

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	VII
RÉSUMÉ	IX
ABSTRACT.....	XI
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XVII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES SYMBOLES.....	XXV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 PROBLÉMATIQUE	2
1.2.1 CHUTE DE TRANSITION.....	4
1.2.2 MODULE D'ALIMENTATION.....	5
1.3 OBJECTIFS	6
1.4 MÉTHODOLOGIE	8
1.4.1 OPTIMISATION DE LA CHUTE DE TRANSITION	9
1.4.2 OPTIMISATION DU MODULE D'ALIMENTATION.....	9
1.5 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES PARTIES	10
CHAPITRE 2 L'ÉCOULEMENT DES MATÉRIAUX GRANULAIRES	11
2.1 THÉORIE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES	11
2.1.1 DÉFINITION D'UN MATÉRIAU GRANULAIRE	12
2.1.2 LES DIFFÉRENTS RÉGIMES D'ÉCOULEMENT	12
2.1.3 ÉCOULEMENT DENSE.....	14

2.1.4	LES MÉTHODES NUMÉRIQUES D'ANALYSE	15
2.1.5	L'AVANTAGE DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE	16
2.2	PRÉSENTATION DU LOGICIEL EDEM	23
2.2.1	MODÈLE DE CONTACT	23
2.2.2	RÉALISATION D'UNE SIMULATION.....	26
CHAPITRE 3 RECHERCHE DES PROPRIÉTÉS MATÉRIAUX.....		27
3.1	DÉFINITIONS	27
3.2	MÉTHODE DE DÉTERMINATION.....	28
3.2.1	BANC D'ESSAI	29
3.2.2	PRINCIPE DES PLANS D'EXPÉRIENCE	29
3.3	PLAN D'EXPÉRIENCE ET CALIBRATION DU LOGICIEL	32
3.3.1	RECHERCHE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES	32
3.3.2	DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES INFLUENTS.....	38
3.3.3	BASE DE DONNÉES DE MATÉRIAUX.....	43
CHAPITRE 4 OPTIMISATION DE LA CHUTE DE TRANSITION		45
4.1	CONSTRUCTION D'UN BANC D'ESSAI.....	45
4.2	COURBES EXPÉRIMENTALES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT.....	48
4.3	MODÉLISATION DU BANC D'ESSAI	52
4.4	DISCUSSION	56
4.5	UTILISATION OPTIMALE DE LA CHUTE STANDARD	58
4.5.1	INFLUENCE DE LA POSITION HORIZONTALE.....	58
4.5.2	INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA CHUTE	59
4.5.3	INFLUENCE D'UN REVÊTEMENT À FRICTION FAIBLE.....	61
4.5.4	VITESSE DE SORTIE DES PREMIÈRES PARTICULES	63
4.6	RECHERCHE DE NOUVELLES GÉOMÉTRIES	65
4.6.1	CRITÈRES DE CHOIX ET DÉROULEMENT DES ESSAIS.....	65
4.6.2	EXEMPLE AVEC UNE CHUTE DOUBLE	67
4.6.3	TABLEAU SYNTHÈSE DES ESSAIS.....	69

4.7	DISCUSSION	73
CHAPITRE 5 OPTIMISATION DU MODULE D'ALIMENTATION.....		75
5.1	DESCRIPTION DU SYSTÈME ET PROBLÉMATIQUE	75
5.1.1	LE MODULE GHS	75
5.1.2	LA ROUTINE DE REMPLISSAGE.....	76
5.1.3	CHOIX D'UNE RECETTE	78
5.1.4	PROBLÉMATIQUE	79
5.2	HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE	80
5.3	TRAVAIL PRÉLIMINAIRE SUR EDEM	81
5.3.1	OBTENTION DU DÉBIT EN TEMPS RÉEL	81
5.3.2	REPRODUCTION DE L'ÉCOULEMENT ERRATIQUE.....	82
5.3.3	CHOIX D'UNE MÉTHODE DE COMPARAISON ET D'ANALYSE	84
5.4	RÉSULTATS DES SIMULATIONS POUR DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DE PORTES...91	
5.4.1	LES SYSTÈMES À UNE PORTE	91
5.4.2	AUTRES SYSTÈMES (DIAPHRAGME ET DOUBLE PORTE).....	97
5.5	ESSAIS EXPÉRIMENTAUX.....	102
5.5.1	PROTOCOLE D'ESSAI	103
5.5.2	RÉSULTATS	104
5.6	DISCUSSION	107
5.6.1	ANALYSE DES PERFORMANCES	107
5.6.2	VALIDATION DE LA MÉTHODE.....	114
CHAPITRE 6 CONCLUSION GÉNÉRALE.....		121
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		125
ANNEXE I PARAMÉTRAGE D'UNE SIMULATION SUR EDEM.....		127
I.1	IMPORTATION DES GÉOMÉTRIES	127
I.2	SAISIE DES PARAMÈTRES DE SIMULATION.....	129
I.3	DÉFINITIONS DES PARTICULES	130

I.4 CRÉATION DES PARTICULES.....	132
I.5 DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE CALCUL.....	133
I.6 VISUALISATION DE LA SIMULATION.....	134
ANNEXE II LES DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DE CHUTES TESTÉES	135
II.1 CHUTE DOUBLE 2	135
II.2 CHUTE DOUBLE 3	137
II.3 CHUTE DROITE.....	140
II.4 CHUTE SEMI-PARABOLIQUE	142
II.5 CHUTE CYCLOÏDE	144
II.6 CHUTE TUBE.....	145
II.7 CHUTE CONIQUE	147
II.8 CHUTE CONIQUE AVEC DÉFLECTEUR	148
ANNEXE III LES ANALYSES DES TESTS DE PRÉCISION	153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs de C selon les niveaux	30
Tableau 2 : Résultats d'une analyse ANOVA.....	31
Tableau 3 : Liste des paramètres à étudier et leurs niveaux	33
Tableau 4 : Plan d'expérience issu des équations	35
Tableau 5 : Analyse ANOVA de l'influence des paramètres.....	36
Tableau 6 : Temps de chute du maïs.....	38
Tableau 7 : Temps d'écoulements réels sur modèle réduit	40
Tableau 8 : Valeurs possibles des	41
Tableau 9 : Temps de chute des granules	42
Tableau 10 : Valeurs possibles des	42
Tableau 11: Synthèse des essais de géométrie pour la chute de transition.....	70
Tableau 12 : Valeurs du débit instantané selon le temps	84
Tableau 13 : Valeurs du débit selon l'ouverture pour	86
Tableau 14 : Essais de répétabilité du modèle à différentes ouvertures	87
Tableau 15 : Amélioration de performance par rapport à la porte standard pour nos prototypes.....	111

Tableau 16 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard	153
Tableau 17 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard pour les granules de bois	153
Tableau 18 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard	154

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'une machine de pesage.....	3
Figure 2: Les différents régimes d'écoulement (Pouliquen 2004)	13
Figure 3 : Configurations d'écoulements denses : cisaillement plan (a), Plan incliné (b), écoulement sur un tas (c), tambour tournant (d)	14
Figure 4 : Les 4 étapes des méthodes de simulation discrètes.....	15
Figure 5 : Dispositif expérimental d'écoulement sur plan incliné	17
Figure 6 : Diagramme d'écoulement, épaisseur selon l'angle d'inclinaison (Pouliquen 2002)	18
Figure 7: Loi d'écoulement (Pouliquen 2002)	19
Figure 8 : Diagramme et loi d'écoulement obtenus par simulation numérique (Roux 2005)	21
Figure 9 : Profil normalisé du nombre inertiel à différentes inclinaisons (Roux 2005)	21
Figure 10 : Lois de frottement sur plan incliné (Roux 2005)	22
Figure 11 : Étapes de la collision de 2 particules sur EDEM	24
Figure 12 : Chevauchement normal.....	25
Figure 13 : Module GHS ou module d'alimentation.....	46

Figure 14 : Balance standard.....	46
Figure 15 : Installation de tests en entreprise.....	47
Figure 16 : Temps d'écoulement de 20kg de maïs en fonction de l'ouverture des portes	50
Figure 17 : Temps d'écoulement du maïs en fonction de la masse	51
Figure 18 : Temps d'écoulement de 20kg de maïs en fonction de l'ouverture des portes	54
Figure 19 : Temps d'écoulement de maïs en fonction de la masse	54
Figure 20 : Positionnement horizontal de la chute.....	58
Figure 21 : Temps de décharge selon le positionnement de la balance	59
Figure 22 : Cote de positionnement pour l'optimisation de la hauteur de la balance.....	58
Figure 23 : Temps de décharge selon la hauteur de la chute.....	60
Figure 24 : Comparaison chute classique/chute téflon.....	62
Figure 25 : Nombre de particules en fonction du temps en secondes lors d'une décharge ..	64
Figure 26 : Vitesse moyenne instantanée des particules dans l'intervalle $[t_1;t_2]$ et vitesse moyenne à la sortie de la bouche d'alimentation.....	65
Figure 27 : Géométrie de la chute double 1 pour les essais de décharge.....	67
Figure 28 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t_1	66
Figure 29 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t_2	66
Figure 30 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t_3	67
Figure 31 : Le module GHS intégré au système	73
Figure 32 : Modèle de simulation utilisé avec bac de récupération	82

Figure 33 : Mise en évidence du caractère erratique de l'écoulement sur EDEM	81
Figure 34 : Évolution du débit selon l'ouverture pour différents pas de temps	86
Figure 35 : Évolution de la dispersion selon l'ouverture et pour différents pas de temps	86
Figure 36 : Évolution de la dispersion selon le débit moyen (porte standard)	90
Figure 37 : Porte standard : vue d'ensemble et forme du découpage.....	92
Figure 38 : Découpage de la porte avec encoche.....	92
Figure 39 : Découpage de la porte courbe	93
Figure 40 : Montage des murs déflecteurs.....	93
Figure 41 : Comparaison globale des courbes de dispersion (géométries à une porte).....	94
Figure 42 : Comparaison autour d'une dispersion de 15% (géométries à une porte)	95
Figure 43 : Découpage de la pointe selon un angle donné (ici 12°).....	96
Figure 44 : Influence de l'angle de la pointe.....	97
Figure 46 : Diaphragme plat	98
Figure 45 : Diaphragme conique	95
Figure 47 : Double porte pointe.....	99
Figure 48 : Double porte courbe	100
Figure 49 : Comparaison globale des courbes de dispersion des systèmes théoriques	101
Figure 50 : Comparaison autour de 15% de dispersion des systèmes théoriques.....	101
Figure 51: Mesure des dispersions des prototypes avec du maïs	105
Figure 52 : Tests de précision des prototypes avec des granules de bois	106

Figure 53 : Tests de précision des prototypes avec des billes de plastique.....	107
Figure 54 : Comparaison des performances des portes par rapport à la porte standard pour le maïs	109
Figure 55 : Comparaison des performances par rapport à la porte standard pour les granules de bois	110
Figure 56 : Comparaison des performances par rapport à la porte standard pour les billes de plastique	110
Figure 57 : Courbes de dispersion théoriques des géométries testées pour d'autres débits	117
Figure 58 : Éjection des particules lors de la fermeture des portes.....	114
Figure 59 : Importation des géométries.....	128
Figure 60 : Saisie des paramètres principaux.....	130
Figure 61 : Définition des particules	131
Figure 62 : Création de l'usine à particules	133
Figure 63 : Visualisation du résultat de la simulation.....	134
Figure 64: Géométrie de la chute double 2 pour les essais de décharge.....	136
Figure 65 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t1	130
Figure 66 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t2	131
Figure 67 : Géométrie de la chute double 3 pour les essais de décharge.....	138
Figure 68 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t1	132
Figure 69 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t2	133
Figure 70 : Géométrie de la chute droite pour les essais de décharge	140

Figure 71 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 3 à t1	135
Figure 72 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 3 à t2.....	135
Figure 73 : Géométrie de la chute semi-parabolique pour les essais de décharge.....	142
Figure 74 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute semi-parabolique à t1	137
Figure 75 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute semi-parabolique à t2.....	137
Figure 76 : Géométrie de la chute cycloïde pour les essais de décharge.....	144
Figure 77 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute cycloïde à un instant t	139
Figure 78 : Géométrie de la chute tubulaire pour les essais de décharge	146
Figure 79 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute tube à un instant t	140
Figure 80 : Géométrie de la chute conique pour les essais de décharge.....	147
Figure 81 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique à t1	141
Figure 82 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique à t2	142
Figure 83 : Géométrie du déflecteur 2 (déflecteur circulaire troué)	143
Figure 84 : Géométrie du déflecteur 1 (déflecteur tube troué)	143
Figure 85 : Géométrie du déflecteur 3 (déflecteur conique).....	143
Figure 86 : Géométrie du déflecteur 4 (déflecteur conique troué)	143
Figure 87 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique avec un déflecteur circulaire troué des instants t1, t2 et t3	144
Figure 88 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique avec un déflecteur conique à des instants t1, t2 et t3.....	144

LISTE DES SYMBOLES

- % ouverture : Commande d'ouverture envoyée au servomoteur pour l'ouverture de la porte (% entre le min. et le max.)
- B : Longueur caractéristique
- β_1 : Constante dépendant du couple matériau-rugosité
- β : Raideur normale
- CutOff* : Poids où la consigne de fermeture est envoyée
- δ_n : Chevauchement normal, m
- δ_t : Chevauchement tangentiel, m
- Δt : Intervalle de temps pour la simulation sur EDEM
- Δt_i : Erreur sur le temps de sortie de la première particule
- DFW* : Dribble Feed Weight : poids auquel on passe du remplissage rapide au progressif (donc auquel on débute le contrôle de la
- e : Coefficient de restitution
- e_p : Erreur expérimentale (analyse ANOVA)
- F_n : Force normale, N
- F_n^d : Force d'amortissement normale, N
- F_t^d : Force d'amortissement tangentielle, N
- F_t : Force d'amortissement tangentielle, N
- g : Accélération de la pesanteur
- h : Épaisseur, m
- $h_{stop}(\theta)$: Épaisseur critique
- $h_{start}(\theta)$: Amorce de l'écoulement
- I : Nombre inertiel
- k_B : Constante de Boltzmann, J.K⁻¹

- L : Longueur caractéristique, m
 μ_s : Coefficient de frottement statique
 m : Masse équivalente des particules, kg
MinFeeding : % d'ouverture minimum
MaxFeeding : % d'ouverture maximum
 Q : Débit moyen de particules, part. s⁻¹
 R : Rayon moyen, m
 r_p : Coefficient de corrélation
 σ : Écart-type des mesures de masse, g
 S_n : Raideur normale, N.m⁻¹
 S_t : Raideur tangentielle, N.m⁻¹
 $\tau(V, h)$: Contrainte de cisaillement au fond, Pa
 T : Température ambiante, K
 θ : Angle d'inclinaison
 θ_1 : Angle pour lequel h_{stop} diverge
 θ_2 : Angle pour lequel $h_{stop} = 0$
 $V(h, \theta)$: Vitesse des particules
 v_n^{rel} : Composante normale de la vitesse relative, m.s⁻¹
 v_t^{rel} : Composante tangentielle de la vitesse relative, m.s⁻¹
Wtarget : System Compensation : Poids visé pour obtenir le poids nominal
Wnominal : Poids visé final
 X_{cible} : Poids consigne, lb
 Y : Module de Young, kg.m²

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 MISE EN CONTEXTE

L'entreprise, dont nous taillons le nom pour des raisons de propriété intellectuelle, est une structure de plusieurs unités d'affaires. Un de leurs secteurs d'activité est la conception et la fabrication de machines de pesage et d'ensachage qui seront ensuite utilisées dans des secteurs d'activité variés. Cela peut être dans l'agroalimentaire pour remplir des sacs de maïs ou de nourriture à chien par exemple, ou encore dans l'industrie du chauffage pour le remplissage de granules de bois : combustible de chaudière. Il existe alors différents systèmes et principes de fonctionnements adaptés au matériau ensaché. L'éventail étant large, nous avons choisi de nous concentrer sur les machines représentant le plus gros secteur d'activité de l'entreprise à savoir les ensacheurs de matière granulaire sèche et non cohésive. On travaille donc avec des matériaux du type grain (maïs, blé, canola..), nourriture à chien, bois de chauffage et on exclut les grains trop fins comme la farine, les poudres, le sable et les matières collantes comme la mélasse et les nourritures de bovins.

L'entreprise n'est pas la seule sur le marché. Pour rester parmi les chefs de file dans le domaine, elle se doit d'innover et de se perfectionner perpétuellement. La stratégie la plus couramment adoptée par les développeurs est du type essai et erreur. L'entreprise fabriquant ses pièces sur le site, il lui est facile de construire des prototypes et de les tester, réduisant ainsi le coût d'analyse.

Le but premier de l'innovation est de fabriquer des machines de pesage et d'ensachage plus rapides et plus précises que celles de ses concurrents pour s'imposer sur le marché. La rapidité est reliée au nombre de sacs que l'on va pouvoir ensacher à la minute. La précision

quant à elle est importante pour le client qui vendra ensuite ses sacs. S'il vend un sac de 20kg de produit, il s'engage à fournir un minimum de 20kg par sac. Si la machine pèse alors 20kg à plus ou moins 0,2kg il devra alors la régler sur 20,2kg. Cette matière supplémentaire peut sur plusieurs milliers de sacs, représenter un coût important.

1.2 PROBLEMATIQUE

Même s'il existe toute une gamme de produits s'adaptant aux différentes cadences voulues, aux différents systèmes d'ensachage situés en aval, ou même aux différents sacs utilisés par les clients, le système de pesage est toujours constitué des mêmes éléments principaux. Il se divise en trois parties distinctes représentées sur la figure 1 :

- 1 : Le module d'alimentation gravitaire qui contrôle l'apport de matériau en vrac dans la balance avec une porte motorisée et asservie.
- 2 : La balance qui accumule le produit à peser et le décharge par ses 2 portes une fois la consigne de masse atteinte.
- 3 : La chute de transition qui achemine le produit déchargé par la balance jusqu'à la bouche de remplissage des sacs (4).

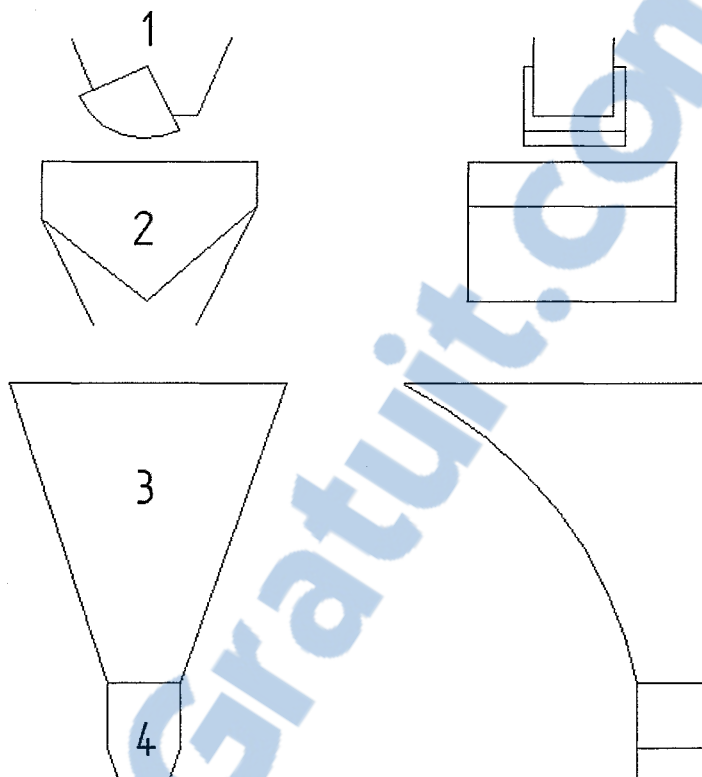


Figure 1 : Schéma d'une machine de pesage. 1 : Module d'alimentation, 2 : Balance, 3 : Chute de transition, 4 : Bouche de remplissage.

Pour ce type de système de pesage et ensachage de matériaux granulaires secs et non cohésifs, les paramètres les plus importants pour l'entreprise, et pour le client potentiel qui va acheter la machine sont la vitesse et la précision de pesage. Il en découle une cadence exprimée souvent en nombre de sacs à la minute traduisant la performance de l'appareil, ainsi qu'une précision exprimée en grammes ou en onces.

Il est dans l'intérêt de l'entreprise de pouvoir concevoir leurs machines de manière plus efficace et réduire les retards dus aux essais et à l'optimisation de l'équipement. Dans l'industrie chaque machine est fabriquée selon des exigences précises qui varient d'un client à l'autre. Du coup, chaque machine est unique et possède des caractéristiques différentes : hauteur de chute, vitesse d'ensachage, matériau ensaché. La mise au point finale des systèmes se fait par ajustements successifs et requiert souvent des modifications qui sont réalisées de manière empirique.

A chaque pesée nous avons trois étapes qui correspondent aux trois organes principaux : l'alimentation en matière, le pesage et la décharge. Ces étapes sont distinctes, mais ne peuvent pas pour autant être anticipées ou superposées à cause de la conception de la machine. C'est-à-dire que l'on ne pourra pas, par exemple, pré-peser de la matière lors de la décharge. On a donc intérêt à chercher des solutions d'amélioration pour chacune de ces parties.

Tous les organes principaux de la machine sont donc soumis à des écoulements granulaires. Ces écoulements ont un comportement vraiment particulier et la complexité de leur phénomène est grande. Nous présenterons, dans le chapitre 2, quelques propriétés de ces écoulements. La balance accumulant le produit et le déchargeant ne constitue pas un axe d'étude, c'est un choix de l'entreprise. Nous aborderons alors deux organes de la machine à l'intérieur desquels nous tâcherons d'optimiser les écoulements granulaires : la chute de transition et le module d'alimentation.

1.2.1 Chute de transition

La chute de transition est la partie d'équipement qui est située en dessous de la balance. Sa fonction est de diriger le produit déchargé par la balance vers la bouche d'alimentation de l'ensacheur (voir l'élément 4 sur la figure 1). Comme la surface de décharge de la balance est beaucoup plus grande que la bouche d'alimentation de l'ensacheur, la forme de la chute de transition ressemble à un entonnoir.

Afin de diminuer le temps de cycle du système de pesage, il est avantageux de décharger le matériel le plus rapidement possible. C'est-à-dire d'ouvrir et de fermer les portes de la balance le plus rapidement possible sans refermer celles-ci avant que toute la quantité de matériel ait quitté la balance. Plus la décharge est rapide et plus il est possible de commencer le prochain cycle de pesage rapidement. En pratique, lorsque le déchargement est très rapide, il se produit fréquemment un phénomène de bouchonnage à la sortie de la chute de transition, ce qui augmente de façon dramatique le temps de

remplissage du sac positionné sur la bouche de remplissage de l'ensacheur. Le terme bouchonnage ne fait pas partie du jargon scientifique, mais il est utilisé en pratique en entreprise. Le terme utilisé dans les articles scientifiques est écoulement bouchon (Pouliquen 2004). Pour essayer donc d'atténuer ce phénomène de bouchonnage, nous devons réduire l'ouverture des portes de la balance. Cela a pour effet d'envoyer moins de produit à la fois dans la chute de transition ce qui réduit le phénomène. Cependant pour chaque chute et chaque système de porte, il y a une séquence d'ouverture de porte optimale permettant de réduire le temps de remplissage du sac. Enfin, l'effet du sac, que nous n'étudierons pas et qui a été identifié par l'expérience, vient aussi perturber la décharge de matière. L'expérimentation montre qu'une même décharge avec ou sans sac ne donne pas les mêmes résultats. Il sera toutefois décidé de ne pas inclure le sac dans l'étude, car il est très difficile à modéliser. De plus, nous considérons que le délai additionnel dû au sac est une valeur fixe. Cela ne jouera alors pas sur la comparaison entre les expériences.

Il n'est pas rare que les temps d'ouverture des portes de la balance doivent être augmentés et que l'ouverture des portes doive être diminuée pour atténuer le phénomène de bouchonnage. À une vitesse de 22 pesées par minute, une augmentation du temps de cycle global de 0,5 seconde fait baisser la cadence à 18,5 pesées par minute ce qui est considérable. À noter que le temps de décharge à l'intérieur de la chute de transition est comptabilisé entre le moment où la première particule sort de la chute jusqu'au moment où la dernière particule en sort. Tout le temps avant cela peut être anticipé par l'ensacheur.

1.2.2 Module d'alimentation

Le module d'alimentation gravitaire actuel est très précis et rapide avec des matériaux fins comme des billes de plastique. Cependant, avec des produits plus grossiers comme des grains de maïs, le système devient moins précis. La baisse de précision est causée par une moins grande régularité du débit, principalement à faible ouverture. En effet à faible ouverture, l'écoulement peut prendre un caractère erratique dans son débit, résultant en une

variation beaucoup trop élevée. Cela se produit dans des ouvertures faibles, lorsque la taille des particules n'est plus très petite par rapport à l'ouverture un blocage est possible. Il faut donc terminer le cycle d'alimentation de la balance avec une ouverture finale plus grande ce qui nuit à la précision. La précision finale du système, dont les valeurs ne seront pas dévoilées par souci de confidentialité, dépend de plusieurs facteurs comme la cadence d'ensachage, le matériau employé et le paramétrage du cycle de remplissage.

Le système d'alimentation actuellement utilisé possède une seule porte, ce qui crée un flux de matière dévié. Un système d'alimentation à deux portes pourrait offrir des avantages et permettre d'augmenter la cadence et la précision.

Comme on peut le constater, la complexité du système est grande. De nombreux paramètres de conception entrent en jeu rien que dans les deux éléments concernés. Lors de l'utilisation, il faut aussi tenir compte d'autres paramètres qui viennent influencer les performances du système étudié. On se rend alors compte du grand nombre de combinaisons possibles et de la nécessité de se focaliser dans notre étude. Des objectifs précis vont nous permettre de concentrer notre analyse.

1.3 OBJECTIFS

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'étude des écoulements granulaires dans la machine de pesage va s'articuler autour de deux objectifs principaux représentant chacun un organe essentiel de la machine :

- Améliorer l'écoulement lors de la sortie de produit de la chute de transition après une décharge à pleine vitesse de la balance.
- Optimiser le module d'alimentation gravitaire afin d'améliorer la précision de la balance pour une gamme de vitesses et de produits donnée.

Pour être plus précis, le premier objectif consiste à établir des nouvelles formes de chutes de transition qui permettent de réduire le temps de sortie du produit après une décharge rapide de la balance. On va donc vérifier comment la forme de la chute influe sur la décharge et ensuite essayer de trouver des formes adaptées.

On travaillera sur des décharges à pleine vitesse de la balance. Actuellement, la vitesse d'ouverture des portes influence l'écoulement de la matière. En effet le produit a moins tendance à bouchonner si les vitesses sont faibles. Pour certaines configurations de masse et de matériau, on peut avoir des temps de décharge globalement plus faibles. Par contre, les perspectives d'améliorations dans ce cas sont faibles, on a donc intérêt à se concentrer sur des décharges à pleine vitesse.

Pour le second objectif, l'optimisation est un terme large qui regroupe en fait deux objectifs secondaires. Dans un premier temps, on essaie d'améliorer la précision de pesage en modifiant au minimum le système d'alimentation existant et on joue seulement sur la géométrie de la porte. Dans un second temps, on cherche à mesurer les avantages en termes de vitesse et précision d'un système d'alimentation à deux portes que nous souhaitons développer.

Les tests effectués seront ceux que réalise l'entreprise une fois leurs machines terminées. Sa précision est caractérisée par le 2σ soit deux fois l'écart type d'une répétition de 30 pesées dans les mêmes conditions. C'est ce qui permet de juger de la performance de la machine et qui est utilisé comme argument de vente.

On va se placer dans différentes configurations représentant en fait les cadences utilisées le plus fréquemment par l'entreprise à savoir des cycles de 18, 20, 22, 25 et 30 sacs par minute et pour trois matériaux différents : les billes de plastique, des granules de bois et le maïs en vrac. Ces trois matériaux permettent d'avoir une gamme de produits dont l'écoulement est différent. Les billes de plastique sont un matériau test alors que le maïs est un matériau couramment ensaché et les granules de bois pour les chaudières est un matériau dont l'écoulement est dit "difficile" de par sa forme en bâtonnets.

Voici en pourcentage des exemples d'améliorations de la précision 2σ des pesées qui seraient satisfaisantes :

- Grain de maïs : réduction de 35-50% du 2σ
- Particule de bois : réduction de 20-40% du 2σ
- Bille de plastique : réduction de 10-20% du 2σ

1.4 MÉTHODOLOGIE

Le projet porte sur une application industrielle qui permet d'ensacher des matériaux granulaires. Il faut souligner que ce terme est très général et que nous sommes quotidiennement confrontés à ce type de matériaux. Il regroupe aussi bien les poudres que l'on retrouve dans notre cuisine comme le sucre, la farine et le café qu'un champ d'astéroïdes en orbite autour d'une planète. Selon les secteurs industriels, on peut traiter des sables, des graviers, des céréales ou encore des pilules.

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrerons sur l'écoulement de la matière particulaire sèche et non cohésive utilisée avec des grains dont les dimensions sont de l'ordre du centimètre. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un ensemble de travaux qui ont déjà été réalisés sur le sujet et qui nous permettront de mieux comprendre le phénomène d'écoulement des matériaux granulaires.

Nous verrons que la théorie actuelle nous aide à comprendre certains phénomènes lors de l'écoulement de la matière, mais que nous préférerons utiliser une méthode de modélisation informatique. On comprend assez bien la dynamique des contacts entre particules et à l'aide d'un logiciel de calcul on peut étape par étape recréer l'écoulement global. Nous ferons alors le choix d'un logiciel nous permettant de faire nos modélisations.

L'acquisition de ce nouveau logiciel va nécessiter une phase de validation et de calibrage pour être sûr que dans notre application la prédiction des comportements se fasse de manière fiable. Une phase de tests ainsi qu'un banc de test vont être nécessaires pour valider et calibrer les modèles.

Une fois le logiciel calibré on utilisera majoritairement cet outil pour la réalisation de nos deux objectifs principaux. L'avantage avec le logiciel est de bénéficier d'un outil de simulation et donc de faire des expériences plus rapidement et à moindre coût.

1.4.1 Optimisation de la chute de transition

Pour l'optimisation de la chute de transition, le temps et les moyens mis à notre disposition vont nous orienter vers une démarche expérimentale. On teste différents modèles de chute, selon les idées des concepteurs et les lectures théoriques, sur le logiciel de simulation. Les résultats obtenus nous permettront de tirer les premières conclusions sur les écoulements granulaires.

1.4.2 Optimisation du module d'alimentation

Le module d'alimentation permet de contrôler l'apport de matière dans la balance. Pour obtenir la plus grande précision possible en fonctionnement normal, on ferme progressivement la porte jusqu'à une ouverture minimum. A cette ouverture minimum on ferme subitement et complètement la porte ne restant plus qu'une petite quantité dans les airs. On fait alors l'hypothèse que la précision de pesage dépendra uniquement de la capacité à prévoir cette quantité restée dans les airs. Comme cette ouverture minimum peut varier selon la cadence ou la masse visée, on cherche à obtenir un débit le plus constant possible tout au long du cycle d'ouverture de la porte.

On utilisera le logiciel de simulation pour réaliser les calculs de débit pour différentes géométries et types de portes (simple et double) et différentes ouvertures. L'objectif est d'identifier les meilleures formes de portes potentielles et de tester ces dernières comme prototypes physiques.

1.5 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES PARTIES

Pour la suite de cette étude, nous allons premièrement développer davantage l'état des connaissances actuelles que nous possédons sur l'écoulement des matériaux granulaires. Partant de la théorie générale nous progresserons vers les écoulements denses et leurs caractéristiques qui sont notre domaine d'étude. Enfin, nous démontrerons que pour cette étude il est préférable d'employer un logiciel, dans notre cas EDEM, que nous présenterons.

Nous poursuivons avec la recherche des propriétés matériaux. L'utilisation du logiciel nécessitant une calibration des paramètres, une étude est faite sur l'impact des paramètres sur les résultats des simulations en utilisant des plans d'expérience. Les paramètres les plus importants sont déterminés en utilisant un banc d'essai. Une méthode de détermination est élaborée afin de nous constituer une base de données pour les matériaux de notre étude.

Ces vérifications préliminaires essentielles effectuées l'optimisation de la chute de transition peut être abordée. Afin d'étudier la décharge, nous mettons au point un jeu de courbes caractéristiques à l'aide d'un banc d'essai. Ces résultats sont comparés avec le logiciel pour valider que son analyse est valable. Nous pourrions tirer des conclusions sur le comportement ainsi que vérifier l'influence de certains paramètres sur la chute standard. Enfin, un tableau compare les simulations des performances de nouvelles géométries avec la géométrie actuelle.

L'optimisation du module d'alimentation est la seconde partie de l'optimisation. Après une description du système, nous mettons au point une méthode d'analyse basée sur la précision de pesage. Après des vérifications des capacités d'EDEM, nous appliquerons la méthode à différentes géométries de portes ainsi qu'à un prototype à 2 portes. Une analyse détaillée ainsi qu'une discussion viendront compléter cette section.

Une conclusion générale de l'étude permet enfin de revenir sur les principaux résultats obtenus et de présenter des pistes intéressantes pour des travaux futurs.

CHAPITRE 2

L'ÉCOULEMENT DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

Avant de se lancer dans l'optimisation, il est essentiel de comprendre l'état actuel des connaissances. Les matériaux granulaires ne sont pas un domaine auquel nous sommes familiers, nous allons alors commencer par faire le bilan des connaissances générales que nous pouvons recenser et que nous allons utiliser dans notre étude. Différentes parties seront présentées, de la théorie générale à la présentation des méthodes numériques que nous allons utiliser pour optimiser les organes de la machine. Enfin, nous ferons une présentation du logiciel EDEM en présentant la théorie sur laquelle il repose, ainsi que la manière de réaliser des simulations.

2.1 THÉORIE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

Après une définition et la présentation des différents types d'écoulement, nous nous focaliserons de plus en plus sur notre application. Nous présenterons alors les écoulements denses qui définissent le type d'écoulement auquel nous sommes confrontés dans les machines de pesage. Ensuite nous étudierons le principe de fonctionnement des méthodes numériques d'analyse adaptées à l'étude des écoulements de matière granulaire. Nous avons choisi de travailler avec un logiciel d'écoulement, nous justifierons finalement ce choix en présentant les avantages de la méthode numérique vis-à-vis de l'expérimentation dans un exemple.

2.1.1 Définition d'un matériau granulaire

Pour reprendre une définition déjà utilisée, on peut de manière très générale faire l'affirmation suivante : un système composé d'un grand nombre de particules macroscopiques est appelé matériau granulaire (Herrmann 2002).

Si l'on souhaite apporter plus de précisions, on peut citer le travail de Degouet qui en 2005 a introduit la taille de particules : les particules qui composent les matériaux granulaires doivent être de dimension caractéristique supérieure à $1\mu\text{m}$. En dessous de $1\mu\text{m}$, l'agitation thermique est importante et le mouvement Brownien peut devenir visible. Au-dessus de $1\mu\text{m}$, l'agitation thermique devient négligeable. En effet, le terme de macroscopique est pris au sens où l'agitation thermique $k_B T$ (k_B étant la constante de Boltzmann et T la température ambiante) est négligeable devant les variations d'énergie potentielle. (Degouet 2005)

La limite inférieure de taille est de $1\mu\text{m}$, mais il n'y a pas à proprement parler de limite supérieure, les champs d'astéroïdes ou d'icebergs font partie de la famille extrêmement vaste des matériaux granulaires. Les physiciens considèrent que les risques de perturbation dus à l'humidité de l'air et les interactions électrostatiques qui engendrent des forces d'attraction sont négligeables pour des diamètres de particule supérieurs à $100\mu\text{m}$, lorsque le fluide interstitiel est de l'air. Ces matériaux sont alors appelés matériaux granulaires secs. De plus, il faut aussi distinguer si les matériaux sont cohésifs ou non. C'est-à-dire identifier si les particules entre elles n'interagissent que par contact et s'il existe des forces supplémentaires qui lient les particules entre elles par un effet de "colle". On se concentrera dans notre étude sur le cas des matériaux granulaires secs et non cohésifs.

2.1.2 Les différents régimes d'écoulement

Une des difficultés des matériaux granulaires est qu'ils peuvent se comporter comme un solide, un liquide ou un gaz suivant les sollicitations imposées (Jaeger and Nagel 1996).

Aucune théorie ne permet, à l'heure actuelle, de décrire l'ensemble des comportements. L'étude des écoulements granulaires est généralement divisée en trois régimes distincts que l'on peut observer sur la figure 2 : le régime quasi-statique, le régime dense et le régime collisionnel.

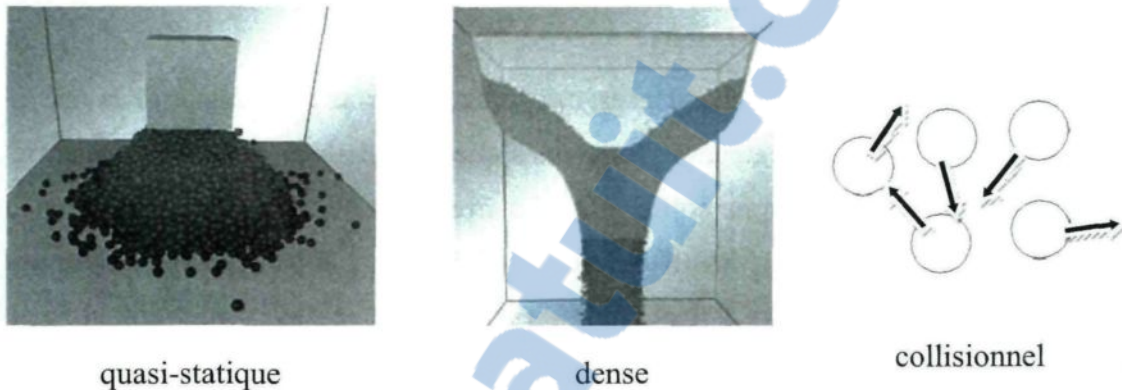


Figure 2: Les différents régimes d'écoulement (Pouliquen 2004)

Le régime quasi-statique est obtenu lorsque les déformations sont lentes, par exemple lorsqu'une construction est posée sur un sol. Le sol se déforme alors plastiquement et les grains interagissent par contact et frottement.

A l'opposé des écoulements quasi-statiques se trouve le régime collisionnel. Lorsque le milieu est très agité et dilué, les particules interagissent essentiellement par collisions. Dans la limite de sphères rigides, les collisions peuvent être considérées comme quasi instantanées. Le milieu ressemble alors fortement à un gaz, les grains jouant le rôle des molécules subissant des collisions binaires. (Pouliquen 2004)

Le régime dense se situe entre le régime quasi-statique et le régime collisionnel que l'on peut aussi appeler dilué. Les grains sont en contact pendant un temps fini avec plusieurs voisins, comme dans le régime quasi-statique, mais les effets d'inertie sont importants. Depuis quelques années, les écoulements denses font l'objet de nombreux travaux tant expérimentaux que numériques et théoriques (Rajchenbach 2000; Pouliquen and Chevoir 2002). Cependant, la variété des comportements observés rend difficile une

vision globale de la rhéologie des écoulements denses. La profusion de modèles théoriques proposés en est la preuve.

2.1.3 Écoulement dense

Focalisons sur les écoulements denses, car les écoulements à l'intérieur de la machine de pesage rentrent dans cette catégorie. Rappelons que l'écoulement dense se situe entre le régime quasi-statique et le régime collisionnel. La frontière entre les régimes reste encore floue et il se pourrait même que lors d'une simple décharge de la balance, la matière passe par différents régimes : dense à l'intérieur du module de pesage, puis collisionnel à l'ouverture des portes et à nouveau dense au moment du remplissage des sacs.

Revenons aux écoulements denses à proprement parler, des travaux de recherche ont été faits sur des écoulements standards comme des conduites verticales ou des plans inclinés pour tenter de développer des modèles dynamiques d'écoulements (Chevoir, Roux 2008; Pouliquen 2002; Prochnow 2002). On ajoute à cela encore bien des configurations différentes, écoulements sur fond fixe, sur un tas, dans un tambour, qui montrent bien la particularité de chaque disposition. Un exemple de quelques écoulements se retrouve sur la figure 3.

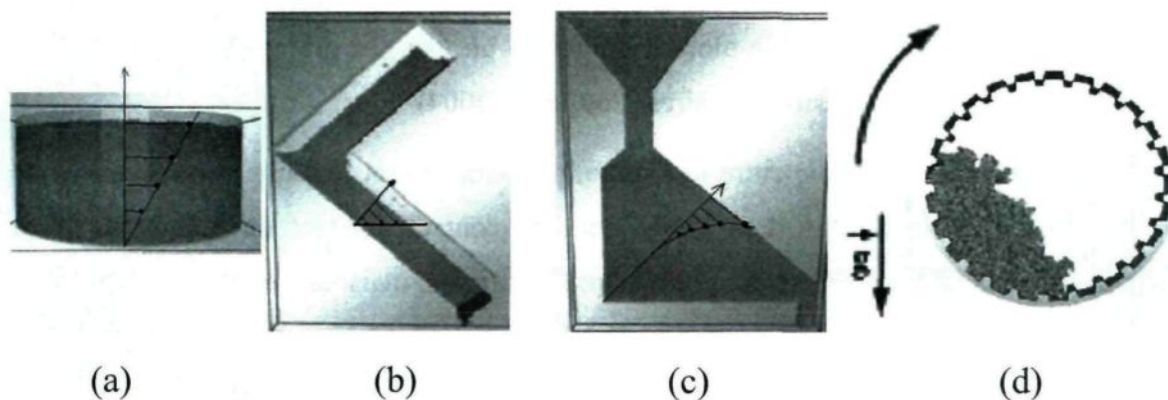


Figure 3 : Configurations d'écoulements denses : cisaillement plan (a), Plan incliné (b), écoulement sur un tas (c), tambour tournant (d)

A ce jour il existe des modèles empiriques qui permettent de prédire le profil de vitesse, la compacité, la propagation des forces dans le milieu, mais il n'existe pas encore de modèle qui prédise tous les effets observés à la fois autrement que par simulation numérique.

2.1.4 Les méthodes numériques d'analyse

Avec le développement des outils informatiques et l'augmentation de la capacité de calcul, les simulations numériques discrètes peuvent être appliquées aux matériaux granulaires. Les simulations numériques se basent sur des lois de contact entre les particules du matériau granulaire comme la loi de Hertz que l'on applique pour des situations où la taille des régions de contact est très petite comparativement à la taille des grains. L'application des lois de contact à tous les grains peut demander une puissance de calcul considérable. Les mécanismes de fonctionnement et les lois de contact du logiciel que l'on utilisera sont expliqués en détail dans la section 2.2.

Le principe de fonctionnement des outils de modélisation et simulation des écoulements est illustré par la figure 4 ci-dessous.

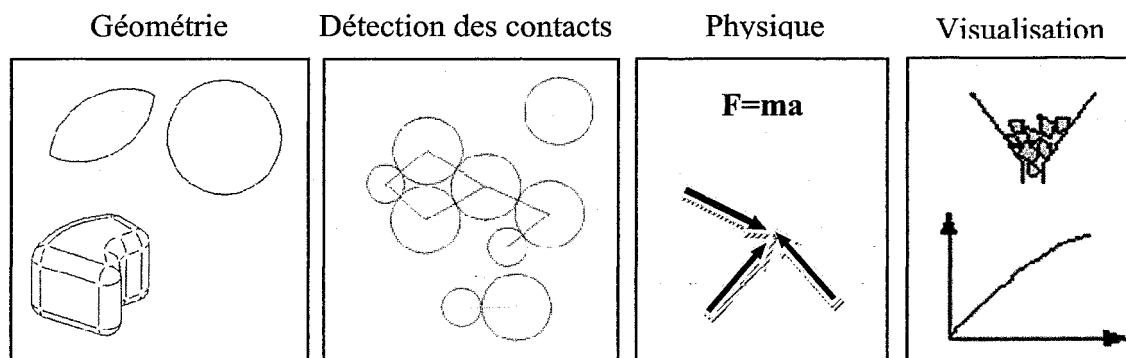


Figure 4 : Les 4 étapes des méthodes de simulation discrètes



Comme on peut le constater, la méthode comporte 4 étapes :

- Définition des géométries de grains et des géométries d'écoulement;
- Application d'un algorithme de détection des contacts;
- Application des lois physiques auxquelles obéissent les grains dans leurs déplacements;
- Visualisation des écoulements.

Durant les derniers 30 ans, le développement de ces techniques et outils de simulation numérique fut progressif. Au début, les recherches ont beaucoup visé à recréer les différentes expériences faites en laboratoire. Le but étant de valider les méthodes numériques en confrontant les résultats et retrouver les lois empiriques déterminées avec soins par les chercheurs (Roux 2005).

Les simulations numériques se sont alors peu à peu imposées. Elles donnaient de bons résultats, mais restaient assez lentes et couteuses en temps de calcul, principalement sur la détection des contacts. Les premières méthodes numériques détectaient les contacts par la méthode des éléments distincts qui modélise chaque grain indépendamment. Les travaux suivants ont eu pour but d'améliorer les méthodes, on peut alors utiliser des triangulations dynamiques (Müller 1996) pour détecter les contacts dans des voisinages.

Le développement de nouvelles techniques de détection et de nouveaux modèles de collision, de contact, etc. ont permis aux méthodes numériques de se développer et de montrer leurs avantages. Les informations stockées dans les simulations sont plus riches en données et permettent d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes. Nous allons en illustrer un exemple par les travaux de Roux en 2005 dans la section 2.1.5.

2.1.5 L'avantage de la simulation numérique

Le but de cette section est de justifier notre choix d'utiliser un logiciel de simulation numérique pour l'optimisation des écoulements granulaires dans la chute de transition et le

module d'alimentation. Nous allons comparer deux études visant à établir une loi de frottement empirique sur plan incliné, en écoulement dense pour rester dans notre domaine d'application. La première est obtenue par expérimentation, la seconde à l'aide de simulations numériques. Nous présenterons les résultats obtenus dans les deux cas et nous verrons que la simulation numérique nous permet d'arriver aux mêmes conclusions que l'expérimentation tout en fournissant plus d'informations.

On retrouve sur la figure 5 un schéma du dispositif expérimental d'écoulement sur plan incliné dont on s'est servi dans la méthode expérimentale. La paroi de contention du matériau granulaire est à hauteur variable pour faire varier l'épaisseur h de la couche en écoulement. L'épaisseur est mesurée grâce à une nappe laser.

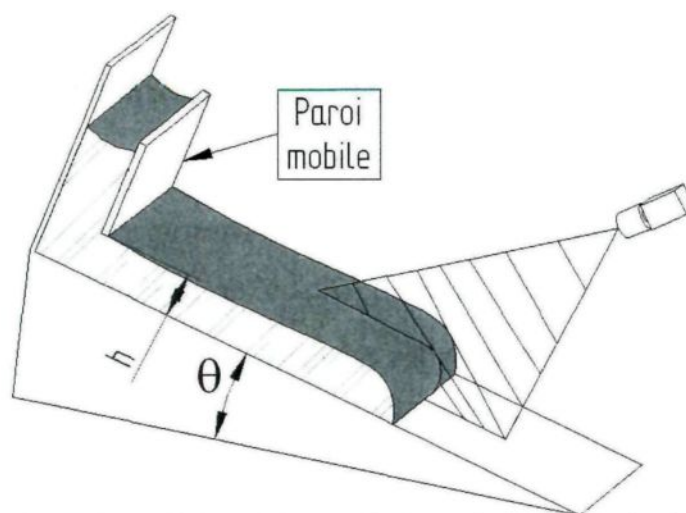


Figure 5 : Dispositif expérimental d'écoulement sur plan incliné

Le premier travail consiste à tracer le diagramme d'écoulement d'un matériau granulaire sur plan incliné. Ce diagramme exprime la relation qu'il existe entre l'épaisseur h de la couche de matière qui s'écoule et l'inclinaison θ du plan. Il permet de classer les régimes d'écoulement (arrêt, stationnaire ou accéléré) selon ce couple de valeurs. La figure 6 montre le type de diagramme obtenu.

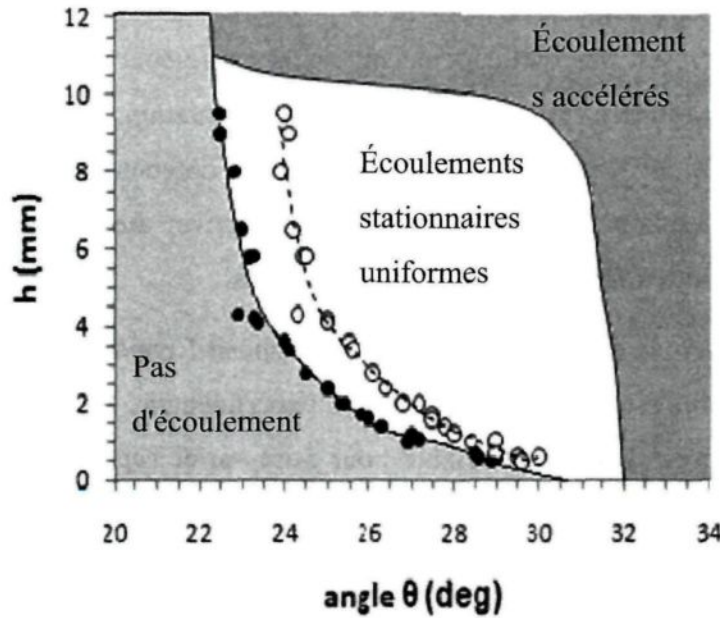


Figure 6 : Diagramme d'écoulement, épaisseur selon l'angle d'inclinaison (Pouliquen 2002)

Ce diagramme permet de mettre en évidence les différentes phases d'écoulement. En augmentant progressivement l'angle θ , on finit par avoir un écoulement, la courbe noire montre l'évolution de l'épaisseur critique $h_{stop}(\theta)$, qui décrit cette frontière. Entre la courbe noire et la courbe blanche, nous avons les écoulements incertains. La courbe en blanc est l'évolution de $h_{max}(\theta)$, au-dessus de laquelle les écoulements sont stationnaires. Finalement au-delà de la zone blanche, il y a les écoulements non uniformes.

Pour revenir à $h_{stop}(\theta)$ on peut l'exprimer par une fonction de l'angle d'inclinaison θ

$$h_{stop}(\theta) = B \frac{\theta_2 - \theta}{\theta - \theta_1} \quad (2.1)$$

Avec :

- B : Longueur caractéristique
- θ_1 : Angle pour lequel h_{stop} diverge
- θ_2 : Angle pour lequel $h_{max} = 0$

Connaissant maintenant l'expression de h_{stop} en fonction de θ , on peut grâce à la nappe laser placée au dessus du banc d'essai, relier l'épaisseur à la vitesse moyenne d'écoulement en surface. Les mesures de vitesse ont aussi permis de la relier au ratio des épaisseurs h/h_{stop} . La figure 7 est le tracé du nombre de Froude $V(h,\theta)/\sqrt{gh}$ en fonction de h/h_{stop} pour différentes inclinaisons θ . On remarque alors que la variation est linéaire et indépendante de l'inclinaison. On trouve alors la relation suivante.

$$\frac{V(h,\theta)}{\sqrt{gh}} = \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)} \quad (2.2)$$

Avec

- β : constante dépendant du couple matériau-rugosité
- g : accélération de la pesanteur

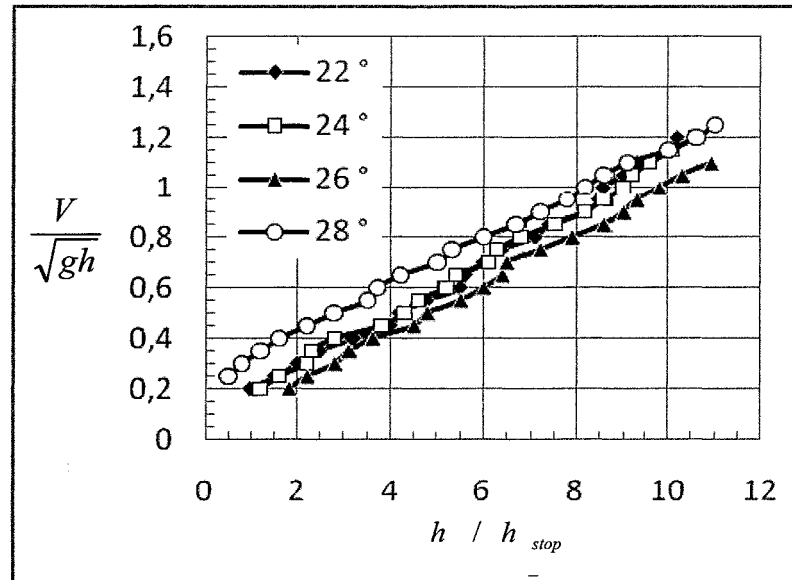


Figure 7: Loi d'écoulement (Pouliquen 2002)

L'équation (2.2) constitue une loi d'échelle et permet de proposer une loi de friction empirique pour l'écoulement plan. Or, il faut alors trouver une relation angulaire avec la loi

de frottement pour la substituer dans la précédente formule. On formule alors l'hypothèse que les écoulements stationnaires uniformes, résultant de l'équilibre entre la gravité et la contrainte de cisaillement au fond (Pouliquen 2002), s'expriment par la relation :

$$\tan\theta = \tau(V, h) \quad (2.3)$$

Avec $\tau(V, h)$ la contrainte de cisaillement au fond

En substituant aux équations (1) et (2) on obtient alors la loi empirique :

$$\tau(V, h) = \tan\theta_1 + \frac{(\tan\theta_2 - \tan\theta_1)I}{I + \beta/L} \quad (2.4)$$

Avec :

- I : Nombre d'inertie, adimensionnel $I = \frac{V}{h} \sqrt{\frac{d^2}{gh}}$
- L : Longueur caractéristique (ici la longueur du banc, L=70cm)

On va maintenant comparer les travaux de Pouliquen avec ceux de Jean Noël Roux qui a réalisé la même étude en utilisant cette fois une méthode de simulation numérique. Ces travaux avaient pour but de vérifier d'une part que les résultats des simulations concordent avec les résultats et lois empiriques. D'autre part, nous verrons que les travaux de Roux ont montré aussi que la simulation numérique peut apporter des précisions que l'on ne peut obtenir par expérimentation.

La simulation numérique de l'expérience de l'écoulement sur plan incliné a permis de retrouver le diagramme d'écoulement ainsi que la loi d'échelle. Tel que le montre la figure 8, les résultats expérimentaux peuvent être décrits par simulation. On retrouve des courbes ayant un comportement similaire et vérifiant les résultats expérimentaux.

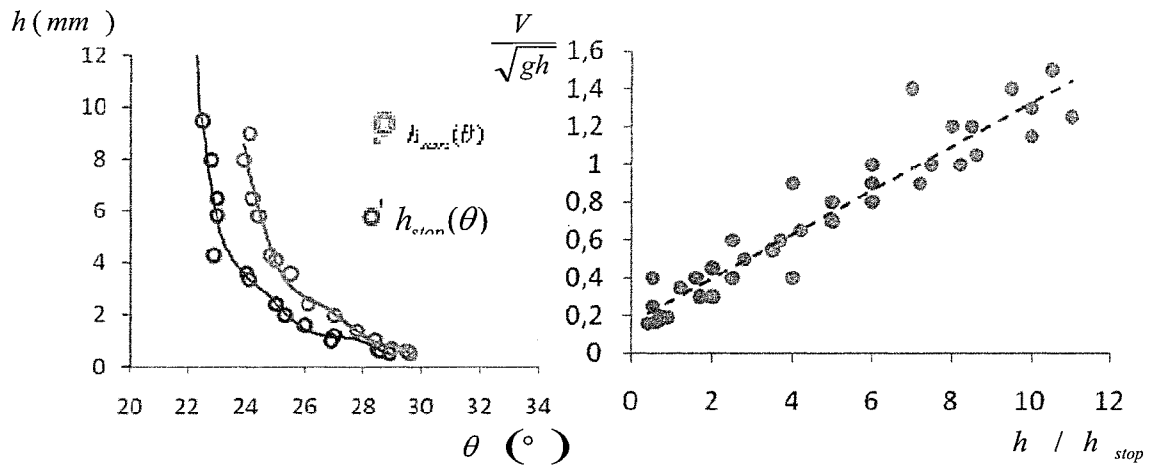


Figure 8 : Diagramme et loi d'écoulement obtenus par simulation numérique (Roux 2005)

Avec les outils de simulation, il est possible de suivre chaque grain de matière. On peut ainsi avoir la valeur du nombre d'inertie (I) en tout temps et dans tout l'écoulement. La figure 9 montre le diagramme d'évolution de I/I_{min} en fonction de la vitesse d'écoulement V , chose que nous ne pouvions faire en expérimentation, car ne connaissant que la vitesse moyenne des particules en surface de l'écoulement.

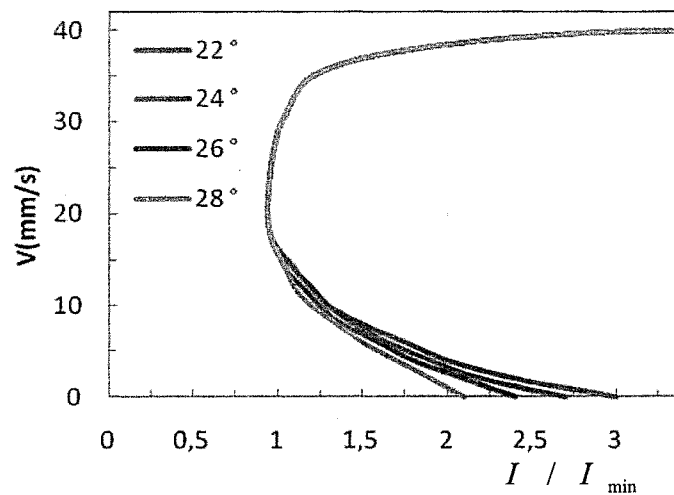


Figure 9 : Profil normalisé du nombre inertiel à différentes inclinaisons (Roux 2005)

On se rend alors compte d'une part que le profil du nombre d'inertie est quasi indépendant de l'inclinaison (les différentes couleurs sur la figure 9). D'autre part, on

observe une augmentation de I près de la surface et à proximité du socle. L'hypothèse faite lors de l'expérimentation est que I est une valeur fonction de V et h . La simulation nous permet de connaître directement sa loi de variation en fonction de θ . De cette manière en utilisant l'équation (2.3), on obtient une loi de frottement légèrement différente dépendante de I et non de V et de h :

$$\tau(I) = \frac{\theta_1 + \alpha \theta_2 I}{1 + \alpha I} \quad (2.5) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{2B}{5\beta}$$

Comparons finalement graphiquement les deux lois de frottement que nous avons tracé sur la figure 10. La courbe et les disques rouges sont issus de la loi obtenue par simulation. Les croix en bleu correspondent à la loi obtenue par expérimentation. On voit que la loi dépendant du nombre inertiel s'écarte de celle avec l'hypothèse de cisaillement homogène de façon très significative. Ceci est dû au fait que le nombre inertiel varie selon l'épaisseur de la couche, chose que l'on ne pouvait observer en expérimentation.

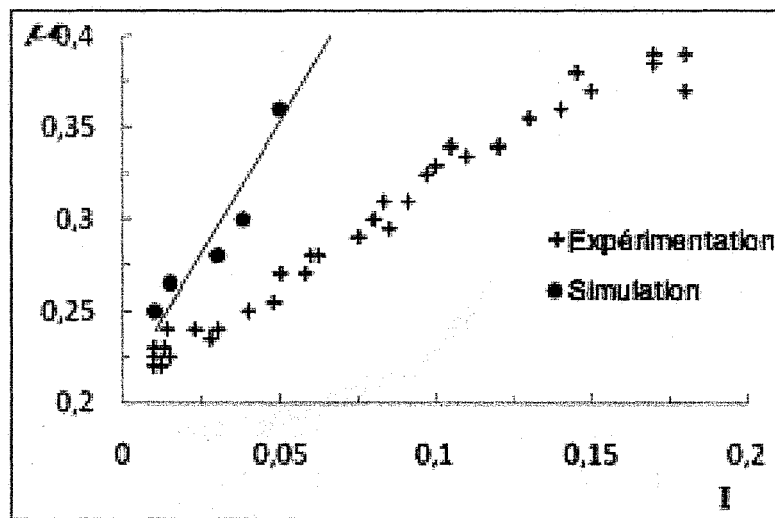


Figure 10 : Lois de frottement sur plan incliné (Roux 2005)

En conclusion, la simulation numérique permet maintenant d'avoir des résultats qui concordent avec les nombreux travaux réalisés en laboratoire. Elles ont démontré leurs qualités, permettent de sauver du temps et de l'argent dans des expérimentations

compliquées sans pour autant perdre des informations. De plus, elles permettent aussi d'avoir des informations supplémentaires, car on peut alors observer ce qu'il se passe à l'intérieur des écoulements et donc aller plus loin dans la compréhension des phénomènes.

2.2 PRÉSENTATION DU LOGICIEL EDEM

Afin de mener à bien notre phase d'expérimentation nous avons utilisé le logiciel EDEM qui est développé par la compagnie DEM Solution. Il est capable entre autres de simuler un écoulement de particules sèches dans des géométries de notre choix. Cependant, ce logiciel est récent et son utilisation pour de telles applications n'a pas encore été démontrée. La compagnie est d'ailleurs intéressée par l'utilisation que l'on peut en faire. C'est pour cela que l'on attachera de l'importance aux théories qui régissent le fonctionnement du logiciel et que l'on va faire toute une phase d'essai et de calibration pour faire concorder le plus possible les résultats de la simulation avec ceux obtenus avec le banc de test et la chute standard avant de se lancer dans la recherche de nouvelles géométries.

Le fonctionnement global du logiciel est une méthode de simulation discrète, qui a été décrite dans le chapitre 2.1.4. La détection des contacts se fait dans une grille. Le domaine est divisé en cellules de taille sensiblement égale à une particule et si deux particules ou plus sont détectées les contacts sont analysés. La technique de détection des contacts qui est au cœur du système n'est pas détaillée par secret. Cependant, la théorie employée dans le calcul des forces lors de collisions peut être expliquée.

2.2.1 Modèle de contact

Si l'on n'a pas d'outil ou de formule pouvant décrire le comportement et donc l'écoulement d'un matériau granulaire dans son ensemble, on sait depuis longtemps comment se comportent deux particules isolées lorsqu'elles se rencontrent. Le modèle de

contact d'Hertz-Mindlin est le modèle le plus couramment utilisé dans les logiciels récents et dans EDEM. Il se base sur les travaux de Mindlin. (Mindlin 1949)

Le logiciel va calculer à chaque pas de temps la position, la vitesse, la trajectoire... de toutes les particules présentes dans la simulation. Ainsi pour deux particules quelconques on peut avoir un comportement de la sorte sur trois pas de temps :

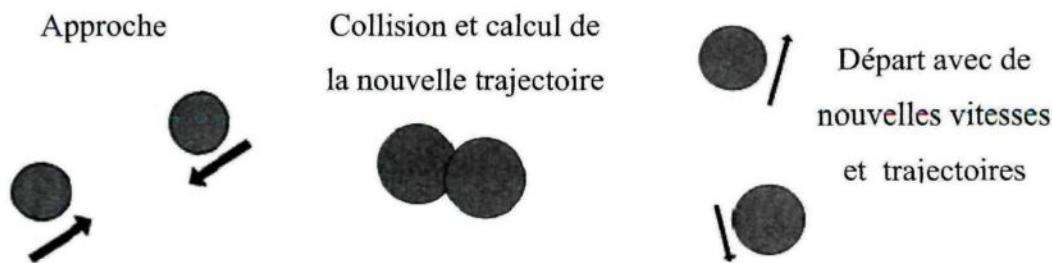


Figure 11 : Étapes de la collision de 2 particules sur EDEM

Lors du calcul de trajectoire au pas de temps 2, deux particules se chevauchent, on appliquera alors le modèle de contact afin de recalculer leurs forces internes et leur trajectoire.

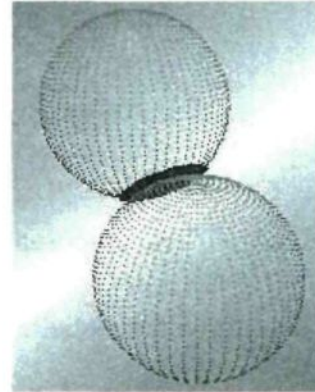
On peut rapidement déduire que plus le pas de temps est faible, plus il y aura de calculs à effectuer et plus le temps de simulation sera long. Cependant, on ne peut pas trop augmenter le pas de temps sinon on se retrouve avec des chevauchements trop importants lors de la collision. Selon les vitesses en jeu, avec un pas de temps important deux particules pourraient se chevaucher complètement, ce qui cause des forces anormalement élevées et un comportement chaotique qui n'a rien à voir avec la réalité.

La force normale lors d'un contact entre deux particules est donc :

$$F_n = \frac{4}{3} Y \sqrt{R} \delta_n^{3/2} \quad (\text{Mindlin 1949})$$

Avec :

- Y le module de Young
- R le rayon moyen des particules
- δ_n le chevauchement normal (illustré avec la figure 12)
la longueur normale du volume commun



soit

On ajoute à cela une force d'amortissement normale :

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n}mv_n^{rel}$$

Figure 12 :
Chevauchement normal

Avec :

- m la masse équivalente des particules
- v_n^{rel} la composante normale de la vitesse relative
- β et S_n les raideurs normales :
 - $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$ avec e le coefficient de restitution
 - $S_n = 2Y\sqrt{R\delta_n}$

La force tangentielle quant à elle est donnée par:

$$F_t = -S_t\delta_t$$

Avec :

- S_t raideur tangentielle de formule $S_t = 8G\sqrt{R\delta_n}$
- δ_t la déformation tangentielle



Il y a aussi une force d'amortissement tangentielle :

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m}v_t^{rel}$$

Avec : v_t^{rel} la composante tangentielle de la vitesse relative

Cette force tangentielle est limitée par le frottement de Coulomb $\mu_s F_n$ où μ_s est le coefficient de frottement statique.

2.2.2 Réalisation d'une simulation

L'un des avantages d'EDEM est que l'on peut utiliser les modèles CAD et notamment ceux faits sur SolidEdge, logiciel de CAO utilisé par l'entreprise. Cependant, chaque ensemble mobile doit être importé séparément.

Les étapes nécessaires à la création d'une expérience sont détaillées dans l'annexe I. En résumé il faut renseigner dans un premier onglet toute une liste de propriétés spécifiques au matériau granulaire employé. Ensuite, importer et/ou fabriquer les géométries fixes où la matière va s'écouler. Un troisième onglet pour définir la forme des particules et leur taille. Enfin, le quatrième onglet sert à entrer les paramètres propres à la simulation.

On remarque que pour mener à bien une simulation nous avons besoin de connaître une petite liste de paramètres matériaux. Comme nous utilisons des matériaux peu communs : billes de plastiques, maïs ou encore granules de bois on ne retrouvera pas toutes les propriétés dans la littérature. Dans le but d'obtenir une modélisation fiable, nous allons devoir travailler sur la détermination de ces propriétés avant de nous lancer dans l'optimisation.

CHAPITRE 3

RECHERCHE DES PROPRIÉTÉS MATÉRIAUX

3.1 DÉFINITIONS

Comme nous avons pu le voir précédemment, l'utilisation du logiciel EDEM pour nos expériences suppose que l'on connaisse certaines caractéristiques du matériau granulaire utilisé. Voici la liste des paramètres à renseigner : le coefficient de poisson, le module d'élasticité, la densité qui sont des paramètres avec lesquels nous sommes familiers. On retrouve aussi les coefficients d'interaction entre les matériaux (restitution, friction statique et résistance au roulement) qui sont moins courants.

Le coefficient de restitution est un coefficient physique qui intervient lors des contacts. Il permet de quantifier les portions de l'énergie cinétique qui sont transférées lors d'une collision. On peut le mesurer par le rapport entre la vitesse restituée et la vitesse initiale.

Le coefficient de friction statique est le rapport $\mu = F / N$ où F est la force nécessaire au mouvement et N la force normale à la surface.

Le coefficient de résistance au roulement est la résistance que peut avoir un cylindre lorsqu'il roule sur une surface. Si F est la force nécessaire à mettre le cylindre en mouvement, R le rayon du cylindre et W son poids, alors le coefficient de résistance au roulement f est : $f = FR / W$

On comprend la difficulté que l'on aura à créer des expériences en laboratoire sur des grains de maïs, des billes de plastique ou des granules de bois pour déterminer ces coefficients, ainsi que pour le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. De plus, on ne trouve pas ces valeurs dans la littérature pour ce type de matériau. Un autre fait

important est que l'on ne souhaite pas consacrer du temps à déterminer avec précision des paramètres dont l'influence s'avèrera négligeable par la suite. Il faudra alors trouver une méthode de détermination adaptée.

3.2 MÉTHODE DE DÉTERMINATION

Les développeurs du logiciel EDEM recommandent de procéder par expérimentation pour ajuster les propriétés matériaux. L'idée étant de conduire des expériences simples d'écoulement en laboratoire et de retrouver ces résultats en modifiant petit à petit les propriétés sur EDEM. Une fois que nos résultats concordent, on suppose que les paramètres entrés sur le logiciel sont bons.

La simulation sur EDEM du système complet à l'échelle 1, comprenant le remplissage de la balance et sa décharge dans la chute de transition (en moyenne 20kg de produit soit plus de 80 000 particules) prend environ trois heures. Pour faciliter la recherche des propriétés des matériaux, nous avons choisi de travailler sur un modèle réduit afin de réduire le temps des simulations.

On choisit alors de construire un modèle réduit de chute de transition où l'on ferait s'écouler une petite quantité de grain (entre 1 et 2kg). L'écoulement en laboratoire est filmé avec une caméra et les propriétés du matériau sont ajustées petit à petit sur le logiciel pour retrouver le temps de chute. De ce fait, les simulations sont courtes et l'on peut rapidement procéder à l'ajustement des propriétés d'un matériau par cette méthode.

Pour éviter de chercher à tâtons et dans le but de mesurer l'influence des coefficients matériau sur le temps de chute final, nous avons conduit un plan factoriel partiel de simulation permettant d'évaluer l'importance de chacun des neuf paramètres. Comme notre objectif initial est d'obtenir une bonne modélisation du comportement de la balance, il n'est donc pas intéressant pour nous d'obtenir avec précision tous les coefficients, mais seulement ceux qui ont un effet significatif. Pour cette raison, on va commencer par faire

une planification d'expérience et une analyse de la variance, méthode permettant de mesurer l'influence de plusieurs paramètres sur un résultat.

3.2.1 Banc d'essai

Un modèle réduit de système d'ensachage a donc été construit afin de pouvoir faire des manipulations qui soient rapides à réaliser aussi bien sur le banc d'essai qu'en simulation EDEM. La simulation est très rapide sur le logiciel et prend environ cinq minutes, car c'est un petit banc permettant d'accueillir 1 à 2kg de produit. Le banc est fait en bois par souci d'économie et des plaques en acier inoxydable sont ajoutées à l'intérieur pour respecter les coefficients de frottement de l'interaction entre le matériau pesé et le matériau de la chute standard.

Pour le système d'ouverture du banc, il est constitué d'un vérin pneumatique qui va tout simplement, à l'aide d'un compresseur, pousser et tirer une plaque en bois qui servira de porte à l'extrémité inférieure du cylindre. Le choix du vérin est très important, car c'est le moyen qui paraissait le plus simple et qui permettait d'avoir une ouverture et fermeture de la trappe reproductible d'une expérience à une autre et facile à modéliser sur EDEM, le temps d'ouverture de la porte ayant un impact sur le temps de chute final.

3.2.2 Principe des plans d'expérience

L'analyse de la variance est souvent abrégée par son terme anglais ANOVA : ANalysis Of VAriance. C'est un test statistique permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population. Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles qui influencent la distribution d'une variable continue à expliquer (Scherrer 1984). Les variables explicatives sont appelées plus communément facteurs, elles prennent plusieurs valeurs fixes que l'on appelle niveaux.

On peut réaliser des ANOVA sur une variable continue, mais aussi pour plusieurs variables continues (MANOVA). Pour ce qui est des facteurs et des niveaux, différentes techniques sont à notre disposition pour couvrir toutes les configurations. Pour exposer clairement la technique générale, un exemple est présenté. Le tableau 1 donne les valeurs d'une variable continue C dépendant de deux facteurs A et B variant sur deux niveaux A_1 , A_2 , B_1 et B_2 .

Tableau 1 : Valeurs de C selon les niveaux des facteurs A et B

	A1	A2
B1	15, 13	11, 12
B2	15, 14	17, 18

Soit T la somme des valeurs de C, ici T=115, N le nombre de valeurs de C, ici N=8 et y_i une valeur de C. On calcule les sommes des carrés des contributions, les SS (venant de Square Sum) par les trois équations ci-dessous :

$$\text{Contributions totales : } SS_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{T^2}{N} \quad (3.1)$$

Les contributions des facteurs peuvent aussi être calculées. L'équation (3.2) présente le calcul pour le facteur A.

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) - \frac{T^2}{N} \quad (3.2)$$

Où A_i est la somme des valeurs au niveau i et n le nombre de résultats à ce niveau et k_A le nombre de niveaux de la variable

Avec cette méthode on a aussi la contribution de l'interaction AxB, soit l'effet sur C de A et B variant simultanément :

$$SS_{AxB} = \sum_{i=1}^{k_{AxB}} \left(\frac{(AxB)_i^2}{n_{AxB_i}} \right) - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (3.3)$$

Enfin, on applique la propriété de base de l'analyse ANOVA qui est :

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AxB} + SS_e$$

Cela nous permet alors de retrouver SS_e , la contribution de l'erreur. Les résultats de l'analyse ANOVA sont ensuite répertoriés dans un tableau. Le tableau 2 donne un résultat d'analyse typique.

Tableau 2 : Résultats d'une analyse ANOVA

Source	SS	v	V	P
A	0,125	1	0,125	2,5
B	21,125	1	21,125	55,2
AxB	15,125	1	15,125	40,1
Total	39,875	7		100,0
e _p	3,5	4	0,875	2,2

v représente le nombre de degré de liberté. Le nombre de degré de liberté total est le nombre d'essais moins un. Chaque paramètre est de degré 1, ce qui permet d'obtenir le degré de liberté de l'erreur $v_E = 4$

V est la variance qui s'obtient en divisant le SS par le degré de liberté.

Enfin, P est le pourcentage de contribution de chaque paramètre. On le calcule en faisant $P = \frac{V_i + V_e}{SS_T} * 100$. On vérifie aussi que l'erreur n'a pas une contribution trop importante sinon les résultats ne sont pas exploitables. En pratique une erreur inférieure à 15% signifie qu'aucun paramètre important n'est oublié.

L'ANOVA est donc un outil d'analyse puissant qui à partir d'expériences nous fournit les contributions des différents paramètres. Cependant, on ne souhaite peut-être pas obtenir un plan complet, c'est-à-dire les effets des variables et de toutes les interactions. C'est ce que l'on réalise lorsqu'on fait varier un facteur à la fois. Pour un plan complet si f est le nombre de facteurs il nous faut 2^f expériences. Si $f = 7$, il nous faudra alors 128 expériences.

Taguchi, statisticien japonais a développé la technique des plans d'expérience. Il existe alors des tables décrivant les expériences à mener en fonction des paramètres que l'on veut observer. Par exemple si l'on étudie 7 facteurs et que l'on souhaite seulement obtenir l'effet de chaque facteur sur une variable sans leurs interactions, on peut le faire en 8 expériences au lieu de 128. Cette technique est très utilisée en optimisation, car elle permet d'économiser de nombreuses expériences et d'éliminer rapidement des paramètres peu influents.

3.3 PLAN D'EXPÉRIENCE ET CALIBRATION DU LOGICIEL

3.3.1 Recherche de l'influence des paramètres

On rappelle le but de notre analyse ANOVA qui est de renseigner le plus efficacement possible nos paramètres dans le logiciel, donc chercher si d'une part les paramètres ont une grande influence sur le résultat et ensuite le cas échéant les déterminer par l'expérience. On va utiliser un plan d'expérience dont les valeurs seront étudiées par une analyse de la variance.

La première étape est de rassembler dans un tableau les facteurs à étudier et définir leurs niveaux. Le tableau 3 fait la liste de ces facteurs.

Tableau 3 : Liste des paramètres à étudier et leurs niveaux

Facteur	Description	Niveau -1	Niveau 1
A	Module de Young (Pa)	$1,1 \times 10^7$	$1,1 \times 10^9$
B	Densité du grain (kg/m^3)	900	1100
C	Coeff. de Poisson	0,3	0,5
D	Coeff. de restitution	0,5	0,7
E	Coeff. de restitution de l'interaction	0,5	0,7
F	Coeff. de friction statique	0,3	0,6
G	Coeff. de friction statique de l'interaction	0,3	0,6
H	Coeff. de résistance au roulement	0,01	0,1
J	Coeff. de résistance au roulement de l'interaction	0,01	0,1

Pour le choix des niveaux haut et bas, nous avons utilisé la base de données de matériau contenue dans EDEM. Chaque facteur s'est vu attribuer les niveaux hauts et bas correspondant respectivement aux plus hautes et basses valeurs contenues dans la base de données. Nous estimons de cette manière couvrir un éventail assez large sans pour autant définir des niveaux dont les valeurs n'auraient aucune signification physique.

Cela représente donc 9 facteurs à 2 niveaux. On veut aussi minimiser le nombre de simulations, car nous cherchons seulement à obtenir l'influence des paramètres, une analyse poussée n'est alors pas nécessaire. Si l'on devait réaliser un plan factoriel complet on devrait faire $2^9 = 512$ simulations...

Le choix s'oriente alors vers une fraction d'un plan factoriel complet, qui permet de minimiser le nombre d'expériences à réaliser. Les méthodes d'analyse d'expérience (Mason, Gunst et Hess 2003) indiquent les choix possibles. Cependant plus on réduit le nombre d'expériences et plus on diminue les informations que l'on peut extraire. Comme nous ne souhaitons obtenir que l'influence isolée de chaque facteur sur la variable de sortie, nous choisissons alors la plus faible fraction possible, c'est-à-dire une fraction $\frac{1}{32}$ qui permet de conserver ces informations. Notre plan d'expérience comportera 16 expériences.

Pour résoudre ce design et obtenir les informations voulues en si peu d'expériences, nous devons confondre certaines interactions de plusieurs valeurs avec l'effet constant I. L'effet constant est une variable dont le niveau est toujours égal à 1.

Afin de confondre les effets et réaliser notre plan d'expérience, il faut coder les facteurs. Pour chaque variable on note -1 pour le niveau bas et 1 pour le niveau haut. On remplit ensuite les colonnes des facteurs A, B, C et D, car pour les 16 essais déterminés, on peut faire un plan factoriel complet avec 4 facteurs. Les valeurs des autres variables découlent ensuite des équations (3.4) suivantes :

$$I = ABCE = BCDF = ACDG = ABDH = ABCDJ \quad (3.4)$$

Ces équations sont contenues dans des tables et permettent de confondre certains effets d'interaction tout en conservant les effets des variables isolées.

Faisons un exemple avec l'essai 1. Si l'on veut renseigner le niveau de la variable E on utilise l'équation $I = 1 = ABCE$, on a $ABC = -1$, d'où $E = -1$.

On obtient alors le tableau 4 suivant.

Tableau 4 : Plan d'expérience issu des équations

Essai	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
2	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
3	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
4	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
5	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
6	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
8	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
12	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
13	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
14	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
15	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Analyse :

La méthode d'analyse statistique ANOVA dont on a vu le principe va nous permettre de calculer les effets de chaque facteur sur la réponse globale soit le temps de chute. On va remplir les contributions des valeurs dans un tableau ANOVA en se basant sur la formule générale : $SS_T = SS_A + SS_B + \dots + SS_L + e_p$

$$SS_T = \sum (temps)^2 - \frac{(\sum temps)^2}{16} \text{ est l'effet global sur la réponse.}$$

Pour le calcul des SS, comme le SS_A par exemple, on utilisera la formule suivante :

$$SS_A = \frac{(\sum temps_{niveau-1})^2}{8} + \frac{(\sum temps_{niveau})^2}{8} - \frac{(\sum temps)^2}{16}$$

Une fois les contributions SS des différents paramètres obtenues, on fait le total pour extraire l'erreur expérimentale e_p . On retrouve les résultats dans le tableau 5.

Tableau 5 : Analyse ANOVA de l'influence des paramètres

Source	SS	v	V	P
A	0,006	1	0,006	0,4
B	0,331	1	0,331	3,9
C	0	1	0	0
D	0,276	1	0,276	3,3
E	0,016	1	0,016	0,5
F	3,151	1	3,151	34,1
G	4,101	1	4,101	44,3
H	0,856	1	0,856	9,5
J	0,391	1	0,391	4,6
Total	9,344	9		100,0
e_p	0,216	6	0,036	0,4

Ce qu'il est important de retenir pour l'analyse est le pourcentage (P) de contribution de chaque paramètre. On vérifie aussi que l'erreur n'a pas une contribution trop importante sinon les résultats ne sont pas exploitables.

Le test de Fisher (ou F-Test) est un test statistique permettant de déterminer la probabilité que le résultat soit fidèle à la valeur trouvée. Faisons un exemple avec le facteur

G. On calcule le rapport $G = \frac{V_G}{V_e} = 113,9$. On le compare ensuite à la valeur de F contenue

dans les tables (Mason, Gunst et Hess 2003). Il existe différentes tables en fonction du degré de confiance souhaité. Les valeurs contenues dans les tables dépendent du degré de liberté du facteur observé et de l'erreur. Dans notre cas $v_G = 1$, $v_e = 6$ et pour un degré de confiance de 95%, soit un risque de 5%, $F_{0,05;1;6} = 3,78$

Le rapport G étant supérieur à la valeur $F_{0.05;1;6}$, cela veut dire que dans les conditions de notre expérience, le temps de chute dépend à 44.3% de la valeur du facteur G et que cette dépendance est sûre à 95%.

On note clairement que le temps de chute est grandement influencé par 2 paramètres : le coefficient de friction statique du matériau ensaché et le coefficient de friction statique de l'interaction entre le matériau ensaché et le matériau de la chute. Ces deux paramètres influencent à hauteur de 78% les résultats. Pour les autres paramètres, l'influence est inférieure à 10%. D'un point de vue physique cela signifie que les particules glissent les unes sur les autres et contre la paroi durant une décharge de matériau granulaire. La perte de temps est alors reliée à une friction trop importante, soit un nombre de particules plus élevé. C'est pour cela qu'à un certain moment les particules se bloquent et forment un bouchon.

L'analyse nous permet donc de conclure que deux paramètres matériau seulement sont significatifs sur le temps de chute : le coefficient de friction statique du matériau granulaire et le coefficient de friction statique de l'interaction entre le matériau et le matériau de la chute (ici l'inox). Tous les autres paramètres n'influençant qu'à hauteur maximum de 10%, les résultats resteront tels qu'indiqués dans la base de données "grain". Ces valeurs seront jugées acceptables vu leur très faible influence.

Reste donc à déterminer avec précision ces deux derniers paramètres selon le matériau employé. En effet, notre étude était générale et donc on peut dire que quel que soit le matériau utilisé, il faudra seulement s'appliquer à rechercher ces deux paramètres.

Nous souhaitons tout de même émettre des réserves concernant les lois d'échelle. Les déterminations ont été faites sur un modèle réduit, visant à optimiser notre temps de simulation. Cependant, nous sommes conscients que des problèmes de lois d'échelles peuvent exister, même si les développeurs du logiciel EDEM nous ont conseillé d'aborder le problème de cette manière. Lors de l'écoulement de matière dans le modèle réduit, nous conservons les mêmes particules, mais nous réduisons l'ouverture ainsi que la géométrie.

Par conséquent, dans notre modèle réduit, il y a moins de particules qui passent par l'ouverture et moins d'interactions entre elles que d'interactions avec les murs.

3.3.2 Détermination des paramètres influents

Pour rechercher ces deux derniers coefficients on va utiliser une méthode de régression. Pour se faire, on considère que le temps de sortie n'est influencé que par deux variables, ce qui nous donne le modèle suivant : $\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$, avec :

- \hat{y} le temps de chute estimé (s)
- x_1 le coefficient de friction statique du matériau
- x_2 le coefficient de friction statique de l'interaction

On réalise une série de simulations sur le logiciel EDEM pour faire varier nos deux coefficients et calculer le temps de chute de 2325g de maïs. Les résultats sont renseignés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Temps de chute du maïs pour différents coefficients

x1	x2	Y (s)
0,9	0,8	1,43
0,9	0,6	1,38
0,9	0,4	1,33
0,7	0,8	1,40
0,7	0,6	1,38
0,7	0,4	1,32
0,5	0,8	1,36
0,5	0,6	1,34
0,5	0,4	1,29
0,3	0,8	1,26
0,3	0,6	1,26
0,3	0,4	1,23

On cherche b_1 et b_2 qui sont respectivement des estimateurs de β_1 et β_2 . Nous utilisons une méthode de régression sur deux paramètres qui se base sur la méthode des moindres carrés. On retrouve cette méthode dans les travaux de Box (Box, Draper 1986)

Le but est de diminuer le résidu $y - \hat{y}$

Soit les équations normales : $\sum (y - \hat{y})x_1 = 0$ et $\sum (y - \hat{y})x_2 = 0$

$$\Rightarrow \sum (y - b_1x_1 - b_2x_2)x_1 = 0 \quad \text{et} \quad \sum (y - b_1x_1 - b_2x_2)x_2 = 0$$

En notant $[ij]$ pour $\sum (x_i x_j)$ et $[yi]$ pour $\sum (y x_i)$ on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} [11]b_1 + [12]b_2 = [y1] \\ [12]b_1 + [22]b_2 = [y2] \end{cases} \quad \text{avec les valeurs de l'expérience, on a le système suivant :}$$

$$\begin{cases} 4,92b_1 + 4,32b_2 = 9,71 \\ 4,32b_1 + 4,64b_2 = 9,64 \end{cases} \quad \text{en résolvant on a alors : } b_1 = 1,8 \quad \text{et} \quad b_2 = 0,5$$

Nous obtenons alors le modèle du temps de chute en fonction de ces deux variables :

$$\hat{y} = 1,8x_1 + 0,5x_2$$

Pour vérifier la pertinence de ce résultat, on calcule le coefficient de corrélation entre les résultats de la simulation et les résultats du modèle. Cela correspond aux séries $y(y_1, y_2, \dots, y_{12})$ qui sont les valeurs du tableau 6 et $\hat{y}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_{12})$ les valeurs du modèle pour les valeurs de x_1 et x_2 contenues dans le tableau 6. Ce coefficient comme le coefficient de détermination R^2 dans une régression linéaire témoigne de l'écart entre les séries de données. On le calcule de la manière suivante :

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^{12} (y_i - \bar{y}) \cdot (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{12} (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \Bigg]^1$$

Dans notre cas on obtient un coefficient de corrélation $r_p = 0,88$, cette valeur proche de 1 témoigne que notre modèle à deux estimateurs donnera un temps de chute proche des résultats réels en n'utilisant que les données des coefficients de friction statique.

Ce modèle peut alors être confronté aux essais réalisés en laboratoire. Pour chaque matériau, on fait des essais de décharge sur le modèle réduit (doublés pour être sûr du résultat) avec différentes quantités de grains. Le tableau 7 montre un exemple pour les granules de bois et le maïs.

Tableau 7 : Temps d'écoulements réels sur modèle réduit

MAÏS	
Masse (g)	2325
Temps* (s)	1,35
GRANULES DE BOIS	
Masse (g)	1300
Temps* (s)	1,31

**Temps mesuré entre le moment où la trappe commence à s'ouvrir et le moment où le dernier grain arrive en bas de la chute de transition. La mesure se faisant à l'aide d'une caméra. L'erreur est de $\pm 0,02$ s.*

Pour les grains de maïs, notre premier cas étudié, nous trouvons en laboratoire une décharge de 2325g en 1,35s. Il nous reste alors à trouver x_1 et x_2 vérifiant $1,35 = 1,8x_1 + 0,5x_2$ soit résoudre une équation à deux inconnues. Nous avons donc d'un point de vue mathématique une infinité de couples de valeurs pour les coefficients qui sont

¹ Tiré de Probabilités, statistiques et techniques de régression par Baillargeon Gérald, 1989, les éditions SMG.

solutions du modèle. Cependant, on peut arriver à réduire les couples de valeurs possibles en faisant quelques hypothèses :

- Les coefficients de frottement varient dans un intervalle $[0;1]$
- On va faire varier les coefficients avec un pas de 0,05 qui est assez faible pour ne pas influencer sur le temps de chute.
- Le coefficient de friction statique de l'interaction est plus faible que le coefficient de friction du matériau. On peut le constater visuellement, car les grains glissent mieux sur une plaque qu'entre eux. De plus en comparant avec des valeurs connues, cette hypothèse est vérifiée.

Avec toutes ces considérations, il nous reste 4 couples de valeurs possibles vérifiant $1,35 = 1,8x_1 + 0,5x_2$ Ils sont recensés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Valeurs possibles des coefficients pour le maïs

x1	x2
0,55	0,72
0,60	0,54
0,65	0,36
0,70	0,18

On les vérifie alors sur le logiciel. Un seul couple de valeur nous donnera exactement une chute en 1,35s, $x_1 = 0,65$ et $x_2 = 0,36$. Nous avons alors déterminé les propriétés matériau pour le maïs.

Vérification avec les granules de bois :

Pour vérifier notre méthode, on utilise le même protocole avec les granules de bois. On va chercher le modèle de régression et tester les couples de valeurs qui vérifient nos hypothèses. Le tableau 9 contient les expériences faites sur le logiciel avec 1300g.

Tableau 9 : Temps de chute des granules de bois pour différents coefficients

x1	x2	Y (s)
0,4	0,6	1,29
0,4	0,4	1,21
0,4	0,2	1,12
0,3	0,6	1,23
0,3	0,4	1,14
0,3	0,2	1,09
0,2	0,6	1,17
0,2	0,4	1,10
0,2	0,2	1,03
0,1	0,6	1,11
0,1	0,4	1,05
0,1	0,2	0,97

On obtient le modèle de régression suivant : $\hat{y} = 2,01x_1 + 1,34x_2$

Le coefficient de corrélation pour ce modèle est de 0,99, il est donc une bonne approximation.

Nos hypothèses nous réduisent les solutions aux couples de valeurs contenus dans le tableau 10.

Tableau 10 : Valeurs possibles des coefficients pour les granules de bois

x1	x2
0,45	0,33
0,50	0,25
0,55	0,18
0,60	0,1

On les vérifie à nouveau les valeurs sur le logiciel. Un seul couple de valeur nous donnera exactement une chute en 1.31s, $x_1 = 0,50$ et $x_2 = 0,25$.

En conclusion on arrive avec cette méthode à retrouver les temps de chute obtenus sur le banc d'essai pour deux matériaux différents. L'analyse ANOVA a montré, avec 95% de certitude, que les deux facteurs influent sur 80% du résultat final. De plus, on peut dire que la régression donne des estimations fiables au vu des coefficients de corrélation obtenus. On conclut que la méthode est validée et que l'on va pouvoir s'en servir par la suite pour renseigner correctement le logiciel EDEM dans les modélisations à grande échelle.

3.3.3 Base de données de matériaux

La conclusion que l'on peut faire après les expérimentations et les analyses ANOVA sur le maïs et les granules de bois est que quel que soit le matériau, dans notre cas d'étude, les deux paramètres agissant sur le temps de décharge de notre banc sont les coefficients de friction statique de l'interaction entre le produit déchargé et le matériau du modèle (inox) ainsi que le coefficient de friction statique propre au matériau granulaire.

Si l'on souhaite alors plus tard obtenir les propriétés d'un nouveau matériau pour faire des simulations sur EDEM on fera de la façon suivante :

- Fixer les valeurs éventuellement connues (la densité par exemple est souvent facile à obtenir)
- Fixer des valeurs aux paramètres matériau à l'aide de la base de données "grain". On a montré que dans tous les cas ces valeurs sont peu influentes.
- Se servir du banc d'essai pour obtenir le temps de décharge pour une masse souhaitée.
- Utiliser la méthode de régression du paragraphe précédent pour obtenir un modèle de temps dépendant des coefficients de friction statique.
- Filtrer les couples de valeurs d'après nos hypothèses et tester les quelques couples restants pour trouver celui qui donnera le même temps qu'en réalité.

On applique cette méthode pour déterminer les propriétés des billes de plastique qui serviront lors de l'optimisation du module d'alimentation pour nos modélisations.

Les paramètres à utiliser pour les billes de plastique sont $x_1 = 0,45$ et $x_2 = 0,20$.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DE LA CHUTE DE TRANSITION

4.1 CONSTRUCTION D'UN BANC D'ESSAI

Dans cette section nous avons fait le choix de coupler le logiciel de simulation avec des données expérimentales pour l'optimisation de la chute de transition. Il est donc nécessaire de construire un banc d'essai de taille réelle qui nous permet de reproduire de manière fidèle ce qu'il se passe dans une vraie machine de pesage et d'ensachage que l'entreprise livre à ses clients. L'installation permettra de tester les prototypes de chutes, mais dans un premier temps de reproduire fidèlement le fonctionnement d'une machine de pesage et particulièrement du phénomène de décharge. Nous pourrons ainsi accumuler des données de base pour notre optimisation.

Ce banc d'essai comprend les éléments essentiels d'une machine de pesage à savoir :

- Un module GHS (Gravity High Speed) pour l'alimentation en produit. Il s'agit d'une porte manœuvrée par un servomoteur qui permet d'alimenter la balance en produit jusqu'à la masse souhaitée. La routine de remplissage sera détaillée dans le chapitre suivant qui traite de l'optimisation de cet équipement. Le détail de cet équipement est présenté sur la figure 13.

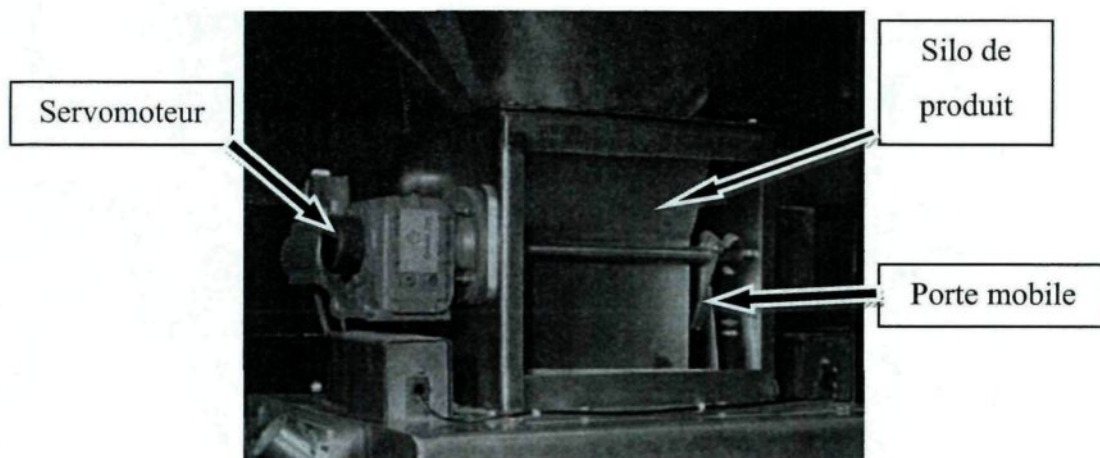


Figure 13 : Module GHS ou module d'alimentation

- Une balance et ses cellules de charge qui a pour fonction d'accumuler le produit jusqu'à la valeur consigne puis de le décharger grâce à ses deux portes commandées par vérins. La figure 14 présente la balance dans son ensemble.

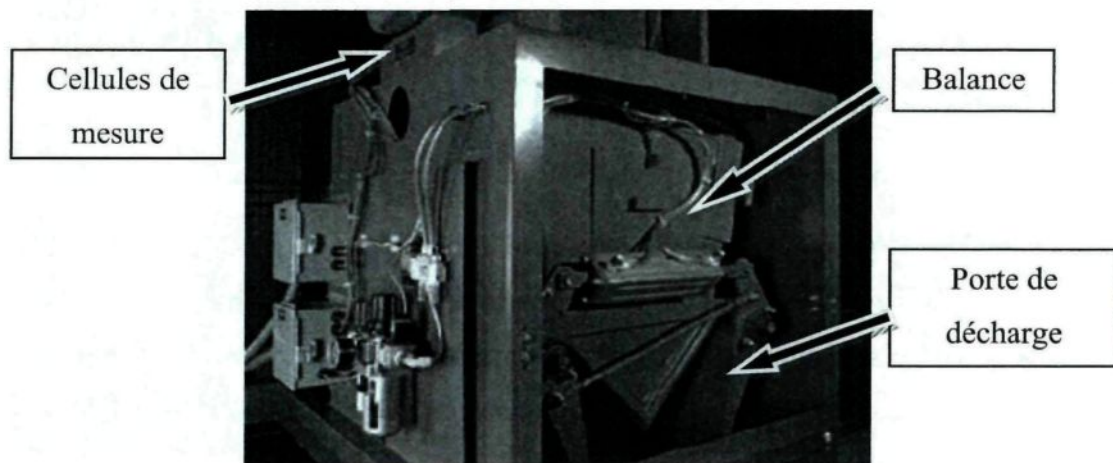


Figure 14 : Balance standard

- Une chute standard que l'on place en dessous de la balance. C'est l'élément concerné par l'objectif de ce chapitre et qui permet de faire converger la matière dans la bouche de remplissage du sac accrochée sous la chute.

- Les panneaux de commande électrique qui regroupent l'alimentation ainsi que le microcontrôleur et l'écran de commande où l'on peut régler les paramètres de pesage et de recette de remplissage.

Cela donne alors l'installation contenue sur la figure 15 pour réaliser nos essais :

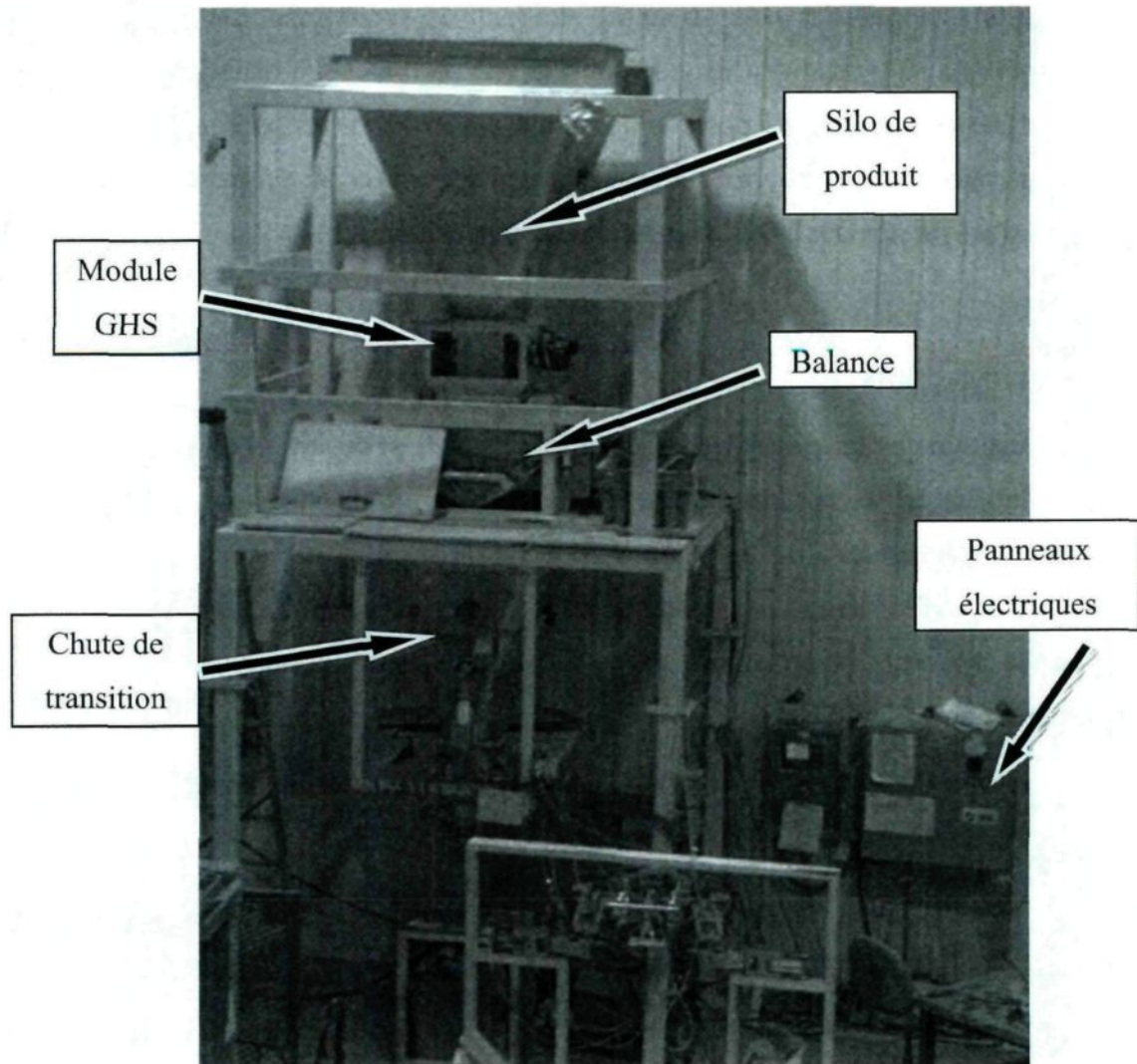


Figure 15 : Installation de tests en entreprise

4.2 COURBES EXPÉRIMENTALES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT

Une fois le banc construit, on procède à l'élaboration de courbes d'écoulements qui caractérisent le comportement de la matière lors de la décharge. Pour ce faire, deux paramètres sont commandés : la masse de produit et l'ouverture des portes.

Les tests sont réalisés dans les halles de tests de l'entreprise. On choisit le maïs comme matière de référence pour deux raisons. D'une part, c'est un matériau très employé par l'entreprise. D'autre part, il possède une taille moyenne et des particules à géométrie proche d'une sphère. Nous pourrions alors effectuer des essais sur un matériau granulaire réellement utilisé (et non des billes de plastiques toutes identiques).

Incertitude sur les essais :

L'acquisition des temps de décharge sur le banc de test se fait à l'aide d'une caméra. Comme on utilise des pièces standard, il n'y a pas d'ouverture ou de plaque transparente pour filmer l'écoulement. On filme alors la bouche de sortie et à l'aide d'un logiciel, on repasse ensuite le film image par image pour obtenir le temps de décharge. Le temps de sortie est calculé entre la première et la dernière particule sortant de la bouche de remplissage (spout).

Lors de l'établissement du temps de décharge, les éléments suivants doivent être pris en considération :

- L'échantillonnage temporel de la caméra utilisée qui produit une image toutes les 0,04 seconde. Le temps zéro se trouve toujours entre deux images. Par exemple, une image ne présente aucune matière alors que la suivante montre que les particules ont déjà franchi plusieurs centimètres.

- La qualité de la vidéo n'est pas toujours suffisante pour distinguer un grain en particulier et donc de dire à quel moment la dernière particule est sortie. On hésite souvent entre trois images pour la fin de l'écoulement.

D'après les considérations précédentes, on peut alors calculer deux sources d'erreurs :

- L'erreur sur le temps de sortie de la première particule est de $\Delta t_{11} = \pm 0,02s$ parce que l'on prend le temps moyen entre deux images de la caméra.
- En ce qui concerne le temps de sortie de la dernière particule, on hésite la plupart du temps entre trois images pour déterminer la fin de l'écoulement. L'erreur est alors de $\Delta t_{12} = \pm 0,04s$ qui est le temps moyen entre trois images.

On a donc une erreur totale sur le temps de chute qui est la somme des deux erreurs précédentes, soit une erreur $\Delta t_1 = \pm 0,06s$

On obtient alors les courbes d'écoulement contenues sur les figures 16 et 17 qui nous serviront de référence. On fait apparaître l'intervalle provenant de l'erreur.

Choix du lissage :

Dans nos expériences, on obtient uniquement des données ponctuelles qui sont limitées par un intervalle d'erreur. Nous ne connaissons par contre pas l'allure de la courbe finale, il n'est donc pas possible d'appliquer un modèle de régression particulier. On choisit alors pour des raisons de visualisation et de comparaison de lisser les points par des splines cubiques tout en considérant qu'il s'agit d'une approximation de la courbe réelle.

Les splines sont des approximations polynomiales par intervalles. On leur applique de plus des règles de continuité et de dérivabilité. Elles ont l'avantage de passer par les points connus et de limiter le degré des polynômes, donc les oscillations. Dans nos tracés de courbes qui suivent sur les figures 16 et 17 nous affichons les points, qui sont les données réellement obtenues et nous traçons la courbe avec une spline cubique.

Pour des raisons de confidentialité, les temps d'écoulements dans ce chapitre ne seront pas indiqués. Le comportement global peut bien se comprendre en supprimant l'échelle de temps. Lorsque des comparaisons devront se faire, nous utiliserons des valeurs relatives.

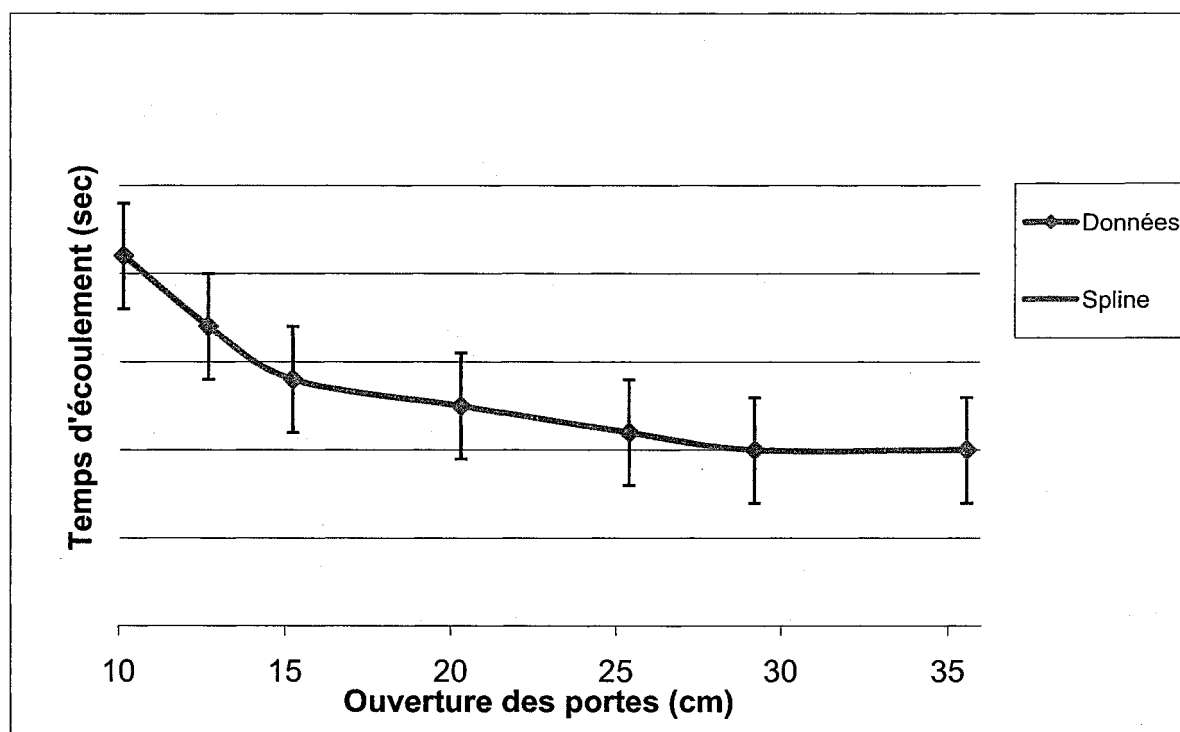


Figure 16 : Temps d'écoulement de 20kg de maïs en fonction de l'ouverture des portes

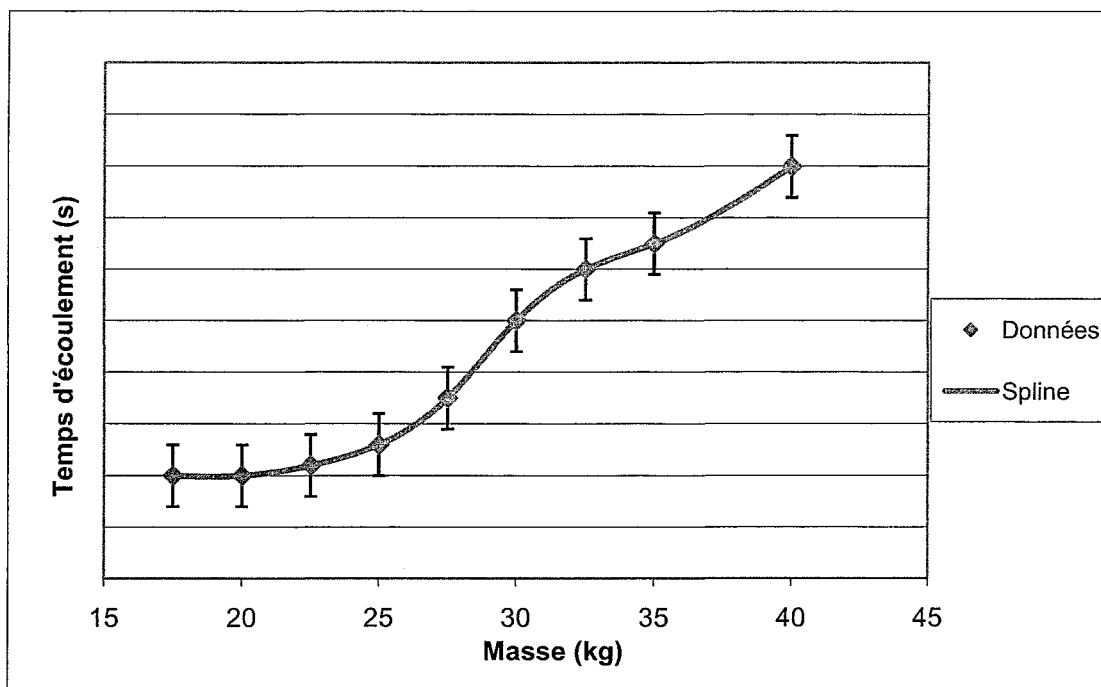


Figure 17 : Temps d'écoulement du maïs en fonction de la masse
(Tracé pour l'ouverture maximale des portes soit 30cm)

Ces courbes nous permettent déjà de confirmer ou d'infirmer certaines observations et suppositions que l'on avait pu se faire sur le fonctionnement de l'appareil.

Tout d'abord dans le cas d'une décharge de 20kg de maïs, on note sur la figure 16 que le temps d'écoulement diminue lorsque l'ouverture des portes augmente. Il est bon de noter que l'entreprise diminuait volontairement l'ouverture des portes de la balance lors d'une décharge par crainte de la formation d'un bouchon et donc d'une augmentation du temps de décharge. Cette courbe permet alors d'infirmer certaines constatations empiriques.

Au niveau du temps d'écoulement en fonction de la masse, la courbe permet de faire l'hypothèse très intéressante qu'il existe deux régimes lors d'une décharge dans une chute de transition. Ces régimes correspondent aux deux pentes que l'on peut observer. Dans un premier cas, on aurait un premier régime d'écoulement que l'on qualifierait de "libre" pour des masses allant jusqu'à 25kg. On note une zone de transition entre 25kg et 30kg, zone où

l'on observe la formation du bouchon. Ensuite passé 30kg, l'écoulement serait un écoulement bouchon.

Cela bien entendu reste à prouver et ne constitue des essais que pour un seul matériau et dans le cas de l'ouverture des portes pour une seule masse de 20kg.

4.3 MODÉLISATION DU BANC D'ESSAI

Connaissant les propriétés matériau, on peut faire les simulations sur EDEM à grande échelle, soit sur le modèle reproduisant le banc de test que l'on a réalisé dans l'entreprise. On retrouve un détail du fonctionnement du logiciel EDEM et de son paramétrage dans l'annexe I. Les paramètres de simulation sont les suivants :

- Propriétés matériau du maïs telles que déterminées au chapitre 3,
- Particules modélisées par des sphères de rayon $R=3,8\text{mm}$ (voir annexe I),
- Géométries identiques et récupérées des modèles CAD (voir annexe I pour une image du modèle)
- Les paramètres de calcul seront 20% du temps de Rayleigh pour l'incrément et un maillage de taille $2R_{\text{mini}}$ (voir annexe I).

On trace donc les deux courbes d'écoulement pour les superposer aux courbes réalisées sur le banc d'essai réel. Pour les courbes obtenues sur EDEM un lissage de type splines cubiques est aussi appliqué.

Analyse des erreurs d'interprétation :

Le logiciel EDEM va faire la simulation de l'écoulement de produit lors de la décharge de particules. La vidéo de la décharge nous permettra ensuite comme pour le banc d'essai d'obtenir notre temps de décharge. Néanmoins, nous avons toujours le même problème à savoir :

- Le temps de sortie de la première particule se situe entre deux images, sur la première aucune matière ne sera sortie et sur la suivante le premier grain sera hors de la structure.
- La dernière particule sortant de la bouche d'alimentation est assez difficile à déterminer. Ce n'est pas cette fois à cause de la résolution trop faible, mais du nombre élevé de particules se dirigeant en même temps vers la sortie. On hésite alors à nouveau entre trois images pour la fin de l'écoulement.

On se retrouve alors avec le même type de calcul pour l'erreur du temps de décharge sur les simulations, à la différence que les simulations fournissent 100 images par seconde. On se retrouve alors avec des erreurs respectives :

- $\Delta t_{21} = \pm 0,01s$ soit le temps moyen entre deux images de la simulation.
- $\Delta t_{22} = \pm 0,02s$ soit le temps de simulation entre trois images.

Cela fait pour la simulation une erreur $\Delta t_2 = \pm 0,03 s$

Comparaison entre la modélisation et l'expérimentation :

Les figures 18 et 19 montrent la comparaison entre les simulations sur EDEM et les résultats expérimentaux. Nous allons analyser les différences et voir si l'utilisation d'EDEM et notre modèle sont adaptés à l'optimisation de la chute de transition.

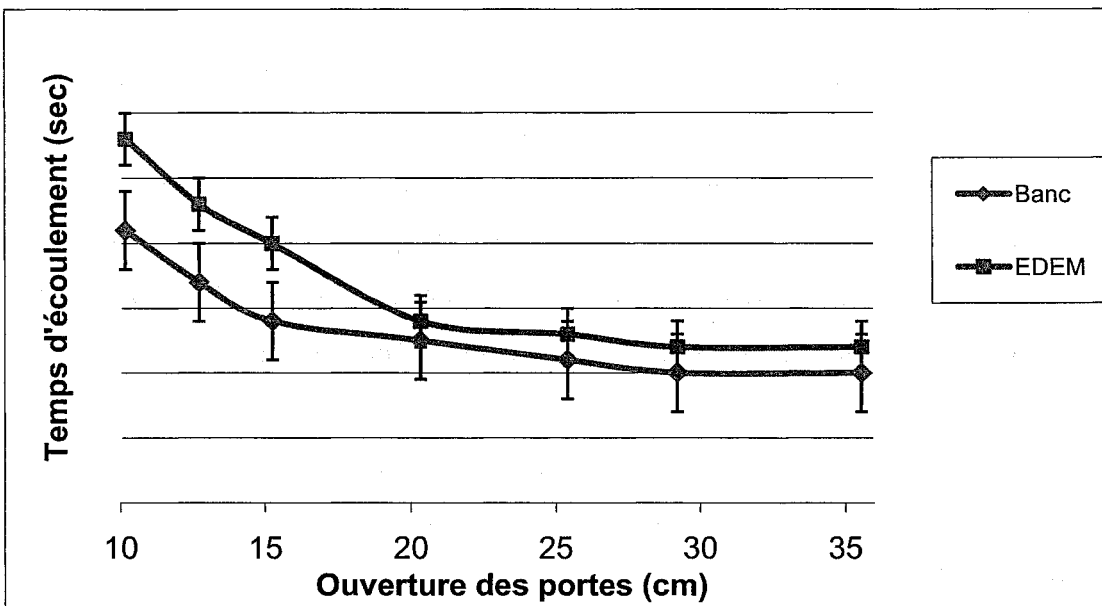


Figure 18 : Temps d'écoulement de 20kg de maïs en fonction de l'ouverture des portes

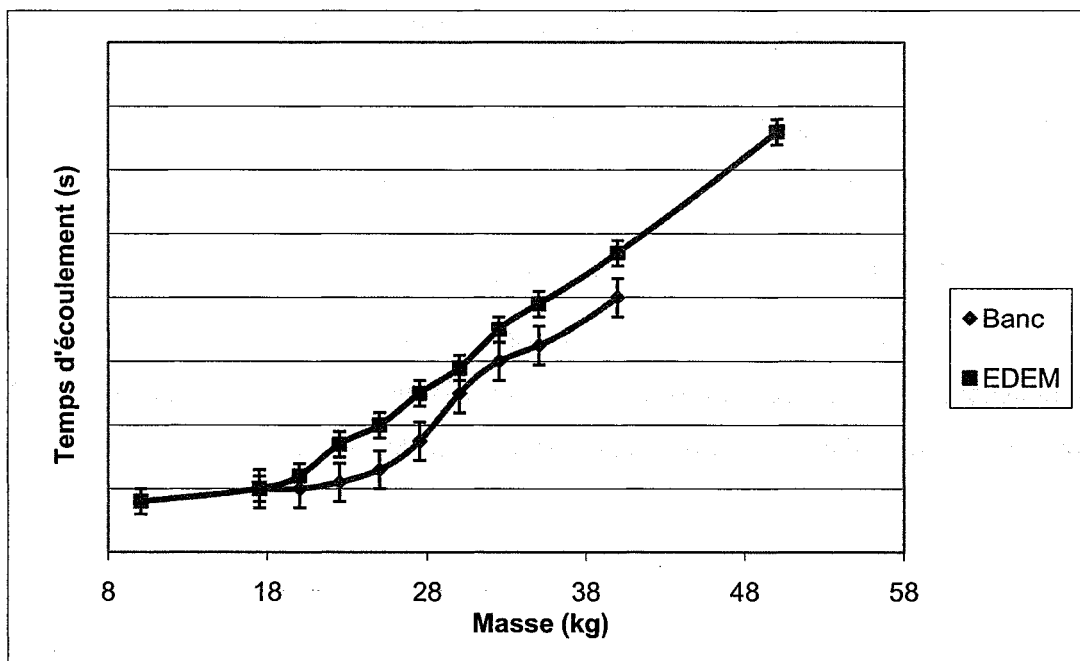


Figure 19 : Temps d'écoulement de maïs en fonction de la masse
(Tracé pour l'ouverture maximale des portes soit 30cm)

Au niveau du temps d'écoulement en fonction de l'ouverture des portes, on retrouve le même comportement général. Lors de grandes ouvertures de porte, soit à partir de 15cm,

les résultats des simulations sur EDEM sont contenus dans les intervalles d'erreur. Ceci est un bon point, car notre courbe d'écoulement en fonction de la masse est faite pour des ouvertures maximales de porte. Cela est alors de bon augure pour notre modèle de simulation.

Dans les faibles ouvertures (inférieures à 15cm) par contre, les simulations donnent des temps légèrement supérieurs aux intervalles d'erreurs. Cela peut venir de la reproduction de l'ouverture des portes. En effet, la vitesse d'ouverture joue beaucoup sur le temps de chute des particules, surtout dans de faibles ouvertures car elles ont un rôle de déflecteur. La vitesse avait aussi été évaluée par expérimentation pour notre modèle. A l'aide d'une caméra nous avons filmé l'ouverture des portes, afin de d'obtenir le temps nécessaire à l'ouverture et donc de calculer la vitesse. Comme toute analyse utilisant une caméra nous sommes tributaires de sa résolution et donc les erreurs peuvent venir de l'incertitude liée à ces résultats.

Pour ce qui est de la courbe d'évolution en fonction de la masse, la première constatation est que tous les résultats des simulations sont supérieurs aux résultats expérimentaux. Ce peut être de manière faible ou bien plus importante comme pour une masse de 28kg où le plus gros écart est enregistré avec une valeur supérieure de 15%.

La différence de résultats est difficile à expliquer et surtout à vérifier. On ne peut qu'émettre des hypothèses sur les sources de ces différences bien que nous nous soyons efforcés d'être le plus rigoureux possible :

- Les propriétés matériau ont été déterminées pour les deux seuls matériaux les plus influents. Les temps mis en jeu étant tout de même faibles, une somme de petites contributions peut se révéler néfaste,
- On peut avoir un effet de loi d'échelle, la matière ne s'écoulant pas de la même façon entre un modèle réduit et la chute standard. En effet le rapport entre l'ouverture et la taille des particules change, ce qui peut jouer sur les propriétés finales du matériau,

- L'ouverture de la porte mentionnée dans la figure 18 qui, même si elle est faible, peut avoir un effet,
- Enfin, au niveau du modèle EDEM, nous n'avons pas essayé d'optimiser les modèles de contact, chose possible en entrant notre propre code de calcul. Nous avons utilisé le modèle existant le plus adapté : celui d'Hertz-Mindlin.

De plus, nos plus gros écarts se situent dans ce que nous avons qualifié, dans le chapitre 4.2, de zone de transition où le bouchon est en train de s'installer dans la chute. On comprend que cette zone puisse en effet être sensible.

4.4 DISCUSSION

Notre premier modèle de simulation, bien que présentant certaines limites dont nous sommes conscients (voir section précédente), permet toutefois de tirer certaines conclusions intéressantes sur les caractéristiques des écoulements granulaires appliqués à notre étude.

La première constatation fut de noter que la vitesse de décharge diminue à mesure que l'ouverture des portes augmente. Il faut savoir qu'une des techniques empiriques utilisée par l'entreprise afin de baisser le temps de décharge est de diminuer volontairement l'ouverture pour mieux contrôler l'apport de matière. Les simulations ainsi que les essais sont en accord pour nous montrer que cette technique est fautive pour des poids de 20kg ainsi que probablement pour des poids plus faibles car l'apport de matière est peu important.

L'analyse de la courbe de temps d'écoulement en fonction de la masse montre clairement une évolution non linéaire. Les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre 4.2 supposent l'existence de 3 régimes d'écoulement : un régime libre, un écoulement bouchon et une zone de transition entre ces deux régimes. La courbe obtenue par simulation, pour sa part, présente une zone de transition plus petite. On pourrait même dire qu'elle ne comporte que deux régimes : écoulement libre et bouchon. On peut de plus noter

que la courbe d'expérimentation tracée par des splines peut aussi être interprétée de cette manière. On pourrait très bien faire passer une droite entre les intervalles d'erreur pour des masses supérieures à 20kg. De ce fait, l'hypothèse sur l'existence d'une zone de transition est compromise. On va alors faire une nouvelle hypothèse qui est que lors de la décharge, il s'installe deux régimes d'écoulement autour d'une masse limite :

- Avant la masse limite où se forme le bouchon : écoulement libre. Les particules ont un contact ponctuel entre elles et il ne se forme pas de zones de pertes de vitesse dans l'écoulement,
- Après la masse limite : écoulement bouchon. Les particules peuvent avoir des contacts entre elles sur un temps fini. L'écoulement présente aussi différentes zones de vitesse, semblable à l'écoulement de sable dans un sablier.

Ces régimes sont identifiés par les changements de comportement dans la courbe. De plus, le changement de comportement se situe autour de 20kg, masse pour laquelle on commence à voir la matière bouchonner dans la chute. On a déjà pu observer que la matière s'écoule différemment une fois qu'un bouchon se forme, cela change alors la forme de son écoulement et son débit (Pouliquen 2002).

Dans nos expérimentations futures, on se contente de ce résultat. De nouvelles expérimentations pourraient apporter plus de réponses, mais nous avons déjà une bonne idée du comportement de la matière dans la chute de transition. De plus, il faut rappeler que notre souhait est de procéder à l'optimisation de la chute de transition et non de créer un modèle d'écoulement parfaitement en accord avec les expériences. Si nous utilisons ce modèle dans les mêmes conditions et qu'une géométrie s'avère prometteuse, elle engendrera dans tous les cas la réalisation d'un prototype. Nous utiliserons donc ce modèle à l'avenir dans nos simulations d'optimisation.

4.5 UTILISATION OPTIMALE DE LA CHUTE STANDARD

En plus de l'optimisation, nous allons vérifier l'influence de quelques paramètres de la chute standard sur le temps de décharge. Cela peut donner d'autres pistes d'amélioration que l'optimisation de forme.

4.5.1 Influence de la position horizontale

En premier lieu nous allons tester l'influence de la position horizontale de la chute par rapport au centre de la balance. Les côtes indiquées sur la figure 20 donnent la côte concernée, soit la distance entre le centre de la balance et le bord de la chute. Nous utiliserons un double système d'unités car dans l'entreprise les pouces sont plus communément utilisés. La position normale est de 14po soit 35,5cm et différentes configurations ont été testées. Leur influence sur le temps de décharge de 20kg de maïs à une ouverture maximale des portes est présentée dans la figure 21.

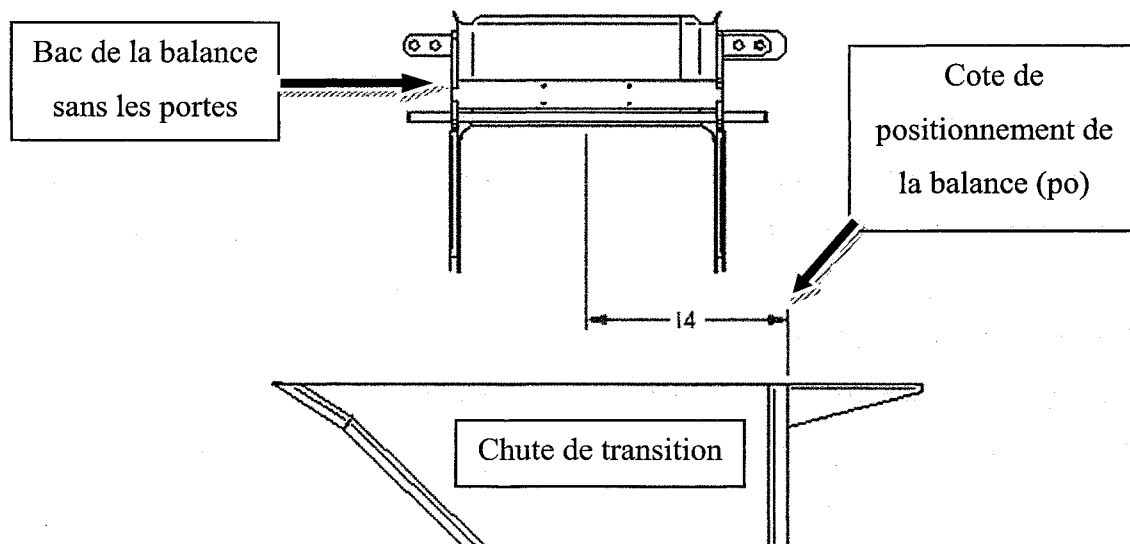


Figure 20 : Positionnement horizontal de la chute

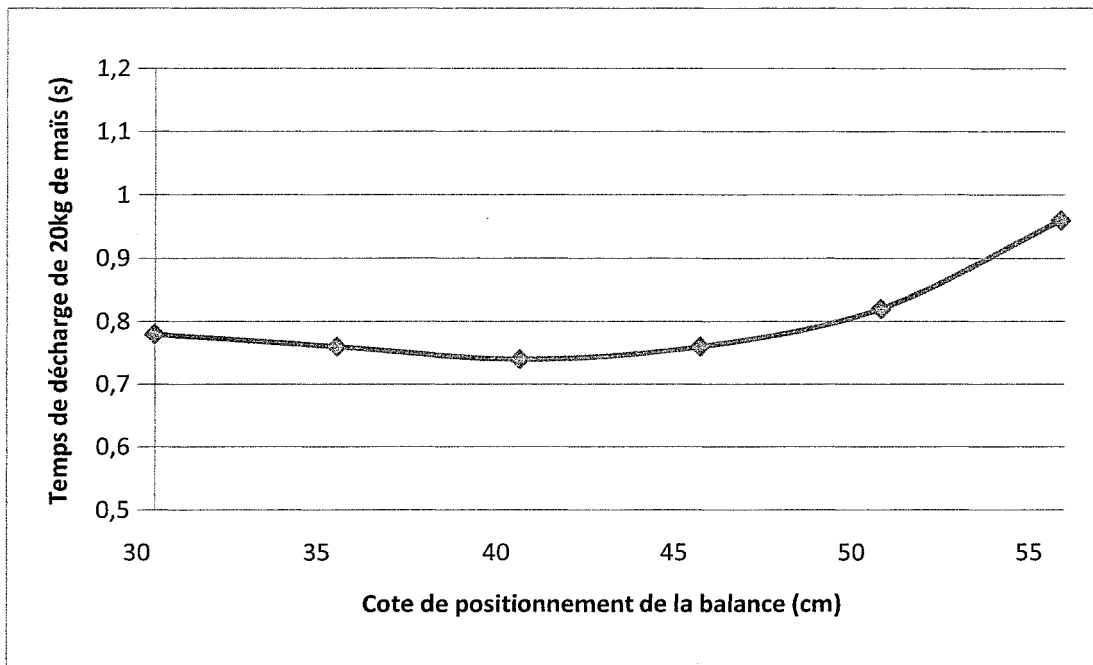


Figure 21 : Temps de décharge selon le positionnement de la balance

Les différents temps sont obtenus pour des décharges de 20kg de maïs à pleine vitesse (soit ouverture maximale des portes). On remarque dans un premier temps que même si la différence est faible il est préférable de ne pas décharger directement au-dessus de l'ouverture, car on n'exploite pas la forme parabolique de la chute. En se décalant, on freine un certain nombre de particules empêchant une concentration trop importante vers l'ouverture de remplissage du sac et donc un bouchonnage. Pour les grands décalages, on coupe la vitesse des particules les plus éloignées de manière trop importante et le temps augmente alors à nouveau.

4.5.2 Influence de la hauteur de la chute

On a aussi vérifié l'effet de la hauteur de la chute. L'idée est de placer la balance à des hauteurs différentes, car l'entreprise a constaté que les performances ne sont pas les mêmes selon les clients et l'encombrement disponible sous les balances. La figure 22 montre la côte visée par cette optimisation et sa valeur en fonctionnement normal. La figure

23 montre pour sa part le résultat d'une décharge de 20kg de maïs à pleine ouverture de porte pour différentes hauteurs de la balance.

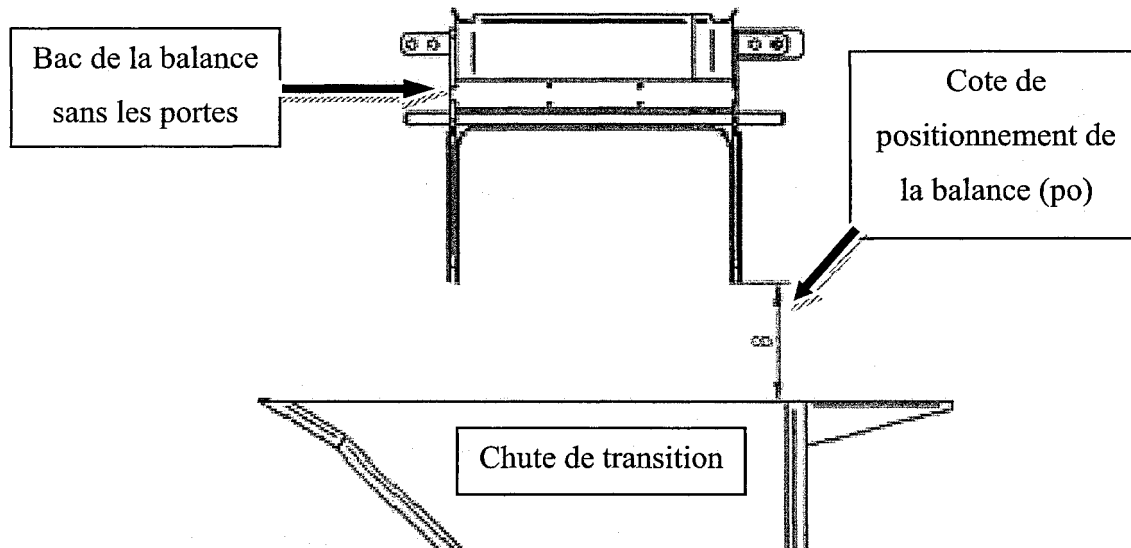


Figure 22 : Cote de positionnement pour l'optimisation de la hauteur de la balance

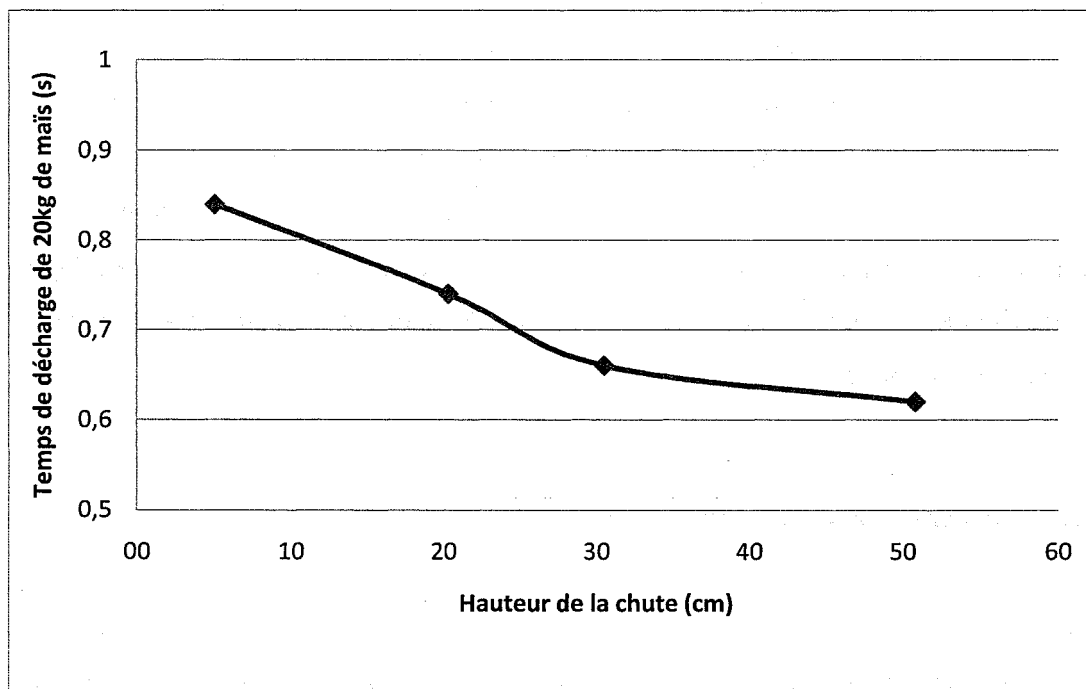


Figure 23 : Temps de décharge selon la hauteur de la chute

Globalement, plus la chute est haute, meilleur est le temps de décharge. Quoique l'on n'ait réalisé que quelques essais, la courbe présente la tendance de l'impact de la hauteur de chute. L'explication possible est que la vitesse accumulée par les particules leur permet de converger plus efficacement vers la bouche de remplissage.

Néanmoins, s'il est vrai que l'entreprise a intérêt à fabriquer les chutes les plus hautes possible, on est bien souvent limité par la place disponible pour les machines.

4.5.3 Influence d'un revêtement à friction faible

Les précédentes études ANOVA ont montré que le coefficient de friction statique de l'interaction entre le grain et le matériau a une grande influence sur le temps de chute. On a donc à priori tout intérêt à appliquer un revêtement à l'intérieur de la chute dont le coefficient est le plus faible possible.

On se tourne alors vers le téflon qui est souvent utilisé dans ce cas.

On va prendre pour nos essais un coefficient de friction entre grain et téflon de 0,1. Cette valeur est basée sur une étude visant à identifier les coefficients de friction entre plusieurs matériaux employés lors de la construction de silos de grains de céréales (ici blé et orge). (Lawton 1979)

Les résultats obtenus pour des décharges à pleine ouverture sont présentés sur la figure 24.

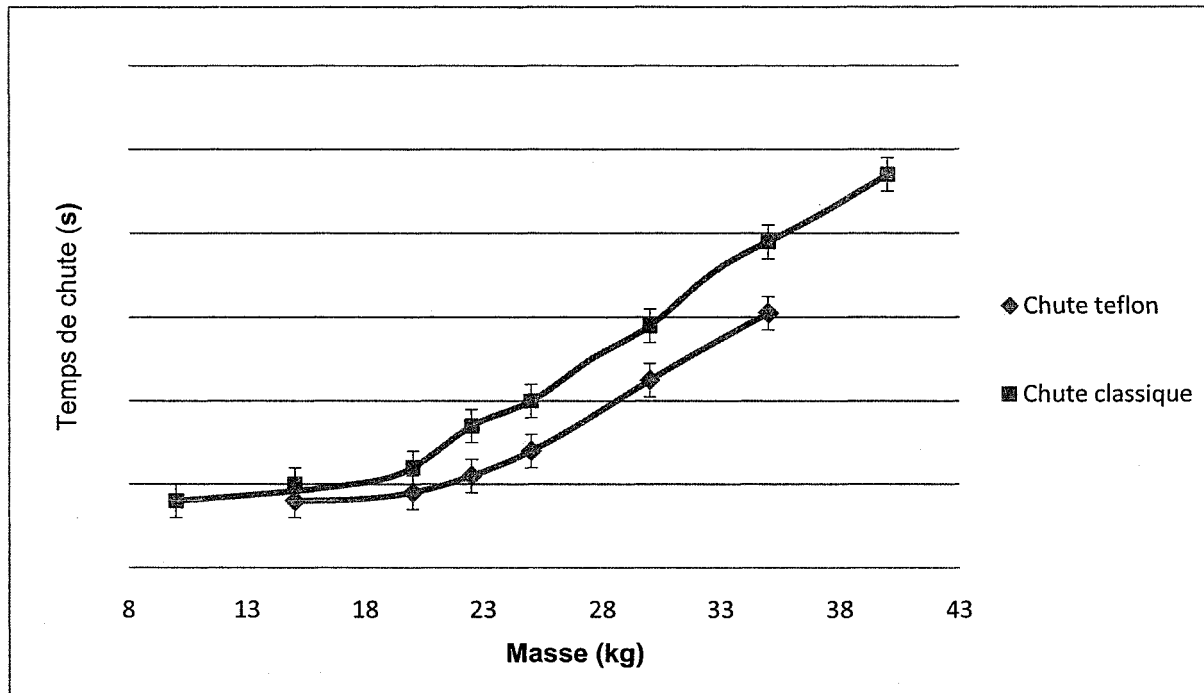


Figure 24 : Comparaison de la chute classique et de la chute téflon

Comme on pouvait s'y attendre d'après nos études ANOVA, un revêtement à friction faible appliqué à l'intérieur de la chute améliore globalement les temps de chute. On remarque même que les performances sont principalement améliorées lorsque l'écoulement bouchonne. Cela se comprend, car les particules glissent alors mieux sur la paroi. Si l'on calcule le pourcentage d'amélioration de la manière suivante : $\% = (t_{standard} - t_{teflon}) / t_{standard}$ on peut en faisant une moyenne calculer une amélioration globale sur les temps de décharge de 11%.

On remarque aussi que la courbe d'écoulement obtenue avec une chute ayant un revêtement en téflon est décalée. On obtient un comportement similaire à la chute classique, mais pour des masses plus importantes ce qui est très avantageux.

4.5.4 Vitesse de sortie des premières particules

C'est un nouveau critère que l'on a identifié lors du déroulement de l'étude. Dans la réalité, le sac fermé est placé sous la bouche de remplissage (spout) et s'ouvrira grâce à la pression appliquée par les premières particules. Ce phénomène perturbe quelque peu l'écoulement, mais, pour ne pas ajouter de la difficulté à l'étude, nous avons choisi de ne pas modéliser le sac. On enregistrera alors la vitesse des particules à la sortie de la bouche de remplissage. Nous travaillons avec 20% des particules totales, choix effectué de manière empirique et l'on cherche à comparer les vitesses moyennes d'une quantité de matière frappant le sac en premier.

Pour la suite, on suppose que plus la vitesse des premiers 20% de matière à sortir de la bouche de remplissage est élevée et plus facilement le sac s'ouvre.

Pour obtenir cela, on se sert des outils graphiques d'EDEM car ils peuvent facilement nous donner le nombre de particules dans le modèle en fonction du temps. La figure 25 montre l'évolution du nombre de particules dans le modèle obtenu par les outils graphiques d'EDEM.

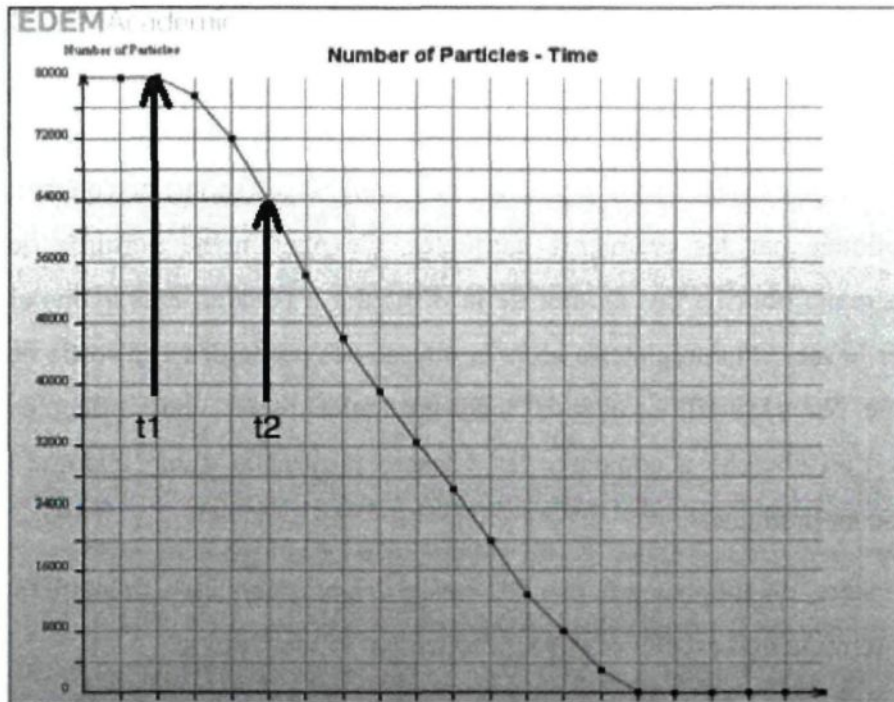


Figure 25 : Nombre de particules en fonction du temps en secondes lors d'une décharge

On relève donc sur le graphe le temps où 20% des particules seront sortis de la bouche de remplissage : dans le cas de la chute standard avec 20kg de maïs (80000 particules), les grains commencent à sortir à partir d'un temps t_1 et à t_2 , 20% des particules sont sorties, car il reste 64000 particules dans le modèle.

Connaissant l'intervalle de temps où les particules sortent il est possible de créer un domaine virtuel au niveau de la bouche de remplissage, on relèvera alors dans ce domaine la vitesse des particules, car on veut la vitesse des particules sortantes. Sur la figure 26 on a tracé la vitesse moyenne instantanée des particules sortant de la bouche de remplissage dans l'intervalle $[t_1 ; t_2]$ et l'on fait tracer la moyenne pour avoir la vitesse moyenne désirée. Dans le cas de la chute standard, on obtient une vitesse moyenne de 5,6m/s.

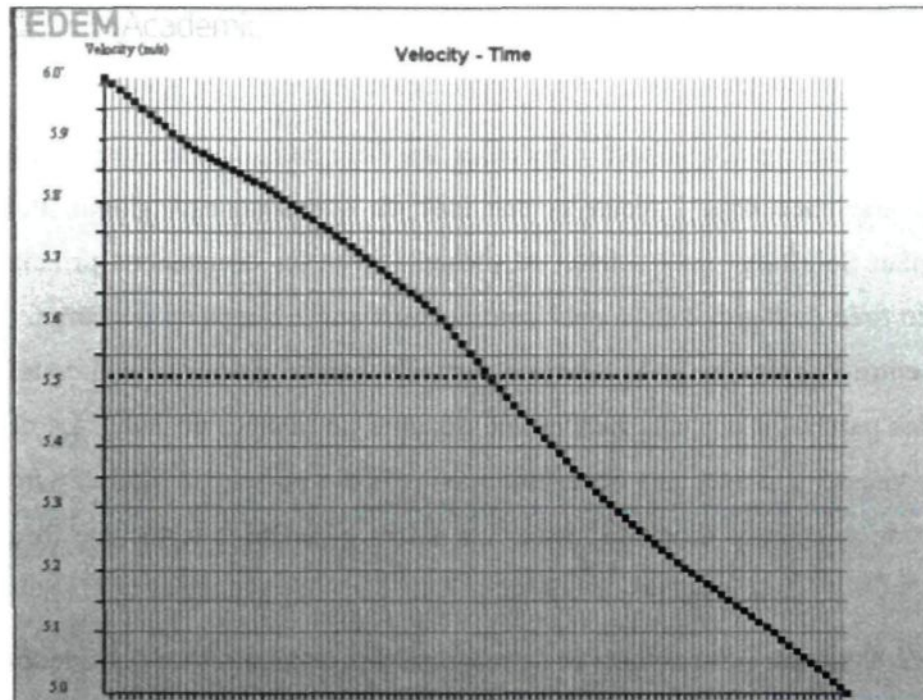


Figure 26 : Vitesse moyenne instantanée des particules dans l'intervalle $[t_1; t_2]$ et vitesse moyenne à la sortie de la bouche d'alimentation

4.6 RECHERCHE DE NOUVELLES GÉOMÉTRIES

4.6.1 Critères de choix et déroulement des essais

Nous avons maintenant tous les outils nécessaires pour faire l'analyse. Les critères utilisés lors de l'optimisation sont :

- Le temps de décharge de la balance vers la bouche de remplissage pour une ouverture maximale des portes (30cm).
- La vitesse moyenne des premières particules. Pour faciliter l'ouverture du sac, une chute dont les premiers 20% de matière sortent avec une vitesse moyenne plus élevée sera préférable.



Les chutes sont dessinées sous SolidEdge, ensuite les géométries sont importées dans EDEM pour les tester.

Un document notice servant à recenser les différentes formes testées a été rédigé afin d'avoir une trace dans l'avenir et une idée du comportement global. Pour chaque forme, un plan SolidEdge de la chute est présenté avec les dimensions principales ainsi qu'une vidéo tirée du logiciel et un petit commentaire sur le temps de décharge. Ce dernier est calculé entre la première et la dernière particule sortant de la chute. Les tests ont été faits avec des particules de type maïs et une quantité de matière de 20kg. La décharge se fait à pleine vitesse, soit avec une ouverture maximale des portes. La figure 28 nous montre un exemple de géométrie de chute testée, les autres géométries testées se trouvent dans l'Annexe II.

Afin de comparer nos résultats et de respecter les paramètres de confidentialité, nous n'afficherons pas les dimensions des chutes et nous noterons t_{ref} le temps de référence. C'est le temps que met 20kg de maïs à se décharger dans une chute standard et l'on exprimera les autres temps en fonction de t_{ref} .

4.6.2 Exemple avec une chute double

Plan :

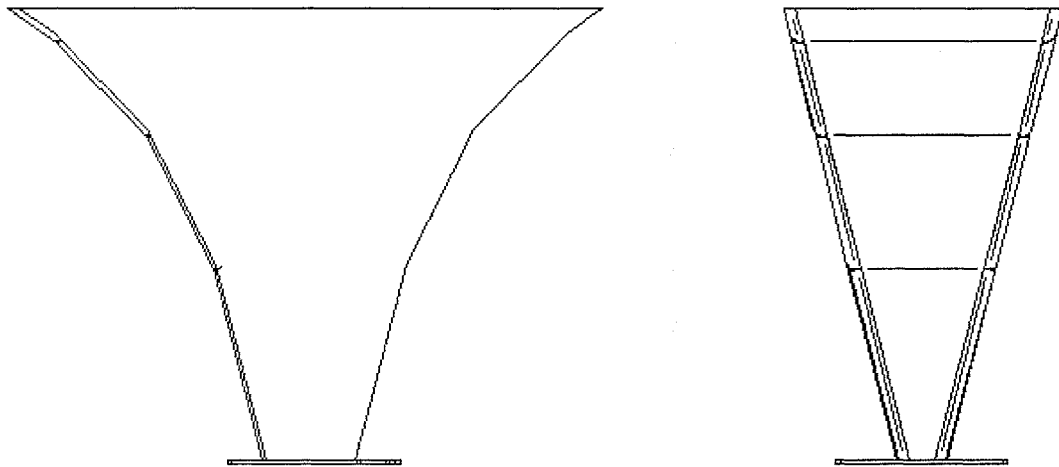
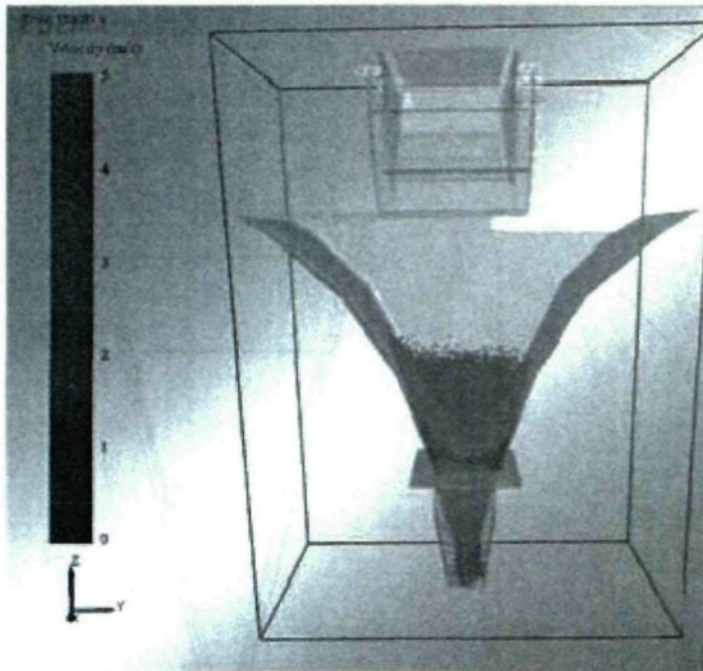


Figure 27 : Géométrie de la chute double 1 pour les essais de décharge

Analyse de la décharge :

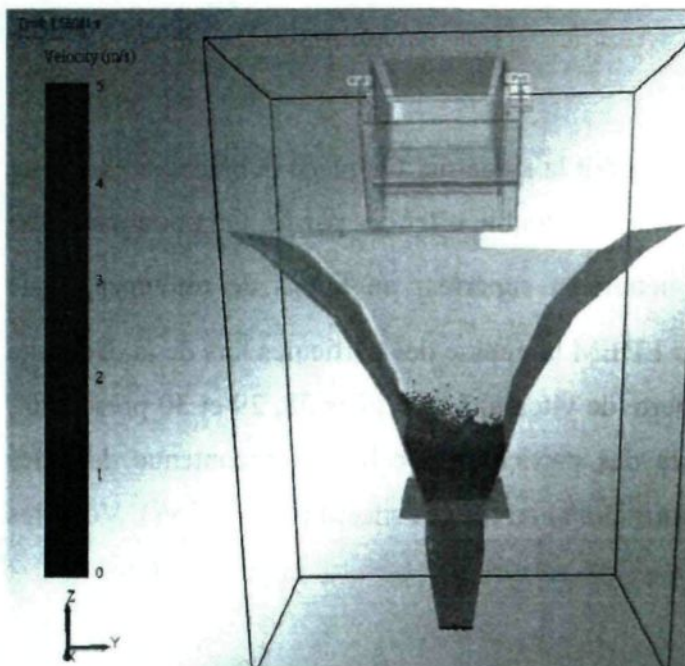
On reprend la chute standard et on en fait la symétrie. On place la balance centrée au dessus de l'ouverture on espère ainsi profiter du double effet des parois. On obtient comme temps de décharge : $1,6t_{ref}$. Ceci est nettement supérieur au temps de référence, mais analysons la raison. On peut afficher sur EDEM la vitesse des particules lors de la décharge ce qui permet d'analyser les zones de perte de vitesse. Les figures 28, 29 et 30 présentent, pour trois temps différents, les vitesses des particules. L'échelle est contenue dans les images : un dégradé du bleu (vitesse mini = 0m/s) au rouge (vitesse maxi = 5m/s). Voici les principales étapes de l'écoulement :



A l'ouverture des portes, la matière prend beaucoup de vitesse et se dirige vite vers la sortie, ce qui est bénéfique pour la vitesse des premières particules.

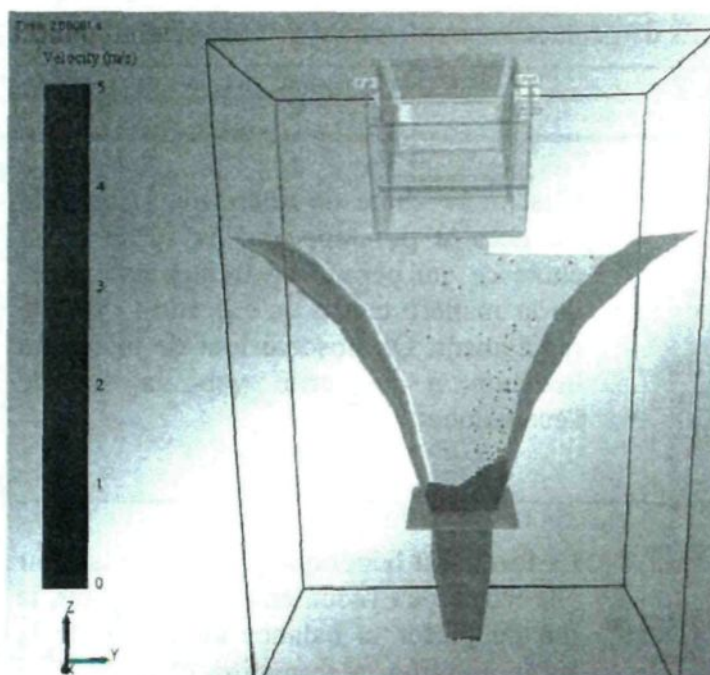
On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 6,1m/s

Figure 28 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t1



Cependant beaucoup de matière se dirige vers la bouche de remplissage et se retrouve bloquée. La vitesse accumulée est perdue et on constate l'apparition d'un bouchon en haut de l'ouverture.

Figure 29 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t2



Le bouchon nous fait alors perdre du temps. La pression sur les parois fait apparaître des zones mortes comme dans un écoulement en silo.

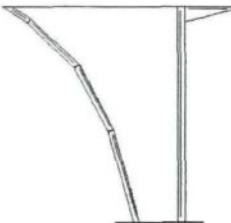
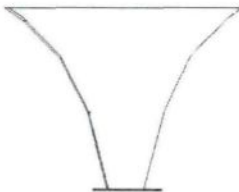
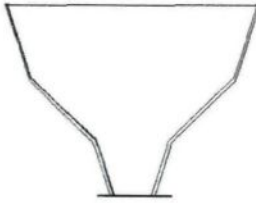
Figure 30 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute standard à t_3

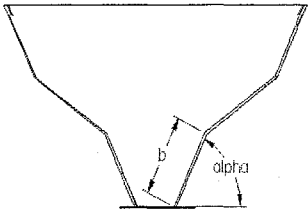
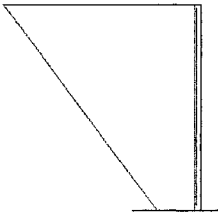
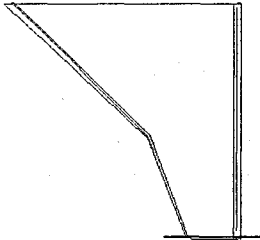
Cette ébauche de chute nous permet alors mieux de comprendre la problématique. Le bouchon fait augmenter significativement le temps de décharge, il faut donc empêcher sa formation en ralentissant certaines particules pour laisser le temps aux premières de s'écouler librement. On comprendra le compromis à faire, car trop ralentir les particules ferait à nouveau augmenter le temps global.

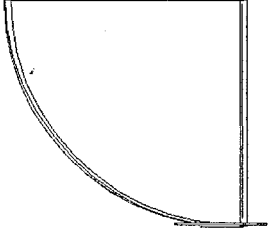
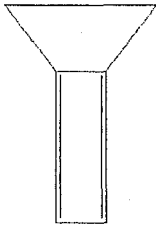
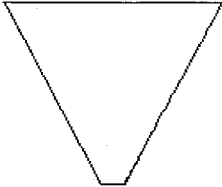
4.6.3 Tableau synthèse des essais

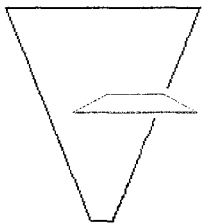
Le même travail a donc été réalisé pour différents modèles de chute que l'on retrouve en Annexe II. Ces chutes ont été ajustées après les essais et par les constatations que l'on a pu faire. Le tableau 11 regroupe les résultats des temps d'écoulement et des vitesses obtenus, ainsi que des commentaires généraux.

Tableau 11: Synthèse des essais de géométrie pour la chute de transition

Géométrie testée	Résultats	Commentaires
 <p>Chute standard</p>	<p>Temps de décharge t_{ref}</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,6m/s</p>	<p>C'est notre chute de référence, la balance est décalée par rapport à la sortie de la chute ce qui permet de freiner une partie de la matière tandis qu'une autre s'écoule rapidement. On observe tout de même un bouchon à la sortie vers la fin de l'écoulement.</p>
 <p>Chute standard double</p>	<p>Temps de décharge $1,6 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 6,1m/s</p>	<p>La forme est bénéfique pour la vitesse, car elle freine peu l'écoulement. Cependant, le fait de placer la balance au-dessus de la sortie entraîne la formation d'un bouchon qui freine l'écoulement de la matière.</p> <p>On pense alors à un système freinant plus la matière.</p>
 <p>Chute double 1</p>	<p>Temps de décharge $1,25 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,8m/s</p>	<p>L'écoulement possède un comportement intéressant, environ la moitié des particules est dirigée directement vers la sortie. Par contre, la deuxième partie de la matière bouchonne sur la fin, ce qui fait perdre du temps. On pourrait essayer alors de freiner moins de produit dans la première partie pour limiter ce phénomène.</p>

Géométrie testée	Résultats	Commentaires
 <p>Chute double 2</p>	<p>Temps de décharge $1,2 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,7m/s</p>	<p>On gagne légèrement sur le temps de décharge, mais les particules bouchonnent, car convergent rapidement vers la sortie.</p> <p>Les possibilités d'amélioration sont faibles, car même si l'on freine plus de matière par les murs le temps global s'en trouvera augmenté.</p> <p>On souhaite alors essayer de diriger la matière sans perdre trop de vitesse.</p>
 <p>Chute droite</p>	<p>Temps de décharge $1,6 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,2m/s</p>	<p>En partant de l'idée que la chute standard retient peut-être trop de particules, la chute droite a été conçue.</p> <p>Trop peu de matière s'écoule directement vers la sortie. Les particules viennent frapper la paroi opposée ce qui crée des turbulences et une "vague" qui occasionne une remontée des particules.</p>
 <p>Chute semi-parabolique</p>	<p>Temps de décharge $1,05 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,3/s</p>	<p>L'idée est de bien orienter les particules vers la sortie et de moins freiner les particules dans la partie supérieure comparativement à la chute standard.</p> <p>Au final, la cassure apporte des turbulences. On n'opte donc pas pour ce système moins optimisé que la chute standard.</p>

Géométrie testée	Résultats	Commentaires
 <p>Chute cycloïde</p>	<p>Temps de décharge $2,6 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 6,0m/s</p>	<p>Une cycloïde d'après la littérature permet d'accumuler le maximum de vitesse pour une particule.</p> <p>Au final, une grande quantité de matière reste bloquée et le reste vient frapper la paroi. La vitesse est aussi très diminuée.</p>
 <p>Chute tube</p>	<p>Temps de décharge $1,55 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 5,4m/s</p>	<p>Cette chute vient d'une idée d'un développeur de l'entreprise. L'objectif était de retenir les particules avant qu'elles accumulent de la vitesse.</p> <p>En fait, on a tout de suite un entonnoir et la matière bouchonne vite sans prendre de vitesse. Forme peu intéressante en conclusion.</p>
 <p>Chute conique</p>	<p>Temps de décharge $1,5 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 6,2m/s</p>	<p>La chute circulaire est placée directement au-dessus de l'ouverture de la bouche de remplissage.</p> <p>Sa forme conique permet de diriger efficacement la matière sans la freiner. Cette chute donne la vitesse des premières particules la plus élevée de toutes les chutes testées.</p> <p>Cependant, la formation d'une vague centrale fait augmenter le temps de décharge. On va alors tenter de diminuer cette vague.</p>

Géométrie testée	Résultats	Commentaires
 <p>Chute conique avec déflecteur</p>	<p>Temps de décharge $1,25 t_{ref}$</p> <p>Vitesse des premiers 20% : 6,2m/s</p>	<p>Voici un exemple de déflecteur utilisé. Plusieurs types ont été testés en faisant varier l'ouverture, la hauteur, la forme. Dans l'ensemble on diminue efficacement la vague, mais on ne peut pas descendre en dessous de $1,25 t_{ref}$ pour la décharge.</p>

4.7 DISCUSSION

L'objectif initial de ce chapitre était d'améliorer le temps d'écoulement lors de la sortie de produit dans la chute de transition après une décharge à pleine vitesse de la balance.

L'une des attentes principales était bien sûr de trouver une forme de chute de transition optimisée donnant un temps de décharge meilleur que la chute actuellement utilisée. Comme on a pu le constater, les modélisations réalisées n'ont pas permis d'obtenir un temps meilleur. Les différentes idées que l'on a eu ne suffisent sûrement pas à faire le tour de toutes les formes possibles, mais un certain éventail a été exploré.

Cependant, tout le travail n'a pas été vain. Les différentes simulations d'écoulement ont permis de mieux cerner l'impact des géométries sur la décharge. Par exemple, il est maintenant clair que l'apparition du bouchon fait augmenter globalement le temps de la décharge ou encore que la matière doit être dirigée directement vers la sortie pour éviter des turbulences supplémentaires. Cette expérience supplémentaire sur les écoulements appliquée au cas concret de l'entreprise peut donc s'avérer utile pour eux.

L'optimisation de forme n'a pas été le seul travail réalisé. Les essais sur la position horizontale et la hauteur de la chute vont permettre d'utiliser la chute de transition dans son plein potentiel selon les exigences du client. Ceci est aussi très profitable, car la calibration de la machine s'en trouvera facilitée. De plus, l'influence positive d'un revêtement à friction faible ouvre aussi des perspectives futures.

Outre tous les essais et les courbes obtenues, nous avons développé un outil de simulation performant et disponible. Si l'on en éprouve le besoin, le logiciel peut servir à de nouvelles analyses. L'entreprise dispose alors de documents et d'outils vérifiés pouvant servir à des développements futurs.

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DU MODULE D'ALIMENTATION

5.1 DESCRIPTION DU SYSTÈME ET PROBLÉMATIQUE

5.1.1 Le module GHS

Cette fois-ci notre travail va se concentrer sur le module GHS (pour Gravity High Speed) que l'on avait présenté dans le chapitre 4. On rappelle que ce module est situé juste en dessous du silo où la matière à ensacher est stockée en vrac. Il aura pour fonction d'alimenter la balance avec la quantité de produit choisie et ceci avec la plus grande précision possible. La figure 31 montre une photographie du module avec ses principales composantes :

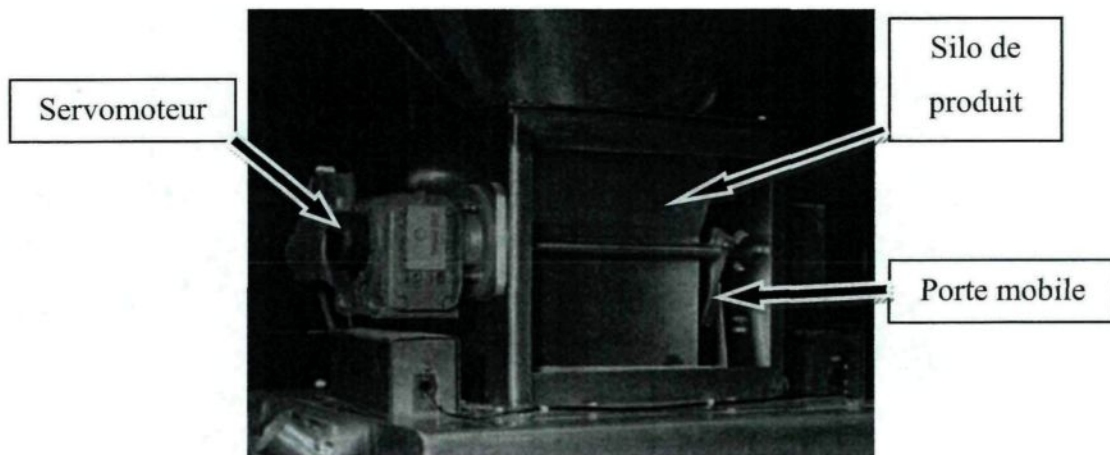


Figure 31 : Le module GHS intégré au système



La mécanique est en fait assez simple : une porte mobile en dessous du silo commandée par un servomoteur relié lui-même à un contrôleur. La porte est asservie en fonction du poids présent dans la balance que l'on peut lire en temps réel grâce à trois cellules de charge sur lesquelles la balance est accrochée.

5.1.2 La routine de remplissage

Il est important de noter que la routine de remplissage représente la partie clé de la pesée. C'est ici que se joue principalement la précision ainsi qu'une partie de la vitesse d'ensachage. On comprendra donc que pour des raisons de propriété intellectuelle on ne puisse donner tous les détails d'une routine de remplissage. Cependant, nous nous efforcerons de l'expliquer juste assez pour comprendre les travaux liés à ce chapitre.

Afin d'obtenir une plus grande précision, la porte est asservie en temps réel selon une routine de remplissage qui dépend en partie du poids présent dans la balance. Cette routine peut se modifier manuellement pour s'adapter au matériau ensaché ou encore au poids que l'on veut mettre dans les sacs par l'ajustement de certains paramètres abordés par la suite.

Un paramètre important, qui sera grandement utilisé ultérieurement, est le pourcentage d'ouverture de la porte qui renseigne sur sa position. La position 100% correspond à l'ouverture maximale de la porte (lorsqu'elle ne bloque plus du tout le silo) et la position 0% correspond à la porte complètement fermée. L'angle entre ces deux positions, contrôlé par le servomoteur, sert ensuite de référence et constitue le 100%. Les positions intermédiaires sont une fraction de cet angle. De ce fait, le pourcentage d'ouverture n'est pas une fonction linéaire du débit fourni par le module.

Le principe d'une routine de remplissage est toujours le même et se déroule de la façon suivante :

- La première étape est le "bulk feed" ou remplissage rapide. On ouvre la porte au "MaxFeeding", le pourcentage d'ouverture maximum de la recette (que l'on fixe

manuellement dans chaque recette) jusqu'à ce que la balance lise le poids consigne DFW (Dribble Feed Weight). On ne se soucie pas ici de la précision, car on cherche à mettre le maximum de produit dans la balance dans le temps le plus court possible.

- Lorsque la balance lit le poids consigne DFW, elle entame sa phase de "Dribble feed" ou fermeture progressive. La porte passe alors de l'ouverture maximale "MaxFeeding" à l'ouverture minimale "MinFeeding", que l'on a aussi fixée manuellement. La formule de fermeture ne sera pas détaillée pour des raisons de confidentialité.
- Quand l'ouverture minimale est atteinte, la porte se ferme ensuite subitement. La formule est faite de sorte que le "CutOff" corresponde à un poids W_{target} , qui est légèrement inférieur au poids nominal $W_{nominal}$ et que l'on ajuste manuellement.

Voici le détail des paramètres utilisés dans une recette :

%ouverture : Commande d'ouverture envoyée au servomoteur pour l'ouverture de la porte (% d'ouverture compris entre le min. et le max.)

W_{target} : System Compensation : Poids visé pour obtenir le poids nominal

MinFeeding : % d'ouverture minimum aussi appelé "CutOff"

MaxFeeding : % d'ouverture maximum

DFW : Dribble Feed Weight : Poids auquel on passe de la position Bulk à Dribble (donc auquel on débute le contrôle de la porte)

$W_{nominal}$: Poids visé final

Le contrôle ne se fait donc pas seulement en fonction du poids, mais aussi selon la position de la porte. En effet, on va passer à la phase de fermeture progressive au moment de la lecture d'un poids consigne. Cependant, l'arrêt définitif se fera une fois arrivé à une position de la porte dite "CutOff" où la porte se ferme brusquement. La raison de ce choix est détaillée par la suite.

Dans la routine apparaît un poids W_{target} ou System compensation. C'est une consigne de poids légèrement plus faible (on demandera une masse de 19,9kg pour obtenir 20kg par exemple) que le poids nominal souhaité qui permet de prendre en compte la quantité de produit restée dans les airs à la consigne de fermeture. Ce poids est important, car il permet d'ajuster la recette.

On se rend alors compte que ce qui jouera le plus sur la précision de l'ensemble est la phase de fermeture progressive. Il faudrait idéalement que l'on puisse prévoir l'exacte quantité de produit dans les airs et que cette quantité soit la plus faible possible, de ce fait la précision serait vraiment maximale.

5.1.3 Choix d'une recette

Lorsque l'opérateur doit choisir sa recette, à un changement de matériau ou de poids nominal du sac, il va agir sur trois paramètres :

- MinFeeding : % d'ouverture minimum
- MaxFeeding : % d'ouverture maximum
- W_{target} : Poids visé pour obtenir le poids nominal (System Compensation)

En premier lieu il choisit l'ouverture minimum. Ce choix dépend de la cadence que l'on va utiliser ensuite pour l'ensachage, mais il y a une valeur limite que l'on doit déterminer et que l'on nomme limite d'écoulement erratique.

Pour cela on fait un test visuel d'écoulement. En effet dans les matériaux granulaires la cohésion entre les grains et leur arrangement peut faire qu'à faible ouverture la matière ne s'écoule pas même si l'ouverture est assez grande pour que plusieurs particules passent. Dans des ouvertures plus grandes, il y a une phase d'écoulement erratique où la matière peut tantôt s'écouler, tantôt se bloquer. On ne souhaite pas se retrouver dans ce cas, car la

précision en serait affectée. Le test visuel consiste à ouvrir la porte de plus en plus jusqu'à constater visuellement que l'écoulement est régulier.

Ensuite on ajuste les pourcentages d'ouverture maximum et minimum pour coller à la cadence souhaitée par le client. Dans le souci d'obtenir la plus grande précision, on choisit la routine possédant le pourcentage de fermeture le plus faible. On choisit alors la limite d'écoulement erratique et l'on augmente l'ouverture maximum. Cependant pour des cadences élevées, augmenter seulement l'ouverture maximum ne suffit pas, car la routine ne permet pas d'aller dans les ouvertures faibles assez vite. On augmente alors l'ouverture minimum pour obtenir la cadence voulue, mais on perd en précision.

Enfin, on ajuste notre W_{target} afin d'obtenir le poids nominal souhaité par le client.

La précision est ensuite déterminée par un test statistique. On caractérise la précision par le 2σ soit deux fois l'écart type d'une répétition de 30 pesées avec la même recette. Cela signifie alors que statistiquement 95% des pesées seront situées dans un intervalle $[X_{cible} - 2\sigma; X_{cible} + 2\sigma]$. On obtient alors un résultat en grammes qui est celui donné au client de la machine et utilisé dans la stratégie commerciale de l'entreprise.

5.1.4 Problématique

On rappelle que l'objectif principal de cette partie de l'étude est d'améliorer la précision avec laquelle la balance pèse le produit avant sa décharge, car on veut le moins de variation possible dans le poids et donc la masse finale. Comme on l'a vu, on peut avoir plusieurs cadences sur la machine, ce qui engendre différentes ouvertures minimums pour la porte au moment de la fermeture. Il faut alors trouver un moyen d'optimiser la précision dans le plus de configurations d'ouverture de porte possibles.

Pour des cadences plus faibles se pose le problème de l'écoulement erratique. Les particules ne tombent alors plus de façon constante rendant alors beaucoup plus difficile la

prévision du poids dans les airs. Il serait alors bon de pouvoir réduire l'ouverture sans pour autant avoir l'effet néfaste de l'écoulement erratique.

5.2 HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE

Maintenant que l'on connaît mieux la routine de remplissage ainsi que la manière de calibrer une recette pour la machine, on peut établir des hypothèses afin d'améliorer la précision du système.

La routine de remplissage fait que l'on ferme toujours la porte lorsque l'on arrive à un pourcentage d'ouverture donné. On fait alors l'hypothèse que la précision se joue lors de la fermeture et sera d'autant plus importante que le débit au "MinFeeding" (ou % d'ouverture minimum) est constant. La consigne d'ouverture minimale pouvant varier selon les recettes, le matériau et la vitesse souhaitée, le système le plus optimisé sera celui dont le débit est le plus constant tout au long de la fermeture. On pourra alors mieux prévoir la quantité restée dans les airs. De ce fait, on peut émettre l'hypothèse que la précision de la balance dépend de la régularité de l'écoulement à toutes les ouvertures et plus particulièrement à petite ouverture.

Dans le cadre de ce travail, on va alors étudier le débit et la dispersion de l'écoulement selon l'ouverture de la porte du module GHS. L'approche retenue pour tenter d'améliorer la précision est de travailler sur la géométrie de la porte. On pourrait aussi choisir de travailler sur la routine de remplissage, mais ce n'est pas l'approche retenue.

On souhaite continuer à utiliser le logiciel EDEM dans cette étude. La première partie du projet nous a permis de le calibrer de façon efficace. Nous savons donc quels paramètres entrer dans nos simulations et que les écoulements libres sont bien prédits suite au travail sur la chute de transition. De plus, notre travail consistant à modifier la forme de la porte du module, nous éviterons ainsi la réalisation de prototypes inutiles, et nous pourrons nous permettre de tester différents types de géométries.

D'après notre hypothèse on doit alors faire un travail préliminaire sur les points suivants pour réaliser notre étude à l'aide d'EDEM :

- Trouver une manière efficace de définir le débit en temps réel.
- Vérifier qu'EDEM peut reproduire le caractère erratique d'un écoulement.
- Avoir une méthode de comparaison ainsi qu'une valeur de référence pour juger si un débit est plus constant qu'un autre ou non.

Suite à cela, on applique notre méthode de comparaison pour plusieurs géométries de portes. On identifie les plus prometteuses, on fabrique des prototypes et on les teste réellement en utilisant le protocole de test de l'entreprise pour la détermination de la précision.

5.3 TRAVAIL PRÉLIMINAIRE SUR EDEM

5.3.1 Obtention du débit en temps réel

Partant du fait que l'on importe la géométrie du module d'alimentation standard avec sa porte et que l'on peut dans nos simulations commander la porte en rotation, il est possible sur EDEM d'isoler un domaine précis à l'intérieur duquel on peut compter le nombre de particules en temps réel. On calcule alors le débit Q de la manière suivante, $Q = \frac{\Delta N}{\Delta t}$ avec :

- Q : le débit instantané (particules/s)
- ΔN : variation du nombre de particules dans le volume de contrôle (particule)
- Δt : le pas de temps (s)

Notre modèle de base sera alors un système comportant un bac de récupération. Ainsi, il sera possible de faire le bilan à chaque instant du nombre de particules qui entrent dans le bac et donc avoir notre débit instantané. Sur une simulation dont la durée reste à

définir, nous aurons alors le débit correspondant à l'ouverture choisie en faisant la moyenne des débits instantanés. La figure 32 ci-dessous présente un exemple d'écoulement type que nous avons fait dans ce travail :

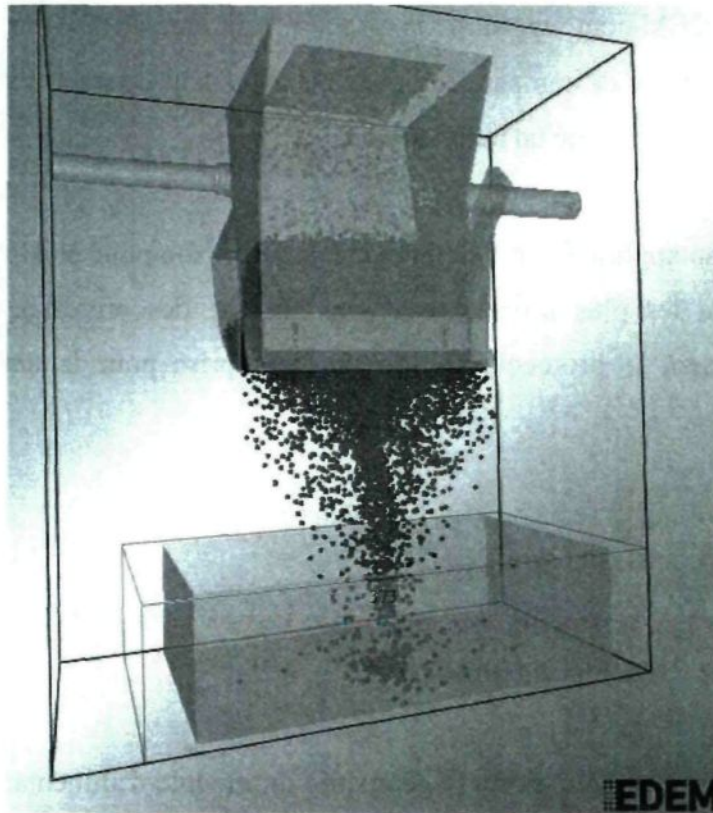


Figure 32 : Modèle de simulation utilisé avec bac de récupération

Avec le logiciel EDEM, il est possible d'isoler un domaine (ici encadré en bleu) où les particules sont comptées. Cela nous permet alors de faire efficacement le bilan à chaque pas de temps du nombre de particules et donc d'avoir un débit instantané Q .

5.3.2 Reproduction de l'écoulement erratique

Il faut vérifier que comme dans la réalité l'écoulement de particules comporte un caractère aléatoire. On va alors réaliser un simple test d'écoulement en simulant une porte

de géométrie droite. On simule l'écoulement de particules pour une ouverture fixe de 12mm, ce qui correspond à trois fois le diamètre donné aux sphères.

Le premier test visuel est déjà convaincant. Si l'on observe la figure 33, l'écoulement varie en fonction du temps. L'ouverture est constante, mais le débit le long de l'ouverture semble varier, les particules ne sortant pas en même nombre d'un côté que de l'autre. Quelques fois même l'écoulement s'arrête en certains points puis reprend.

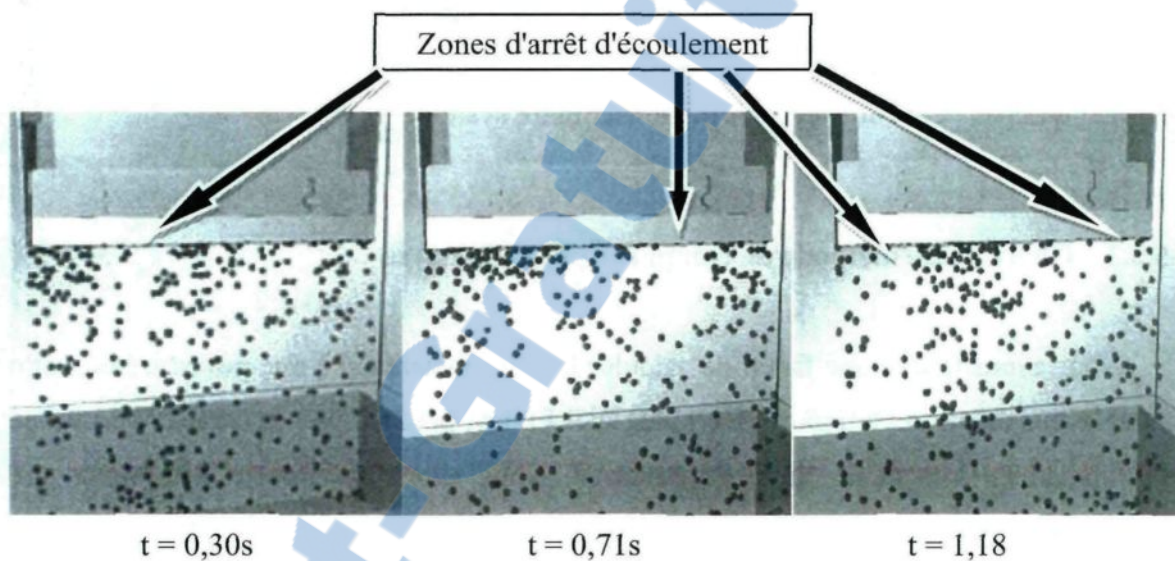


Figure 33 : Mise en évidence du caractère erratique de l'écoulement sur EDEM

Ensuite, un second test est fait afin de confirmer nos observations et de calculer le débit instantané à différents instants selon la formule choisie. Le tableau 12 suivant contient les différentes valeurs du débit instantané selon le temps de simulation.

Tableau 12 : Valeurs du débit instantané selon le temps

Temps (s)	0,30	0,52	0,71	1,02	1,18
Débit instantané (part/s)	1700	1200	1400	2400	1900

On peut constater que les valeurs du débit instantané peuvent varier du simple au double, ceci sans changer ni l'ouverture ou la taille des grains. On en conclut que le caractère erratique contenu dans l'écoulement de particules est bien reproduit par le logiciel EDEM et que l'on peut l'utiliser pour modéliser notre système.

5.3.3 Choix d'une méthode de comparaison et d'analyse

Nous avons trouvé une façon de calculer le débit instantané à une ouverture de porte donnée. Nous avons aussi montré que le logiciel EDEM peut simuler le caractère erratique d'un écoulement lors de la chute de matériau. Nous allons maintenant déterminer une méthode nous permettant de comparer les différentes portes avec efficacité.

Selon notre hypothèse, la précision de la balance dépend de la régularité de l'écoulement en sortie du module GHS. La porte est alors fixée à une ouverture donnée pour en étudier le débit. Pour caractériser sa variation, on introduit une nouvelle valeur mesurant la dispersion que l'on exprime en pourcentage et qui est obtenu selon la formule suivante :

$$\%dispersion = 100 \times \frac{Ecart - type(Q)}{\overline{Q}} \quad \text{avec :}$$

- Écart-type(Q) : l'écart-type des débits instantanés sur une simulation
- \overline{Q} : la moyenne des débits instantanés

Des simulations seront faites à différentes ouvertures de porte afin d'obtenir différents pourcentages de dispersion et extrapoler la dispersion tout au long de l'ouverture de la porte. Ensuite le but sera de comparer les dispersions pour différentes géométries de porte. On va alors tracer pour chaque géométrie de porte, la courbe de dispersion selon l'évolution du débit moyen. On ne peut pas comparer les portes selon le pourcentage d'ouverture, car d'une porte à l'autre le débit sera différent selon l'ouverture.

Cependant, afin de comparer nos valeurs dans les mêmes conditions il est nécessaire de fixer d'autres valeurs qui ont une influence sur le pourcentage de dispersion que nous cherchons à déterminer.

Temps de simulation :

On fait nos mesures de débit et de dispersion sur des simulations dont la durée est d'une seconde. Ce choix a été effectué, car dans une routine de pesage, on ne reste jamais plus d'une seconde à une ouverture fixe et si un régime régulier doit s'installer, il ne sera en réalité pas exploité.

Choix du pas de temps (Δt) :

Il faut choisir notre pas de temps Δt qui détermine combien de valeurs sont extraites de notre simulation d'une seconde. Le choix du pas de temps a une influence sur l'écart type, le débit moyen et aussi la mesure de la dispersion. Nous vérifions alors par des graphes contenus dans les figures 34 et 35, les valeurs du débit et de la dispersion que l'on obtient selon les différents pas de temps employés. On retrouve aussi les valeurs dans le tableau 13.

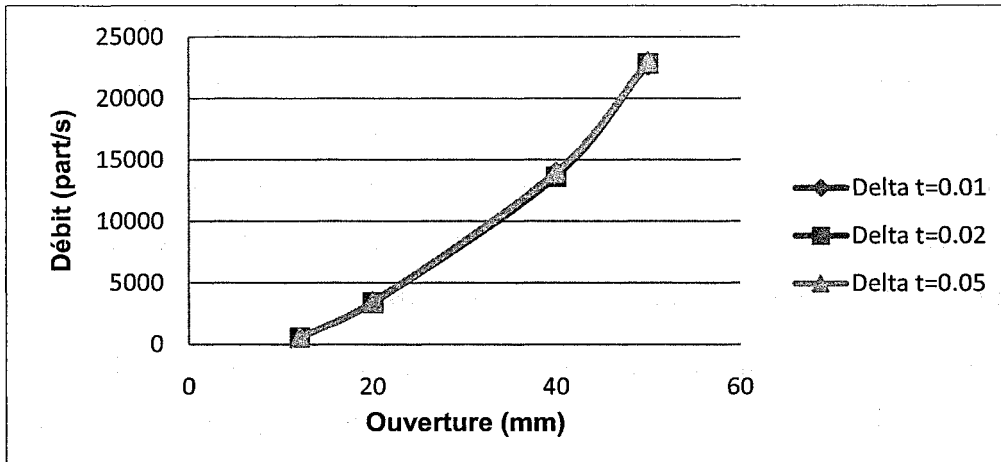


Figure 34 : Évolution du débit selon l'ouverture pour différents pas de temps

Tableau 13 : Valeurs du débit selon l'ouverture pour différents pas de temps

Ouverture (%)		12	20	40	50
Delta t=0,01	Débit (part/s)	596	3427	14019	22717
Delta t=0,02		559	3383	13611	22848
Delta t=0,05		595	3473	13998	22994

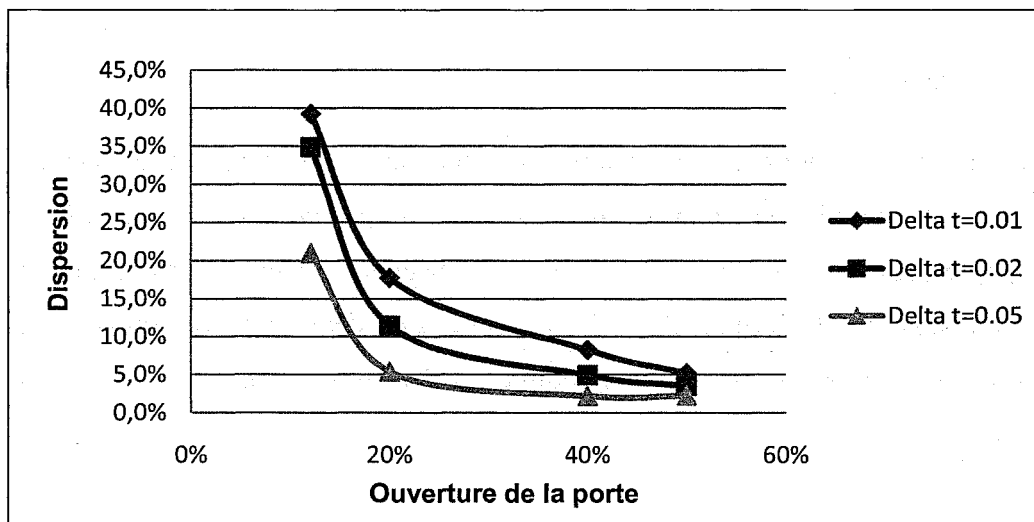


Figure 35 : Évolution de la dispersion selon l'ouverture et pour différents pas de temps

Au niveau du débit, peu importe le pas choisi, les résultats restent sensiblement les mêmes. Il ne constitue pas un critère de choix pour le pas de temps.

Au niveau de la dispersion, un pas de temps plus élevé permet une sorte de lissage des données et fait baisser la dispersion globale. En conséquence pour de grandes ouvertures de porte la pente de la courbe obtenue est d'autant plus faible que le pas de temps est élevé. On choisit alors un $\Delta t = 0,01s$, car on souhaite obtenir le plus d'informations possible sur la variation du débit autant à petites qu'à grandes ouvertures. Les comparaisons de pentes seront alors plus aisées à grandes ouvertures si nous faisons le choix d'un pas de temps faible.

Vérification de la répétabilité des résultats :

On cherche à étudier le caractère erratique d'un résultat. Par conséquent, dans les mêmes conditions, les résultats sont susceptibles de changer. On vérifie alors à quelle hauteur cette dispersion des résultats se fait ressentir dans des simulations répétées où les paramètres de simulation sont exactement les mêmes. Le tableau 14 présente le résultat d'une série de cinq essais réalisés à différentes ouvertures.

Tableau 14 : Essais de répétabilité du modèle à différentes ouvertures

Répétition		1	2	3	4	5
Ouverture 15%	Débit moyen (part/s)	596	586	637	666	594
	Écart type (part)	250	238	256	275	264
	Dispersion (%)	41,9%	40,6%	40,2%	41,3%	44,4%
Ouverture 25%	Débit moyen (part/s)	3427	3348	3353	3454	3377
	Écart type (part)	608	571	507	517	494
	Dispersion (%)	17,7%	17,1%	15,1%	15,0%	14,6%
Ouverture 50%	Débit moyen (part/s)	14019	13816	13809	13764	13756
	Écart type (part)	1154	1155	970	996	1155
	Dispersion (%)	8,2%	8,4%	7,0%	7,2%	8,4%

Le caractère erratique de la décharge fait donc que la dispersion peut varier d'une simulation à l'autre même si les paramètres de simulation sont les mêmes. On a donc intérêt à répéter les simulations pour obtenir des résultats plus précis. Pour tenir compte du côté variable ou erratique de l'écoulement, on a choisi de faire trois simulations identiques par ouverture de porte. Cela représente un bon compromis, permettant de moyennner suffisamment les résultats sans faire un nombre élevé de simulations identiques.

Protocole de simulation final :

Après avoir fait toutes les vérifications nécessaires et fixé les paramètres de simulation, on a établi le protocole qui permet de comparer les différentes géométries de porte. Le but est de comparer les courbes montrant l'évolution de la dispersion en fonction du débit moyen de particules sortant de la porte pour chaque géométrie choisie.

Pour cela on utilise les paramètres de simulation suivants :

- Durée de simulation : 1s
- Particules de maïs simulées avec les paramètres matériaux préalablement déterminés (voir chapitre 3)
- Géométrie standard importée d'après les plans utilisés par l'entreprise. Pour les essais d'optimisation, on réutilise la même base en ne modifiant que la géométrie de la porte.
- Pas de temps pour la simulation : 0,01s.

On extrait ensuite la dispersion et le débit moyen pour une ouverture de porte fixe.

- Chaque simulation est répétée trois fois et on importe dans un tableau Excel pour chaque simulation le nombre de particules collectées dans le bac à chaque pas de temps pour calculer le débit instantané.
- On calcule le débit instantané à chaque pas de temps selon la formule $Q = \frac{\Delta N}{\Delta t}$
- On fait la moyenne des débits et on extrait les écart-types de chaque simulation.
- On calcule le débit moyen global et l'écart-type global par les formules suivantes

$$\bar{Q}_{global} = \frac{\bar{Q}_{simu1} + \bar{Q}_{simu2} + \bar{Q}_{simu3}}{3} \quad \text{et} \quad \sigma_{global} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 n_i ((\bar{Q}_{global} - \bar{Q}_{simui})^2 + \sigma_i^2)}{n_1 + n_2 + n_3}}^2 \quad n_i \text{ est le}$$

nombre de valeurs dans une simulation soit 100.

- On peut alors calculer la dispersion pour une ouverture $\%dispersion = \frac{\sigma_{global}}{\bar{Q}_{global}} \times 100$

Pour obtenir une courbe de dispersion en fonction du débit on répète les expériences pour des ouvertures de porte différentes. Chaque courbe est tracée à partir d'environ 8 valeurs de dispersion et de débit.

Évaluation des erreurs expérimentales :

Avant de tracer notre courbe de dispersion, nous allons nous pencher sur l'analyse des erreurs que l'on peut tirer de notre méthode d'analyse. L'utilisation du logiciel a l'avantage d'éliminer les erreurs que l'on peut qualifier de manipulation, par exemple le comptage des particules et donc l'écart type se révélera toujours exact.

² Tiré de Probabilités, statistiques et techniques de régression, Baillargeon Gérald, 1989, les éditions SMG.

Cependant, d'autres paramètres, tels que le caractère erratique de l'écoulement ou la répétabilité du modèle, ont montré que les résultats obtenus comportent une part aléatoire qu'à ce niveau d'étude nous ne sommes pas capables d'expliquer. Afin d'atténuer ce phénomène, nous avons fait le choix de répéter trois fois la même simulation et d'en faire la moyenne.

Même si nous ne pouvons pas annoncer un intervalle d'erreur sur les résultats, le but est d'y être sensibilisé et d'en tenir compte dans nos analyses futures. Il semble néanmoins difficile, au niveau de la dispersion, de garantir des résultats à $\pm 0,5\%$.

Comme lors de l'optimisation de la chute de transition, nous allons tracer la courbe de dispersion en utilisant des splines cubiques car nous ne connaissons pas l'allure de la courbe finale et que nous voulons passer par nos points obtenus. En effet ces points sont les seules valeurs que nous obtenons par simulation et dont on peut vérifier le résultat. On obtient alors pour la porte standard une courbe dont l'allure est présentée sur la figure 36.

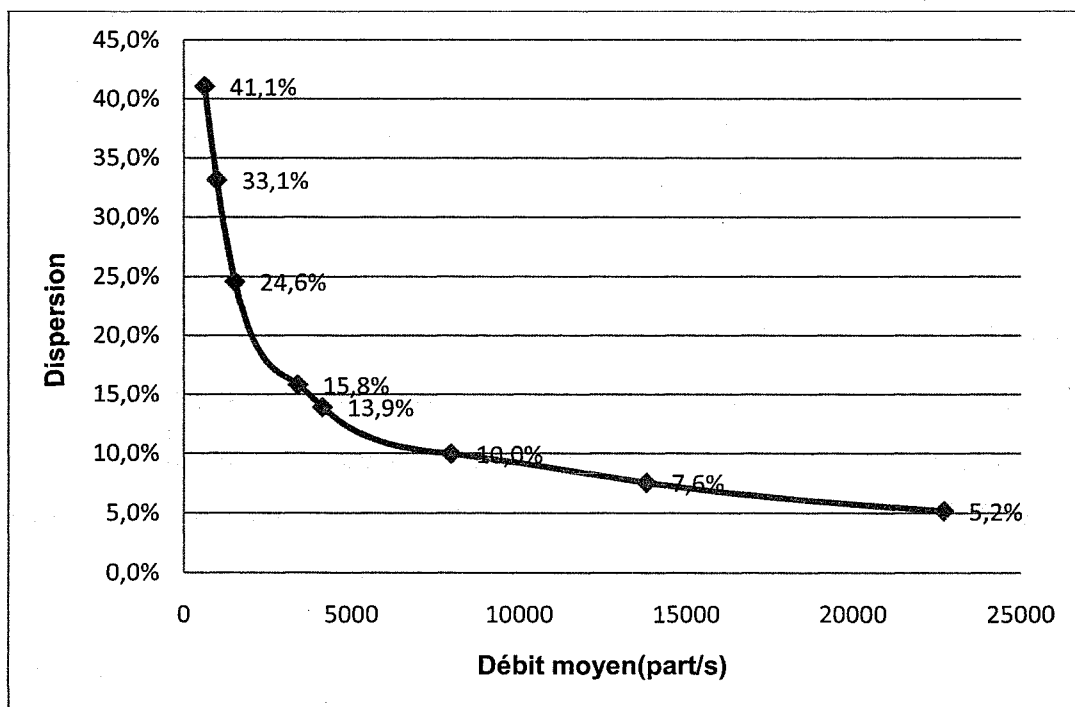


Figure 36 : Évolution de la dispersion selon le débit moyen (porte standard)

On peut constater que l'évolution se fait progressivement pour la porte standard. De plus, on peut déjà analyser cette courbe et la recouper avec le choix de l'ouverture minimale. Dans le système réel, l'ouverture minimale évaluée à partir de l'examen visuel de l'écoulement est de 20%. En faisant des essais de simulation, on trouve que cette ouverture correspond à une dispersion de 15,8%. D'après cette observation, on établit qu'un écoulement n'est pas assez régulier pour assurer une bonne précision si la dispersion dépasse 15%.

5.4 RÉSULTATS DES SIMULATIONS POUR DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DE PORTES

Dans cette section, on présente les résultats des simulations pour les différentes géométries de porte étudiées. On débute par les résultats pour des modifications mineures de la géométrie de la porte actuellement employée. Ensuite, on expose des résultats pour des modifications plus importantes qui demanderaient des changements plus importants et coûteux. Cependant une simple modification de la porte, chose très rapidement réalisable, qui entraîne une amélioration même faible est intéressante pour l'entreprise.

5.4.1 Les systèmes à une porte

La porte standard est simplement une tôle cintrée selon un certain rayon dans laquelle un découpage en pointe a été appliqué pour mieux contrôler l'écoulement. La figure 37 montre la géométrie de la porte ainsi que la forme du découpage. Les dimensions ne sont pas indiquées par souci de confidentialité.

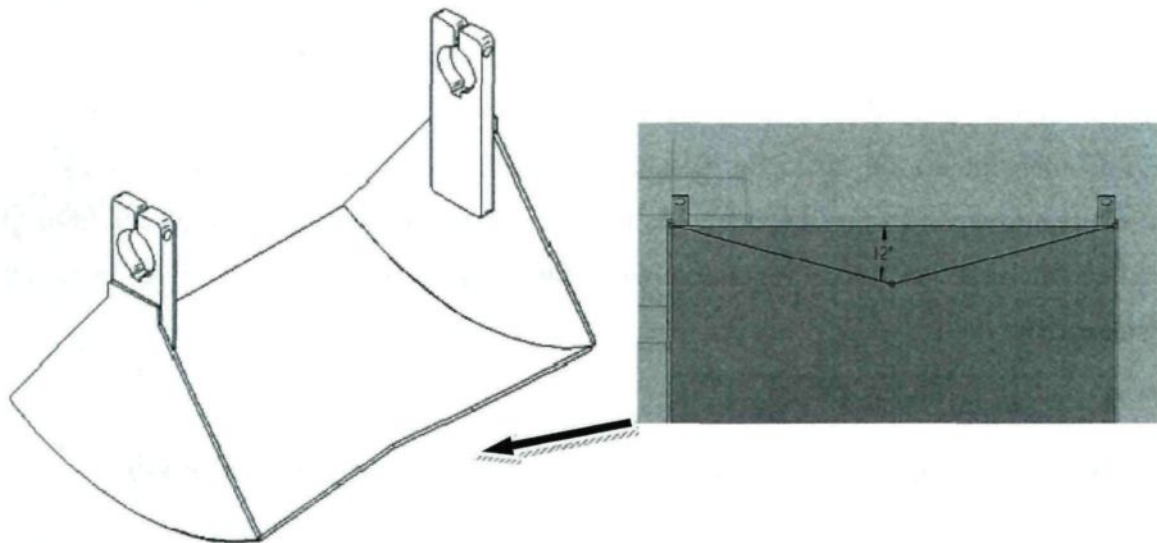


Figure 37 : Porte standard : vue d'ensemble et forme du découpage

Dans cette sous-section, nous étudions les systèmes dits à une porte. La géométrie de base de la porte standard n'a pas été changée. Différentes formes de découpage ont été expérimentées. Ces formes permettent d'avoir plus ou moins de contrôle sur l'écoulement. Les géométries suivantes sont étudiées :

- Porte droite sans découpe.
- Porte à encoche dans laquelle on vient découper une pointe. On espère ainsi avoir plus de précision dans les débits faibles. Le découpage est illustré sur la figure 38.

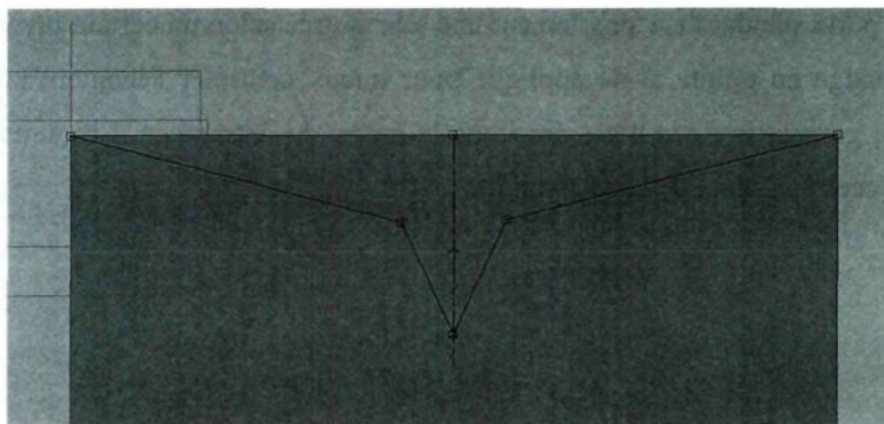


Figure 38 : Découpage de la porte avec encoche

- Porte courbe en forme d'ellipse inverse. On veut pouvoir contrôler les débits faibles par une ouverture quasi circulaire mais aussi éviter les variations brusques de géométrie. Le découpage est indiqué dans la figure 39.

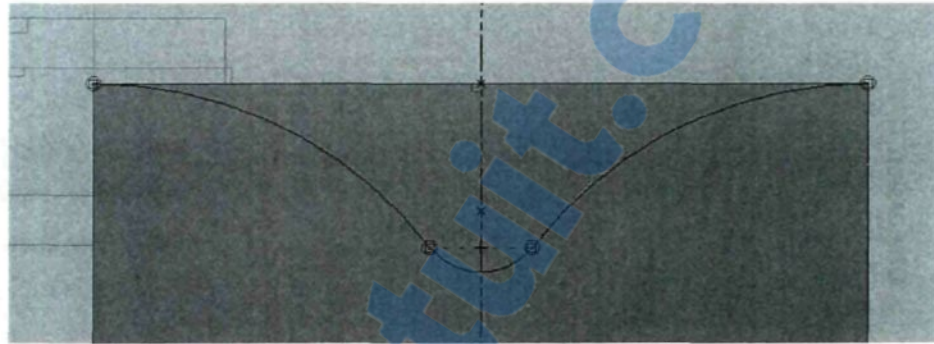


Figure 39 : Découpage de la porte courbe

- Ajout de murs déflecteurs dans le silo juste au dessus de la porte. Le but de ces murs est d'orienter les particules vers l'ouverture et donc de diminuer les zones mortes. Selon leur efficacité, on les combine avec les géométries précédentes. Leur montage à l'intérieur du système est indiqué sur la figure 40.

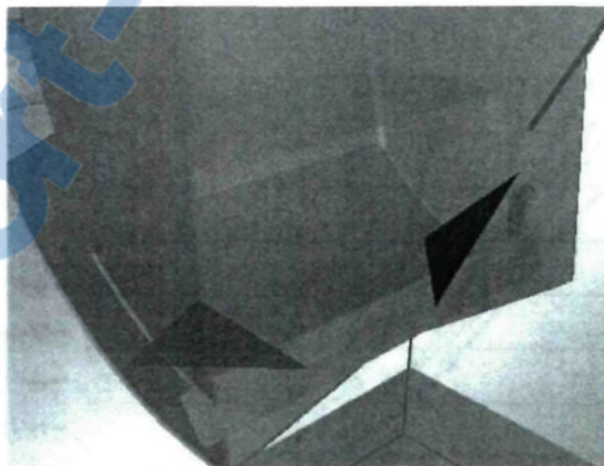


Figure 40 : Montage des murs déflecteurs

Pour chaque géométrie proposée, on va tracer les courbes représentant la dispersion du débit instantané en fonction du débit moyen et les superposer à la courbe de la porte standard qui a été réalisée. On pourra ainsi choisir la meilleure des géométries possibles.

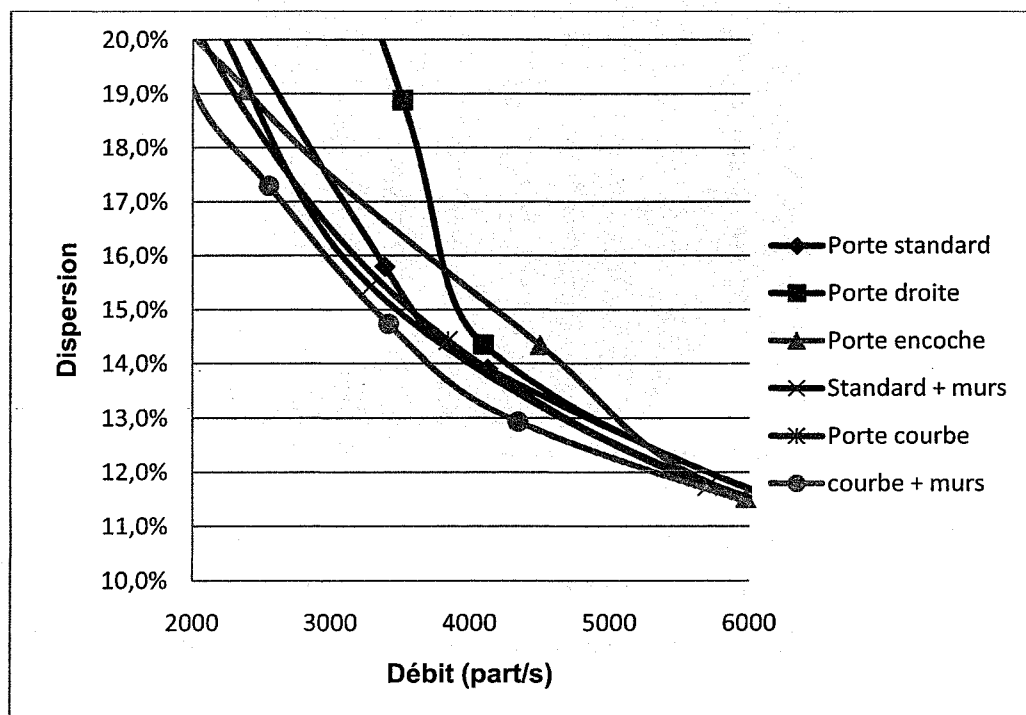
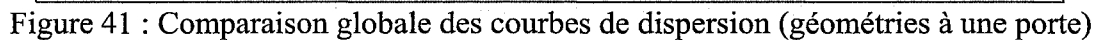


Figure 42 : Comparaison autour d'une dispersion de 15% (géométries à une porte)

Si on compare de manière globale, soit sur toute la gamme de débits que fournit le module GHS, les courbes de dispersion ne donnent pas de différence notable. Les courbes ont tendance à être proches les unes des autres. Les plus gros écarts observés se situent autour d'un débit moyen de 4000part/s. Pour ce débit moyen, toutes les courbes ont tendance à changer de comportement, les dispersions augmentant en général de manière plus importante autour d'une dispersion de 15%. La figure 43 présente, pour une région centrée sur une dispersion de 15%, le comportement des différentes portes. Rappelons qu'à partir d'une dispersion de 15%, l'écoulement est jugé trop inconstant pour pouvoir conduire à des systèmes précis.

On se rend compte comme prévu que la porte droite est bien moins performante dans des débits faibles. À un débit de 3500 particules/s, la dispersion est plus importante pour cette porte que pour toutes les autres. Plus surprenant par contre, la porte avec encoche présente une performance plutôt limitée. On suppose alors qu'une ouverture variant brusquement de géométrie ne permet pas de contrôler avec précision l'apport de matière.

En ce qui concerne l'emploi de murs pour orienter le flux, ils améliorent légèrement les performances pour les portes courbe et standard. Il faut toutefois modérer nos propos, dans la section 5.3.3, nous avons insisté sur l'existence d'erreurs sur nos résultats de simulation. Dans notre cas où les courbes sont très rapprochées, il est difficile de porter un jugement précis sur les courbes de dispersion.

Les simulations réalisées indiquent enfin que le système à une porte le plus intéressant est celui à une porte courbe avec des murs.

Influence de l'angle de découpage :

En plus de ces résultats qui ne représentent que des géométries choisies au hasard, on décide de vérifier l'influence d'un paramètre sur le caractère erratique de l'écoulement. Ainsi, on pourra faire une optimisation de manière efficace en s'aidant de ce paramètre.

On va donc étudier l'influence de l'angle de découpage de la pointe sur la porte. À l'aide des simulations, on va chercher s'il existe un angle optimal pour cette géométrie. La figure 43 montre l'angle concerné par cette optimisation.

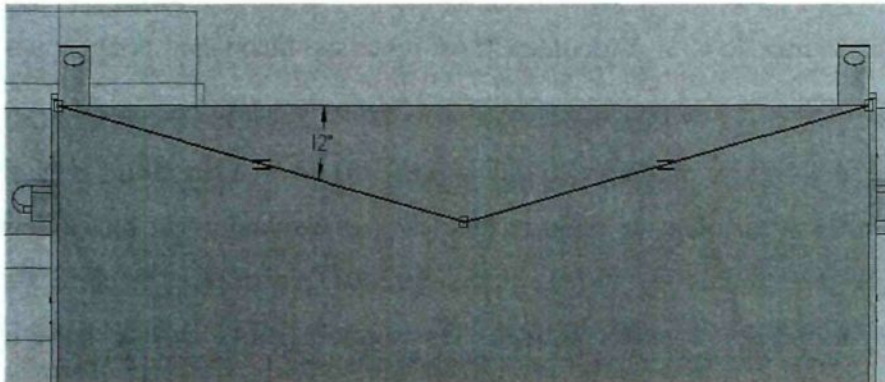


Figure 43 : Découpage de la pointe selon un angle donné (ici 12°)

On va comparer le débit de chaque géométrie à 15% de dispersion. On établit, par des tests sur le banc d'essai de l'entreprise, que la limite de l'écoulement erratique apparaît pour cette valeur. On rappelle que l'on veut obtenir une dispersion inférieure à 15% pour un débit le plus faible possible.

Pour avoir la valeur du débit à 15% de dispersion, on fait deux simulations par angle de pointe autour d'une dispersion de 15% (on s'aidera des résultats de la porte standard pour ne pas être trop éloigné). Puis on fait une approximation linéaire entre les deux points trouvés pour avoir une approximation du débit ayant une dispersion de 15%. On obtient la figure 44 suivante.

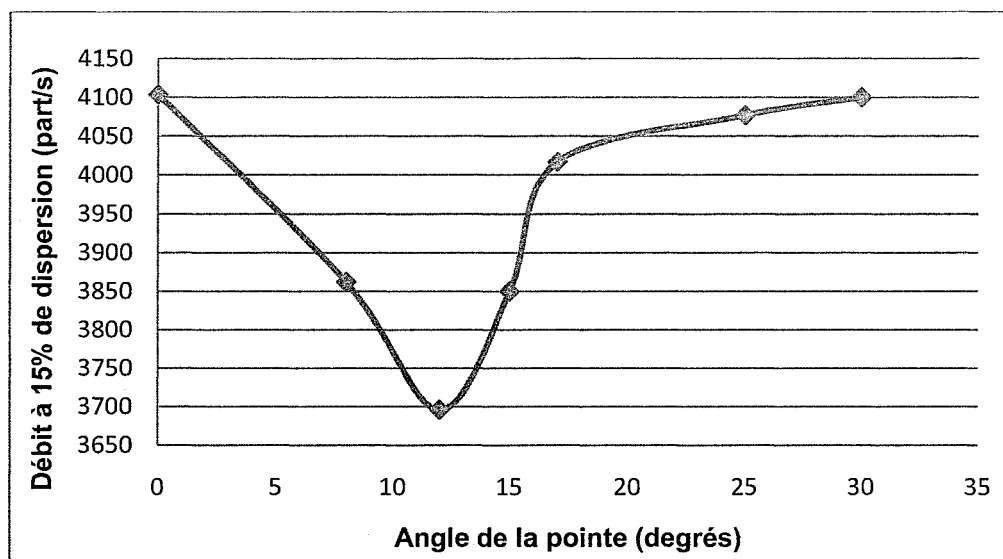


Figure 44 : Influence de l'angle de la pointe

Il existe bien une valeur optimale, mais elle est égale à l'angle de la porte standard. Cependant, cela vérifie bien ce que l'on a observé avec la porte avec encoche, c'est-à-dire qu'un angle trop important ne permet pas d'avoir un débit faible très régulier.

5.4.2 Autres systèmes (diaphragme et double porte)

Nous allons maintenant comparer notre meilleur système classique à une porte (la porte courbe avec murs) avec d'autres systèmes théoriques. Les systèmes à une porte représentent une amélioration simple et intéressante même si les gains sont faibles. Par contre, un tout nouveau système doit être beaucoup plus performant que le système actuel pour être intéressant.

Le système actuellement employé par l'entreprise est de géométrie et de mise en œuvre simple, car il suffit d'actionner en rotation la porte qui est directement reliée au moteur pour laisser la matière s'écouler. Le plus gros désavantage de ce système est que le flux de matière n'est pas dirigé directement vers le bas. La conception fait que la matière doit se diriger vers le côté du système, favorisant alors la formation de zones mortes d'écoulement. On fait alors l'hypothèse dans nos systèmes optimisés que l'écoulement se

fera avec plus de précision si la matière tombe directement vers le bas comme dans un silo. Les géométries théoriques seront donc les suivantes :

- Le système à diaphragme plat a une ouverture circulaire dont on peut faire varier le diamètre. On suppose qu'un système à diaphragme est réalisable. Pour nos simulations nous appliquons simplement un trou de diamètre progressivement plus important. La figure 46 montre le système utilisé pour nos simulations.
- Le système à diaphragme conique est basé sur la même idée que le diaphragme plat, mais il est alimenté par un silo de forme conique afin d'éliminer les zones mortes dans l'écoulement. À noter que le système est théorique. On suppose qu'un tel système possédant un diaphragme et des murs à géométrie variable est réalisable. Le système utilisé dans nos modélisations est illustré sur la figure 45.

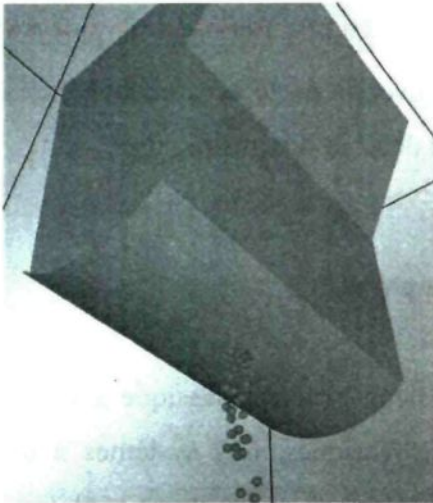


Figure 46 : Diaphragme plat

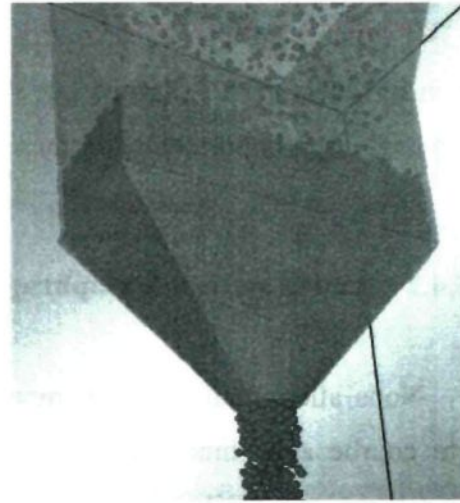


Figure 45 : Diaphragme conique

- Le système à double porte en forme de pointe est constitué de deux portes identiques s'ouvrant de part et d'autre de la bouche du module d'alimentation. Le système à double porte se rapproche d'un système à diaphragme. Les portes sont découpées en forme de pointe. La figure 47 montre la forme des portes ainsi qu'une modélisation du système en fonctionnement.

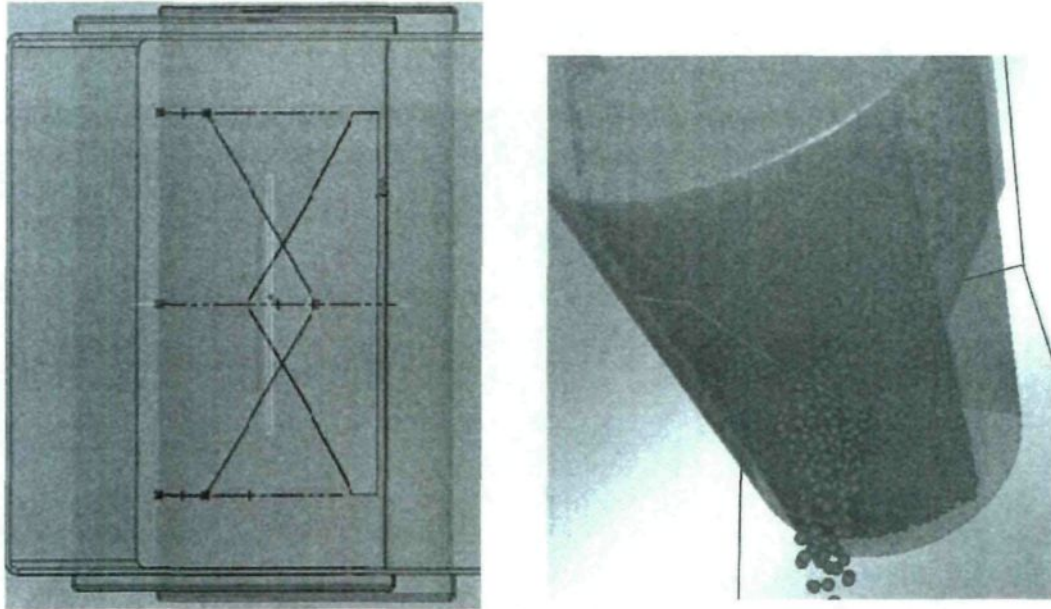


Figure 47 : Double porte pointe

- Le système à double porte courbe est basé sur le même principe que le précédent, seul le découpage des portes est différent. La forme courbe, comme on a vu pour le système à une porte permet de ne pas faire de changement brusque de géométrie et donne de meilleurs résultats. De plus avec la double porte courbe, on se rapproche encore plus du système à diaphragme. La figure 48 montre le détail du système et une illustration en fonctionnement.

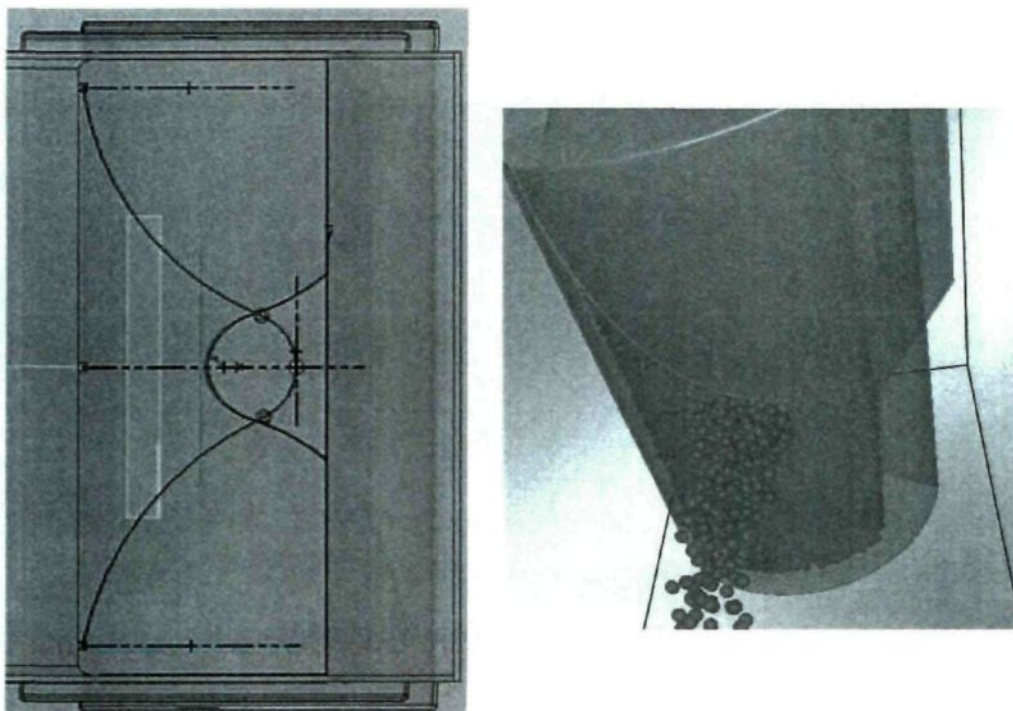


Figure 48 : Double porte courbe

Les figures 49 et 50 comparent les courbes de dispersion pour les systèmes à diaphragme et les systèmes à double porte avec celles du système à une porte courbe avec mûrs, qui est notre géométrie la plus performante pour le système à une porte.

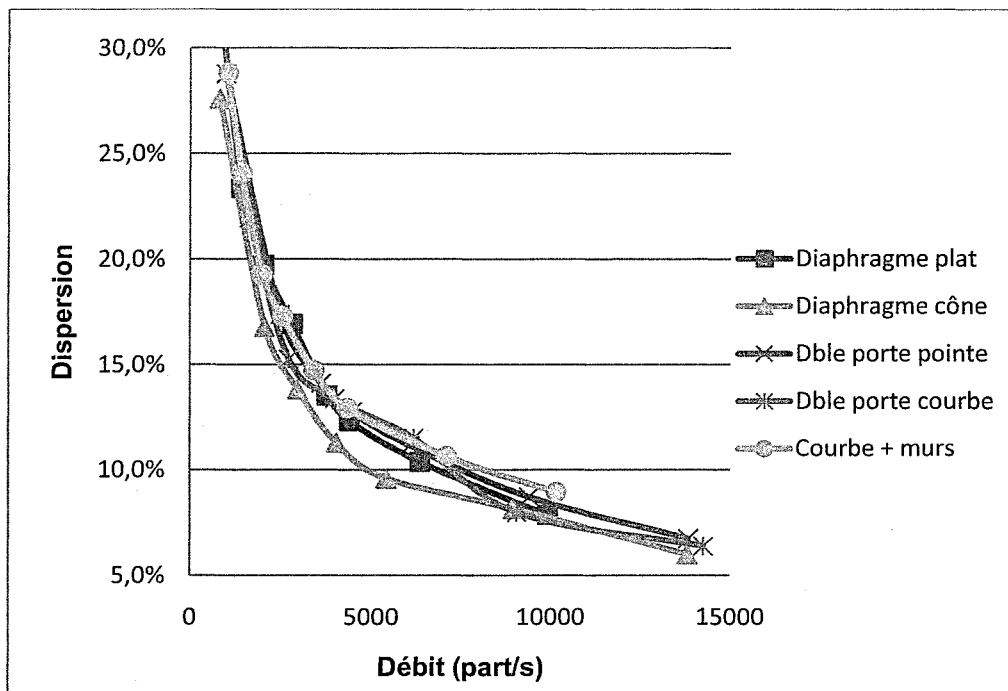


Figure 49 : Comparaison globale des courbes de dispersion des systèmes théoriques

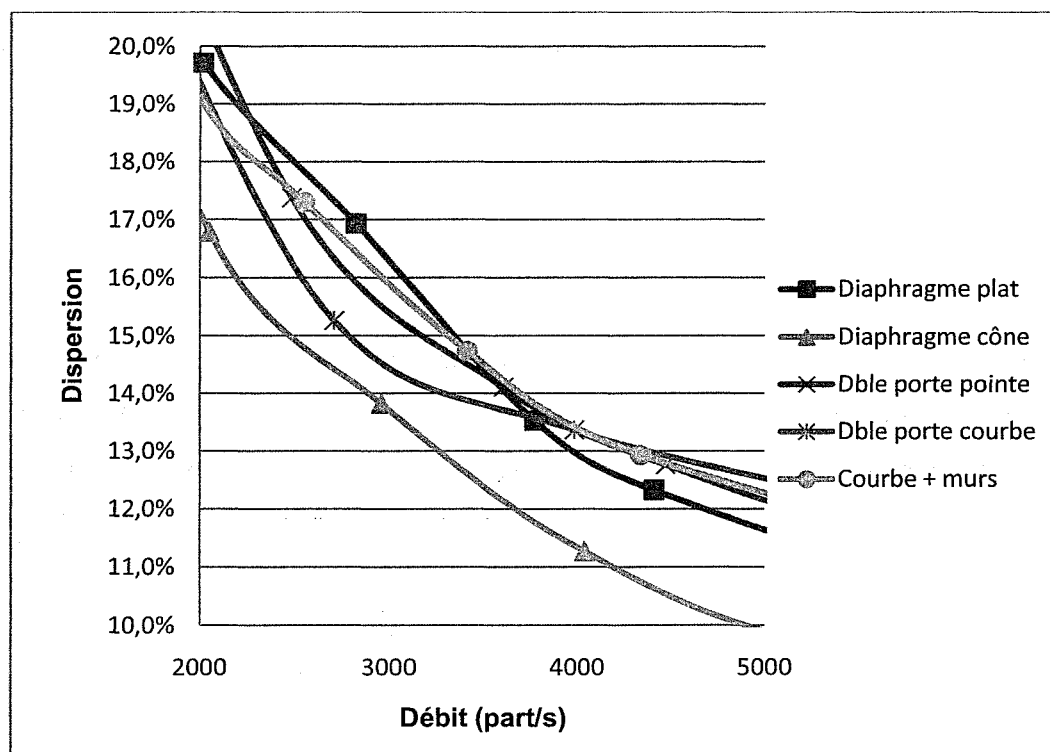


Figure 50 : Comparaison autour de 15% de dispersion des systèmes théoriques

Des deux figures précédentes, on voit clairement que le diaphragme avec cône se démarque. Cependant, cela ne peut que rester théorique à moins de développer un système d'ouverture à diaphragme et parois variables. Par contre, on constate qu'un diaphragme simplement appliqué sous le bac plat standard n'est pas beaucoup plus efficace que la porte courbe avec murs. Ceci est sûrement dû à la présence de zones mortes dans les coins du système.

Pour ce qui est des systèmes à deux portes, la géométrie de la porte en elle-même a l'air d'avoir plus d'influence que sur le système à une porte. La double porte avec une géométrie en pointe ne se démarque pas du système à une porte. Cependant, on a un bon résultat avec la double porte courbe. La géométrie a été réalisée pour avoir une porte qui s'ouvre un peu comme un diaphragme ce qui peut contribuer à l'amélioration.

On retiendra donc que la double porte qui a un découpage courbe conduit à des résultats intéressants aussi bien à faible qu'à fort débit. Cette dernière courbe rejoint pratiquement la courbe de dispersion du diaphragme cône à hauts débits. On pourra donc envisager par la suite le développement d'un prototype, car l'amélioration peut être vraiment significative.

5.5 ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats obtenus grâce à notre méthode de simulation sont intéressants et représentent des perspectives d'amélioration pour certaines géométries. Dans le but de vérifier notre méthode et de constater les progrès réels obtenus, nous allons réaliser 3 prototypes :

- Des murs déflecteurs. Simple de mise en œuvre leur effet est intéressant à vérifier
- Une porte simple à géométrie en courbe qui donne les meilleurs résultats pour les portes simples
- Un nouveau système à deux portes susceptible d'apporter une nette amélioration de la précision

5.5.1 Protocole d'essai

Les tests effectués seront ceux que l'entreprise réalise une fois leurs machines terminées et qui fournissent ensuite à leurs clients, soit le test de la précision de pesage. Il est caractérisé par le 2σ soit deux fois l'écart type d'une répétition de 30 pesées dans les mêmes configurations. Cela signifie alors que statistiquement 95% des pesées seront situées dans un intervalle $[X_{cible} - 2\sigma; X_{cible} + 2\sigma]$

De plus, on fera ces tests pour trois types de matériaux :

- Maïs : matériau standard utilisé dans les simulations
- Granules de bois : matériau "difficile" (les granules sont des cylindres de bois de diamètre 3mm et entre 10 et 20mm d'épaisseur. Cette forme et leur encombrement important fait que l'écoulement est difficilement constant et prévisible)
- Billes de plastiques : matériau "facile" (particules sphériques d'environ 2mm de diamètre)

Chaque test a été fait pour cinq cadences différentes pour représenter les gammes de pesage que propose la compagnie. On simule les différentes cadences en faisant en sorte que l'on ait 4,5kg de produit à décharger en phase de drebble (fermeture progressive de la porte) car c'est ici que la forme de la porte a une influence. Les cadences choisies sont les suivantes :

- Décharge de 4,5kg en 2,5s donnant une cadence de 18sacs/min.
- Décharge de 4,5kg en 2s donnant une cadence de 20sacs/min.
- Décharge de 4,5kg en 1,5s donnant une cadence de 22sacs/min.
- Décharge de 4,5kg en 1s donnant une cadence de 25sacs/min.
- Décharge de 4,5kg en 0,75s donnant une cadence de 30sacs/min.

Il peut exister plusieurs recettes donnant cette cadence selon les réglages employés. Cependant, on s'efforce de choisir la recette la plus précise selon le protocole utilisé par l'entreprise. D'après l'expérience, la recette la plus précise aura le MinFeeding (ou pourcentage d'ouverture minimum) le plus faible. On peut vérifier que cette règle empirique est bien vérifiée. De plus, lors de l'utilisation, c'est l'opérateur qui calibrera la recette et qui utilisera toujours cette technique. On considère alors que pour notre analyse les meilleures recettes possibles sont utilisées car nous faisons le souhait de rester dans des conditions réelles.

Bien entendu cela va nous amener à remettre en question nos résultats par la suite lors de l'analyse. Étant donné que les temps sont faibles et les recettes assez sensibles, une erreur au niveau du choix de la recette n'est pas impossible.

5.5.2 Résultats

Sous forme d'histogramme, ce qui est plus usuel pour la visualisation, les figures 51, 52 et 53 présentent les résultats obtenus avec nos prototypes en suivant le protocole d'essais précédent. On mesure la dispersion des pesées soit le 2σ ce qui fait qu'au plus la valeur mesurée est faible, meilleure sera la précision globale de l'ensemble. Pour des raisons de confidentialité, l'échelle a été supprimée et les résultats seront simplement comparés à la valeur standard.

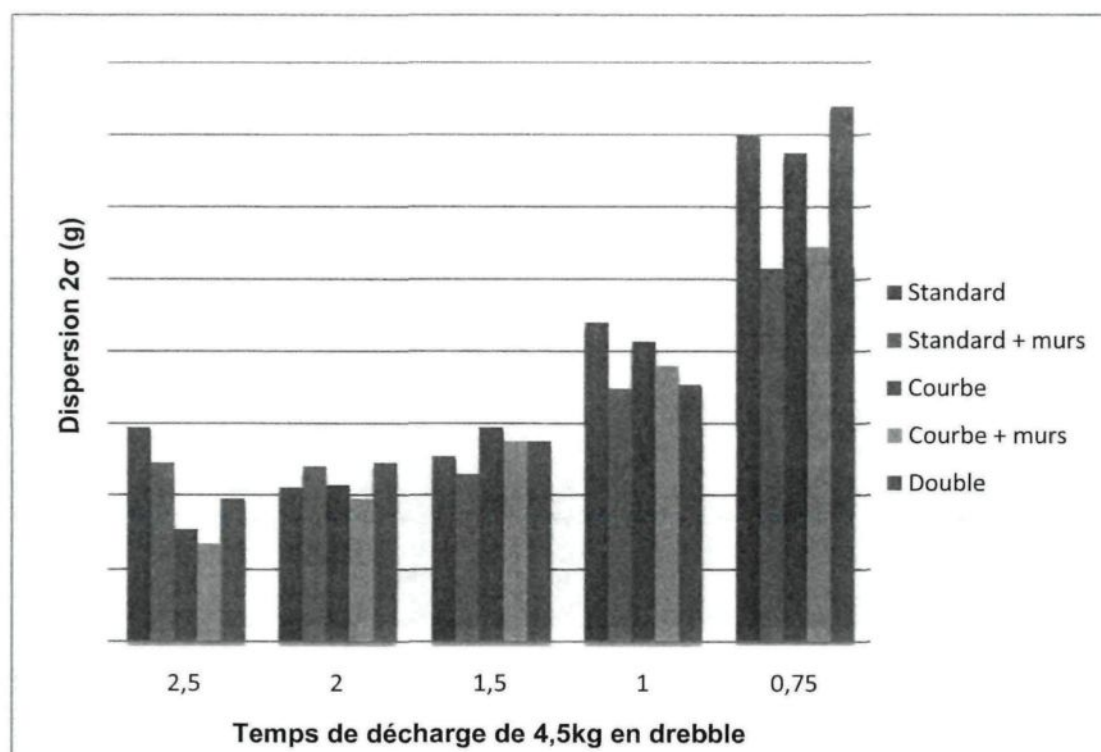


Figure 51: Mesure des dispersions des prototypes avec du maïs

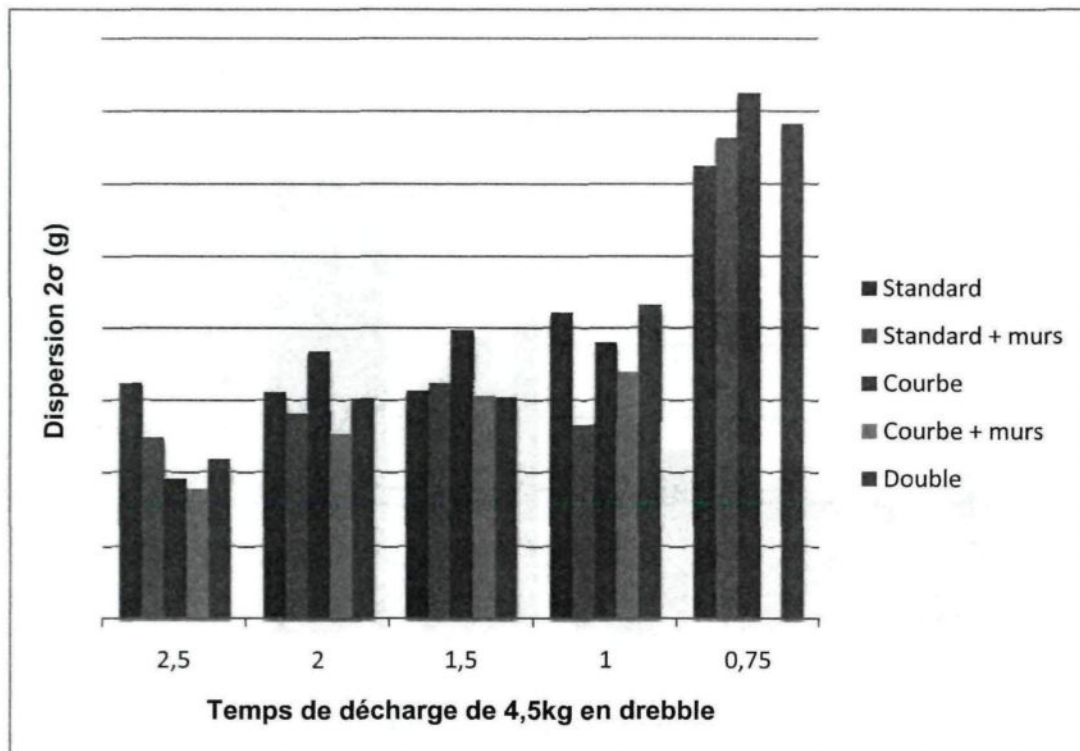


Figure 52 : Tests de précision des prototypes avec des granules de bois

Il manque une valeur pour la porte courbe avec murs déchargeant 4,5kg de granules de bois en 0,75s. Pour ce système on ne peut pas obtenir un temps de décharge aussi court et assez stable.

Les granules de bois étant moins denses les portes doivent être ouvertes presque à leur maximum pour obtenir la masse souhaitée si vite. De plus la routine de fermeture étant progressive et partant d'une ouverture presque maximale, en 0,75s la fermeture se fera toujours pour une ouverture de porte relativement grande. Il est alors très difficile d'obtenir le temps et la masse voulus d'où l'absence de valeur.

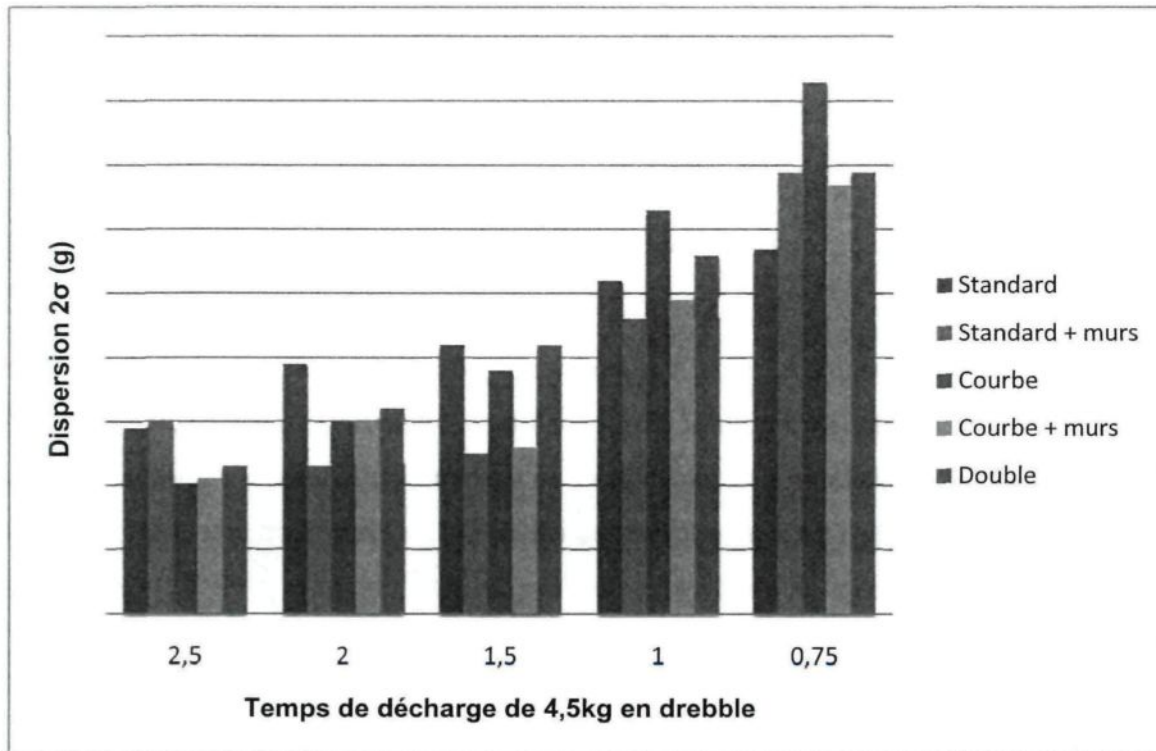


Figure 53 : Tests de précision des prototypes avec des billes de plastique

5.6 DISCUSSION

5.6.1 Analyse des performances

D'une part pour des soucis de confidentialité les résultats ne seront pas donnés sous forme de tableau avec les valeurs numériques de la dispersion des résultats 2σ en grammes. On visualise la tendance des résultats par rapport à la porte standard sur les figures 49, 50 et 51 de la section précédente et ainsi, On constate que les dispersions n'augmentent pas toujours lorsque le temps diminue. On s'attendrait à observer une augmentation progressive compte tenu de nos hypothèses, ce qui n'est pas le cas dans la figure 50 par exemple pour une porte standard avec murs. La dispersion augmente légèrement avant de rebaisser lors d'un remplissage en 1s.

Nous avons tout d'abord pensé à des erreurs de données ou de recettes, ce qui n'est pas impossible. Cependant il se pourrait aussi que selon la géométrie et le matériau il existe des cadences plus adaptées à fournir une précision de pesage plus élevée. En effet selon le matériau utilisé ce ne sont pas les mêmes géométries qui présentent une évolution de la dispersion linéaire. Les conclusions sont donc dures à donner au niveau du phénomène physique.

D'autre part, on souhaite pouvoir quantifier rapidement la performance d'une porte par rapport à la porte standard et donc faire ressortir si la nouvelle géométrie apporte des améliorations significatives ou non par rapport au système actuellement employé. C'est en effet le but recherché par l'entreprise en premier lieu. On va alors comparer à la dispersion 2σ standard, qui servira de référence, les dispersions obtenues lors des essais des différentes géométries. On utilise alors la formule suivante :

$$\%amélioration = \frac{(\sigma_{standard} - \sigma_{étudié})}{\sigma_{standard}}$$

On aura alors un pourcentage positif en cas d'amélioration et négatif si les résultats de pesée sont moins précis.

L'entreprise nous a donné une échelle d'importance aux améliorations de dispersion. Si on l'adapte aux pourcentages d'amélioration, on peut donner les catégories suivantes :

- Gain de plus de 80% = révolution.
- Entre 50% et 80% le gain est très appréciable et l'entreprise va sûrement adapter la solution à ses machines.
- Entre 30% et 50% le gain est significatif et la solution représente des intérêts.
- En dessous de 30%, cela commence à être moins intéressant, mais peut toujours faciliter le réglage. Ce qui est aussi important car lorsqu'un client change sa recette il faut que l'opérateur soit capable de le faire rapidement.

Nous pouvons visualiser sous forme d'histogrammes sur les figures 54, 55 et 56 les pourcentages d'amélioration que l'on peut constater pour chaque porte et chaque cadence.

On réalise trois histogrammes, chacun pour un matériau différent. Cela permettra de faciliter la visualisation.

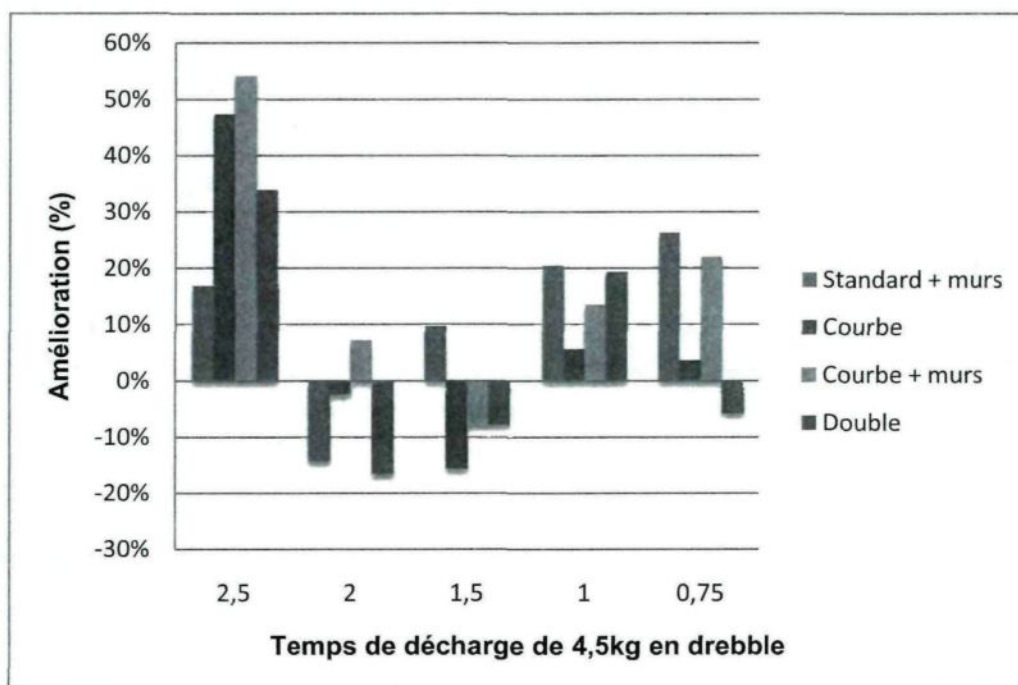


Figure 54 : Comparaison des performances des portes par rapport à la porte standard pour le maïs

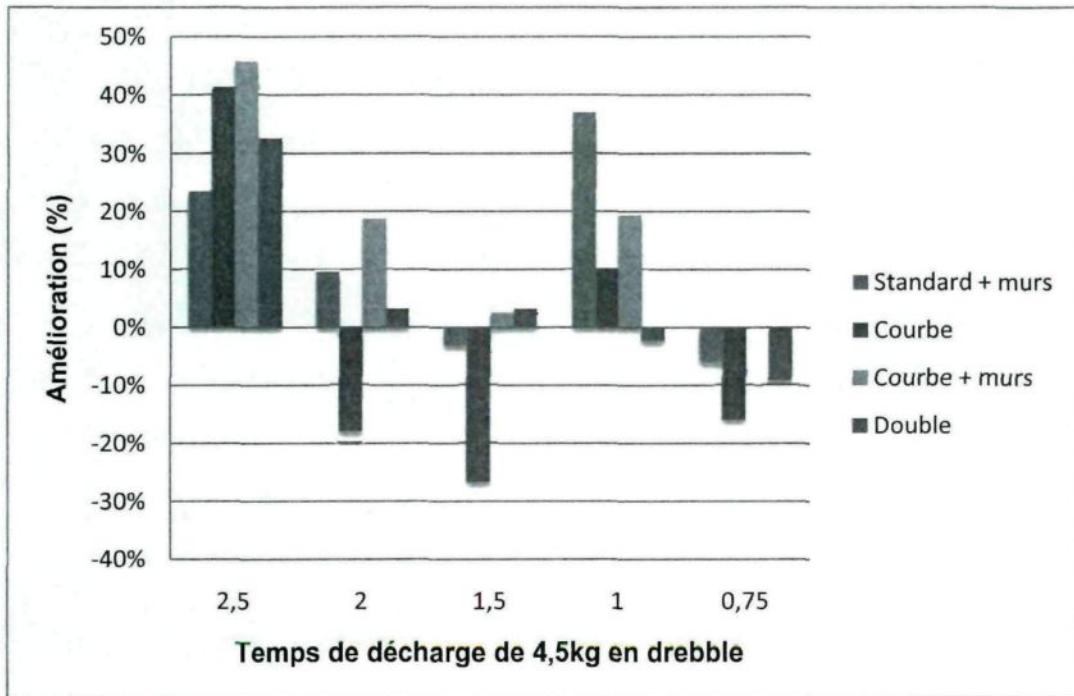


Figure 55 : Comparaison des performances par rapport à la porte standard pour les granules de bois

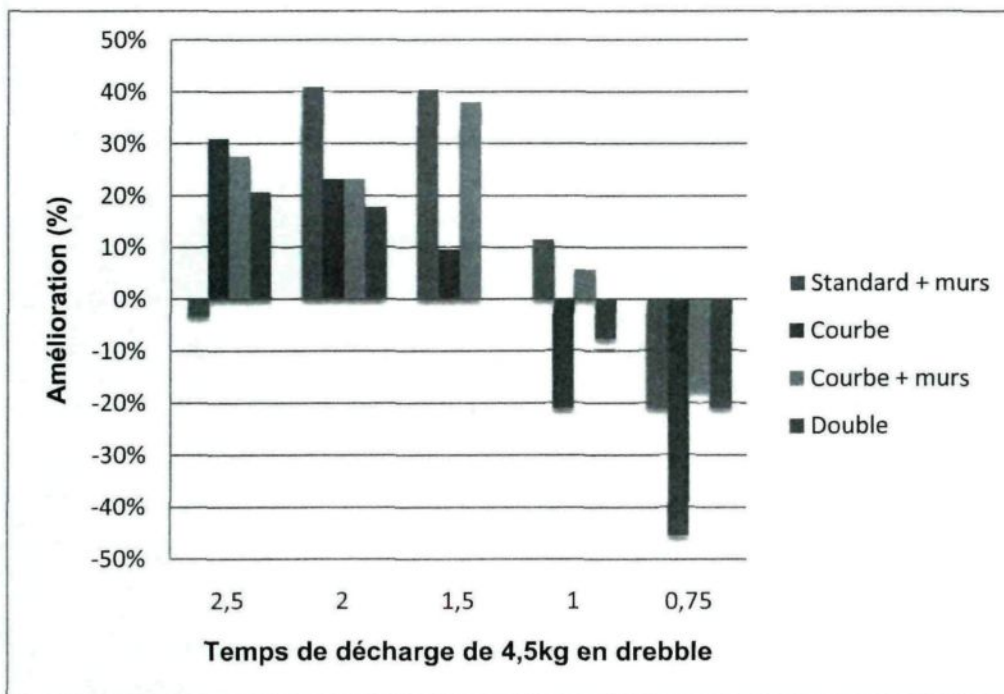


Figure 56 : Comparaison des performances par rapport à la porte standard pour les billes de plastique

On retrouve dans l'annexe III, les tableaux 16, 17 et 18 qui récapitulent les performances pour tous les essais menés si l'on souhaite avoir les valeurs précises des pourcentages d'amélioration.

A première vue, les données varient beaucoup et il est difficile d'extraire des tendances générales en observant les données d'amélioration brutes. Nous décidons alors de nous donner des outils de visualisation plus globaux en regroupant les résultats par catégories dans le tableau 15. Nos catégories seront obtenues de la manière suivante pour chaque géométrie de porte :

- Par matériau : nous faisons la moyenne des améliorations à toutes les cadences pour un matériau donné
- La cadence rapide sera la moyenne des améliorations obtenues pour les cadences de 0,75s et 1s et ceci pour tous les matériaux testés
- La cadence moyenne sera la moyenne des améliorations obtenues pour la cadence de 1,5s uniquement, mais pour tous les matériaux
- La cadence lente sera la moyenne des améliorations obtenues pour les cadences 2s et 2,5s ceci pour les 3 matériaux testés.
- Enfin, la catégorie globale fait la moyenne des améliorations de toutes les cadences pour tous les matériaux testés.

Tableau 15 : Amélioration de performance par rapport à la porte standard pour nos prototypes

	Amélioration de performance						
	Selon le matériau			Selon la cadence			Globale
	Mais	Bois	Plastique	rapide	moyenne	lente	
Porte standard							
Porte standard + murs	12%	12%	14%	11%	16%	12%	13%
Porte courbe	8%	-2%	-1%	-11%	-11%	20%	2%
Porte courbe + murs	18%	22%	15%	9%	11%	29%	18%
Porte double	5%	5%	2%	-4%	-2%	15%	4%

Cela nous donne alors différents outils d'analyse à exploiter pour pouvoir tirer des conclusions sur nos essais et l'efficacité des géométries employées.

Influence des murs :

En se basant sur le tableau 15, les murs semblent avoir une bonne influence, car ils améliorent les performances globales des deux géométries auxquelles nous avons appliqué des murs. On peut remarquer autant pour la porte courbe que pour la porte standard que leur ajout permet d'améliorer nettement les performances pour les débits rapides notamment (0,75sec et 1sec) avec une amélioration de 16% pour la porte standard et un passage de - 11% à 9% entre la porte courbe et la porte courbe avec murs soit une amélioration de 20%. Cela se ressent aussi dans la moyenne globale avec des améliorations respectives de 13% et 16%.

Cette tendance se vérifie sur les figures 52, 53 et 54. Le fait d'ajouter des murs à la porte courbe améliore franchement les performances si l'on compare les deux formes. La porte standard quant à elle est plus contradictoire, car les performances sont différentes selon le matériau employé pendant les essais. On note des améliorations importantes, mais pour le maïs dans des cadences rapides, pour les granules de bois l'amélioration est localisée à la cadence d'1s et pour les billes de plastique les performances sont meilleures dans les cadences faibles.

Nous pouvons tout de même observer qu'en général la matière est mieux dirigée ce qui contribue à la précision. L'entreprise a d'ailleurs décidé d'adopter ce dispositif très simple de mise en œuvre et dont les résultats sont significatifs.

Influence de la géométrie courbe :

Pour l'utilisation de la porte courbe l'amélioration est nette pour les débits faibles (2s et 2,5 s). Le tableau 15 est très parlant, car autant pour la porte courbe seule ou la porte courbe avec murs, on note une différence certaine entre le régime lent et les autres.

En observant les histogrammes d'amélioration et si l'on se concentre sur la géométrie en courbe seule, les performances ne sont nettement intéressantes que pour des débits faibles. Notre hypothèse du chapitre précédent, selon laquelle la porte est efficace si on travaille dans la zone arrondie et qui est optimisée pour des ouvertures faibles, semble donc se confirmer. Par contre pour de plus grandes ouvertures, c'est-à-dire pour des cadences plus élevées, la courbe vient perturber l'écoulement.

La porte courbe avec murs vient pour sa part cumuler les deux avantages des géométries appliquées soit l'avantage de la courbe dans des débits faibles et dans les débits élevés les murs viennent faciliter l'écoulement.

Impact du matériau employé :

L'analyse par matériau sur le tableau 15 ne permet pas d'identifier de différences majeures entre les résultats d'un matériau à l'autre. Ceci est à première vue un bon point pour nous, car la méthode n'est alors pas dépendante du matériau utilisé.

Cependant, on rappelle que les valeurs du tableau représentent des moyennes et il serait réducteur de dire que les comportements observés sont les mêmes d'un matériau à l'autre. En effet, on a réussi à améliorer l'écoulement du maïs dans des cadences élevées alors que pour les billes de plastique tous nos résultats sont en dessous de la porte standard dans des cadences d'1s et surtout de 0,75s.

Effet de la cadence utilisée :

Les différents clients de l'entreprise n'utilisent pas les machines aux mêmes cadences selon leur application. Il est donc bon de comparer les systèmes selon les vitesses d'ensachage.

D'après le tableau 15, la porte courbe avec murs semble être la meilleure solution si l'on opte pour des cadences lentes. Cela se confirme d'ailleurs clairement sur nos histogrammes. Il est intéressant de remarquer que la porte courbe simple et la porte double se démarquent aussi. Cela conforte notre hypothèse que les géométries optimisées comme la porte courbe et porte double sont efficaces si l'on vient "travailler" dans le découpage circulaire.

Par contre si l'objectif est de faire de la cadence rapide la solution est moins évidente. On peut faire les mêmes remarques que précédemment à savoir que l'on retrouve les meilleures performances pour les portes avec murs, confirmant ainsi leur influence pour des débits élevés.

5.6.2 Validation de la méthode

Outre les résultats obtenus qui sont encourageants, il est intéressant de vérifier si la méthode que nous avons développée et appliquée est fiable et constitue un bon outil d'analyse. On va alors comparer les résultats obtenus avec ceux qui étaient initialement prévus par la simulation.

Le plus gros inconvénient de notre méthode est que l'on n'a pas recréé la routine de remplissage utilisée par l'entreprise. De ce fait, les simulations ne permettent pas de prédire les résultats obtenus pendant les campagnes de tests et l'on doit se donner des hypothèses afin de faire des choix de géométrie.

On rappelle que notre méthode de simulation qui utilise des simulations sur EDEM ne fournit que des courbes de dispersion. À partir des courbes de dispersion, nous avons

émis une hypothèse que les courbes possédant une dispersion globalement plus faible selon les débits sont plus adaptées pour fournir une pesée finale de plus grande précision.

En s'appuyant sur les figures 42 et 50, nous avons alors choisi des géométries qui d'après notre hypothèse donnent de meilleures précisions. Si l'on souhaite classer les portes de la plus performante à la moins performante en se basant sur les résultats de simulation, on doit alors comparer nos courbes de dispersion lors de la phase de fermeture. La plus performante est alors celle qui possède la dispersion globalement la plus faible. Cependant, il faut prendre en compte d'autres paramètres :

- On ne peut pas faire le lien entre le débit en part/s et le % d'ouverture de la porte, car il est spécifique à chaque porte. On peut s'en faire une idée, mais les prévisions précises ne sont pas possibles. L'intervalle d'observation a donc été choisi compte tenu des ces considérations.
- Les courbes sont issues de points connus. Entre ces points nous n'avons que des approximations par splines cubiques.

Compte tenu ces constatations et si l'on devait classer les géométries en se basant sur les simulations et sur notre expérience, nous aurions de la plus performante à la moins performante :

- 1 : Double porte
- 2 : Porte courbe avec murs
- 3 : Porte standard avec murs
- 4 : Porte courbe
- 5 : Porte standard

Pour ce qui est des portes simples, les essais de précision ont confirmé nos prédictions de manière globale. On retrouve le même ordre que celui qui était prédit.

Nous ne voyons pas en revanche comment faire des prédictions de performance et comment prévoir le pourcentage d'amélioration obtenu. On ne peut pas prévoir le pourcentage d'ouverture utilisé par le contrôleur avant d'avoir fabriqué, installé et calibré la porte.

On peut cependant penser que notre méthode constitue un bon outil d'exploration. Les courbes de dispersion permettent de juger de façon globale si la dispersion lors de la phase de fermeture est plus faible, encourageant alors le développement de prototypes. La porte droite par exemple dont la dispersion est globalement plus élevée selon le débit avait été testée par l'entreprise comme nous l'avons fait et s'avérait en effet moins performante. Cela nous conforte donc sur la méthode.

Par contre pour ce qui est de la porte double les résultats sont bien en dessous des attentes. Qu'en est-il alors de notre méthode de simulation et prévoyait-elle de meilleures améliorations que nous n'avons pas obtenues ?

Performances de la porte double en fonction du débit :

Notre hypothèse de départ était que plus un système possède un débit constant au cours de la fermeture, plus la précision sera grande. Cependant, on se rend vite compte lors de notre campagne de tests que l'on ne vient pas forcément travailler dans des débits aussi faibles que ce que l'on pensait lors des simulations.

Par ailleurs, on doit souvent augmenter l'ouverture minimum de la porte afin de respecter les cadences demandées. Dans les cadences les plus élevées, il n'est pas rare d'augmenter l'ouverture minimale jusqu'à 30 ou 40%. De ce fait, on ne vient pas travailler dans des débits aussi faibles que prévu et afin d'avoir une idée des dispersions dans ces comportements il faut changer l'échelle de nos courbes. La figure 57 nous permet de visualiser les courbes de dispersion des géométries testées dans des débits plus importants.

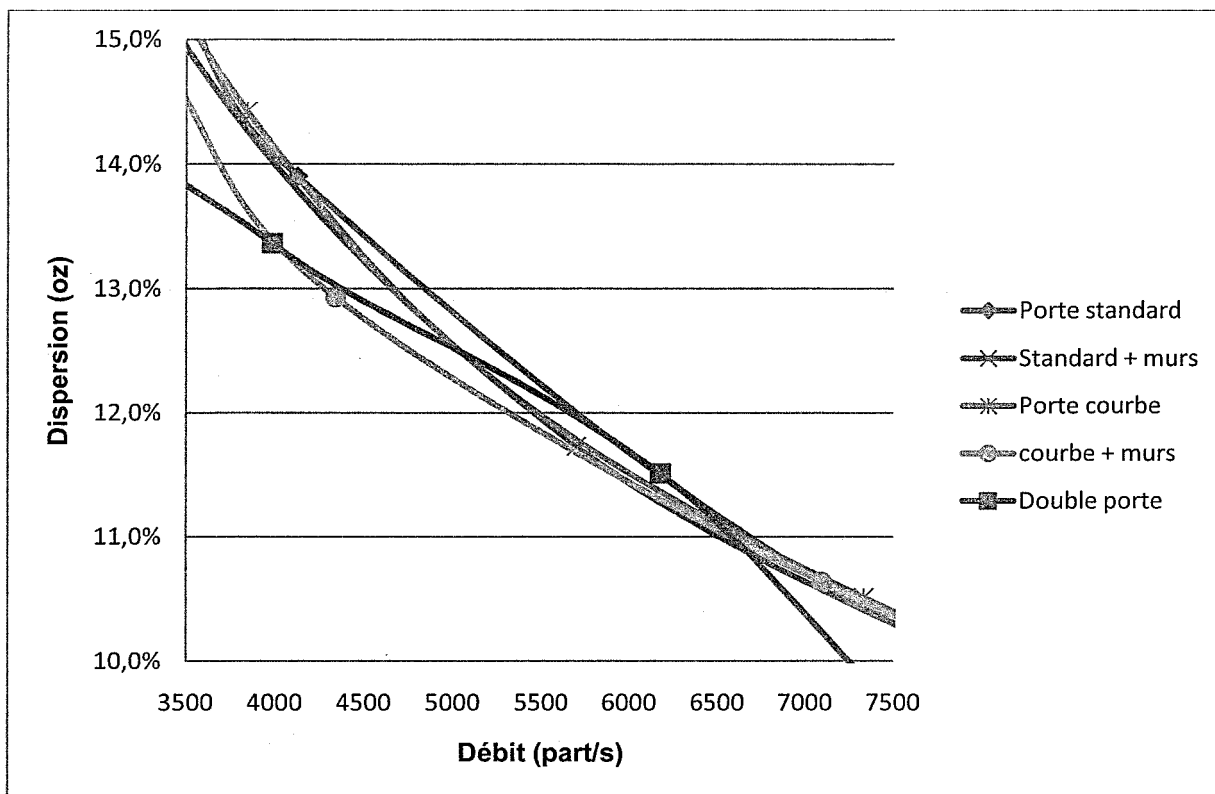


Figure 57 : Courbes de dispersion théoriques des géométries testées pour d'autres débits

On a ici la dispersion selon le débit des différentes portes testées. On a centré le point de vue sur des débits correspondant environ à des ouvertures entre 20 et 40%.

Dans cette zone la porte double est en effet moins performante, ce que l'on a pu observer dans nos essais de précision en entreprise. Cela ne veut pas alors dire que ce système est mauvais, mais simplement qu'il n'est pas adapté pour travailler avec les recettes que nous utilisons. Une explication de ces résultats est que l'on ne vient pas utiliser les débits les plus faibles et que l'on reste dans cette zone où les résultats sont plus décevants.

Enfin comme on peut le constater l'écart entre les courbes est encore plus faible dans cette zone. Cela rend encore plus difficile de choisir entre les différentes courbes pour la performance. Cependant, il est bon de noter que sur un débit de 5000part/s un écart de 1% représente 50 particules, soit environ 14g. Ce qui fait que l'on est dans les ordres de grandeur obtenus.

Difficultés avec le système double porte :

Pour concevoir le système double porte nous avons fabriqué deux portes similaires se superposant afin de se rapprocher le plus possible d'un diaphragme. Lors des simulations on a utilisé un système théorique avec deux portes identiques se chevauchant.

Cependant lors de la conception du prototype, on a dû construire une porte plus grande que l'autre et laisser un jeu entre elles. De plus, afin que les particules ne se coincent pas entre les portes, on a fait le choix de laisser un jeu important (environ 1cm) de sorte que toutes les particules ne restent pas coincées.

De ce fait, on identifie lors des essais une source de dispersion supplémentaire qui peut aussi expliquer les résultats : la projection des particules. En effet les jeux de conception font qu'une quantité de matière reste bloquée entre les deux portes lors du remplissage. Au moment de la fermeture, la porte supérieure vient chasser les particules de la porte inférieure et les éjecter du module, tombant ensuite dans la balance. La figure 58 permet d'illustrer ce phénomène.

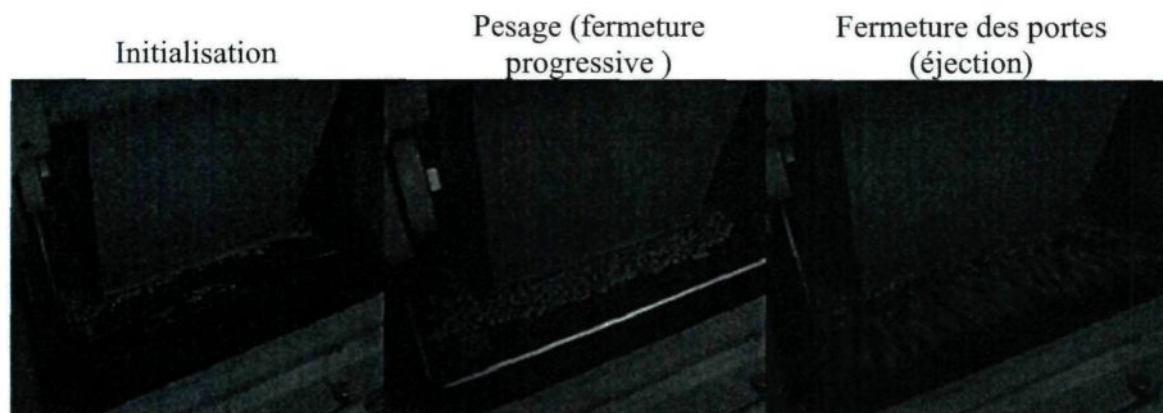


Figure 58 : Éjection des particules lors de la fermeture des portes

On se fabrique alors un petit bac récupérateur avec un sac pour étudier un peu plus cette quantité éjectée. On fait les essais de décharge à nouveau en collectant les particules éjectées. En moyenne 0,2kg de matière est éjecté par pesée. On ne manquera pas de noter

que cette quantité aussi est soumise à la dispersion et que l'on n'a pas exactement la même quantité qui est éjectée à chaque pesée.

De plus, on a refait un des tests de précision pour le système double porte, celui des granules de bois pour une cadence de 2s. Les essais initiaux donnaient une précision de 42g et avec la récupération des particules, la précision est passée à 38g.

Cela reste toutefois moins performant que la porte courbe avec murs dont la conception est beaucoup plus facile.

Pour conclure sur la porte double, différents facteurs peuvent permettre d'expliquer pourquoi les essais sont en dessous des prévisions attendues. Même si l'on arrivait à éliminer le phénomène d'éjection de la matière le système, il n'est pas dit que les résultats seraient meilleurs qu'une porte courbe avec murs dont la réalisation est beaucoup plus simple.

Nous rappelons la méthode d'analyse employée dans le cadre de ce travail. Elle a consisté à se servir de simulations numériques sur le logiciel EDEM pour tracer la courbe de dispersion de la porte standard selon le débit. Une fois les résultats concluants, nous avons appliqué des modifications de design et retracé pour chaque nouveau design la courbe de dispersion. En comparant les courbes, nous avons extrait les plus prometteuses pour les tester en tant que prototypes et vérifier les précisions de pesage obtenues en réalisant les essais utilisés par l'entreprise pour caractériser la précision des balances.

Les essais se sont montrés conformes aux prévisions. On peut même conclure que notre méthode est adaptée pour faire un choix de prototypes. Par contre, elle ne nous permet pas de garantir des gains au niveau de la précision de pesage. On obtient le même ordre de précision que lors des essais si l'on classe les portes en fonction de leurs performances globales. Pour un premier travail sur ce type de produit, nous sommes alors satisfaits.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'optimisation de la machine de pesage et d'ensachage a été axée sur l'étude de l'écoulement de matière granulaire dans des organes de la machine ayant une influence sur la vitesse et la précision de pesage : la chute de transition et le module d'alimentation. La connaissance limitée que la science possède sur l'écoulement des matériaux granulaires nous a orientés vers une démarche expérimentale et l'utilisation du logiciel EDEM pour simuler les écoulements de matière. Cela a entraîné beaucoup de travail préliminaire pour calibrer le logiciel et fabriquer les bancs d'essai, mais nous a permis de développer des méthodes de simulations et de design propres à chaque objectif.

L'optimisation de la chute de transition visait à améliorer l'écoulement de matière lors d'une décharge à pleine vitesse de la balance en adoptant une démarche expérimentale et aussi basée sur des simulations d'écoulement utilisant le logiciel EDEM. Pour cela nous avons simulé le phénomène de décharge dans une chute standard sur le logiciel EDEM. Le modèle fut confronté à la comparaison entre la chute standard réelle et simulée, et fut jugé satisfaisant. De ce fait, nous avons testé d'autres géométries de chute, dans les mêmes conditions, dans le but d'en trouver une dont le temps de chute serait inférieur. Les simulations n'ont cependant pas permis d'identifier une chute procurant une nette amélioration. Pour pouvoir mieux juger du comportement et améliorer notre connaissance en écoulement de matériaux granulaires, on aurait pu tracer les courbes d'écoulement pour les géométries simulées et pour plusieurs matériaux. Avec les courbes complètes, des zones où le comportement est différent ainsi que les réactions sur l'écoulement lorsque l'on utilise un autre type de matériau pourraient être identifiées, mais ceci ne faisait pas partie des objectifs de l'entreprise et pourrait faire l'objet de travaux plus poussés. Au niveau de la

méthode de simulation employée, les résultats n'ont pas encouragé l'entreprise à la réalisation d'un prototype qui aurait permis de vérifier la méthode. Dans le but de vérifier totalement la méthode, il serait alors possible de fabriquer quelques chutes que l'on a simulées et de confronter les résultats réels de décharge aux résultats des simulations.

L'optimisation du module d'alimentation visait à améliorer la précision du pesage pour une gamme de vitesses et de produits donnée. Nous avons fait le choix d'utiliser à nouveau le logiciel EDEM pour simuler les écoulements et de travailler sur la géométrie de la porte. L'approche retenue était de rechercher la géométrie donnant un débit de sortie le plus régulier possible, qui d'après notre hypothèse, fournirait la meilleure précision de pesage. La difficulté était de trouver une méthode capable d'optimiser la précision de la pesée pour une porte qui est constamment en mouvement lors du pesage. Nous nous sommes alors lancés dans l'étude de la dispersion du débit instantané selon le débit demandé, ce qui a permis de juger de la régularité de l'écoulement. Avec la méthode d'analyse mise au point, nous avons pu comparer plusieurs géométries de porte et identifier les plus prometteuses. Ces dernières furent fabriquées en tant que prototypes, qui se sont avérés satisfaisants lors des essais réels de précision, car des améliorations très appréciables ont été relevées. Notre meilleure géométrie, la porte courbe avec murs déflecteurs, a permis d'améliorer la précision globale de 20%. De plus, le fait d'avoir développé plusieurs prototypes nous a permis de mieux comprendre les paramètres influant sur la précision du pesage. Au niveau de l'efficacité de la méthode employée, elle nous a permis d'identifier des géométries apportant potentiellement des améliorations et qui se sont révélées améliorer en effet la précision de pesage. Cependant, elle ne peut pour le moment servir que d'outil de design dans cette application, car il n'est pas possible de prévoir les gains de précision engendrés.

Ces travaux très appliqués nous ont permis de faire avancer la compréhension des écoulements dans des cas très précis. Nous n'avons bien entendu pas étudié toute la question, ayant des objectifs et des résultats à fournir vis-à-vis de l'entreprise. Ce projet peut toutefois ouvrir la voie à d'autres recherches plus fondamentales. Au niveau des lois d'échelle, il serait intéressant de vérifier si elles ont une forte influence ou pas entre le

modèle réduit et le banc d'essai. Il faudrait réutiliser le plan d'expérience sur le banc d'essai complet quitte à augmenter les temps de simulation. Ceci pourrait alors expliquer certains écarts. D'un point de vue plus appliqué, les intérêts de l'entreprise peuvent encore être étudiés. Dans la chute de transition, nous n'avons pas étudié l'effet du sac dans une décharge. Nous avons fait l'hypothèse qu'une vitesse importante des particules favorise son ouverture sans le vérifier. Il se peut de plus que le sac ait une influence sur le bouchon. Dans le module d'alimentation, une amélioration du système à deux portes permettrait de vérifier si les performances sont en effet meilleures sans les soucis de conception que nous avons maintenant identifiés. De plus, nous avons commencé à développer un outil de design et d'étude en nous basant sur les courbes de dispersion. Deux pistes s'offrent alors à nous maintenant. La première consiste à améliorer la méthode et la rendre capable de prédire les performances futures de la machine par l'étude des courbes de dispersion. Il faudrait alors améliorer la précision de nos courbes en augmentant le nombre de points obtenu par simulation, vérifier les concordances au niveau du débit réel et virtuel, ainsi que trouver une échelle capable de comparer les ouvertures de portes exprimées en pourcentages, car elles varient selon les recettes et les géométries. L'autre possibilité est de créer un modèle de simulation plus complet et capable de prédire la précision du système. Il pourrait devenir possible de reproduire les étapes du pesage, en modifiant l'ouverture de porte petit à petit selon la recette, car la commande de la porte sur EDEM se fait uniquement en vitesse et en accélération.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Box, G.E.P. and N.R. Draper (1986). Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analysis, John Wiley & Sons.
- Chevoir, F. and J.-N. Roux (2008). "Friction law in dense granular flows." Powder Technology : 264-268
- Degouet, C. (2005). Caractérisation de matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux. Laboratoire d'Ingénierie Mécanique et Électrique IUT de Brest. Brest, Université de Bretagne Occidentale (UBO): 127.
- Herrmann, H. J. (2002). "Granular matter." Physics A(313): 188-210.
- Jaeger and Nagel (1996). "Granular solids, liquids and gases." Rev. Mod. Phys. **68**(4): 1259-1273.
- Lawton, P. J. (1979). "Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials." Journal of Agricultural Engineering Research **25**(1): 75-86.
- Mason, R.L., R.F. Gunst, et J.L. Hess (2003). Statistical design and analysis of experiments, Wiley Interscience.
- Mindlin, R. D. (1949). "Compliance of elastic bodies in contact." Journal Applied Mechanics **71**.
- Müller, D. (1996). Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieux granulaires par la méthode d'éléments distincts. Département de Mathématiques. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Pouliquen, O. (2004). Écoulements granulaires secs. Laboratoire IUSTI. Marseille, Université de Provence - Technopôle Château Gombert: 71.
- Pouliquen, O. and F. Chevoir (2002). "Dense flows of dry granular material." C. R. Physique **3**: 163-175.

- Prochnow, M. (2002) . Ecoulements denses de grains secs . Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil. Paris, Ecole nationale des ponts et chaussées .
Doctor : 299
- Radjai, F. and Roux, S. (1999). "Contact forces ion granular packing." Chaos **9**(3) : 544-561.
- Rajchenbach, J. (2000). "Granular flows." Advances in Physics **49**: 229-256.
- Ross, P. J. (1995). Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-Hill
- Roux, J.-N. and F. Chevoir (2005). "Simulation numérique discrète pour le comportement mécanique des matériaux granulaires." BLPC (Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées) : 109-138.
- Scherrer, B. (1984). "Comparaison des moyennes de plusieurs échantillons indépendants". Dans Biostatistiques p. 422-463, Gaëtan Morin

ANNEXE I

PARAMÉTRAGE D'UNE SIMULATION SUR EDEM

Cette annexe présente comment paramétrer une simulation sur le logiciel EDEM. Le but est de montrer que de nombreux paramètres doivent être renseignés et comment nous allons procéder en détail lors de l'optimisation.

I.1 IMPORTATION DES GÉOMÉTRIES

- « Import » permet d'importer les modèles CAD, chaque ensemble mobile est importé séparément.
- « Sections/Name » permet de sélectionner les différents modèles que l'on aura importés. Ici on a par exemple sélectionné une des portes. Attention les modèles importés ne peuvent ensuite être déplacés ! Il faut donc veiller de travailler par rapport à la même origine dans le logiciel de CAO.
- « Dynamics » est dans l'onglet qui permet de paramétrer les mouvements. Dans notre exemple on commande l'ouverture de la porte qui déchargera la matière. On choisit donc une rotation linéaire et on fournit au logiciel l'axe de rotation, la vitesse de rotation et le temps de début et de fin.

La figure 59 montre les géométries importées et l'interface dans le logiciel l'onglet de commande des géométries importées.

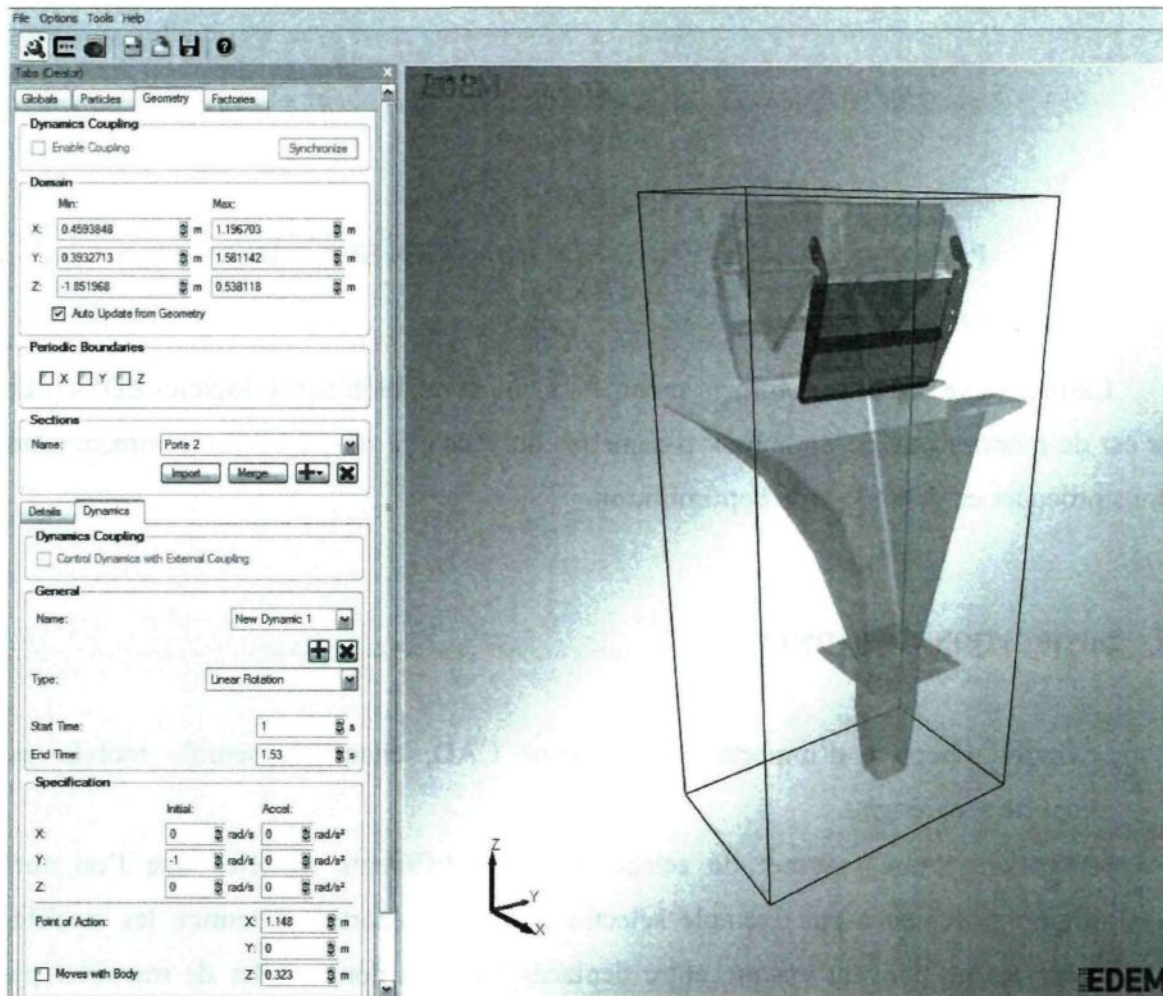


Figure 59 : Importation des géométries

I.2 SAISIE DES PARAMÈTRES DE SIMULATION

- « Physics » permet de choisir entre différents modèles de contact pour les particules lors des collisions. Le modèle par défaut d'Hertz-Mindlin est utilisé, car il est moins lourd en calcul et offre de bons résultats.
- « Gravity » permet de définir la constante gravitationnelle. Attention encore à avoir orienté les modèles CAD suivant le bon axe...
- « Materials » permet de définir les paramètres matériaux : coefficient de poisson, module d'élasticité et densité. Pour les interactions, trois coefficients sont à ajouter, ils influent sur le calcul des forces de contact, de friction, etc....

Le logiciel comprend une base de données où le matériau « grain » est déjà défini. Dans un premier temps, les simulations pour le maïs ont été faites avec ce matériau.

La figure 60 montre le montage utilisé pour nos simulations ainsi que l'onglet de choix des paramètres.

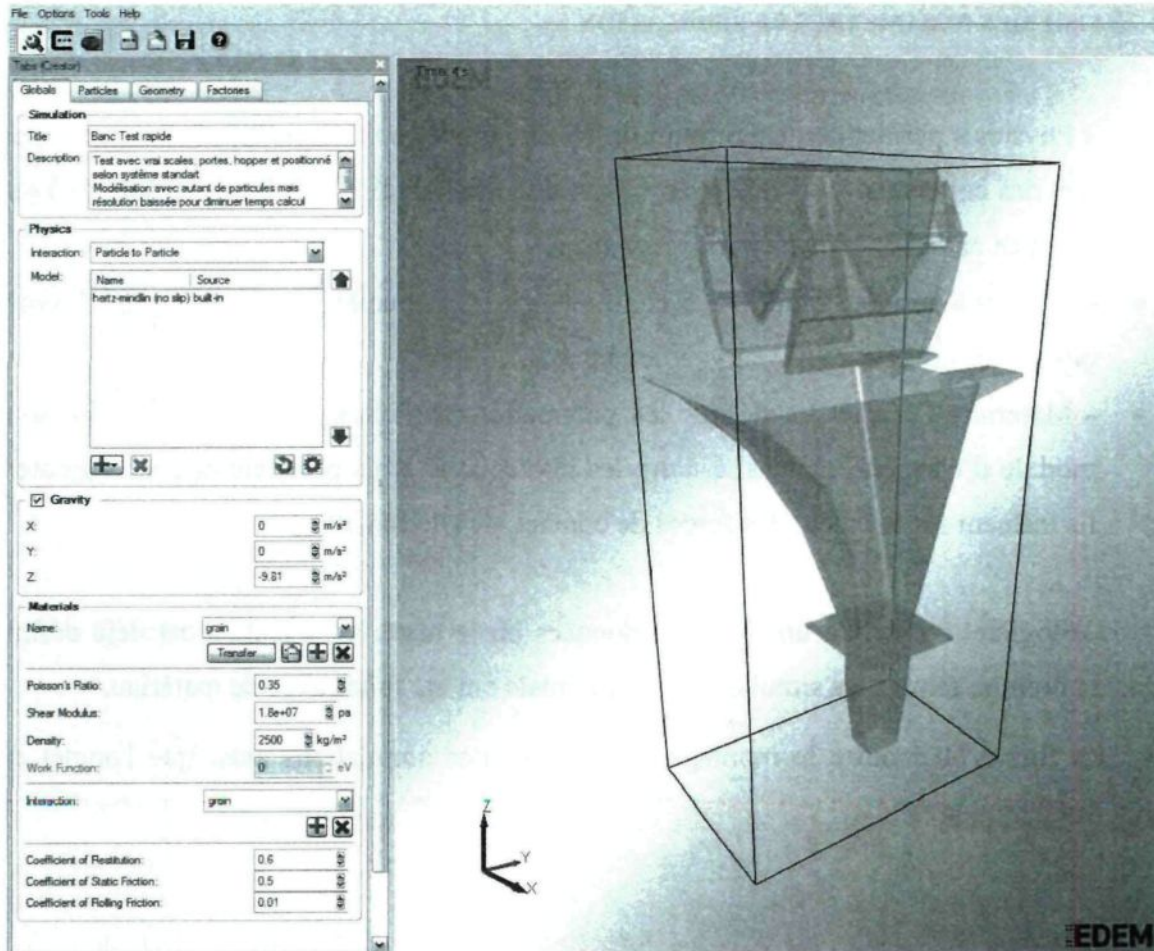


Figure 60 : Saisie des paramètres principaux

I.3 DÉFINITIONS DES PARTICULES

Dans EDEM les particules sont créées à partir de sphères. Il est possible d'importer une forme de particules, cependant seule l'enveloppe apparaîtra et il faudra la remplir avec des sphères dont on peut juste définir le diamètre et la position dans la création de particules.

Les propriétés de la particule (masse, volume, moments d'inertie) sont calculées automatiquement d'après les valeurs du matériau.

Pour notre simulation les grains de maïs seront modélisés tout simplement par des sphères de rayon $R=3,8\text{mm}$. La raison principale est l'économie de calculs, car multiplier les sphères alourdit considérablement les temps de simulation. De plus, ce rayon permet de reproduire le volume standard d'un grain de maïs. On constatera aussi par des essais que le fait de modéliser les particules par une seule sphère ou de faire des géométries complexes n'influe pas sur le résultat.

La figure 61 montre l'écran de définition des particules dans le logiciel ainsi que les options associées.

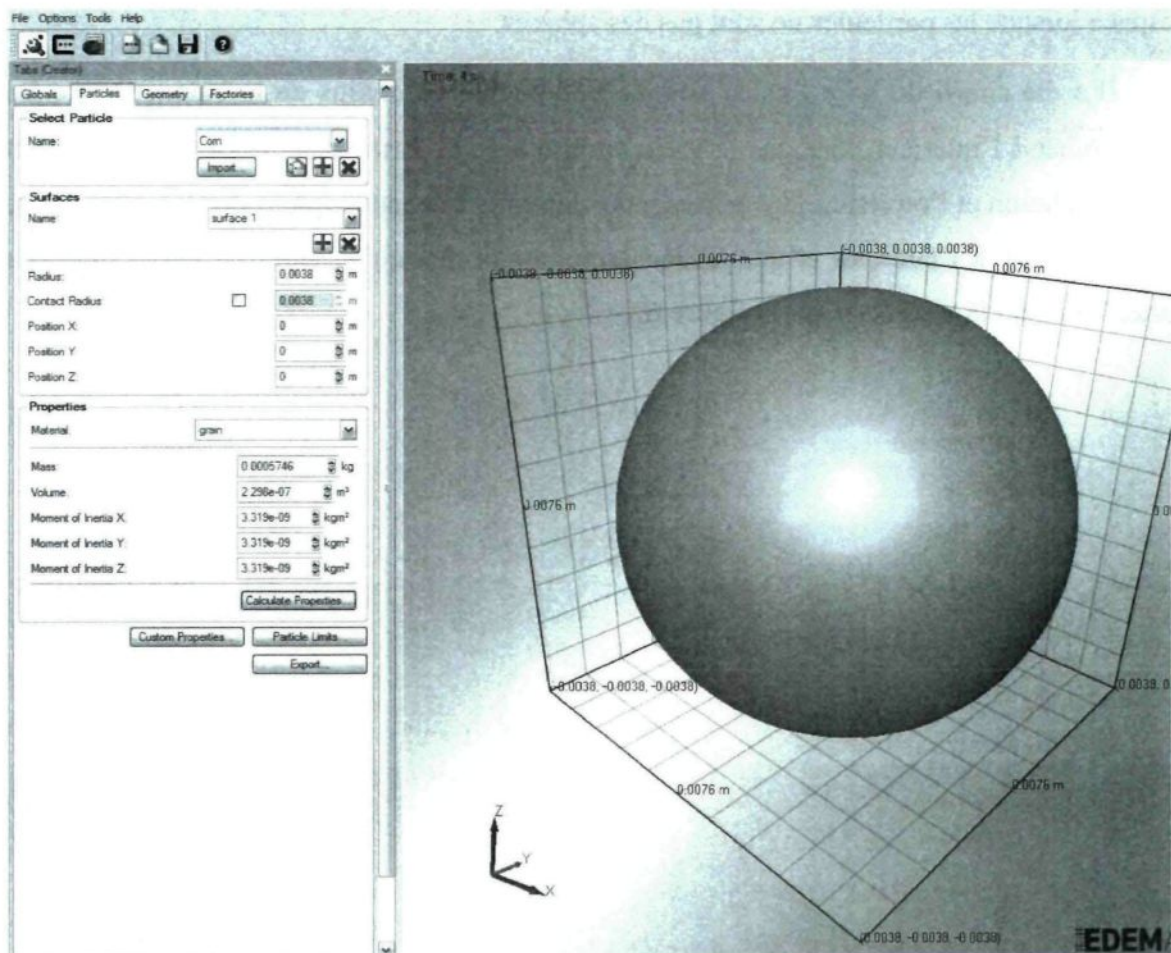


Figure 61 : Définition des particules

I.4 CRÉATION DES PARTICULES

Lors de l'importation des géométries, on réalise aussi une surface virtuelle, que l'on appelle usine, qui va générer les particules que l'on a définies.

Pour l'usine on doit définir entre autres :

- Le nombre de particules à créer,
- Le taux de création (en particules/s).

Quelques paramètres supplémentaires comme la vitesse initiale et l'orientation dans l'espace lorsque les particules ne sont pas des sphères.

Il a été choisi de faire l'usine comme une plaque au dessus de la balance et de les faire tomber à l'intérieur pour que le grain épouse bien la forme des portes. Entre le début de la simulation et l'ouverture des portes, nous laissons 1 seconde pour que les particules se stabilisent bien à l'intérieur et que la décharge ne soit due qu'à l'effet de l'ouverture des portes. On peut la visualiser sur la figure 62.

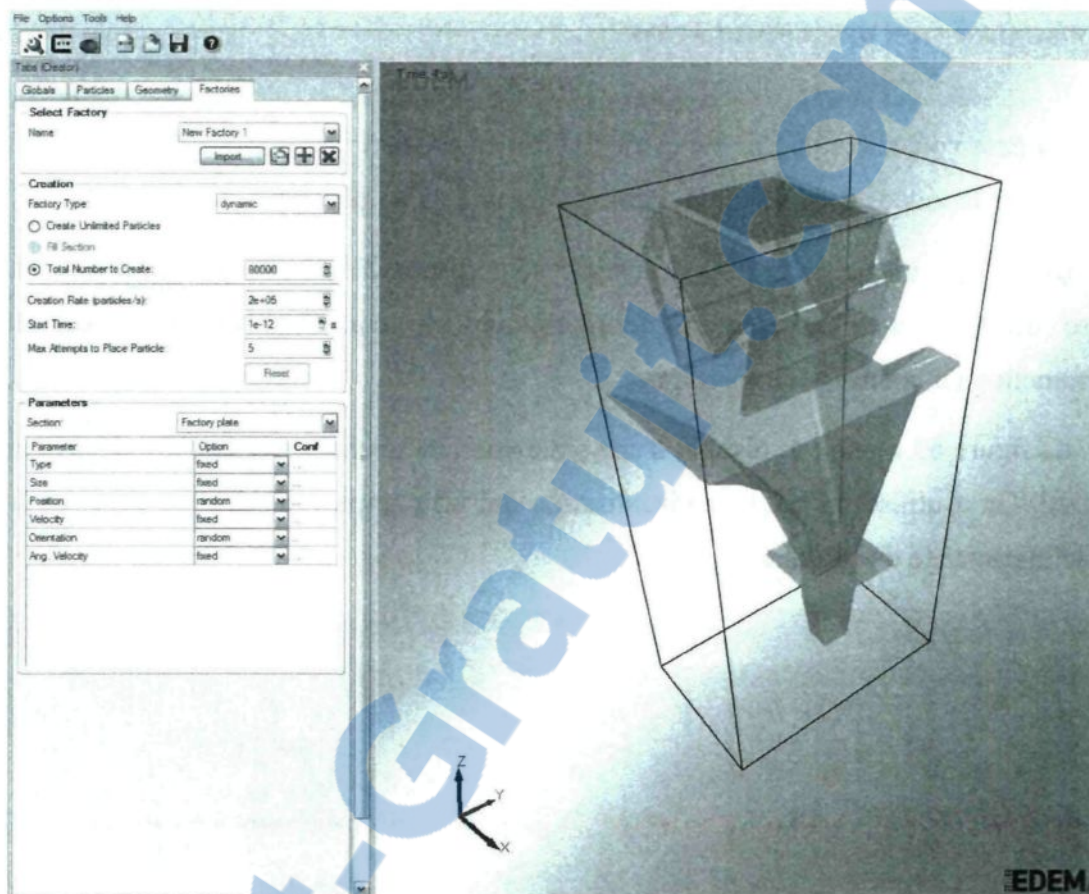


Figure 62 : Création de l'usine à particules

I.5 DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE CALCUL

Après avoir fait les étapes précédentes, on peut lancer la simulation. Il reste encore à définir les paramètres de calcul suivants :

- L'incrément de temps entre chaque calcul de trajectoire. On l'exprime en % du temps de Rayleigh qui est le temps de propagation d'une onde de cisaillement dans une particule. Cela influera sur le temps de calcul. Il faut faire attention, car un temps trop élevé fait se comporter les particules de manière erratique.
- Le temps de simulation qui dans notre cas a été fixé à environ 3 secondes en comptant le temps de remplissage.

I.6 VISUALISATION DE LA SIMULATION

On peut voir le résultat de l'expérience soit en passant image par image les résultats, soit en lisant la vidéo. Il est possible d'enregistrer une vidéo de l'essai.

Des outils intéressants pour l'analyse sont disponibles tels que l'affichage de la vitesse des particules, la création de graphiques, le comptage des particules et la détermination de la vitesse des particules.

La figure 63 montre le résultat d'une simulation de décharge de matière dans la chute standard. On a utilisé un outil de visualisation qui affiche par une échelle de couleurs la vitesse instantanée des particules.

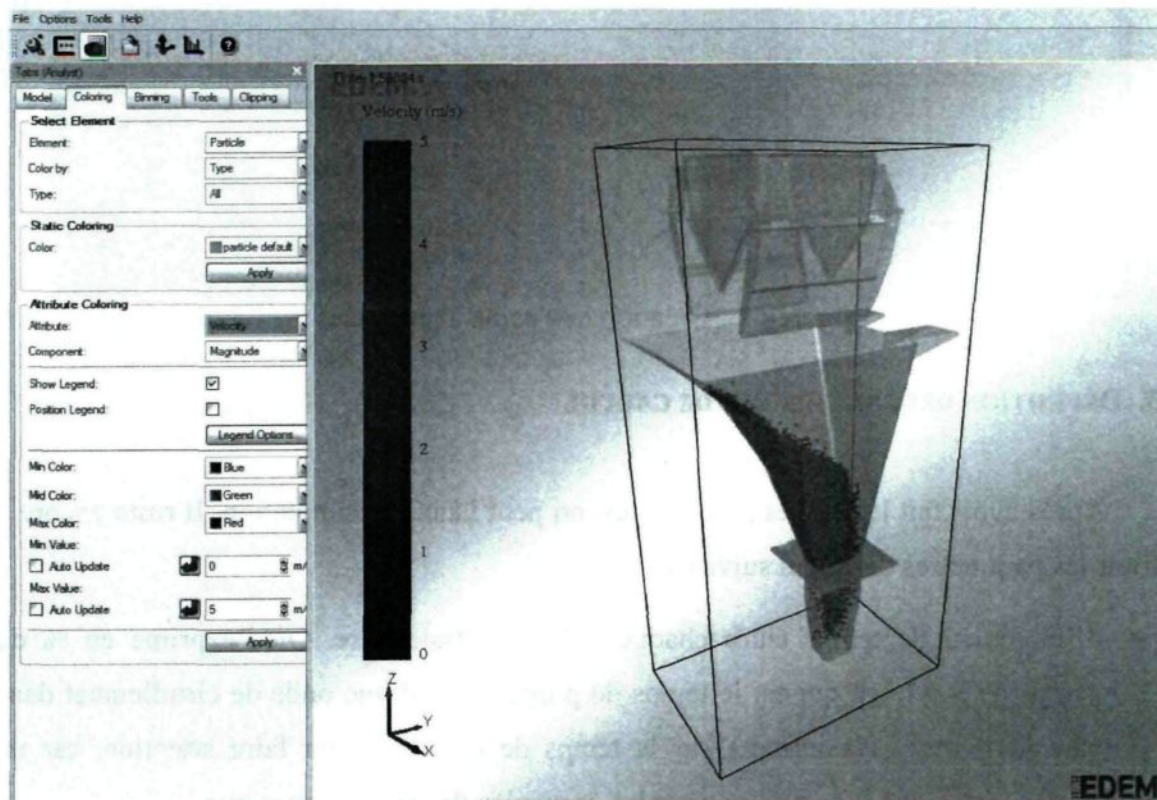


Figure 63 : Visualisation du résultat de la simulation

ANNEXE II

LES DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DE CHUTES TESTÉES

On présente ici plus en détail les différentes géométries testées. Elles comportent un plan de la chute pour avoir une idée de la géométrie. Les dimensions ne sont pas indiquées pour des raisons de confidentialité. Une explication permet ensuite de traduire notre impression sur la chute et le comportement à l'intérieur de celle-ci. Les impressions-écrans des vidéos permettent de mieux juger comment la matière se comporte à lors de la décharge et de présenter les observations et les idées que l'on a pu avoir en observant les décharges. L'échelle de couleur permet de mettre en évidence la vitesse des particules avec un dégradé du bleu (vitesse mini = 0m/s) au rouge (vitesse maxi = 5m/s).

II.1 CHUTE DOUBLE 2

Après avoir étudié la double chute standard, on a adapté la géométrie pour permettre de freiner plus de produit et obtenir une décharge plus efficace. Nous avons lors modifié les formes des murs, le figure 64 montre la géométrie utilisée dans les tests.

Les essais de décharge peuvent être visualisés sur les figures 65 et 66.

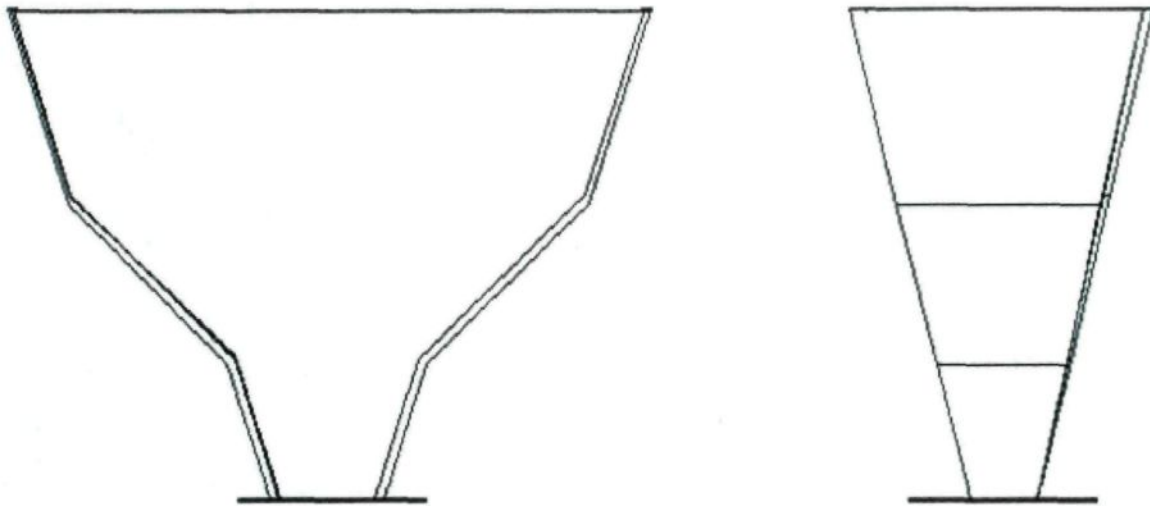
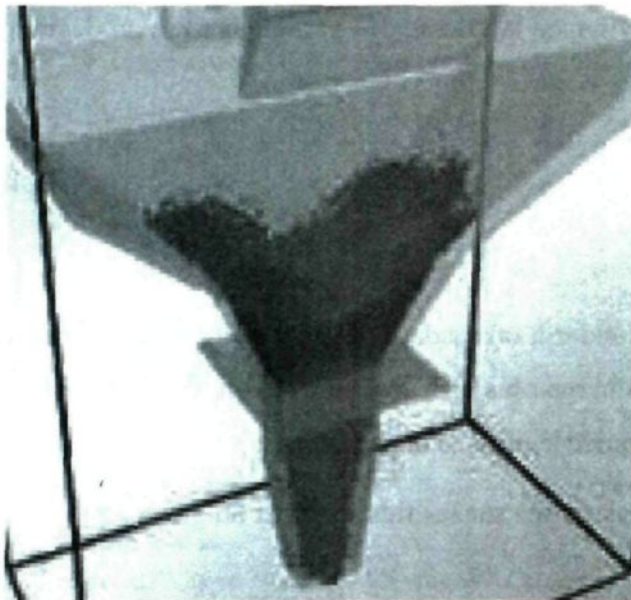


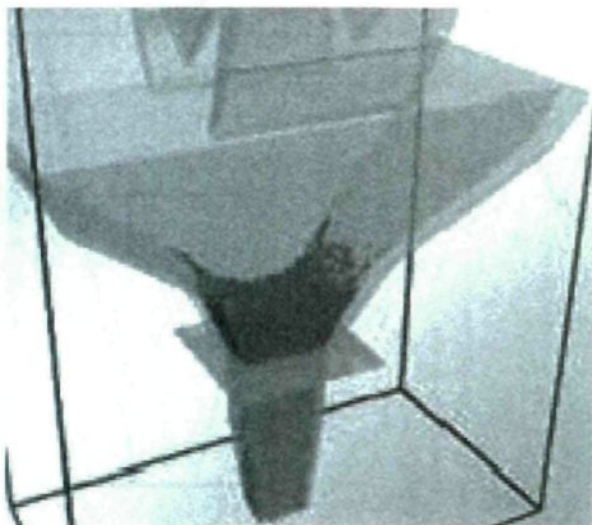
Figure 64: Géométrie de la chute double 2 pour les essais de décharge



On conserve l'avantage d'avoir la bouche de remplissage juste en dessous de la balance, car beaucoup de particules sont directement dirigées vers la sortie. La forme des murs permet de retenir l'excédent de matière contrairement à la double chute standard

On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 5,7m/s

Figure 65 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t1



La matière est cependant grandement ralentie et beaucoup de matière doit encore s'écouler doucement. On pense alors que trop de matière est retenue d'où la chute double 3.

Figure 66 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t_2

Comme dans la première chute double les premières particules arrivent donc avec une vitesse importante et en quantité facilitant sûrement l'ouverture du sac. Pour ce qui est de l'écoulement, le comportement est intéressant, environ la moitié des particules est dirigée directement vers la sortie. Par contre, la deuxième partie de la matière bouchonne sur la fin, ce qui fait perdre du temps. On obtient une décharge en $1,25t_{ref}$, ce qui est mieux que la chute précédente, mais toujours moins que la chute standard.

II.2 CHUTE DOUBLE 3

Les résultats de la chute double 2 nous ont donné l'idée d'essayer de freiner moins de produit en le laissant plus s'écouler dans la bouche de remplissage. On a alors augmenté la partie juste en dessus la bouche d'alimentation par rapport au test précédent pour freiner moins de matière. La figure 67 montre le plan de la géométrie modifiée où l'on a diminué l'inclinaison α et on augmente la côte b de la chute. On conserve l'avantage précédent à savoir une première moitié de la décharge efficace et une vitesse des premières particules élevée (5,7m/s).

Les essais de décharge sont visibles sur les figures 68 et 69.

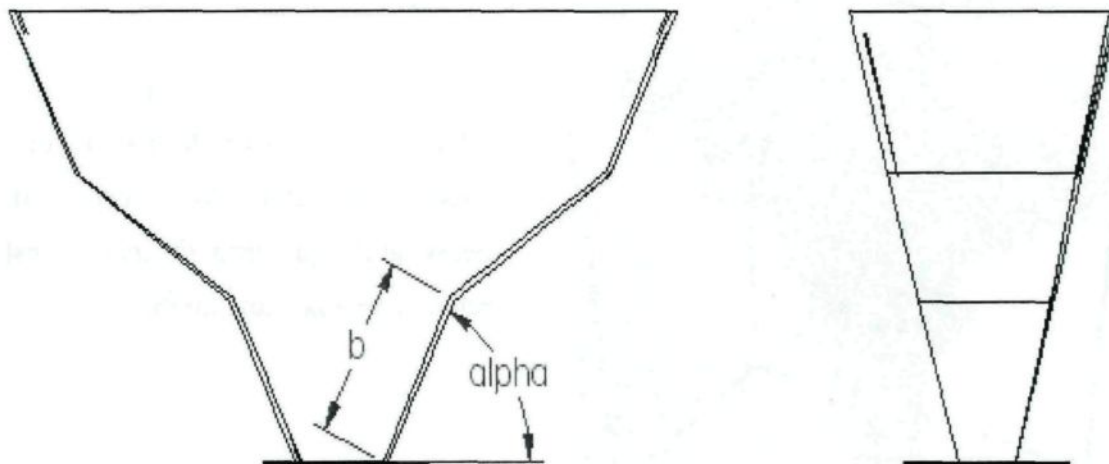
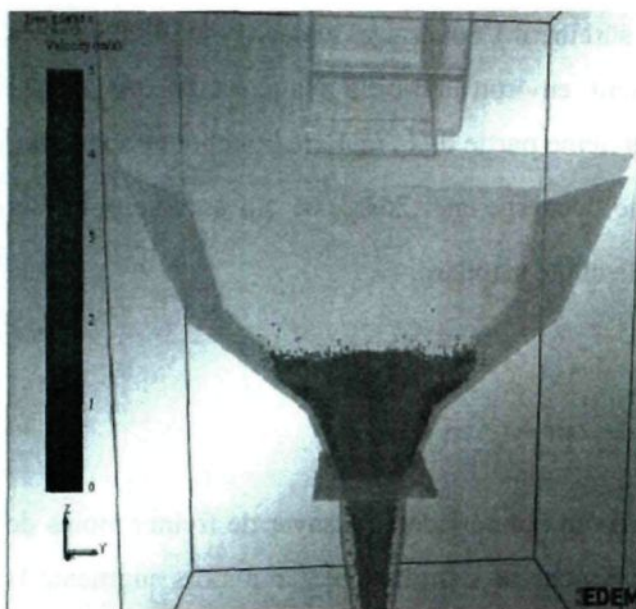


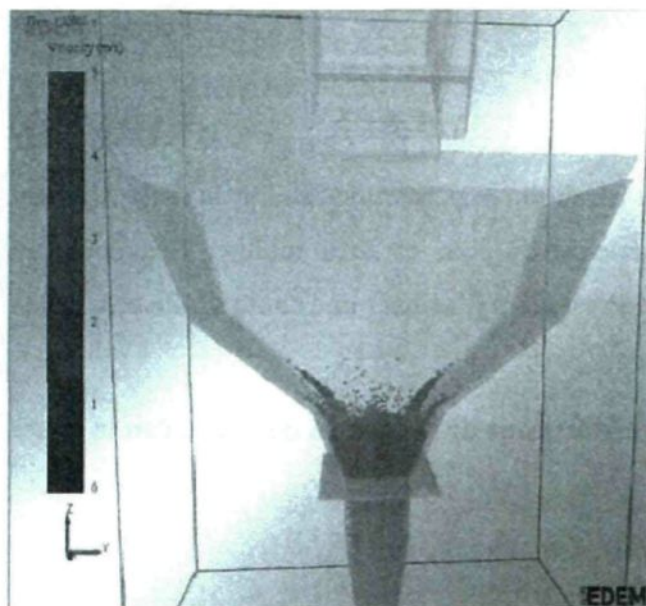
Figure 67 : Géométrie de la chute double 3 pour les essais de décharge



Les murs plus grands font bien converger la matière vers la bouche de remplissage, on voit que la vitesse globale est plus élevée avec la coloration, synonyme que le matériau bouchonne moins dans un premier temps.

On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 5,8m/s

Figure 68 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t1



Cependant maintenant il semble que trop de matière soit accumulée subitement au-dessus de la bouche de remplissage, faisant bouchonner en fin de décharge.

Figure 69 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 2 à t_2

On gagne légèrement au niveau du temps d'écoulement avec une décharge en $1,2t_{ref}$. On a toujours la même impression sur la vitesse des premières particules avec une arrivée en grand nombre et rapide.

Cependant, on reste toujours en dessous de la chute standard et les possibilités d'amélioration sont faibles, car on remarque entre les deux chutes que si plus de matière est freinée on coupe complètement la vitesse accumulée par les particules lors de la chute. A l'inverse si on en ralentit moins on se retrouve avec un bouchon en fin d'écoulement. Le compromis est difficile et il semble donc peu probable de trouver une configuration qui réduise le temps de chute en deçà de celui de la chute standard.

On se concentrera alors plus vers une forme qui dirige la matière en lui permettant de conserver sa vitesse.

II.3 CHUTE DROITE

On revient à une chute simple et la balance décalée par rapport à la bouche (voir figure 70). Dans la chute standard, la partie parabolique permet de ralentir la matière, mais peut être un peu trop dans la partie supérieure où l'on est très incliné. Beaucoup de particules stagnent donc un moment ici, l'idée est alors d'utiliser une chute droite et voir les différences et comprendre mieux l'écoulement.

Les figures 71 et 72 contiennent des impressions des essais de décharge dans la chute droite.

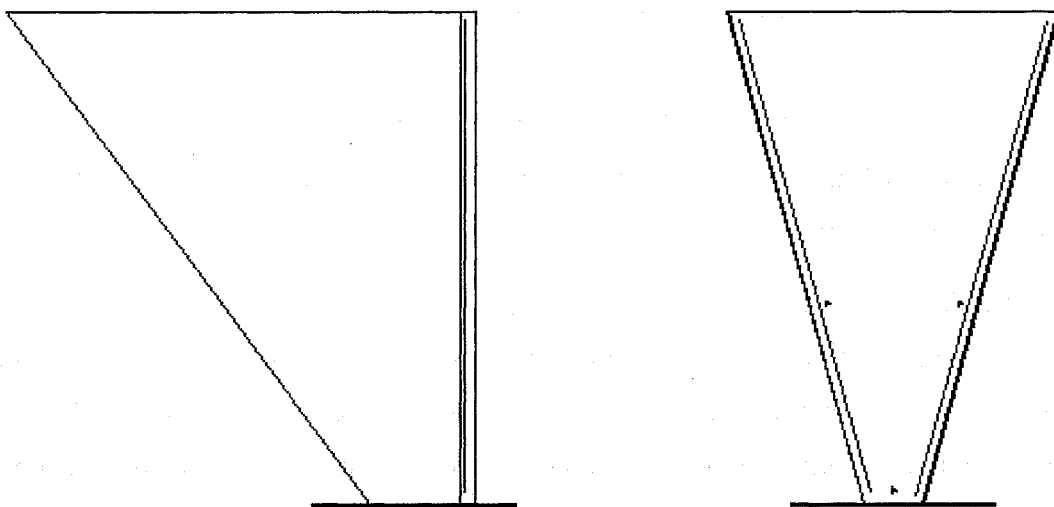


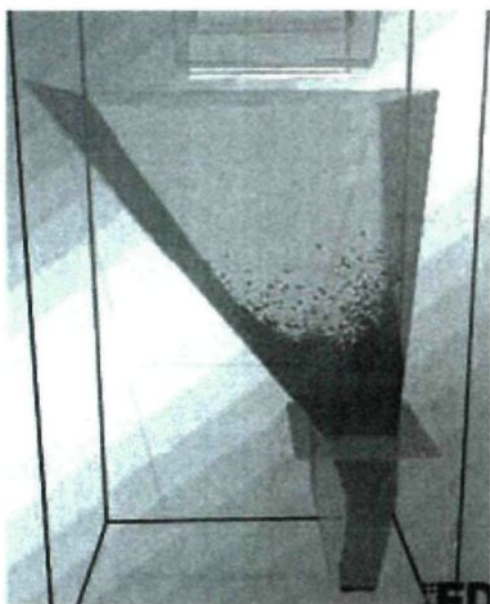
Figure 70 : Géométrie de la chute droite pour les essais de décharge



Comme dans la chute standard la balance décalée permet à une partie des particules de s'écouler directement alors qu'une autre est retenue. La géométrie permet aussi de ne pas freiner trop les particules retenues et continue à les diriger vers la bouche.

On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 5,2m/s

Figure 71 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 3 à t1



Par contre la forme droite oriente les particules vers la paroi opposée. Elles viennent donc frapper et cela crée des turbulences. On observe même une vague qui nuit à l'écoulement global.

La décharge se fait en $1,6 t_{ref}$

Figure 72 : Décharge de 20kg de maïs dans la double chute 3 à t2

On constate que trop peu de matière s'écoule directement vers la sortie du au fait qu'il faut donner aux particules de la vitesse, mais dans la direction de la bouche de remplissage. Avec une chute droite les particules frappent rapidement la paroi opposée d'où des turbulences et la vague qui est gênante.

Il faut peut probablement penser à un système hybride parabolique sur la fin pour orienter les particules sur la sortie et droit au début pour freiner les particules suffisamment, mais moins que dans la chute standard.

II.4 CHUTE SEMI-PARABOLIQUE

Cette chute contient en fait deux parties droites inclinées différemment (voir figure 73). Une partie très inclinée sur la fin pour orienter les particules vers la bouche de sortie. Une partie moins inclinée au début pour ralentir la chute, mais pour aussi freiner moins les particules dans la partie supérieure que dans la chute standard.

On retrouve les essais de décharge sur les figures 74 et 75.

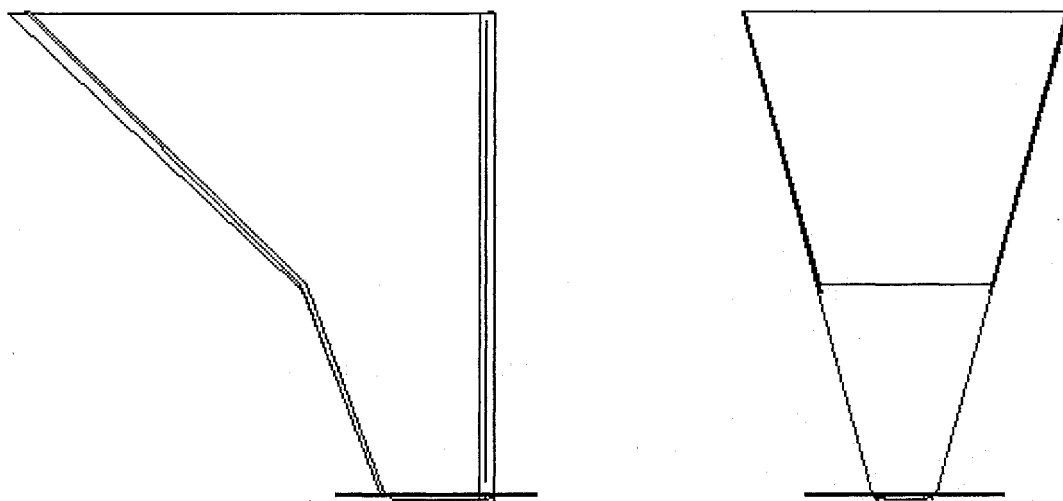


Figure 73 : Géométrie de la chute semi-parabolique pour les essais de décharge

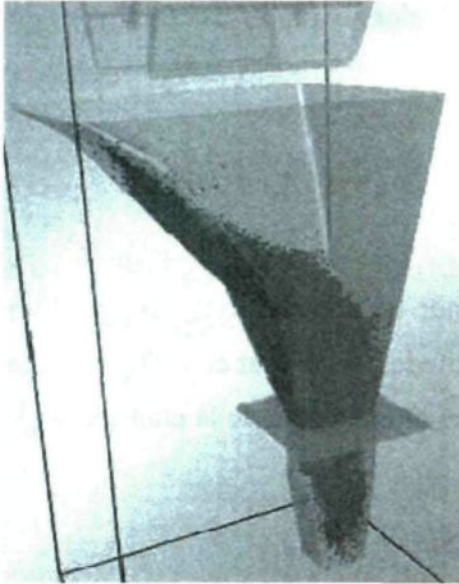


Figure 74 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute semi-parabolique à t1

Une fois de plus on peut séparer l'écoulement en deux parties. Dans la première partie une fois de plus les particules sont dirigées efficacement vers la sortie. L'inclinaison finale permet de diriger encore plus de matière rapidement.

Dans la partie haute la matière est plus retenue.

On relève une vitesse moyenne des premiers 20%
= 5,3m/s



Figure 75 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute semi-parabolique à t2

La décharge est efficace mais la cassure fait "sauter" les particules qui viennent toujours frapper sur la paroi opposée mais moins que dans la chute droite. La matière est concentrée sur la paroi du fond, on est donc moins uniforme.

La décharge se fait en $1,05 t_{ref}$

On arrive quasiment au même temps que la chute standard, cependant il y a un phénomène gênant : comme on a une grosse cassure entre les deux formes de la chute les particules sautent et sont projetées sur la paroi opposée ce qui crée des turbulences. On n'a donc pas d'intérêt à opter pour une chute de ce type qui est en fait moins optimisée que la

standard et dont la vitesse moyenne est plus faible. On va alors explorer d'autres types de solutions.

II.5 CHUTE CYCLOÏDE

D'après la littérature, la forme la plus adaptée pour qu'une particule partant d'un point A ayant une altitude h rejoigne un point B à une altitude $h-x$, le tout en accumulant le maximum de vitesse, est une cycloïde. La figure 76 donne alors le plan de la chute réalisée d'après ces considérations.

La figure 77 montre le résultat d'un essai de décharge.

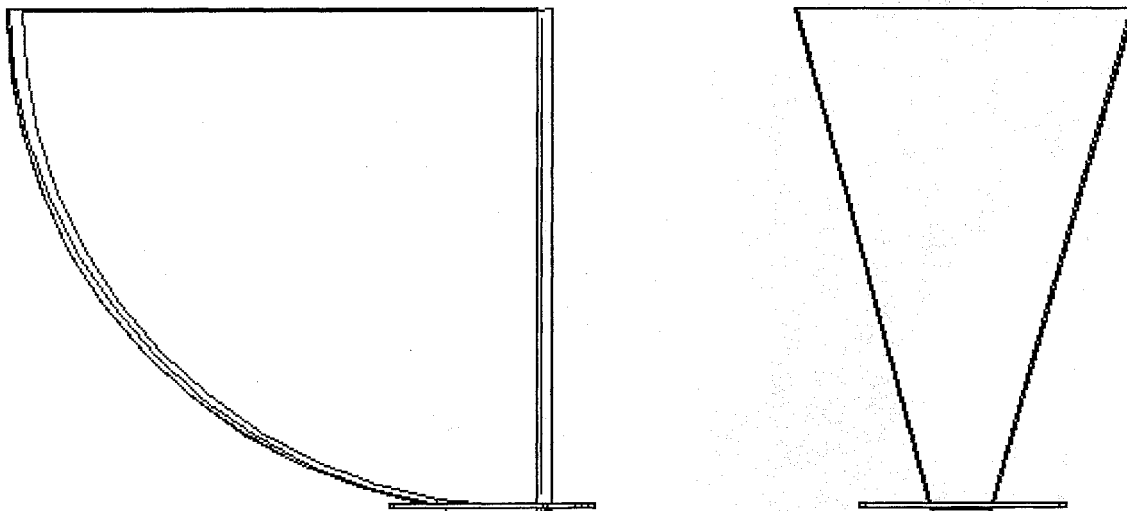


Figure 76 : Géométrie de la chute cycloïde pour les essais de décharge



Comme on pouvait s'en douter d'une part les particules ne sont pas dirigées vers l'ouverture d'où les turbulences. La matière n'accumule pas aussi de vitesse et reste bloquée dans la cuillère. Ce n'est donc pas du tout adapté à notre application.

On relève une vitesse moyenne des premiers 20%
= 4,8m/s

Figure 77 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute cycloïde à un instant t

La parabole orientée dans l'autre sens ne donne pas de résultats satisfaisants. On n'arrive pas à décharger tout le produit qui reste coincé dans la partie plate sur la fin. La vitesse est aussi grandement diminuée ce qui nuit à l'ensemble. On ne peut même pas donner de temps de décharge, car la matière n'est pas entièrement déchargée.

II.6 CHUTE TUBE

L'idée vient d'un développeur de l'entreprise qui est de diriger le produit vers la bouche de remplissage plus haut pour éviter de perdre la vitesse accumulée lors de la chute. Les particules auraient donc le temps de prendre de la vitesse après leur orientation. La figure 78 est un plan de la chute réalisé selon ces considérations.

La figure 79 est l'affichage d'un résultat de décharge.

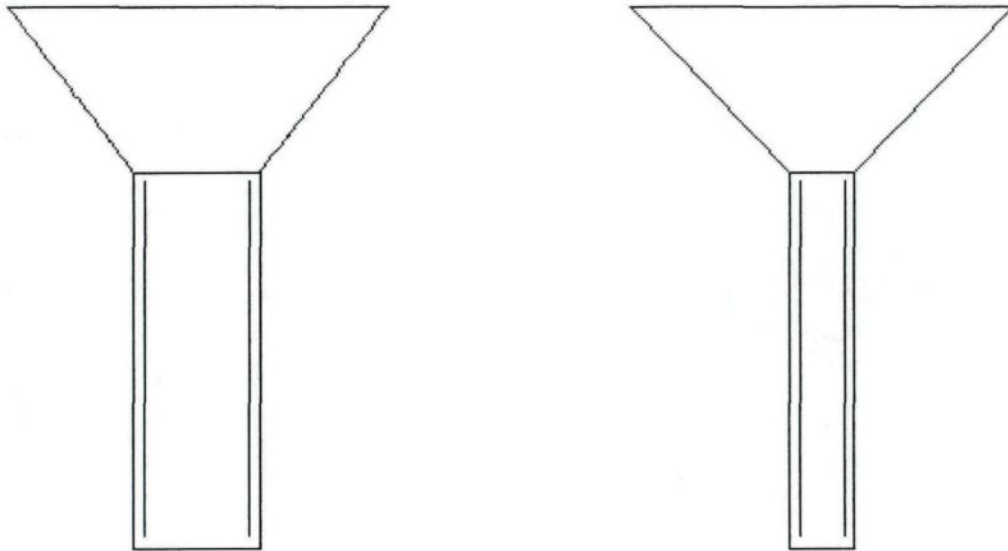
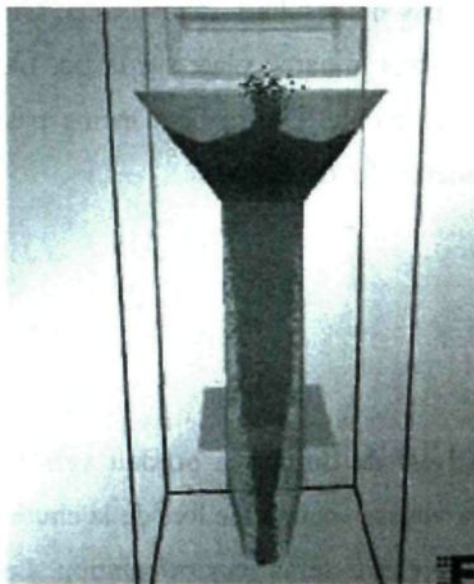


Figure 78 : Géométrie de la chute tubulaire pour les essais de décharge



On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 5,4m/s. On perd alors globalement de la vitesse et on remarque que les premières particules n'arrivent pas en grand nombre (le flux est fin). De plus, le haut de la chute circulaire est petit et fait bouchonner rapidement la matière qui converge vite et en quantité vers la bouche de remplissage.

Figure 79 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute tube à un instant t

Le temps de chute est de $1,55 t_{ref}$. Il ne semble finalement pas intéressant de continuer vers une forme comme celle-ci, car la vitesse est fortement diminuée au niveau de la sortie et le bouchonnage est amplifié en plaçant ce que l'on peut appeler l'entonnoir plus haut.

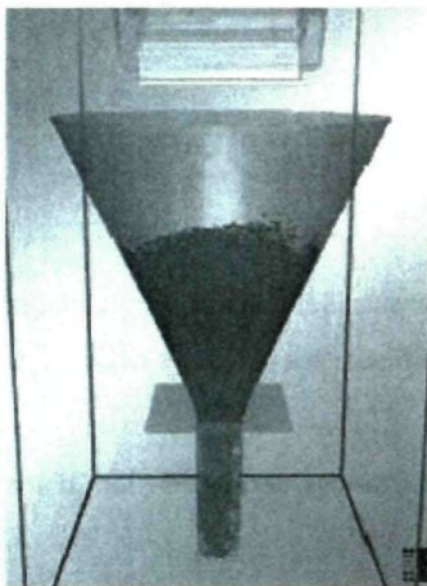
II.7 CHUTE CONIQUE

On a ici décidé de se rapprocher de la forme employée dans les silos avec une chute circulaire permettant de freiner la matière dans plusieurs directions tout en la dirigeant vers la sortie. On a testé deux orientations différentes de la chute à 90° . La plus performante (présentée sur la figure 80) est celle ayant le côté de la bouche aligné avec la balance.

Les figures 81 et 82 sont des impressions des essais de décharge.



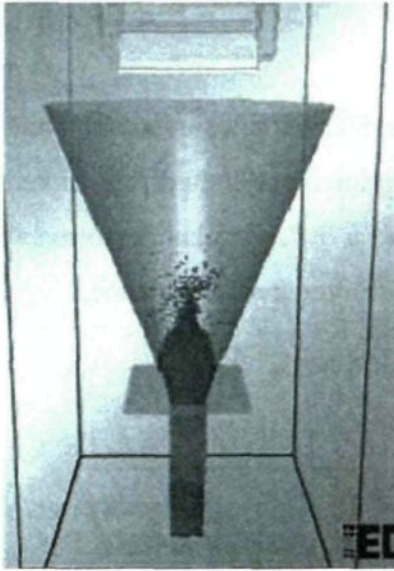
Figure 80 : Géométrie de la chute conique pour les essais de décharge



En première impression les particules sont dirigées efficacement vers la sortie. On cumule les effets positifs de la balance alignée sur l'axe de la bouche de remplissage et les murs dirigeant la matière vers la sortie pour évacuer le tout le plus rapidement possible.

On relève une vitesse moyenne des premiers 20% = 6,2m/s, la plus haute enregistrée.

Figure 81 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique à t1



L'inconvénient apparaît à la fin de l'écoulement : les particules se rencontrent et forment une vague. On remarque que même si la vitesse est importante et la matière est vite dirigée sur la sortie seulement une dernière petite quantité pose problème.

La décharge se fait de plus malgré la vague en $1,5 t_{ref}$

Figure 82 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique à t_2

On a donc une chute potentiellement performante, car fournissant une vitesse de sortie des premières particules élevée et dirigeant rapidement la matière vers la sortie en la freinant légèrement, mais sur toute sa surface.

Pour le temps de décharge, c'est en fait la vague qui se forme lorsque la matière se rencontre qui fait baisser dramatiquement le temps de sortie. Il serait par contre intéressant d'arriver à éliminer cette vague et voir si on arrive à bien faire baisser le temps de chute de cette manière.

II.8 CHUTE CONIQUE AVEC DÉFLECTEUR

On utilise la même chute qu'auparavant, mais différents déflecteurs seront placés pour tenter de diminuer la vague. Les figures 83, 84, 85 et 86 sont les plans des déflecteurs utilisés.

Les figures 87 et 88 sont deux exemples d'utilisation de ces déflecteurs lors d'une décharge.

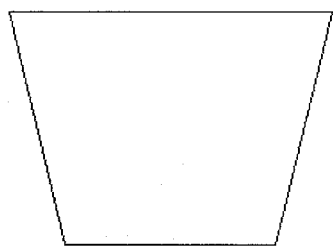


Figure 84 : Géométrie du déflecteur 1
(déflecteur tube troué)



Figure 83 : Géométrie du déflecteur 2
(déflecteur circulaire troué)

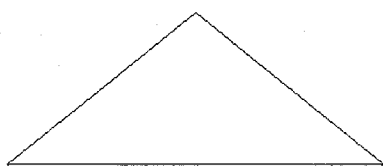


Figure 85 : Géométrie du déflecteur 3
(déflecteur conique)

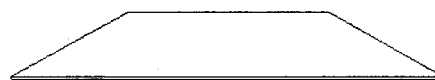


Figure 86 : Géométrie du déflecteur 4
(déflecteur conique troué)

Plusieurs essais ont été réalisés avec les différents déflecteurs. On a essayé de varier l'ouverture, la hauteur à laquelle on les place ainsi que leur forme pour optimiser l'écoulement. On va donner différents exemples de simulation.

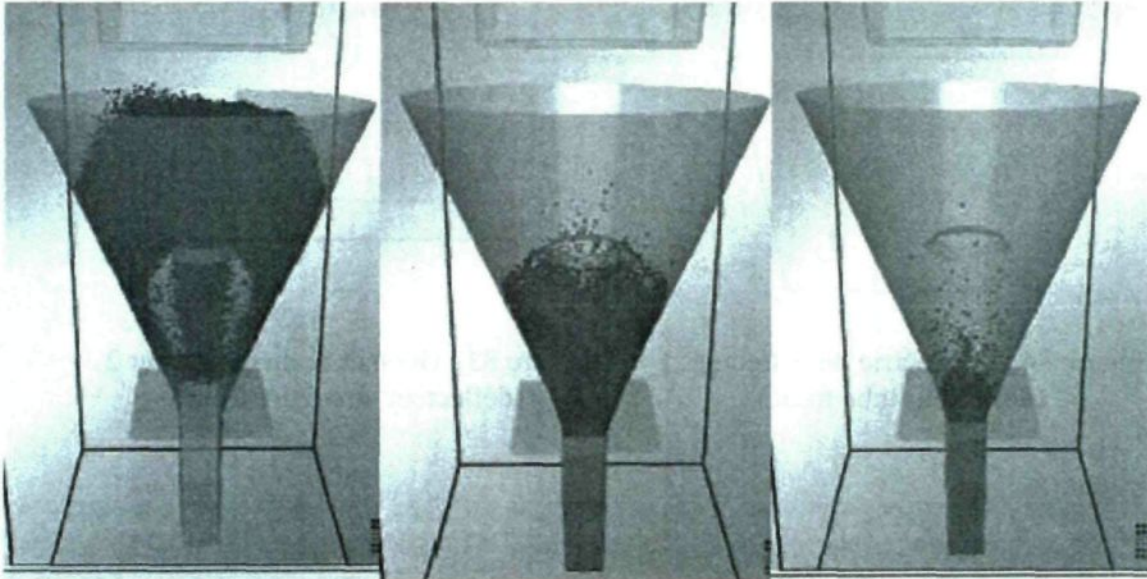


Figure 87 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique avec un déflecteur circulaire troué des instants t_1 , t_2 et t_3

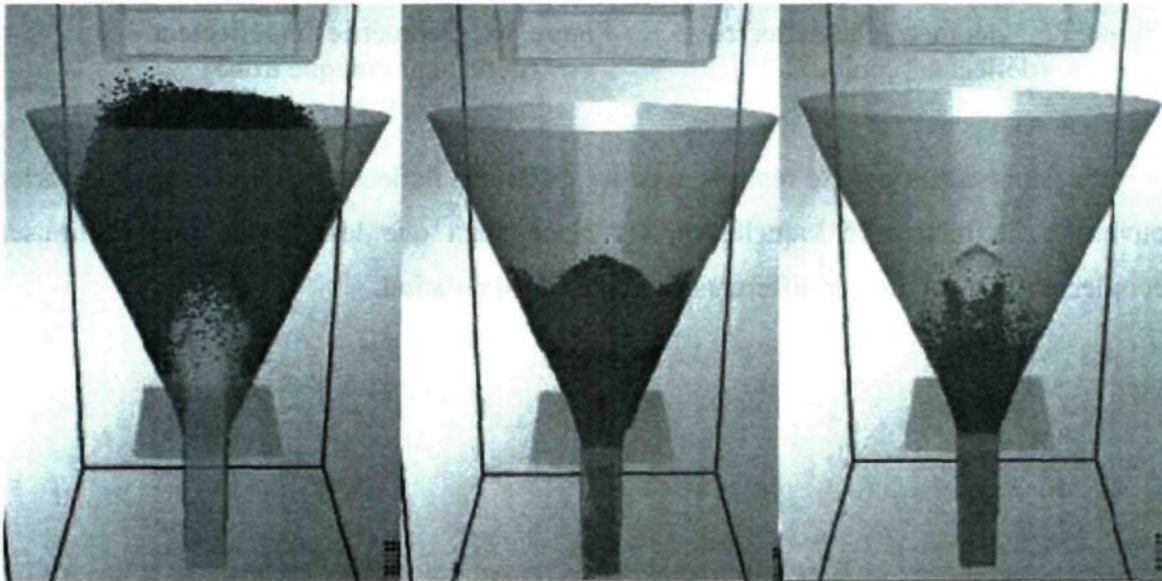


Figure 88 : Décharge de 20kg de maïs dans la chute conique avec un déflecteur conique à des instants t_1 , t_2 et t_3

Comme on pourra le constater dans l'ensemble l'amélioration est bonne, cependant aucune simulation ne donnera un temps de décharge en dessous de $1,25t_{ref}$. Cette configuration reste sinon intéressante dans le comportement de la matière et dans la vitesse d'entrée des premières particules qui reste à 6,2m/s mais il ne semble pas que ce soit cette forme qui nous dirige vers une décharge plus rapide que la décharge dans la chute standard.

ANNEXE III

LES ANALYSES DES TESTS DE PRÉCISION

On présente ici les analyses sur l'amélioration de performance des portes. Comme on pourra le voir, il est difficile de généraliser en se basant sur toutes les données de tests. C'est pourquoi nos conclusions se basent sur des regroupements de données par cadence ou par matériau. Néanmoins, voici pour information les tableaux avec les améliorations de précision en pourcentage permettant de comparer les résultats de manière plus usuelle.

Tableau 16 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard pour le maïs

	Cadences de pesage				
	2,5s	2s	1,5s	1s	0,75s
Standard					
Standard + murs	17%	-14%	10%	20%	26%
Courbe	47%	-2%	-16%	6%	4%
Courbe + murs	54%	7%	-8%	14%	22%
Double	34%	-17%	-8%	19%	-6%

Tableau 17 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard pour les granules de bois

	Cadences de pesage				
	2,5s	2s	1,5s	1s	0,75s
Standard					
Standard + murs	23%	10%	-3%	37%	-6%
Courbe	41%	-18%	-27%	10%	-16%
Courbe + murs	46%	19%	3%	19%	NA
Double	33%	3%	3%	-2%	-9%

**Tableau 18 : Performances des portes testées par rapport à la porte standard
pour les billes de plastique**

	Cadences de pesage				
	2,5s	2s	1,5s	1s	0,75s
Standard					
Standard + murs	-3%	41%	40%	12%	-21%
Courbe	31%	23%	10%	-21%	-46
Courbe + murs	28%	23%	38%	6%	-18%
Double	21%	18%	0%	-8%	-21%