteurs. À gauche résultat obtenu par l'application des équations 2.20 et 2.21 à droite résultat obtenus par l'application des équations 4.2 et 4.3 qui contient la correction pour la valeur de v_0 .

b) Cas d'absence de la trémie pour les ouvertures 40 mm, 50 mm et 60 mm

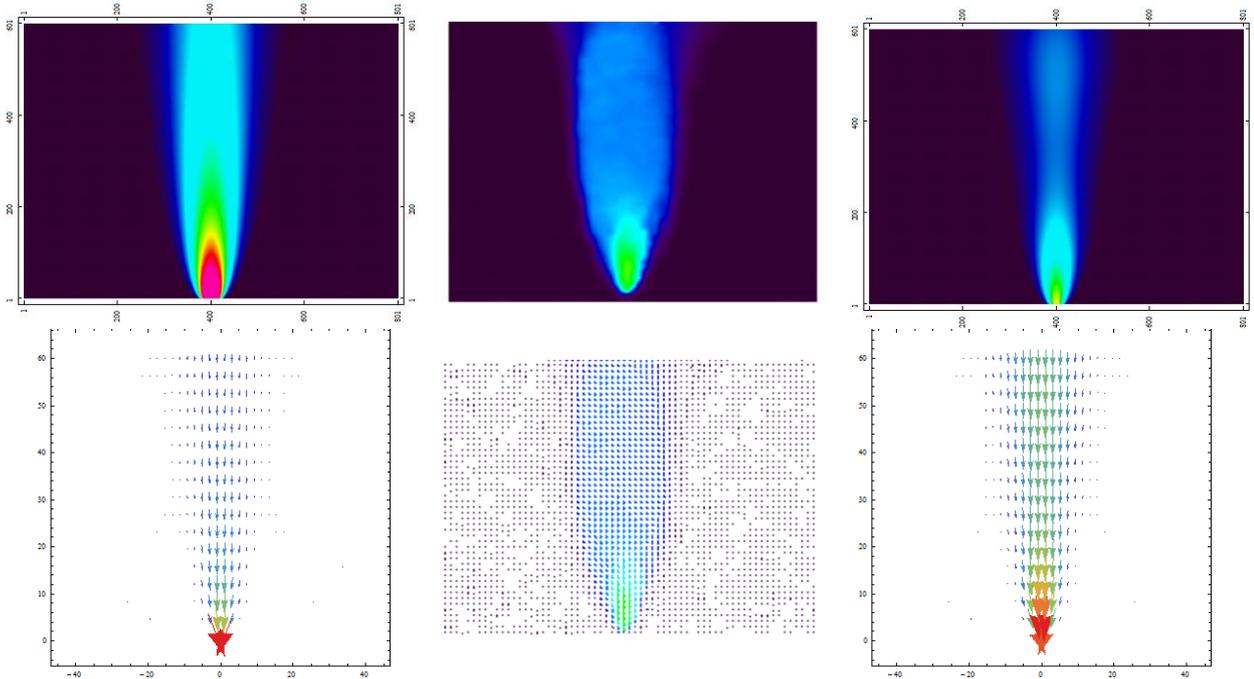


Figure 4.33. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4.2 et 4.3) pour $D = 40$ mm.

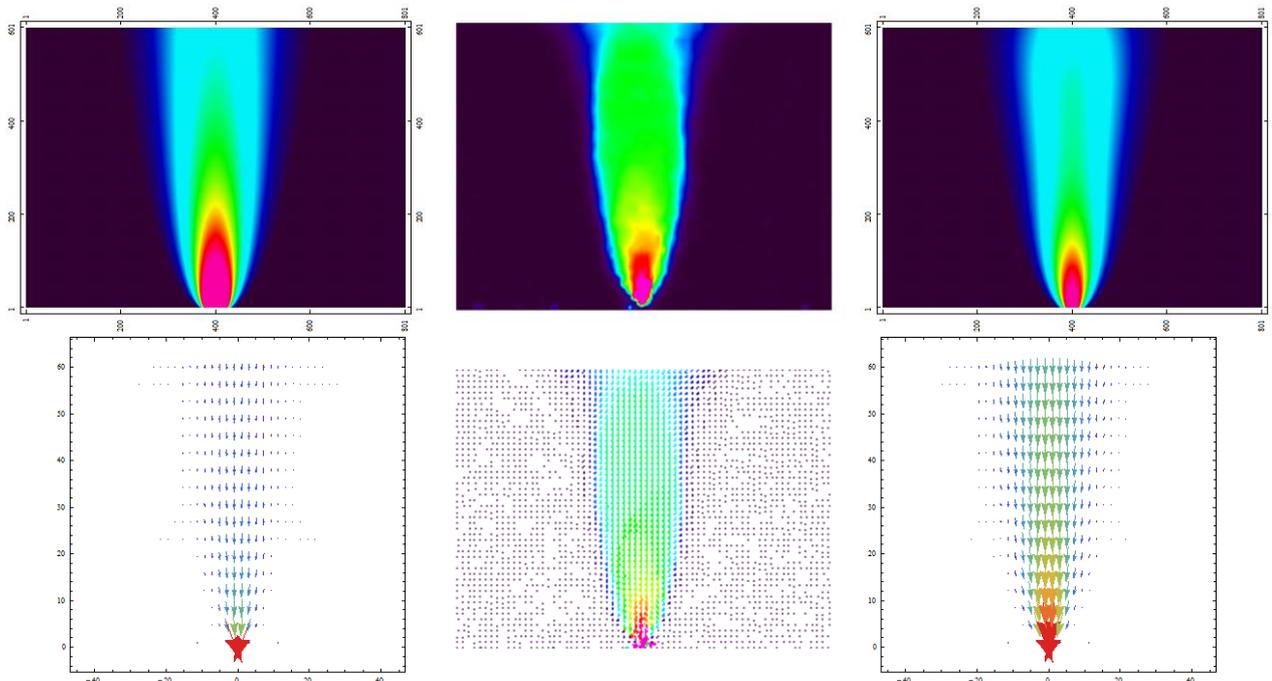


Figure 4.34. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4.2 et 4.3) pour $D = 50$ mm.

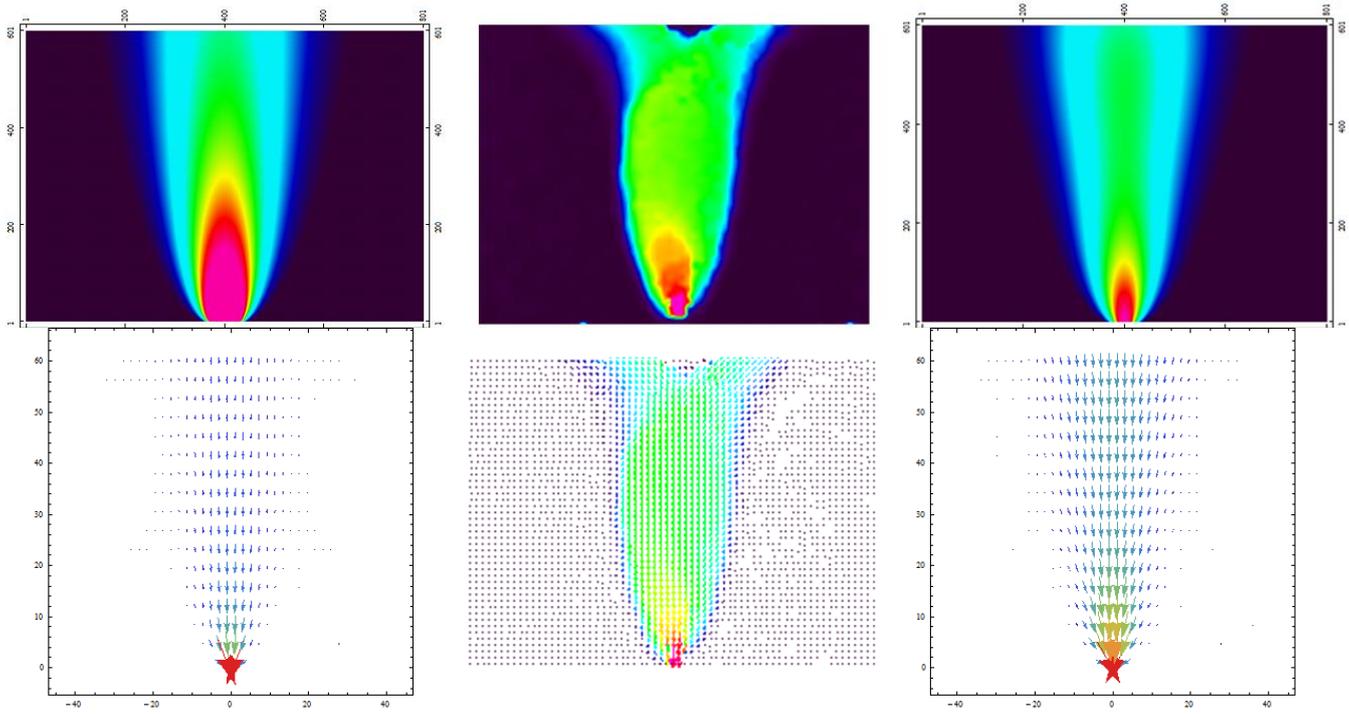


Figure 4.35. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4. 2 et 4.3) pour $D = 60$ mm.

c) Cas de présence de la trémie pour l'ouverture 40 mm, avec les angles $35^\circ, 45^\circ$ et 55° de la trémie

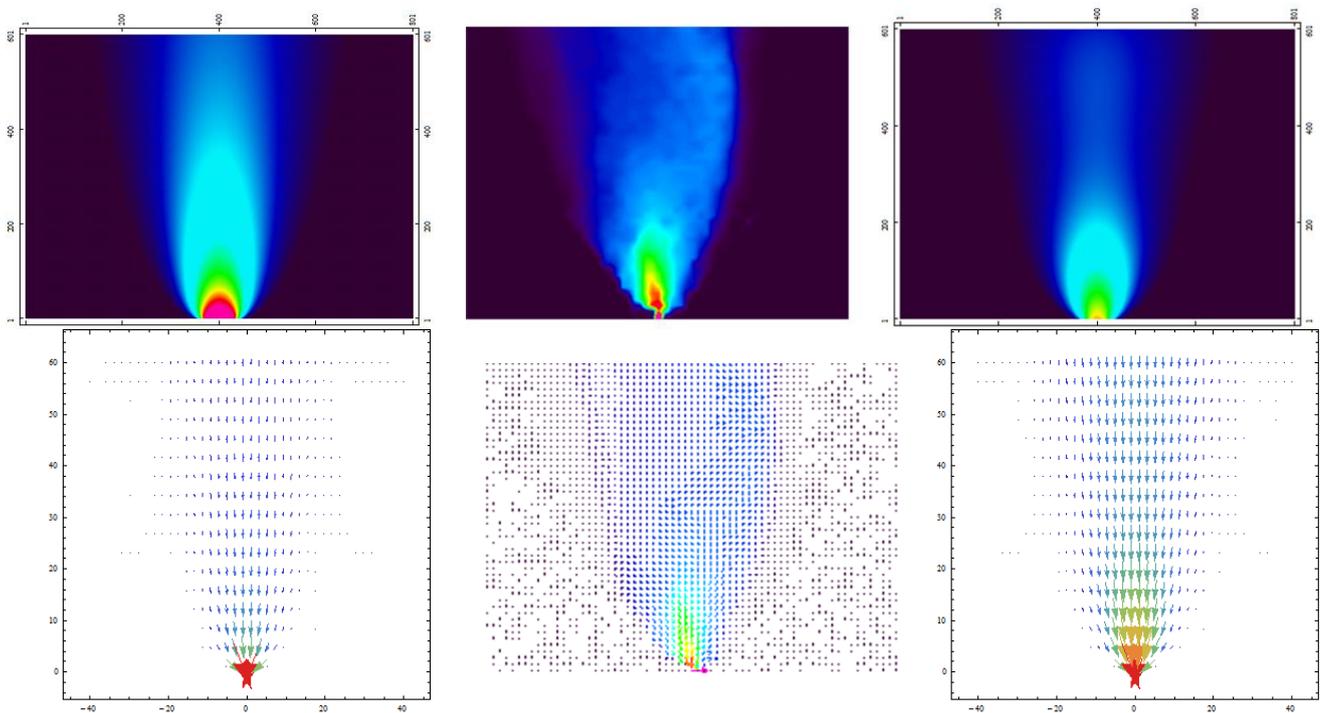


Figure 4.36. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4. 2 et 4.3) pour $D = 40$ mm et $\alpha = 35^\circ$.

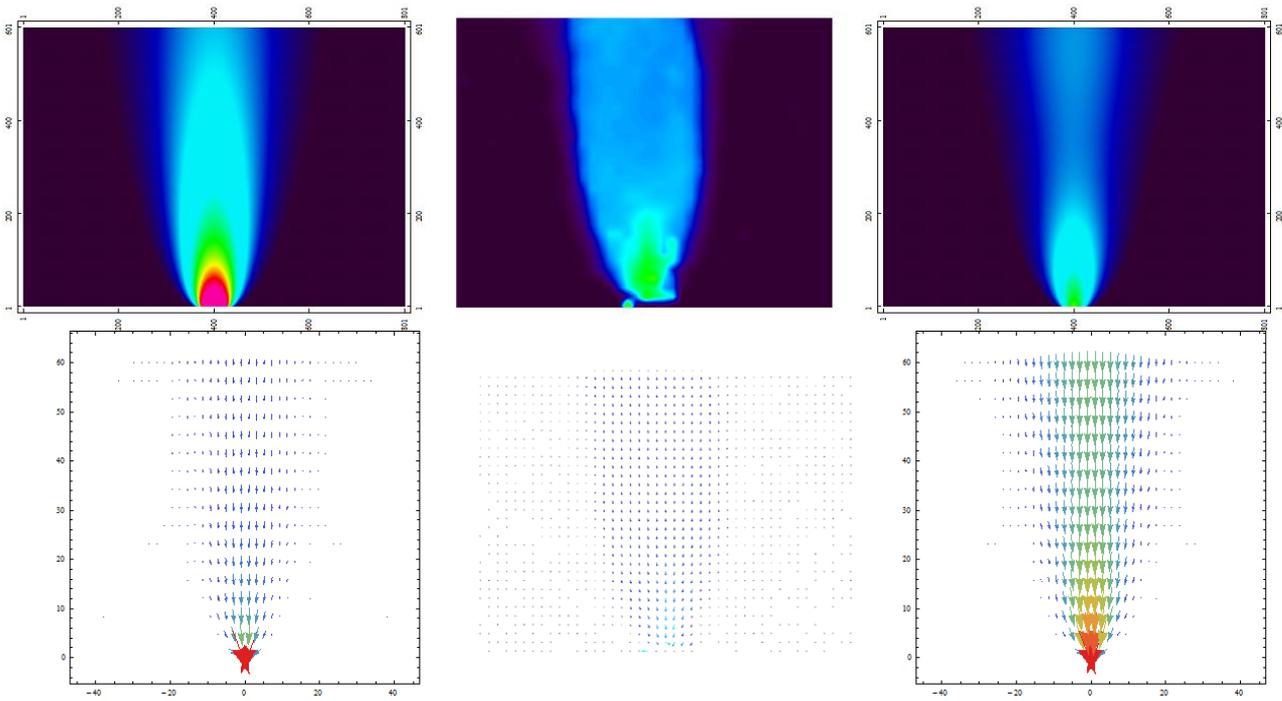


Figure 4.37. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4. 2 et 4.3) pour $D = 40 \text{ mm}$ et $\alpha = 45^\circ$.

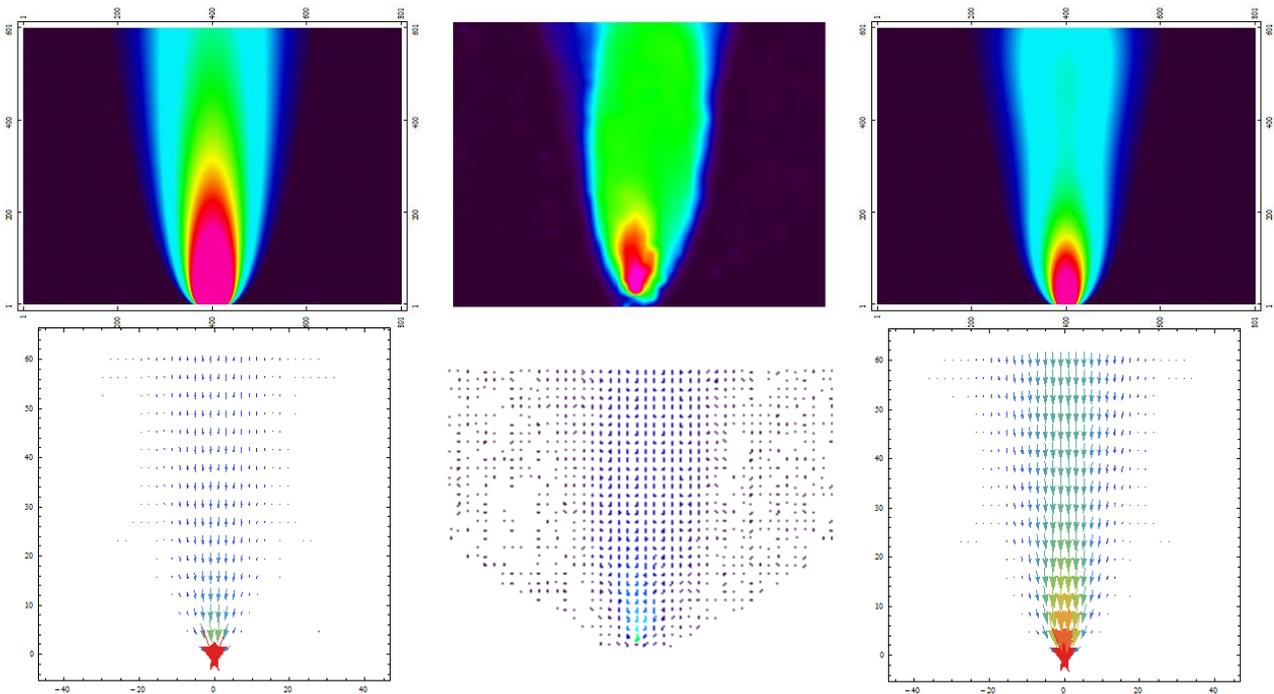


Figure 4.38. Distribution de la vitesse des grains réelle et théorique (à gauche par les équations 2.20 et 2.21, à droite par les équations 4.2 et 4.3) pour $D = 40 \text{ mm}$ et $\alpha = 55^\circ$.

❖ **Conclusion**

On peut conclure d'après la représentation de la vitesse des grains réelle et théorique par les contours et les vecteurs mettent en exergue la validité des équations théoriques. Pour les

deux cas d'absence et présence de la trémie (Figure 4.33 jusqu'à figure 4.38). On peut remarque aussi que la forme d'écoulement est acceptable dans la zone de convergence et pour la zone d'écoulement elle reste toujours faible. Ainsi dans la zone de convergence et pour des grandes ouvertures, la correction qui faite par "Excel" donne une bonne amélioration de la prédiction de la vitesse des grains.

CONCLUSION

Conclusion

Nous avons fait un travail sur l'écoulement gravitaire d'un matériau granulaire sec et homogène qui est le blé dans un silo parallélépipédique en plexiglas. À savoir définir :

- Caractérisation du matériau.
- Etude du débit d'écoulement.
- Etude de la distribution de vitesse des grains.

D'après les expériences que nous avons réalisé, on peut conclure que : la masse volumique apparente en vrac dépendante de l'arrangement des matériaux utilisées. Ainsi on obtient pendant l'écoulement des valeurs constantes du débit, et la prédiction des valeurs de ce dernier est acceptable ; on peut conclure aussi d'après la comparaison des valeurs du débit théoriques et pratiques que les valeurs de l'équation de modèle d'Al-Din et Gunn sont plus proches de la valeur réelle dans le cas d'absence de la trémie ; et pour le cas de présence de la trémie on a l'équation RTBN qui est la plus proche de la réalité. Bien que l'équation de B&R plus proches du cas réelle pour une valeur d'angle égale à 45° .

Nous avons traité les résultats de la distribution de la vitesse des grains au cours de l'écoulement par la technique PIV avec le programme "*PIV view*". Car elle donne une idée claire sur la distribution des vitesses pour le cas 2D. Nous avons utilisée plusieurs équations pour la description de vitesses des grains ou cour de l'écoulement ; on obtient des bons résultats qui sont proche de la réalité pour le cas de la zone de convergence, par le remplacement de les valeurs réelle de v_0 dans l'équation de Nedderman.

Pour la représentation de la distribution de vitesse des grains nous avons défini une corrélation par "Excel" de la vitesse v_0 ; qui est acceptable en comparaison avec les valeurs pratiques. On conclut aussi que après le remplacement du terme de v_0 dans l'équation de Nedderman par la corrélation qui obtenus par "Excel" qu'il y a une bonne prédiction des valeurs de vitesse v_0 des grains dans les deux cas, présence et absence de la trémie. La forme d'écoulement est acceptable dans la zone de convergence et pour la zone d'écoulement elle reste toujours faible.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Degouet, C., 2005, Caractérisation de matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux. Thèse Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale Brest.
- [2] Bruno,A.,Yaël,F.,Olivier,P.2011,Les milieux granulaires entre fluide et solide.1-2.
- [3] Guyon, E.,Troadec, J.P., 1994, Du sac de billes au tas de sable. Éditions Odile Jacob, Paris.
- [4] Allen, T.,1990, Particle size measurement. 4e Éd., Chapman and Hall.
- [5] Ronze, D., Févotte , G., 2008, Introduction au génie des procédés. LAVOISIER.
- [6] Das Gupta, S., Khakhar, D. V., Bhatia, S. K., 1991, Axial segregation of particles in a horizontal rotating cylinder. *Chemical Engineering Science* 46, 1513–1517.
- [7] Donald, M. B., Roseman, B., 1962, Mixing and demixing of solid particles. I. Mechanisms in a horizontal drum mixer. *British Chemical Engineering* 7, 749–753.
- [8] Thomas, N., 2000, Reverse and intermediate segregation of large beads in dry granular media. *Physical Review E* 62, 961–974.
- [9] Guilhem, M., 2015; Mécanique des matériaux granulaires. Mémoire de quatrième année de l'institut national des science appliqués Lyon.
- [10] Xixi,H.,2013,Influence des particules fines sur la stabilité d'un milieu granulaire.Thèse de doctorat de l'Université de Lyon délivrée par l'Ecole Centrale de Lyon
- [11] Coulomb, C. A., 1776, Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de Mathématique et de Physique. L'Académie Royale des Sciences.
- [12] Nedderman, R. M., 1992, Statics and Kinematics of Granular Materials. Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] Wieghardt, K., 1975, Experiments in granular flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 7, 89–114.
- [14] Beverloo, W. A., Leniger, H. A., van de Velde, J., 1961, The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science* 15, 260–269.
- [15] Nedderman, R.M., Tüzün,U., Savage, S. B., Houlsby, G. T., 1982, The flow of granular materials– I : discharge rates from hoppers. *Chemical Engineering Science* 37, 1597–1609.

- [16] Nedderman, R. M., 1992, *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [17] Fowler, R. T., Glastonbury, J. R., 1959, The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science* 10, 150–156.
- [18] Brown, R. L., Richards, J. C., 1959, Exploratory study of the flows of granules through apertures. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 37, 108–119.
- [19] Rao, K., Nott R., 2008, *An introduction to granular flow*. Cambridge University Press, Cambridge. 34.
- [20] Al-Din, N., Gunn, D. J., 1984, The flow of non-cohesive solids through orifices. *Chemical Engineering Science* 39, 121–127.
- [21] Brown, R.L., Richards, J.C., 1970, *Principles of powder mechanics*. Pergamon Press.
- [22] Litwiniszyn, J., 1971, *Problèmes de la Rhéologie*. Symposium Franco-Polonais, Warsaw.
- [23] Nedderman, R. M., Tüzun .U., 1978, A Kinematic Model for the Flow of Granular Materials, *Powder Technology* 19, 287.
- [24] Wolfram, S., 2003, *The Mathematica Book*. Wolfram Media.

ANNEXES

Annexe 1. Variation de la masse et du débit en fonction du temps dans le cas de la présence de la trémie.

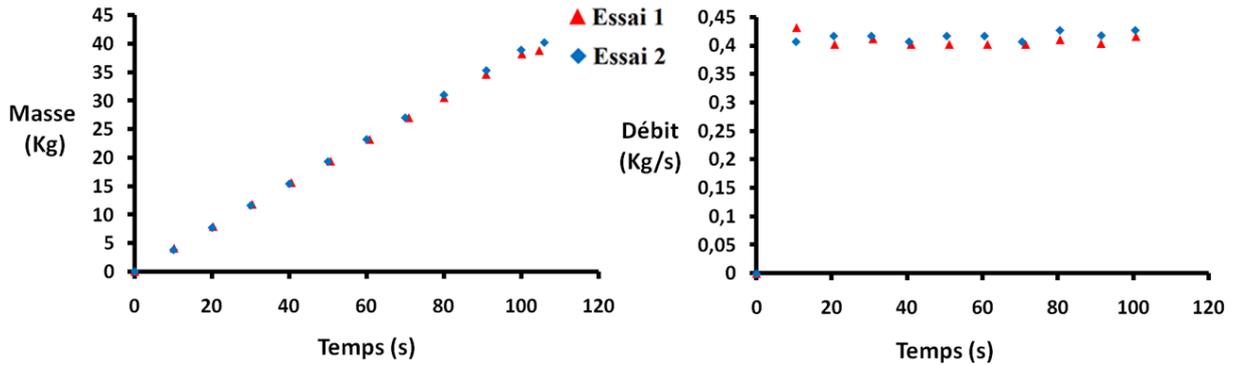


Figure A.1.1 Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 35^\circ$, $D = 20\text{mm}$)

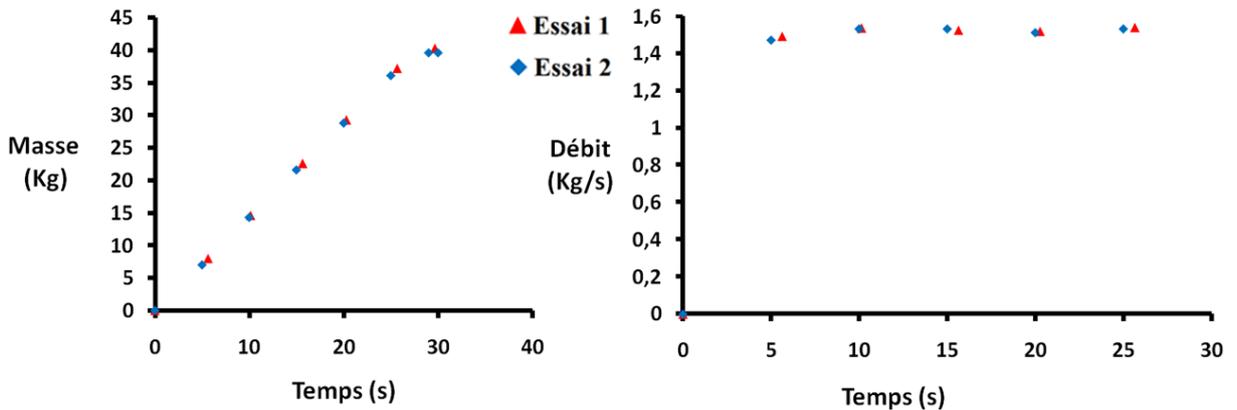


Figure A.1.2 Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 35^\circ$, $D = 40\text{mm}$)

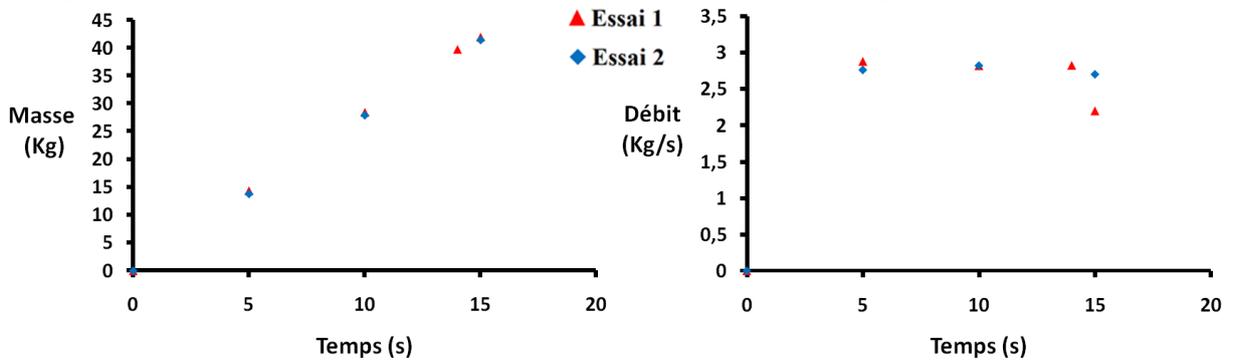


Figure A.1.3 Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 35^\circ$, $D = 60\text{mm}$)

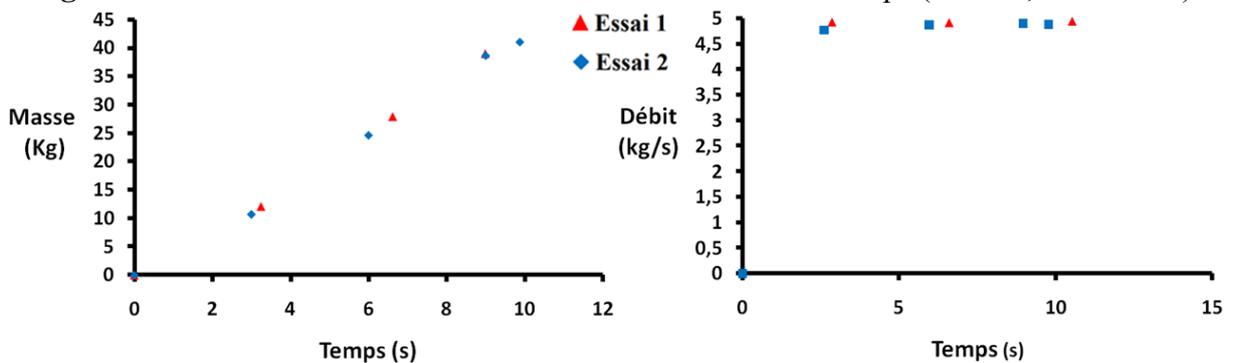


Figure A.1.4 Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 35^\circ$, $D = 80\text{mm}$)

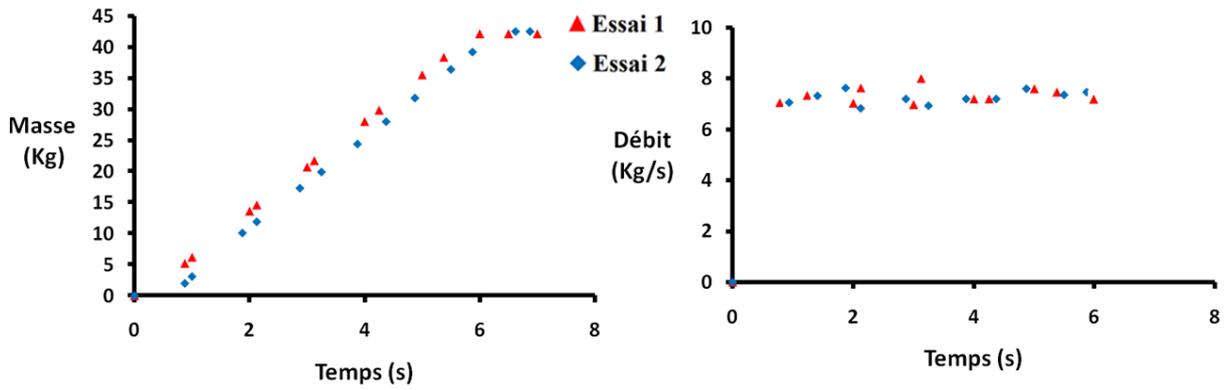


Figure A.1.5 Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 35^\circ$, $D = 100\text{mm}$)

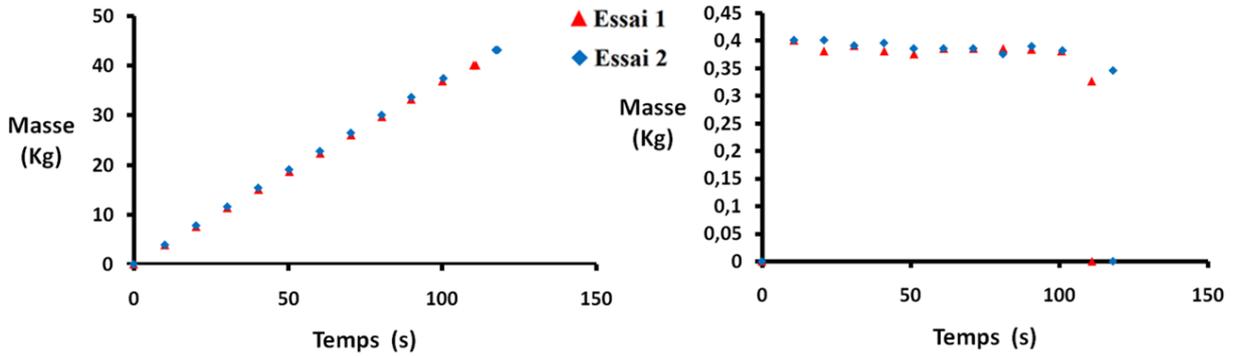


Figure A.1.6. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 45^\circ$, $D = 20\text{mm}$)

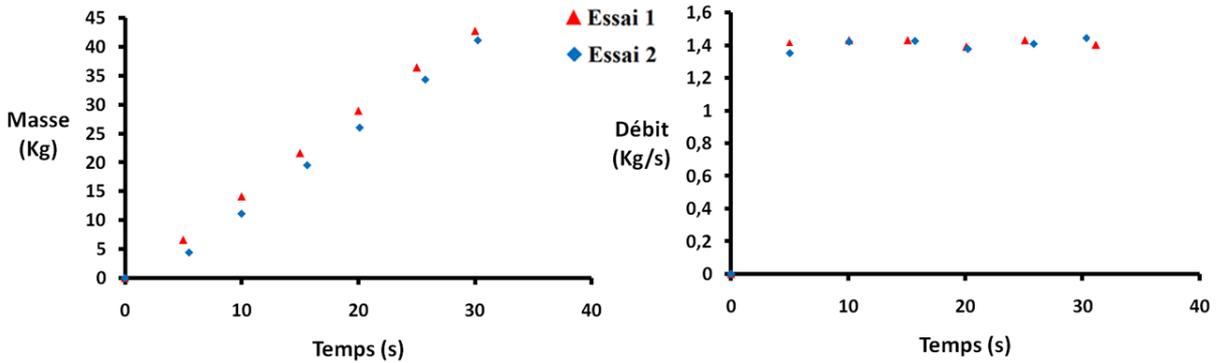


Figure A.1.7. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 45^\circ$, $D = 40\text{mm}$)

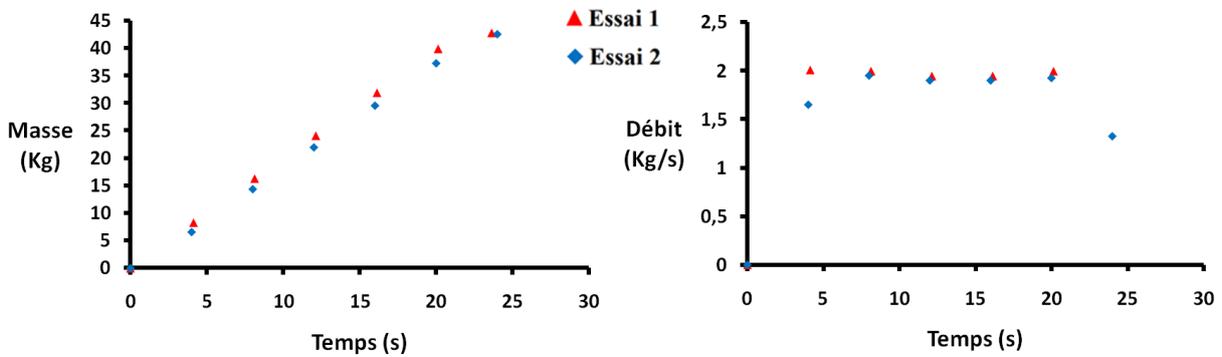


Figure A.1.8. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 45^\circ$, $D = 50\text{mm}$)

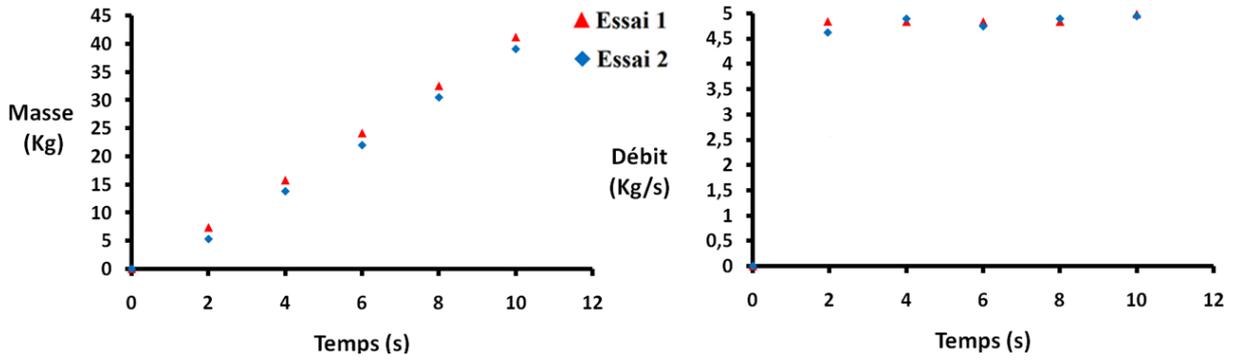


Figure A.1.9. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 45^\circ$, $D = 80\text{mm}$)

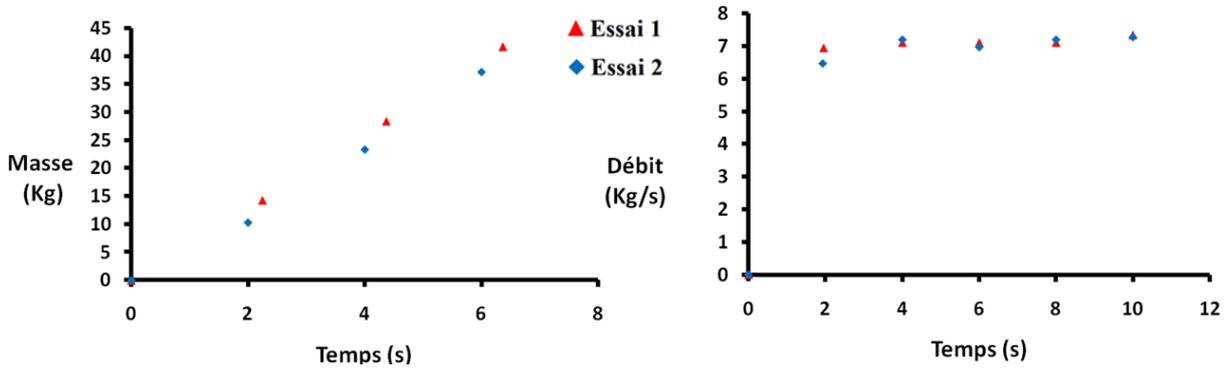


Figure A.1.10. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 45^\circ$, $D = 100\text{mm}$)

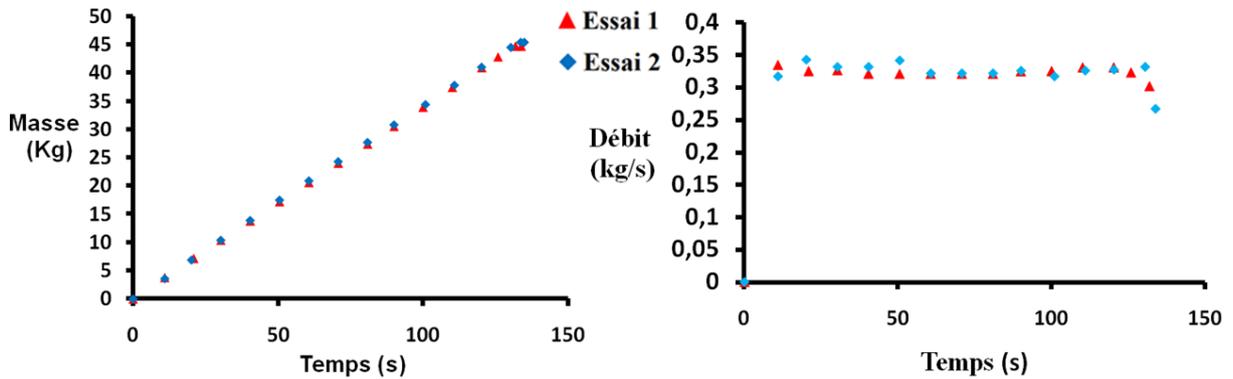


Figure A.1.11. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 55^\circ$, $D = 20\text{mm}$)

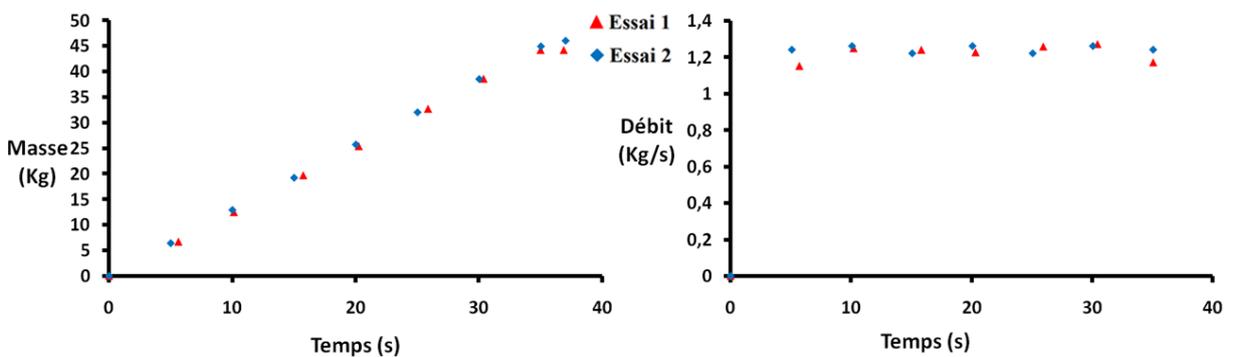


Figure A.1.12. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 55^\circ$, $D = 40\text{mm}$)

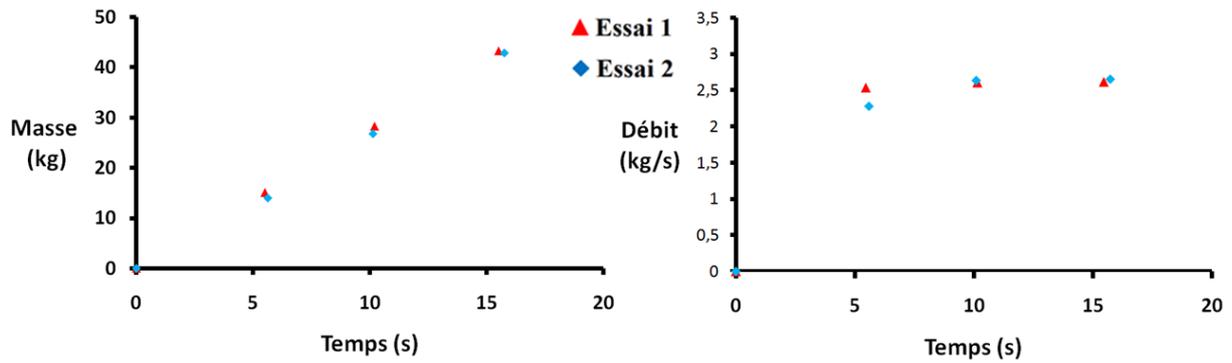


Figure A.1.13. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 55^\circ$, $D = 60\text{mm}$)

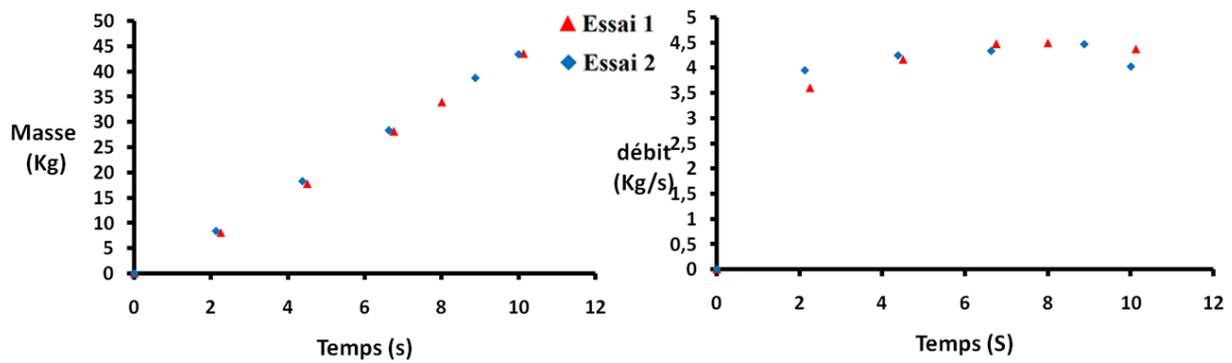


Figure A.1.14. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 55^\circ$, $D = 80\text{mm}$)

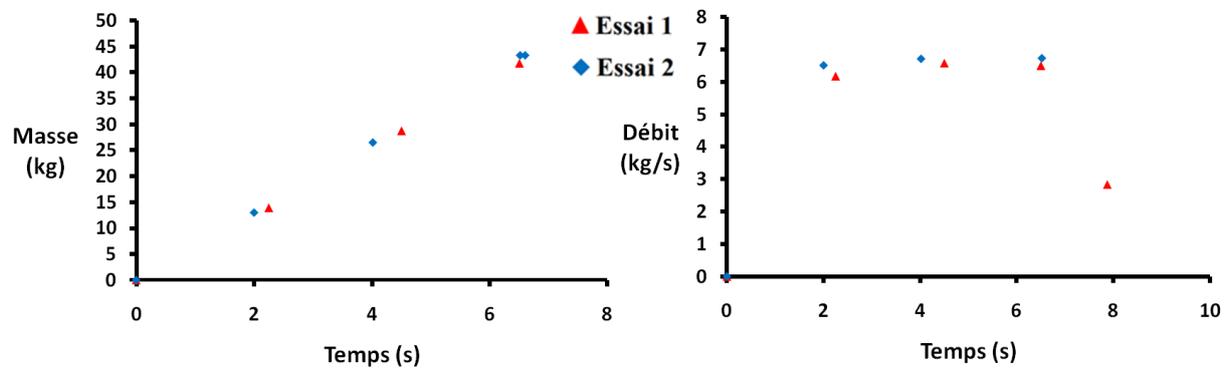
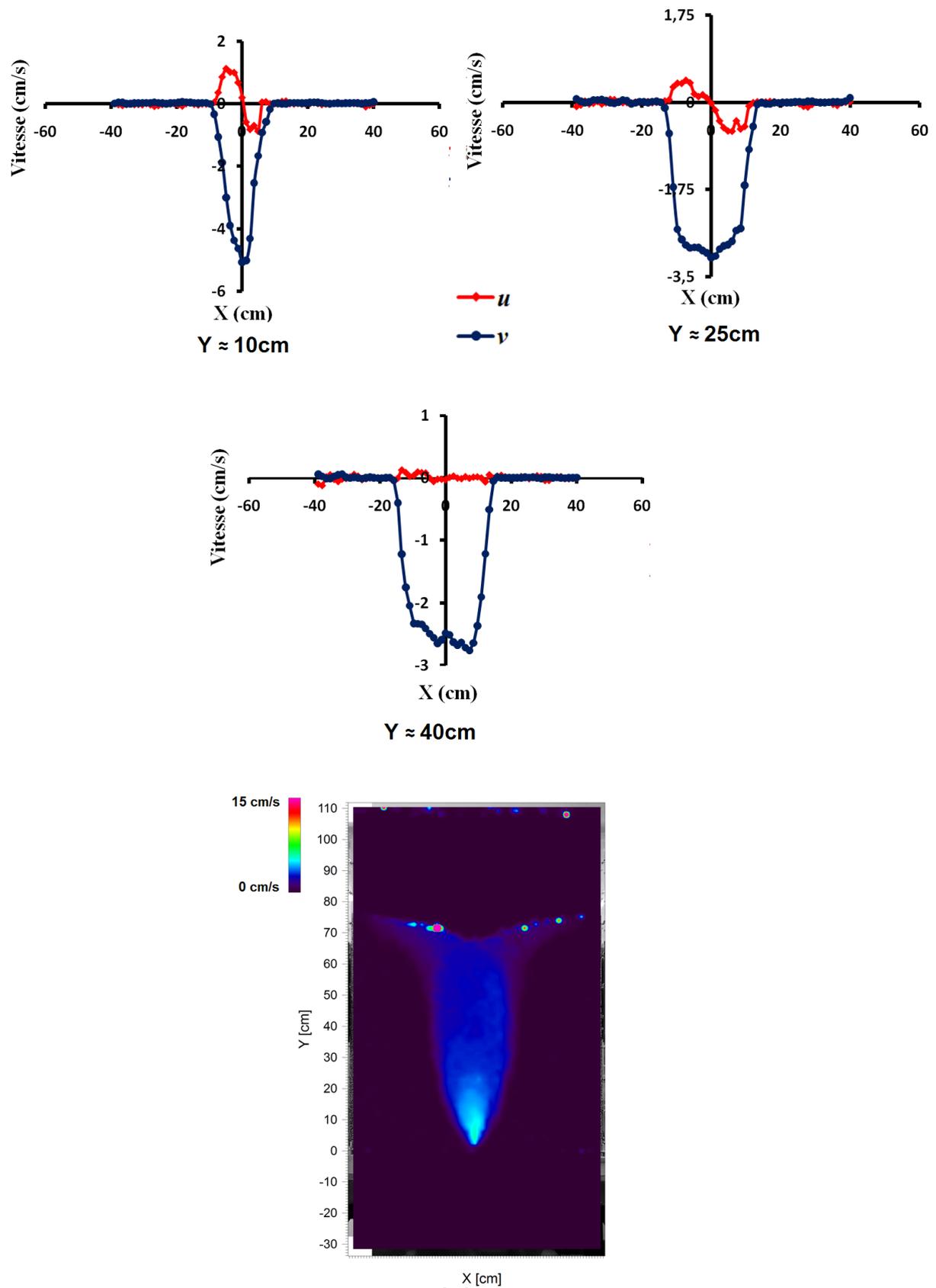


Figure A.1.15. Variation de la masse et du débit en fonction du temps ($\alpha = 55^\circ$, $D = 100\text{mm}$)

Annexe 2. Distribution de la vitesse des grains avec et sans trémie.

Figure A.2.1. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 30\text{mm}$

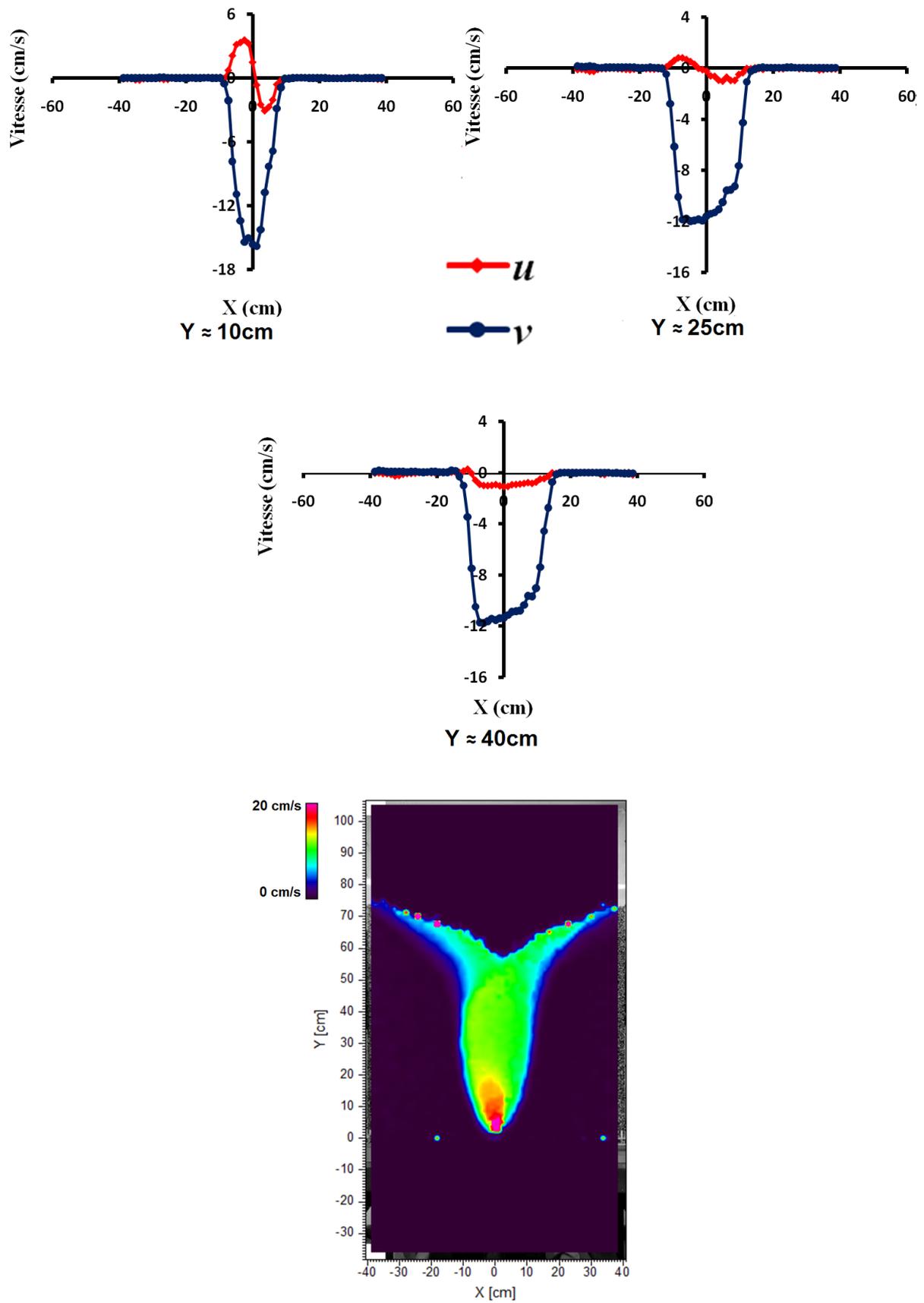


Figure A.2.2. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 60\text{mm}$

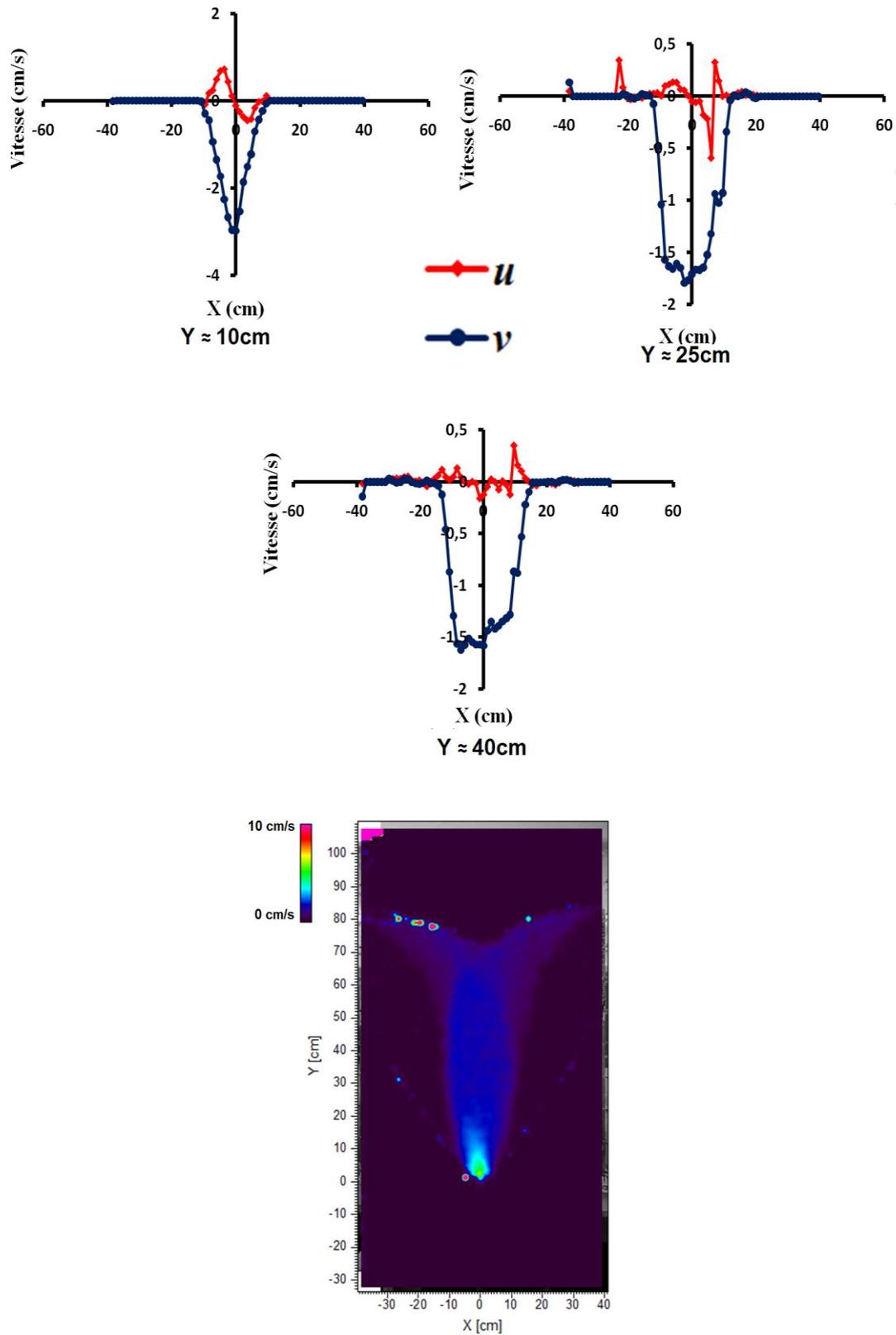


Figure A.2.3. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 20\text{mm}$ et

$$\alpha = 35^\circ.$$

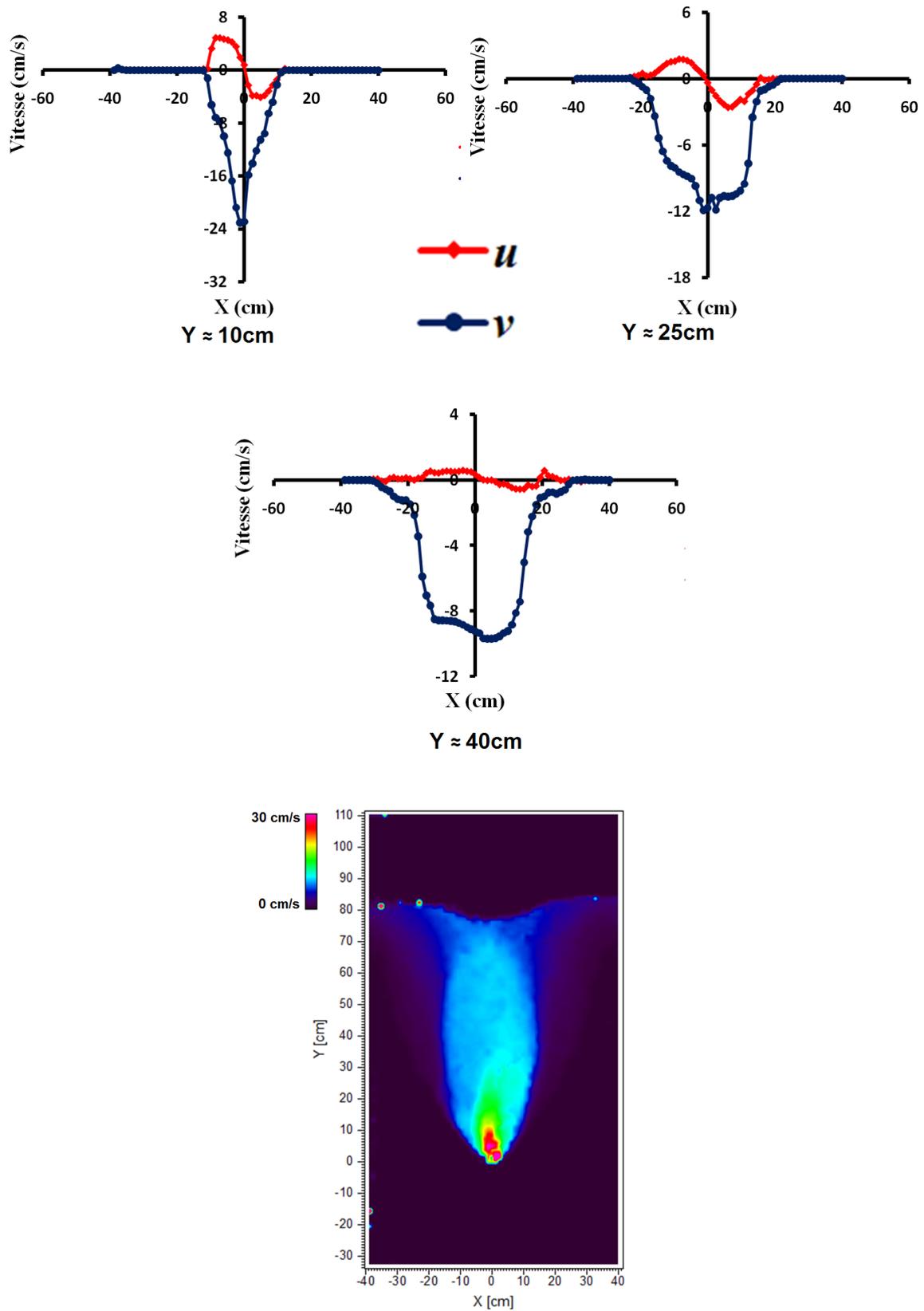


Figure A.2.4. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 60\text{mm}$ et $\alpha = 35^\circ$.

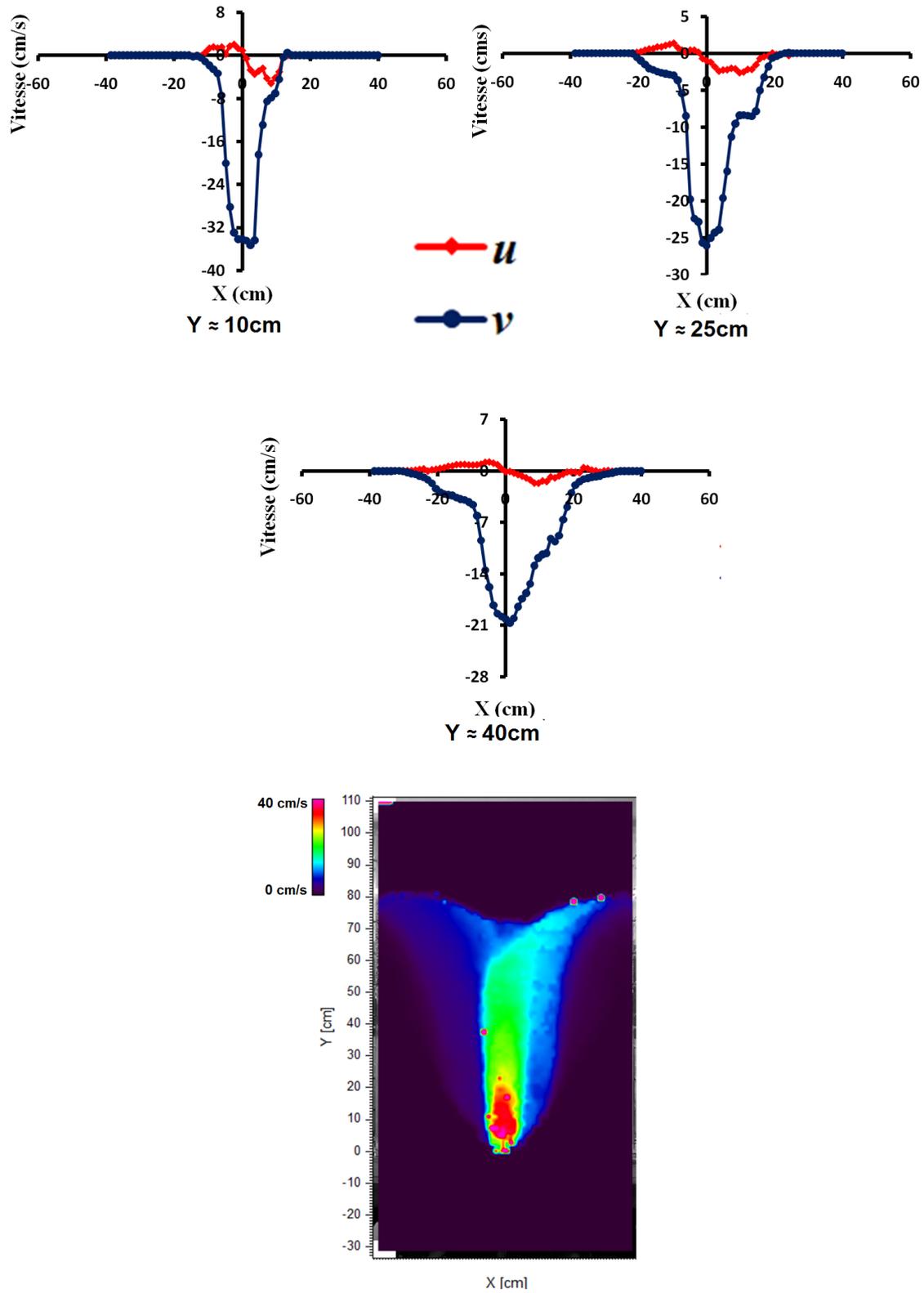


Figure A.2.5. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 80\text{mm}$ et $\alpha = 35^\circ$.

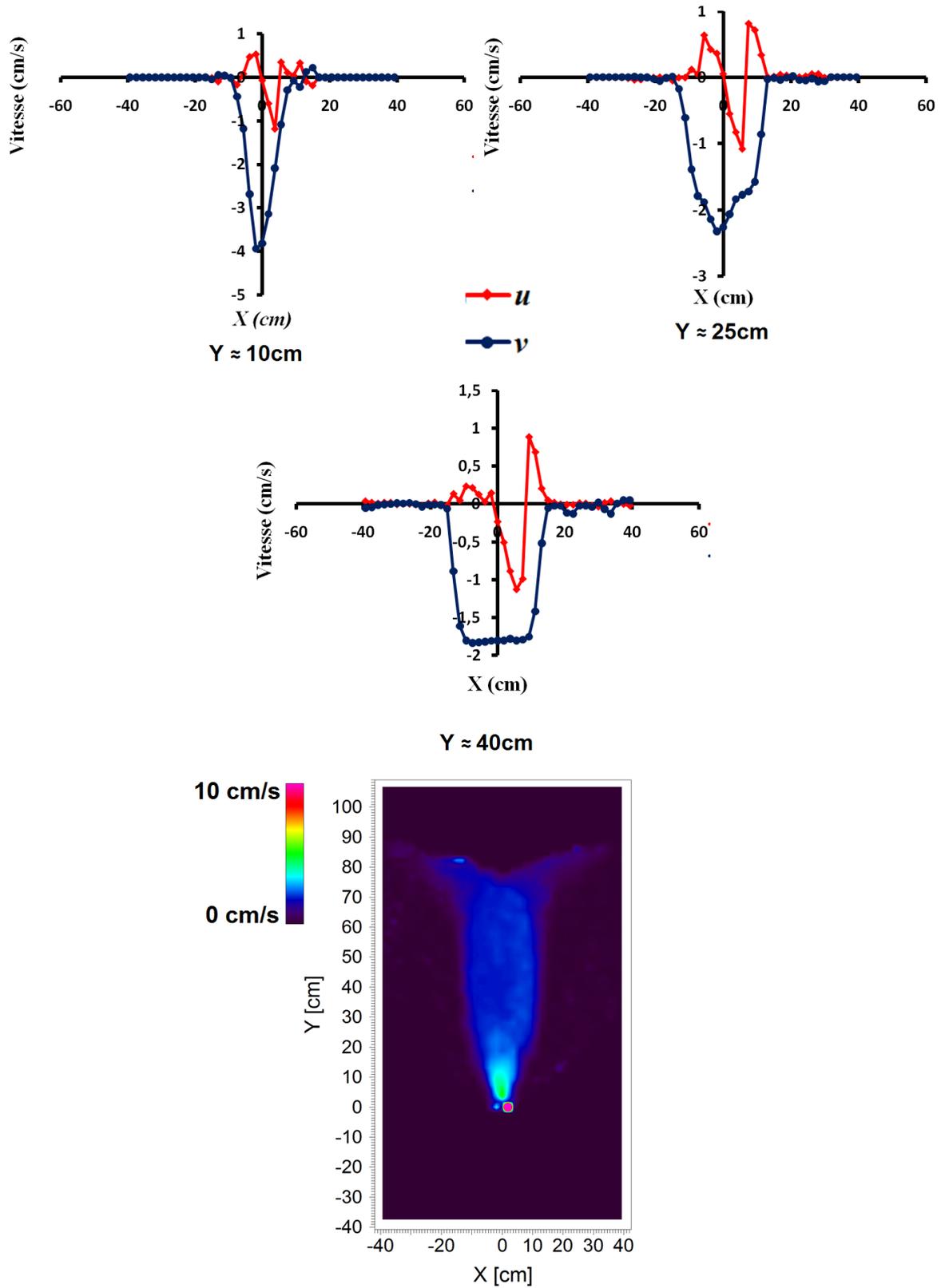


Figure A.2.6. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 20\text{mm}$ et $\alpha = 45^\circ$.

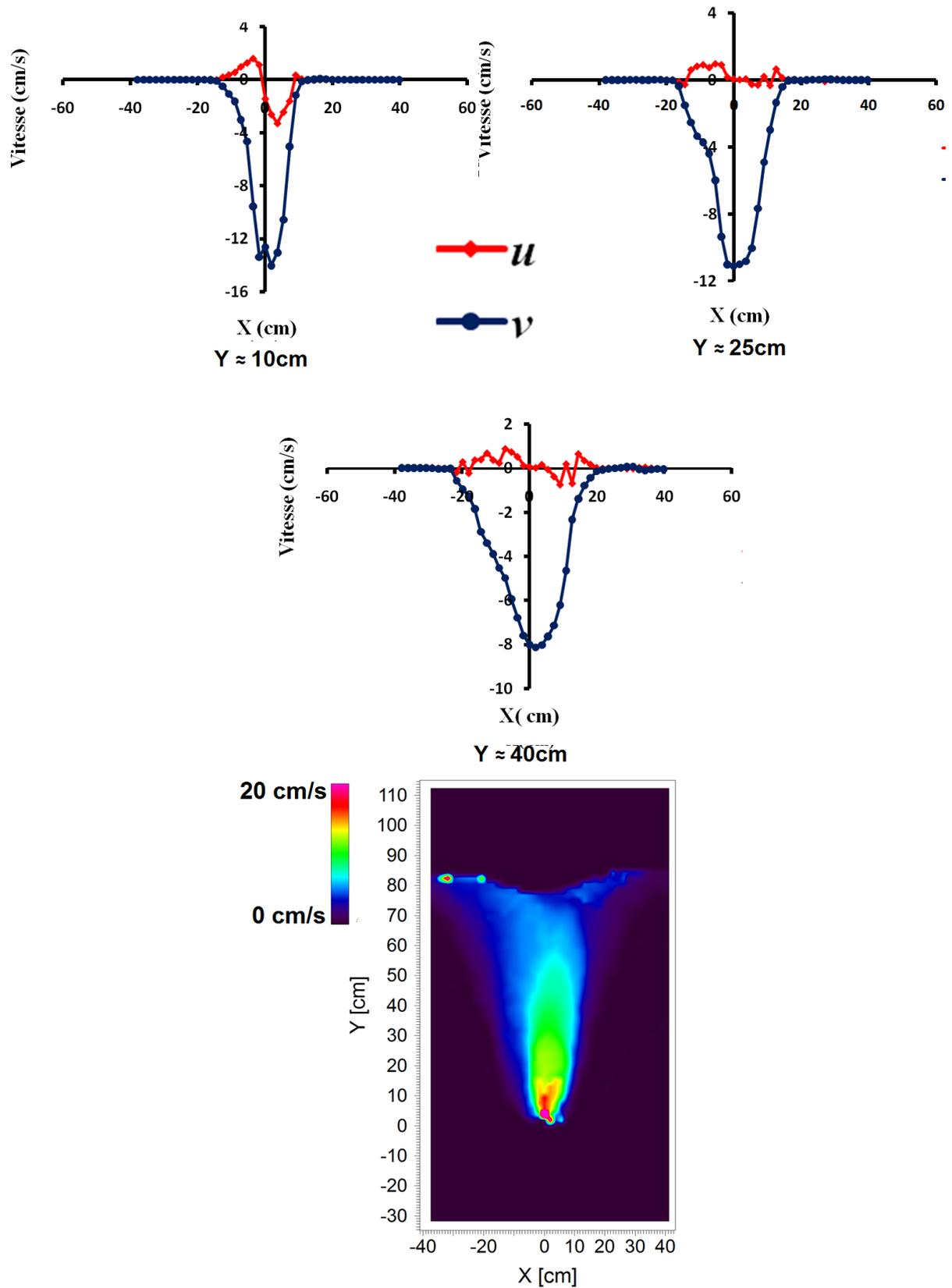


Figure A.2.7. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 50\text{mm}$ et

$$\alpha = 45^\circ.$$

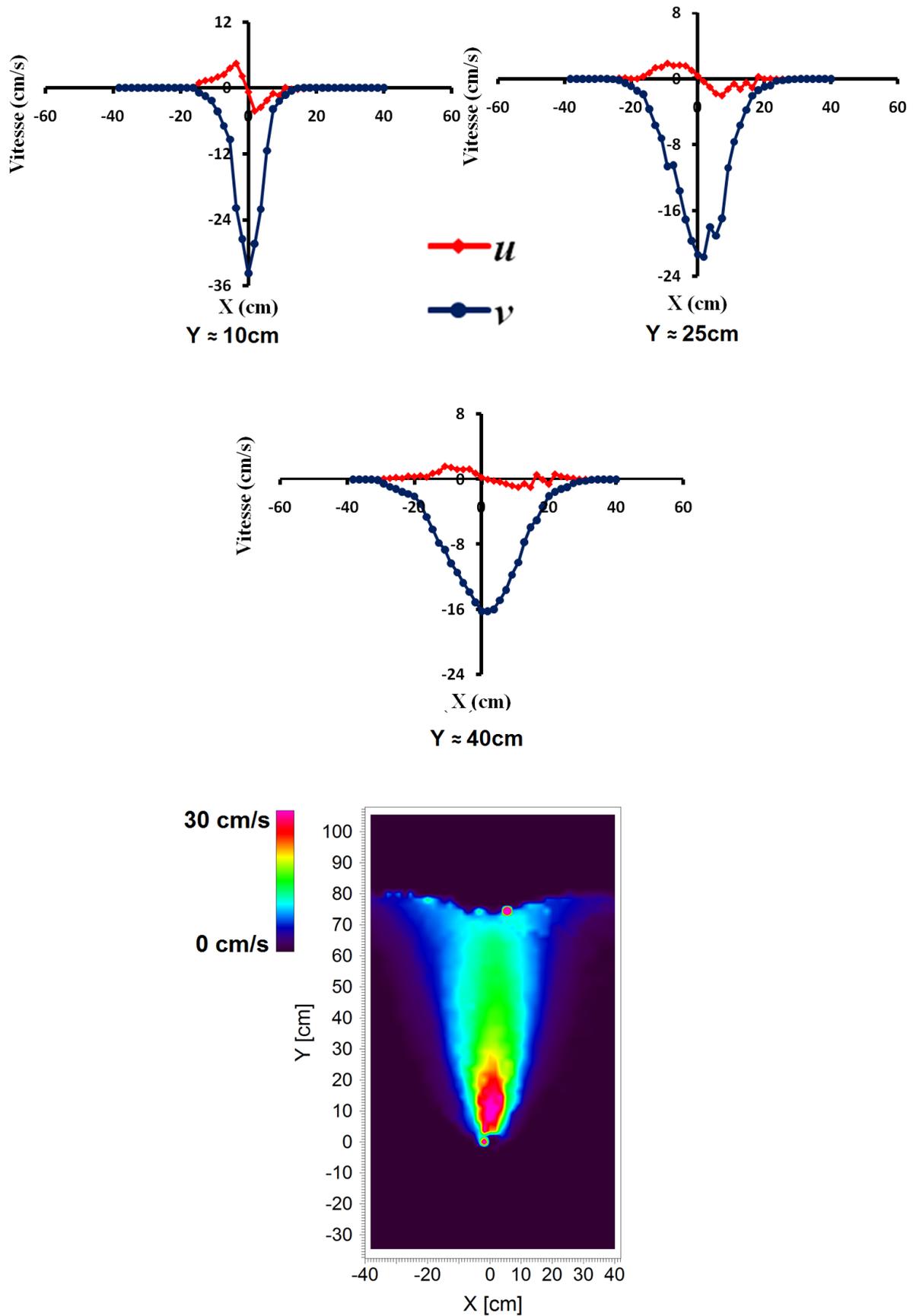


Figure A.2.8. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 80\text{mm}$ et

$$\alpha = 45^\circ.$$

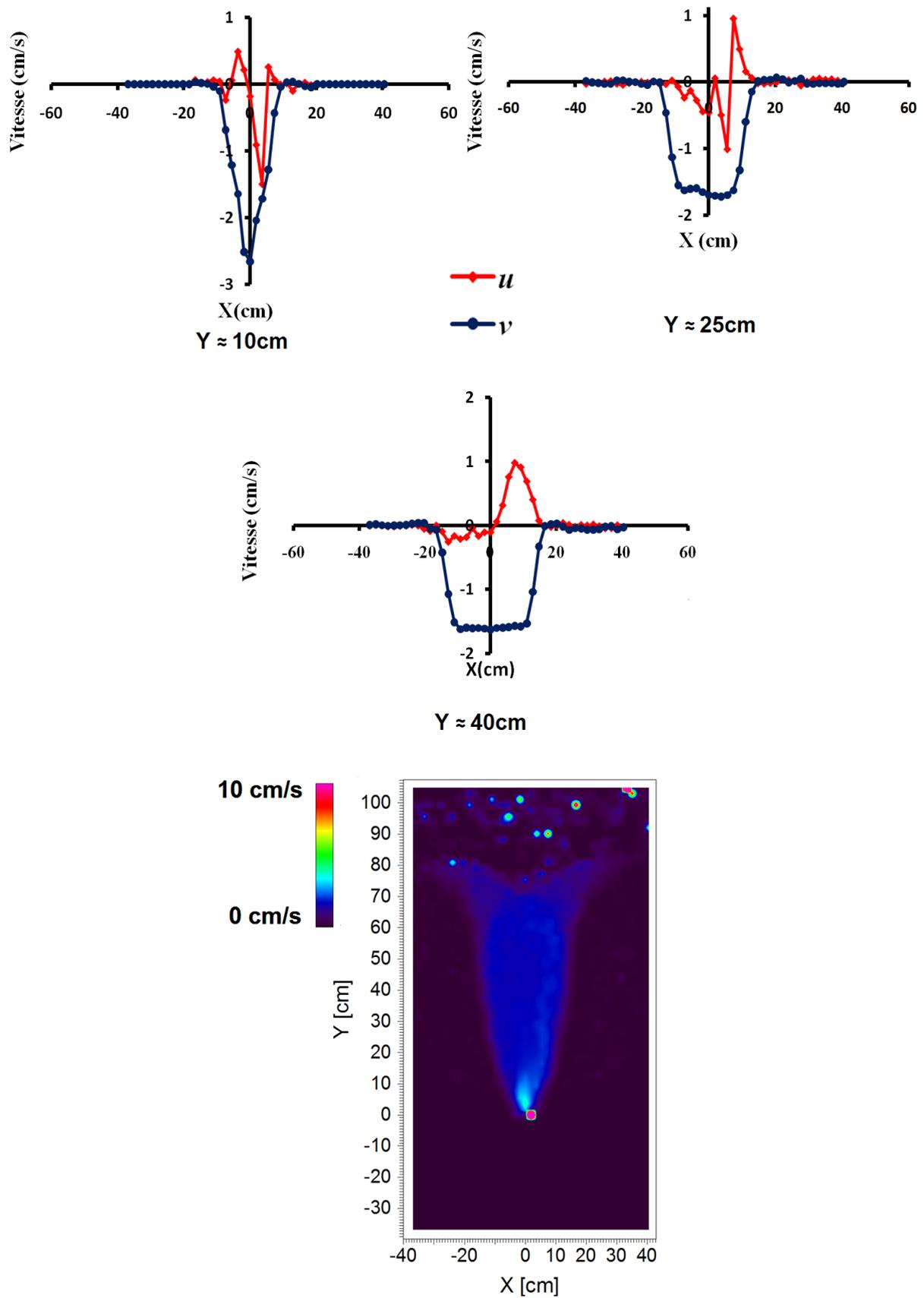


Figure A.2.9. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 20\text{mm}$ et

$$\alpha = 55^\circ.$$

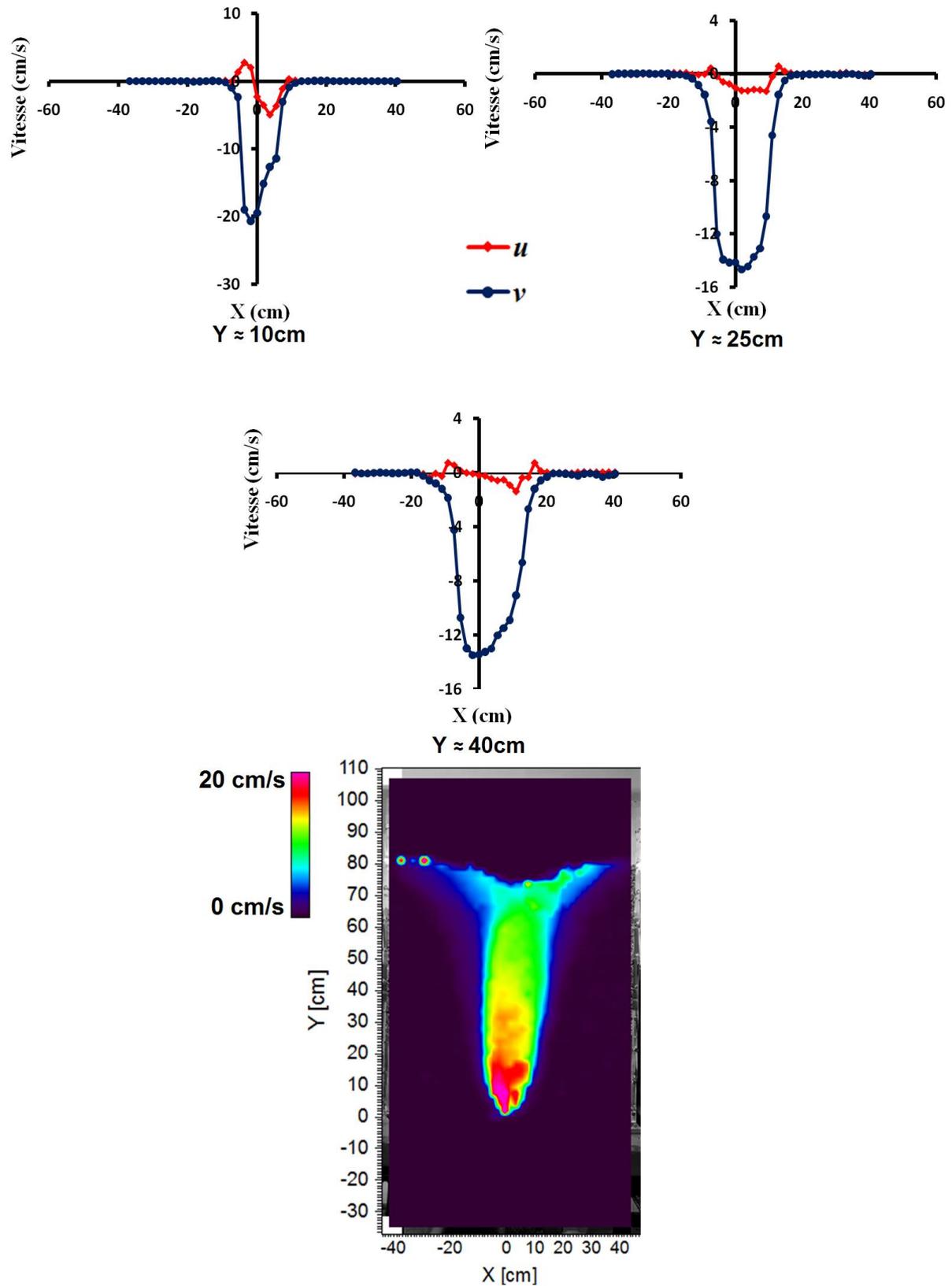


Figure A.2.10. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 60\text{mm}$ et $\alpha = 55^\circ$.

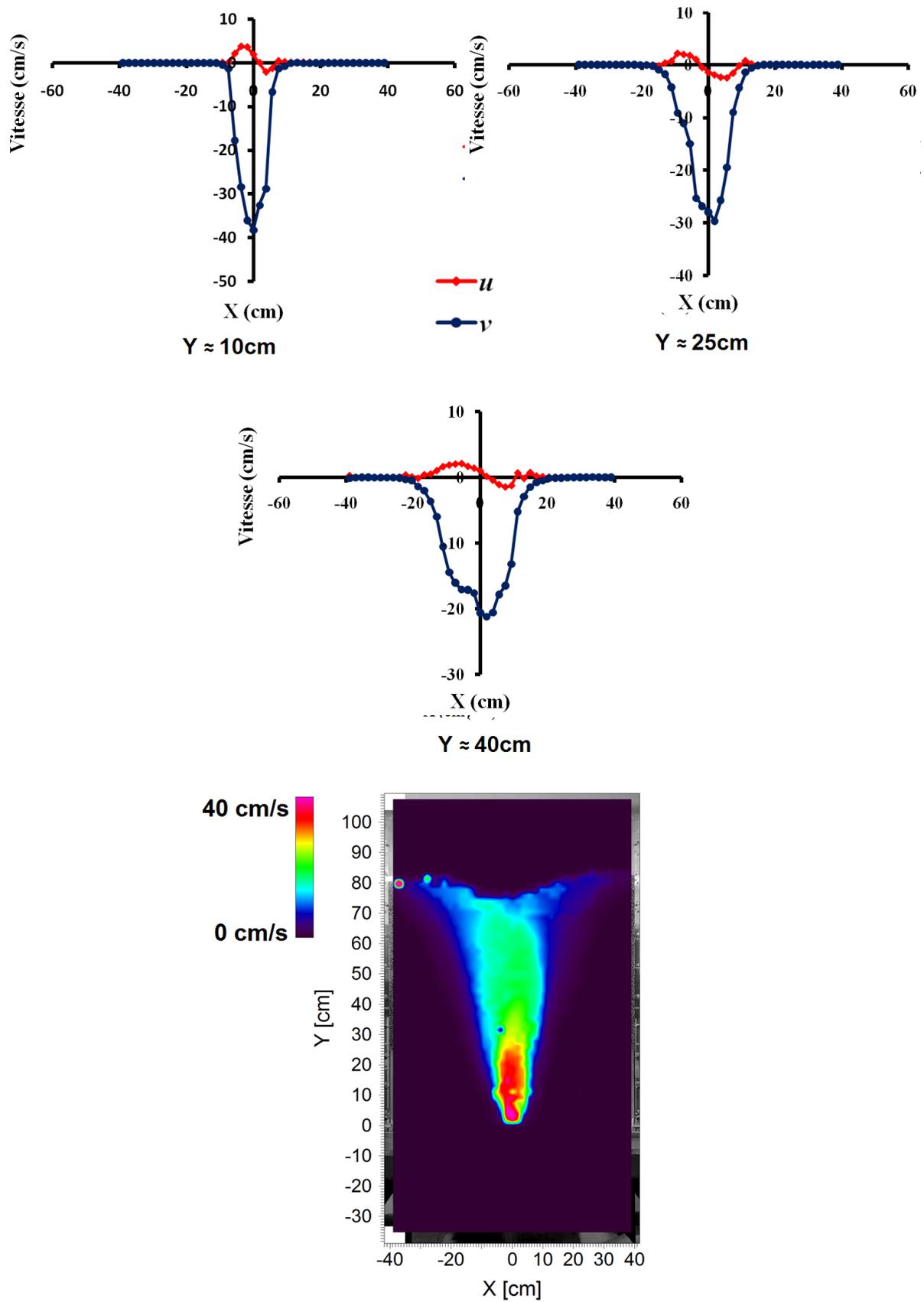


Figure A.2.11. u et v en fonction de X avec la distribution en contour pour $D = 80\text{mm}$ et

$$\alpha = 55^\circ.$$