

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

BIMECA PROCESS



*Mémoire de projet de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique*

Etude et dimensionnement d'un système de transport pneumatique de matière

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021

Réalisé par:

Ghiles TOUAZI

Sous la direction de:

M. Hocine BENNOUR

MAA, ENP

M. Mustapha AMZAL

Ingénieur, BIMECA PROCESS

M. Amokrane Mohammed MAHDI

MAA, ENP

Composition du jury:

Président	M. Djamel SAIDI	MCB, ENP
Promoteur	M. Hocine BENNOUR	MAA, ENP
Co-promoteur	M. Mustapha AMZAL	Ingénieur, BIMECA PROCESS
Co- promoteur	M. Mohammed Amokrane MAHDI	MAA, ENP
Examineur	M. Abdelhamid BOUHELAL	MCB, ENP
Invité	M. Abdallah KAIM	Gérant, BIMECA PROCESS

ENP 2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

BIMECA PROCESS



*Mémoire de projet de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique*

Etude et dimensionnement d'un système de transport pneumatique de matière

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021

Réalisé par:

Ghiles TOUAZI

Sous la direction de:

M. Hocine BENNOUR

MAA, ENP

M. Mustapha AMZAL

Ingénieur, BIMECA PROCESS

M. Amokrane Mohammed MAHDI

MAA, ENP

Composition du jury:

Président	M. Djamel SAIDI	MCB, ENP
Promoteur	M. Hocine BENNOUR	MAA, ENP
Co-promoteur	M. Mustapha AMZAL	Ingénieur, BIMECA PROCESS
Co-promoteur	M. Mohammed Amokrane MAHDI	MAA, ENP
Examineur	M. Abdelhamid BOUHELAL	MCB, ENP
Invité	M. Abdallah KAIM	Gérant, BIMECA PROCESS

ENP 2021

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحديد أبعاد نظام نقل المواد السائبة الهوائية. للقيام بذلك ، تم تطوير نموذج رياضي يعتمد على ميكانيكا الحالة الصلبة ونهج متساوي الحرارة للتحويلات الديناميكية الحرارية، ترجم هذا الأخير الى برنامج ماتلاب لإجراء تحليل حدودي والخروج بنتائج تجعل من الممكن تحديد حجم نظام يتم شرح بياناته في دفتر الشروط. بمجرد تحديد الأبعاد ، يتم تصميم الجهاز باستخدام برنامج صوليدوركس ويتم تطبيق محاكاة مقاومة هيكلية ثابتة عليه باستخدام برنامج سيمسوليد للتحقق من مقاومته للقوى التي سيتعرض لها أثناء التشغيل.

الكلمات الدالة: النقل الهوائي، الحالة المقلصة، الحالة الممددة، عامل الشحن الكتلي، حامل النقل، هواء الضغط العالي، المحاكاة

Abstract

The objective of this work is to design a pneumatic transport system for bulk material. To do this, a mathematical model based on solid mechanics and the isothermal approach to thermodynamic transformations was developed and then translated into MATLAB code in order to carry out a parametric analysis and to come out with results allowing the dimensioning of a system whose data are explained in a specification. Once the dimensions have been decided, the equipment is designed with SOLIDWORKS software and a static structural resistance simulation is applied with SIMSOLID software to check its resistance to the forces to which it will be subjected during operation.

Key words: Pneumatic conveying, dilute phase, dense phase, solid load ratio transport lock, compressed air, simulation.

Résumé

L'Objectif de ce travail consiste à dimensionner un système de transport pneumatique de matière en vrac. Pour ce faire, un modèle mathématique basé sur la mécanique du solide et l'approche isotherme des transformations thermodynamique a été développé puis traduit en code MATLAB pour effectuer une analyse paramétrique et sortir avec des résultats permettant de dimensionner un système dont les données sont explicitées dans un cahier des charges. Une fois les dimensions arrêtées, l'équipement est conçu avec le logiciel SOLIDWORKS et une simulation de résistance structurelle statique lui est appliquée avec le logiciel SIMSOLID pour vérifier sa résistance aux efforts auxquels il sera soumis en cours de fonctionnement.

Mots clé: Transport pneumatique, phase diluée, phase dense, rapport de charge solide, sas de transport, air comprimé, simulation.

Remerciements

Au terme de mon projet de fin d'études, je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers M. Hocine BENNOUR pour l'effort considérable qu'il a fourni et pour son soutiens et ses conseils très précieux dans le projet, je tiens à le remercier également pour sa disponibilité et pour sa patience que je trouve exemplaire.

Je tiens à remercier M. Mohammed Amokrane MAHDI pour avoir accepté de m'encadrer, pour sa disponibilité et pour ses précieux conseils dont j'ai la certitude qu'ils vont m'aider moi et l'équipe "Bimeca Process" pour la réalisation de l'équipement.

En parlant de "Bimeca Process", je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Abdallah KAIM pour m'avoir permis d'effectuer mon premier stage pratique au sein du bureau d'étude, je le remercie également pour la confiance qu'il a porté en moi et pour m'avoir permis de continuer l'aventure en effectuant le projet de fin d'études à ses cotés.

Un grand merci à M. Mustapha AMZAL pour son encadrement au sein de l'entreprise pour son soutient et ses conseils, et ce dès mon entrée à "Bimeca Process".

Mes sincères remerciements à l'ensemble de l'équipe "Bimeca Process" qui m'ont accueilli dans leurs famille, ce fut un plaisir de les côtoyer tous sans exception; Idir, Nazim, Mohamed Islah, Sari, Juba, Mohamed, Omar, sans oublier mon cher Fares avec qui j'ai tissé une certaine complicité et qui m'a beaucoup aidé dans ce projet.

Je tiens également à remercier M. Djamel SAIDI et M. Abdelhamid BOUHELAL pour m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury et d'examiner mon travail.

Ce projet n'aurai pas pu être réalisé sans les notions acquises durant mon parcours à l'ENP, je tiens ainsi à remercier l'ensemble des enseignants du département du génie mécanique, pour les cours, les TP, et les conférences qu'ils ont assuré, et pour les effort qu'ils ont fourni tout au long de mon passage au département.

Il est évident que je n'oublierai pas mes chères camarades auprès desquels j'ai passé d'agréables moments, je leurs souhaite beaucoup de réussite dans leurs projets futur.

Enfin je tiens à dire que je dois beaucoup aux soutiens des membres de ma famille et aux efforts fournis par mes chers parents dont j'espère les rendre fiers à partir de ce modeste travail que je leurs dédie.

Table des matières

Liste des figures:

Liste des Tableaux:

Nomenclature:

Introduction générale: 12

Chapitre 1: Généralités sur les systèmes de transport pneumatique, le système de transport en phase diluée 14

1.1 Introduction.....14

1.2 Paramètres de définitions d'un système de transport pneumatique14

1.2.1 Compression/aspiration14

1.2.2 Système ouvert/fermé15

1.2.3 Ecoulement continu/par lots.....16

1.2.4 Système conventionnel/innovant.....17

1.2.5 Rapport de charge solide (\emptyset).....17

1.2.6 Transport en phase diluée/phase dense17

1.3Le système de transport pneumatique en phase diluée.....17

1.3.1 Descriptif du procédé.....17

1.3.2 Modèle mathématique pour le transport pneumatique en phase diluée:20

1.4 Conclusion :27

Chapitre 2: Le système de transport pneumatique en phase dense..... 28

2.1 Introduction:28

2.2 Notions sur le transport pneumatique en phase dense28

2.2.1 Description du procédé :28

2.2.2 Description d'un cycle de fonctionnement et introduction des grandeurs intervenant dans l'analyse mathématique du fonctionnement du système:31

2.3 Conclusion :42

Chapitre 3 : Analyse paramétrique du système, résultats et interprétations 43

3.1 Introduction.....43

3.2 Procédure de calcul :44

3.2.1 Déclaration des données :	44
3.2.2 Calculs préliminaires:	44
3.2.3 Calcul du premier élément (Lots d'air et de matière à la sortie de la conduite):	44
3.2.4 Calcul des éléments restants consécutivement:	45
3.3 Présentation des résultats et leur interprétation.....	46
3.3 Conclusion:	51
Chapitre 4: Conception de l'équipement	52
4.1 Introduction.....	52
4.2 Analyse fonctionnelle.....	52
4.2.1 Les besoins du client:.....	53
4.2.2Prévision des phases du cycle de vie du produit:	53
4.2.3 Diagramme de Pieuvre:	53
4.3 Conception:.....	57
4.3.1 Sas de transport:	57
4.3.2 Conduite de transport:.....	63
4.4 Conclusion:	63
Conclusion générale:	64
Bibliographie:	66

Liste des figures:

Figure 1.1	Transport par compression	14
Figure 1.2	Transport par aspiration	15
Figure 1.3	système fermé	5
Figure 1.4	Système ouvert	16
Figure 1.5	Débit de matière en fonction du temps pour un système de transport par lots	16
Figure 1.6	Transport pneumatique en phase diluée régime permanent	18
Figure 1.7	Système de dosage par sas alvéolaire	18
Figure 1.8	Système de dosage par vis sans fin	19
Figure 1.9	Système de dosage par venturi.	19
Figure 1.10	Transport pneumatique en phase diluée par lots	20
Figure 1.11	Diagramme de Moody.	24
Figure 2.1	Transport en phase dense par lots avec sas de transport	27
Figure 2.2	Transport en phase dense en continu avec deux sas de transport	29
Figure 2.3	Sas de transport	30
Figure 2.4	Composants du sas de transport	30

Figure 2.5	Bilan des forces sur un lot (i) situé dans la partie horizontale de la conduite de transport	37
Figure 2.6	Bilan des forces sur un lot (i) situé en partie à l'horizontale et en partie à la verticale de la conduite de transport	41
Figure 2.7	Evolution de la pression d'injection d'air P_a du nombre de lots (n) et de leurs dimensions (D et L_s) en fonction de α pour $\tau = 2$; $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$ et $\beta = 850$	41
Figure 3.1	Evolution de la pression d'injection d'air P_a et de la pression de fin de détente P_d en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$	47
Figure 3.2	Evolution de la masse d'un lot m_a et de sa fraction ε par rapport à la masse d'air injectée par cycle, en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$	48
Figure 3.3	Evolution de la période d'un cycle de fonctionnement en fonction de τ pour différentes valeurs de V_{sas}	49
Figure 3.4	Evolution du rapport de charge massique ϕ en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$	50
Figure 3.5	Composants d'un sas de transport	52
Figure 4.1	Diagramme de Pieuvre du dense convoyeur	55
Figure 4.2	Eléments constitutifs de la géométrie d'un sas de transport	57
Figure 4.3a	Répartitions des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 5mm d'épaisseur	60
Figure 4.3b	Répartitions des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 10mm d'épaisseur	61
Figure 4.3c	Répartition des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 15mm d'épaisseur	61
Figure 4.4	Conception 3D des éléments du sas	62
Figure 4.5	Assemblage final du dense convoyeur	63

Liste des Tableaux:

Tableau 2.1	Valeurs indicatives des coefficients d'adhérence (μ_s) et de frottement (μ_d)	38
Tableau 3.1	Valeurs de α donnant lieu à une configuration satisfaisant les contraintes opératoires du système	46
Tableau 3.2	Caractéristiques du système en fonction de α pour $\beta = 800$; $V_{sas} = 0.75 m^3$ et $\tau = 2$	47
Tableau 3.3	Pressions et masses d'air dans le sas (m_{ing}) et dans les lots (m_a) pour différentes valeurs de β et pour $\tau = 2$; $V_{sas} = 0.75 m^3$	48
Tableau 4.1	Prévision des phases du cycle de vie du produit	54
Tableau 4.2	Les fonctions de service	54
Tableau 4.3	Cahier des charges fonctionnel du dense convoyeur	57
Tableau 4.4	Propriétés de l'acier S235	60
Tableau 4.5	Paramètres de la simulation	60
Tableau 4.6	Résultats de la simulation pour différentes épaisseurs de la tôle	62

Nomenclature:

L_H	Longueur horizontale de la conduite	[m]
L_V	Longueur verticale de la conduite	[m]
L	Longueur totale de la conduite	[m]
D	Diamètre de la conduite	[m]
\emptyset	Rapport de charge solide	
\dot{m}_s	Débit massique de matière transportée	[T/h]
\dot{m}_a	Débit massique d'air	[kg/s]
v	Vitesse de l'écoulement	[m/s]
a	Vitesse du son à l'intérieur de la conduite de transport	[m/s]
p_{atm}	Pression atmosphérique	[Pa]
Δp	Pertes de charge le long de la conduite de transport	[Pa]
Δp_a	Pertes de charges en considérant l'air seul	[Pa]
Δp_s	Pertes de charges du à l'ajout de la matière	[Pa]
Δp_{acc}	Pertes de charges du à l'accélération des particules de matière	[Pa]
Δp_{lin}	Pertes de charges linéaires	[Pa]
Δp_{sin}	Pertes de charges singulières	[Pa]
f	Coefficient de frottement de l'air	
Re	Nombre de Reynolds	
μ	Viscosité dynamique de l'air	[Kg/ms]
ρ_a	Masse volumique de l'air	[Kg/m ³]
ρ_s	Masse volumique de la matière	[Kg/m ³]
$\frac{\varepsilon}{D}$	Rugosité relative	
K_i	Coefficient de pertes de charges singulière	
ξ	Facteur de pertes de charges additionnel	
Q	Débit volumique dans la conduite de transport	[m ³ /s]
S	Section de la conduite de transport	[m ²]

v_{min}	Vitesse minimale de fluidisation	[m/s]
x_a	Fraction massique de l'air	
d_s	Densité de la matière solide	
d_a	Densité de l'air	
k_s	Coefficient de sécurité	
P_a	Pression de l'air dans le sas avant la détente (pression de service)	[Pa]
P_d	Pression de l'air dans le sas après la détente	[Pa]
V_a	Volume de l'air dans le sas avant la détente	[m ³]
V_{sas}	Volume du sas	[m ³]
m_s	Masse de la matière dans le sas	[Kg]
m_a	Masse accompagnant un lot de solide	[Kg]
$m_{a,inj}$	Masse de l'air injectée dans le sas	
T	Période	[s]
t_r	Temps de remplissage	[s]
F_i	La force de pression exercée par l'air en amont du lot de matière d'indice (i)	[N]
F_{i-1}	La force de pression exercée par l'air en amont du lot de matière d'indice (i)	[N]
C_x	Force de frottement entre le lot de matière et la paroi interne de la conduite	[N]
μ_s	Coefficient de frottement statique	
L_{ai}	Longueur des lots d'air	[m]
L	Longueur du lot de matière transportée	[m]
n	Nombre de lots	
t_{ra}	Temps de remplissage du sas en air	[s]
t_{rs}	Temps de remplissage du sas en matière	[s]
v_o	Vitesse d'écoulement de la matière à la sortie du silo de stockage	[m/s]
v_i	Vitesse d'écoulement de la matière à l'entrée du silo de stockage	[m/s]
S_i	Section de la partie cylindrique du silo de stockage	[m ²]
S_o	Section de la sortie du silo de stockage	[m ²]

h	Hauteur du silo de stockage	[m]
\dot{m}_{sr}	Débit massique de remplissage du sas en matière	[Kg/s]
V_s	Volume de la matière introduite dans le sas	[m ³]
V_{cone}	Volume du fond conique	[m ³]
V_{cyl}	Volume de la virole (partie cylindrique du sas)	[m ³]
h_{cyl}	Hauteur de la virole	[m]
h_{cone}	Hauteur du cône	[m]
d	Diamètre du fond bombé	[m]

Introduction générale:

Le transport de matériaux en vrac a depuis longtemps suscité l'intérêt de nombreux secteurs industriels, notamment celui des matériaux de construction. Divers procédés ont été mis au point pour répondre à ce besoin. En plus des solutions classiques telles que les vis d'Archimède et les tapis roulants, le convoyage par voie pneumatique des matériaux granuleux connaît une popularité de plus en plus grandissante et une demande croissante de la part des industriels, cela est dû à leurs bonnes performances en terme de distance et de débit de convoyage, associées à la simplicité de leurs fabrication comparé aux procédés classiques.[1]

En plus des travaux de recherche traitant sur l'étude de tels équipements, les grands constructeurs des systèmes de transport pneumatique se basent principalement sur l'empirisme et les résultats expérimentaux développés par leurs propres bancs d'essai pour le dimensionnement [2]. D'autres méthodes empiriques développées par des chercheurs sont disponibles dans certaines références [1], mais ces dernières demeurent insuffisantes pour dimensionner complètement le système.

Le recours aux méthodes expérimentales, nécessite des moyens financiers importants nécessaires pour la fabrication et l'exploitation des bancs d'essai, il est donc intéressant de développer des modèles analytiques pour le dimensionnement des systèmes de convoyage pneumatique, tel est le principal objet de la présente étude.

En collaboration avec la société "Bimeca Process" qui a pour objectif d'acquérir sur le long terme une forte maîtrise sur le sujet dans le but de produire des convoyeurs pneumatiques pour répondre au marché national, un protocole de dimensionnement présenté plus loin dans ce rapport a été mis en place.

On traitera dans le premier chapitre sur les systèmes de transport pneumatique en phase diluée, une configuration dans laquelle une quantité importante d'air est utilisée pour transporter la matière poudreuse qui se retrouve en suspension dans l'air.

L'établissement d'un protocole de dimensionnement des systèmes de transport pneumatique en phase dense, dans lesquels une quantité d'air utilisée pour le transport des granules est plus faible que dans le transport en phase diluée, fera l'objet du second chapitre. Cette configuration sera traitée plus en détail que le transport en phase diluée suite à l'intérêt que "BimecaProcess" porté à ce procédé en raison de sa capacité de transporter des matériaux

abrasifs. L'approche proposée est basée principalement sur la mécanique des solides indéformables de Newton et du caractère isotherme des transformations thermodynamiques de l'air comprimé consommé par le système.

Dans le troisième chapitre, un algorithme de calcul en langage MATLAB exploitant le modèle de calcul développé dans le second chapitre, est programmé pour effectuer une analyse paramétrique du système, dont les résultats seront ensuite appliqués au quatrième chapitre pour le dimensionnement d'un cas pratique explicité dans le cahier des charges fourni par "Bimeca Process". Dans le même chapitre, on a procédé à la conception 3D des éléments du système à l'aide du logiciel SOLIDWORKS, suivie de simulations de résistance statiques avec le logiciel SIMSOLID, effectuées pour s'assurer de la capacité de l'équipement à résister aux efforts auxquels il sera soumis durant son exploitation.

Chapitre 1: Généralités sur les systèmes de transport pneumatique, le système de transport en phase diluée

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons définir les différentes configurations des systèmes de transport pneumatique qu'on retrouve dans la pratique, ces dernières prennent en considération l'emplacement du compresseur (ou aspirateur), le circuit d'air, le régime de transport, le rapport de charge solide et la phase de la matière transportée.

On abordera également, pour le cas du transport en phase diluée, la question du dimensionnement des équipements constituant le système et nous exposerons l'ensemble des équations nécessaires pour procéder à ce dimensionnement.

1.2 Paramètres de définitions d'un système de transport pneumatique

Les principaux paramètres auxquels les constructeurs se réfèrent pour la conception d'un système de transport pneumatique sont les suivants [1]:

1.2.1 Compression/aspiration

Il est possible d'introduire l'air comprimé à l'entrée (compresseur ou ventilateur) de la conduite (Figure 1.1) ou bien de placer un aspirateur à la sortie de la conduite (en aval du silo de réception), afin de créer la dépression nécessaire dans ce point pour provoquer le mouvement des particules de la matière de transport(Figure 1.2), la première option est la plus courante dans la pratique car la seconde présente un risque d'usure de l'aspirateur par les particules qui restent dans l'air à la sortie du dégazeur, elle implique donc un coût de maintenance plus élevé.

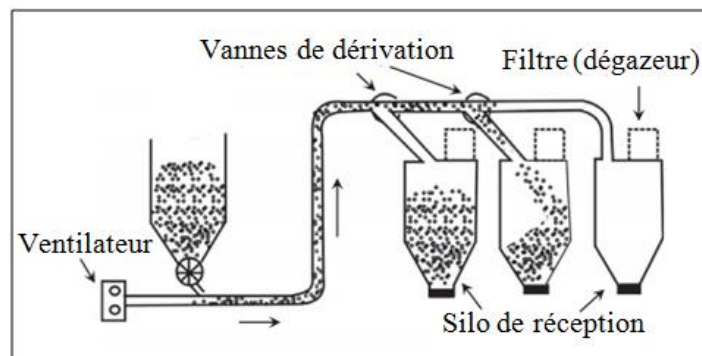


Figure 1.1: Transport par compression. [1]

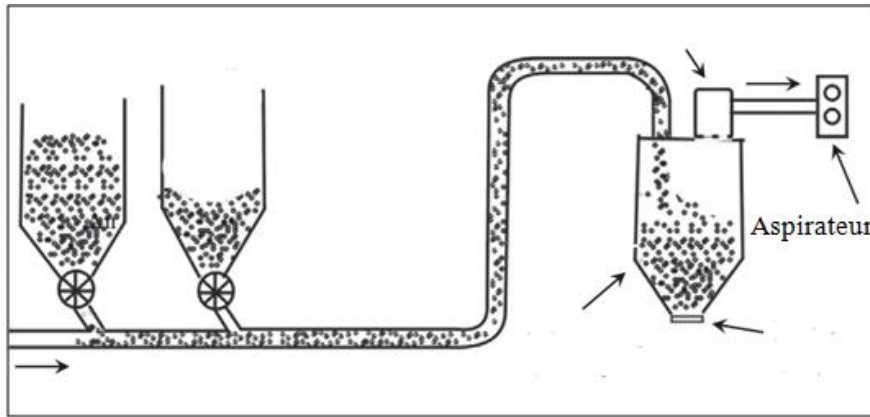


Figure 1.2: Transport par aspiration [1]

1.2.2 Système ouvert/fermé

L'air comprimé peut exécuter une boucle fermée (Figure 1.3) ou un circuit ouvert (Figure 1.4). Dans la pratique, la deuxième option est la plus utilisée car elle est plus économique. La boucle fermée nécessite l'ajout d'un filtre à particules à la sortie du silo de réception, ce qui augmente les frais d'installation et de maintenance, cette option n'est utilisée que dans le cas où la matière transportée est toxique ou nuisible pour l'environnement, pour éviter que les particules transportées par l'air comprimé n'échappent vers l'atmosphère.

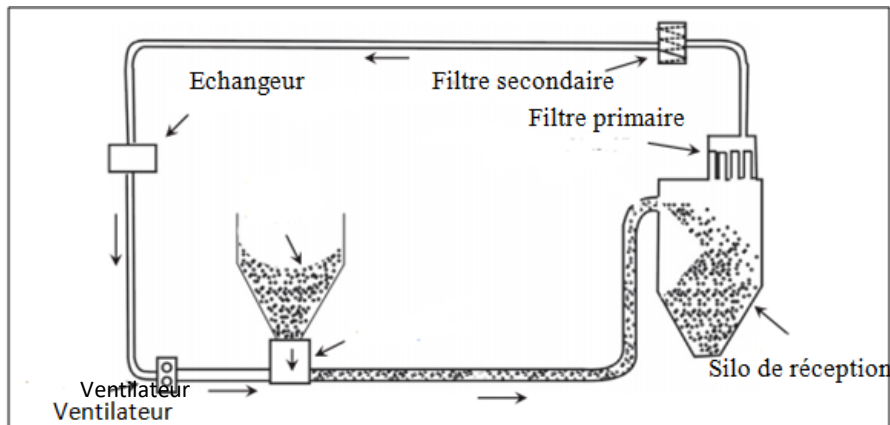


Figure 1.3: système fermé.[1]

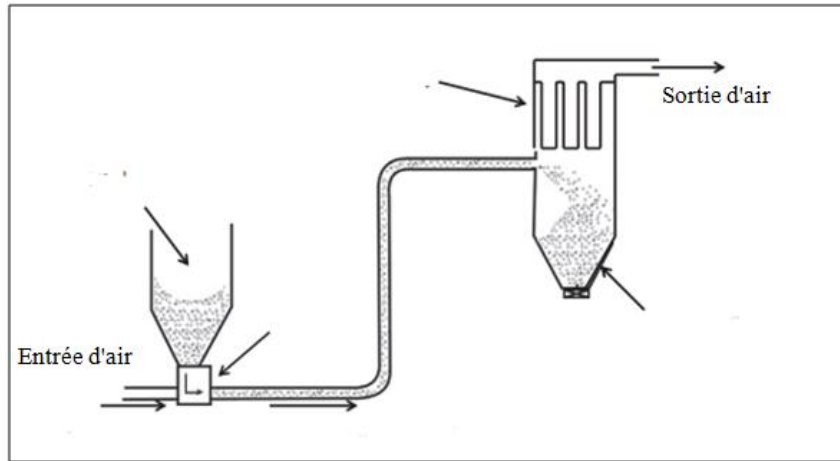


Figure 1.4: Système ouvert.[1]

1.2.3 Ecoulement continu/par lots

L'écoulement peut avoir lieu de manière continue ou discontinue. Dans ce dernier cas, il sera qualifié d'écoulement par lots, c'est à dire qu'un lot de matière est envoyé dans la conduite où il sera poussé (ou aspiré) sur une certaine distance avant de s'arrêter puis de reprendre après l'introduction d'un second lot de matière.

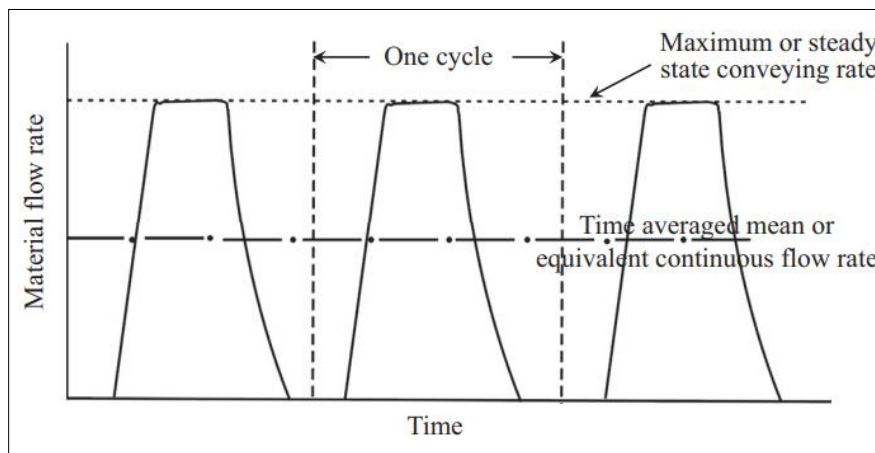


Figure 1.5: Débit de matière en fonction du temps pour un système de transport par lots.[1]

Le transport par écoulement continu permet de dimensionner le compresseur de façon à en optimiser le rendement, contrairement au transport par lots dans lequel le régime varie de façon périodique entraînant une baisse de rendement du compresseur durant certaines phases du régime. D'un autre côté, certaines matières sont friables ou abrasives et il est recommandé de les transporter "en douceur" afin de ne pas abimer le produit ou détériorer les parois internes des équipements. Dans ces conditions, on a intérêt à opter pour le transport par lots,

qui présente également l'avantage d'opérer avec un rapport de charge solide élevé (ce rapport sera défini ci-après).

1.2.4 Système conventionnel/innovant

Dans le système dit "conventionnel", la matière passe directement du silo vers la conduite, sans équipement intermédiaire, contrairement à ce qui se passe dans les systèmes dits "innovants" où un sas de transport, permettant un meilleur dosage de la matière dans le cas d'un transport par lots, est placé entre le silo et la conduite.

1.2.5 Rapport de charge solide (\emptyset)

Le rapport de charge solide (\emptyset) est défini comme étant le quotient du débit de la matière transportée \dot{m}_s , exprimé en (t/h) sur le débit d'air \dot{m}_a , exprimé en (kg/s), soit :

$$\emptyset = \frac{\dot{m}_s}{3.6 \cdot \dot{m}_a} \quad (1.1)$$

1.2.6 Transport en phase diluée/phase dense

En fonction des propriétés de la matière transportée et du rapport de charge massique, on décide si le transport doit s'effectuer en phase diluée (la matière à convoier forme un mélange homogène avec l'air), ou en phase dense (la matière à convoier forme des lots séparés de l'air utilisé pour son transport).

1.3 Le système de transport pneumatique en phase diluée

1.3.1 Descriptif du procédé

La valeur du rapport de charge massique dans un système de transport pneumatique en phase diluée ne doit pas dépasser 15, la matière solide et l'air forment alors un mélange quasi homogène qui s'écoule de manière continue à travers le système. Ce procédé est utilisé pour le transport pneumatique des matières de faible densité [1].

En général, on emploie un système conventionnel dans lequel le débit de matière est contrôlé soit au moyen d'une écluse rotative (Figure 1.7), soit à l'aide d'une vis sans fin (Figure 1.8), soit enfin en utilisant simplement un venturi (Figure 1.9). Le dispositif de contrôle de débit est situé sous le silo de stockage. L'écluse rotative (sas alvéolaire) et la vis sans fin sont entraînées chacune par un moteur électrique,

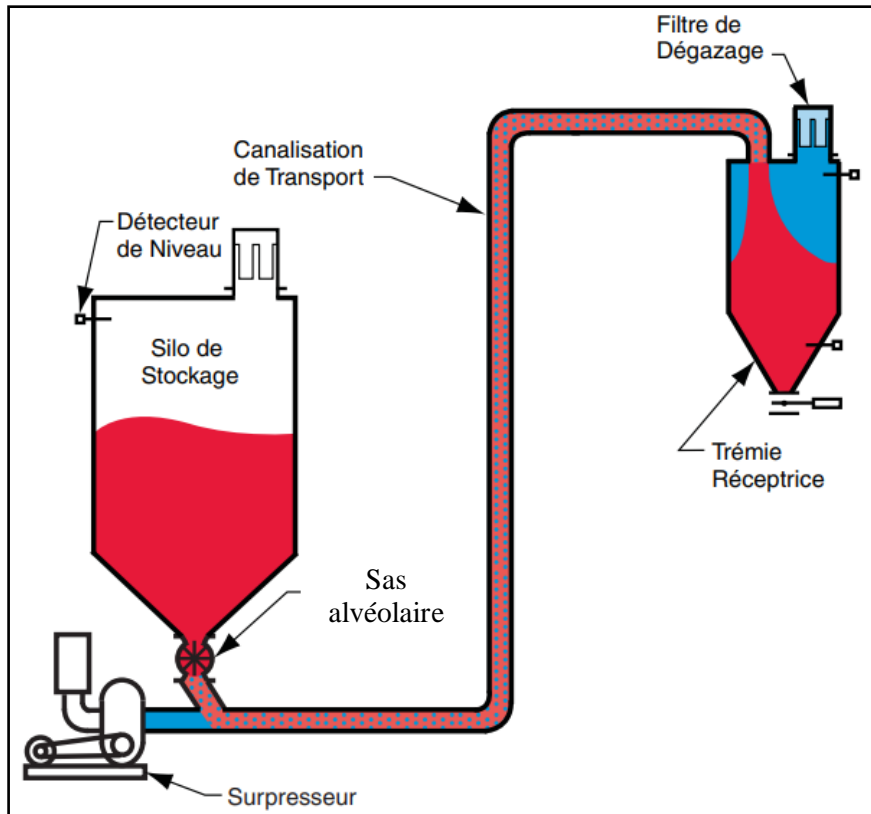


Figure 1.6: Transport pneumatique en phase diluée régime permanent.[2]

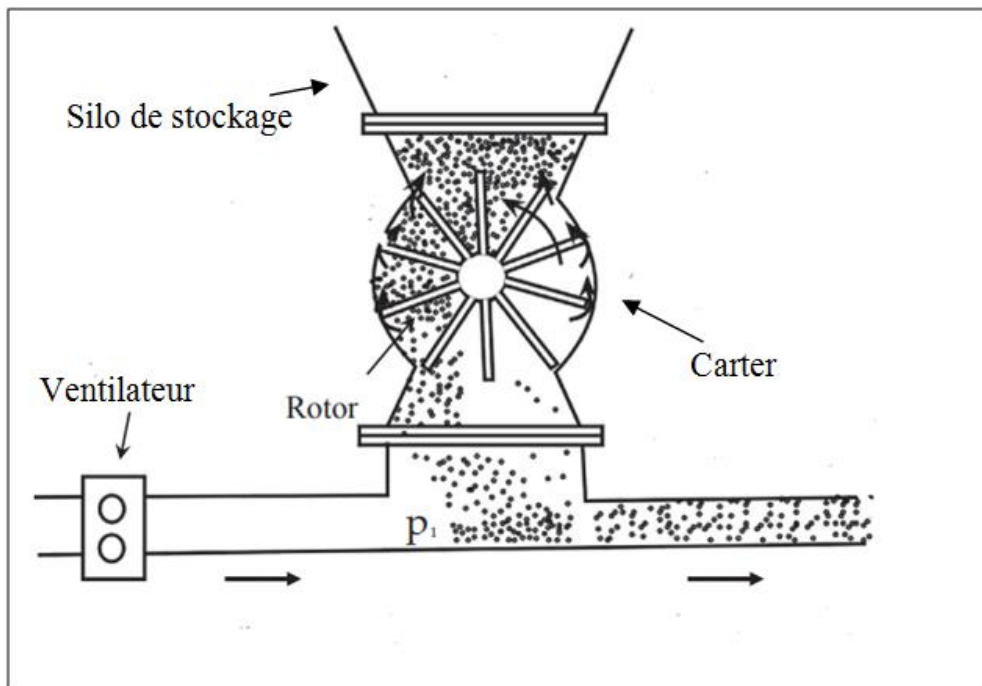


Figure 1.7: Système de dosage par sas alvéolaire. [1]

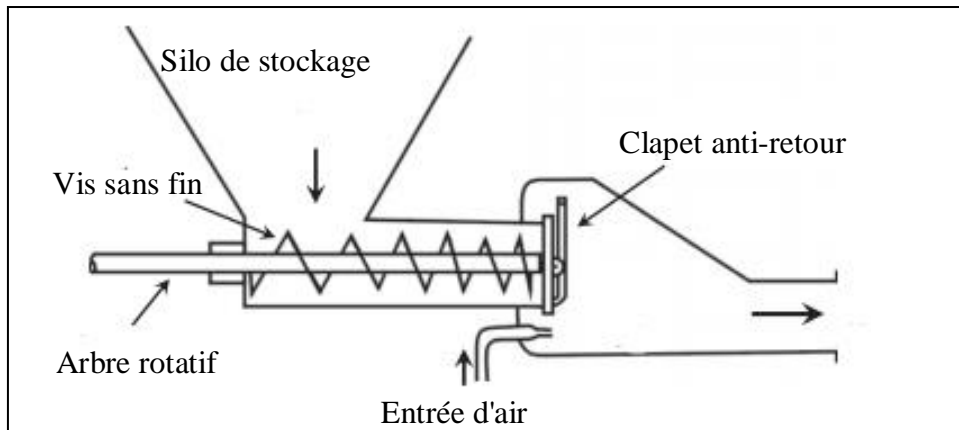


Figure 1.8: Système de dosage par vis sans fin. [1]

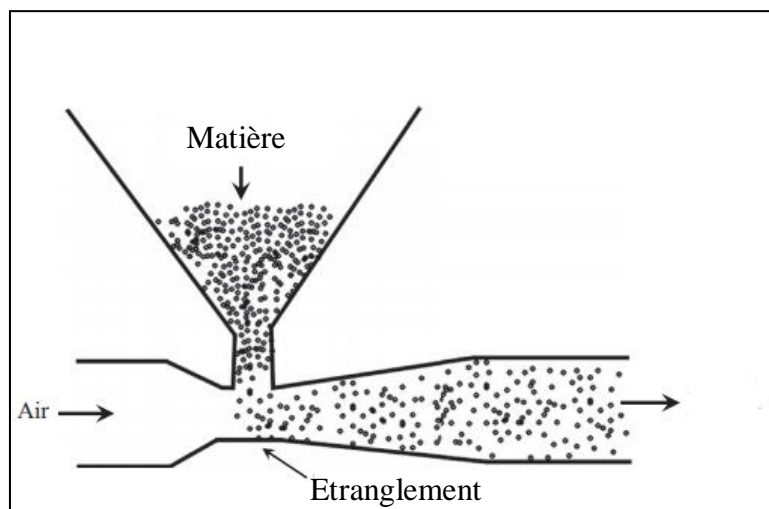


Figure 1.9: système de dosage par venturi. [1]

S'agissant des matières abrasives ou friables, il est nécessaire de les transporter avec des vitesses réduites, dans ce cas on utilise un système par lots (Figure 1.10).[3]

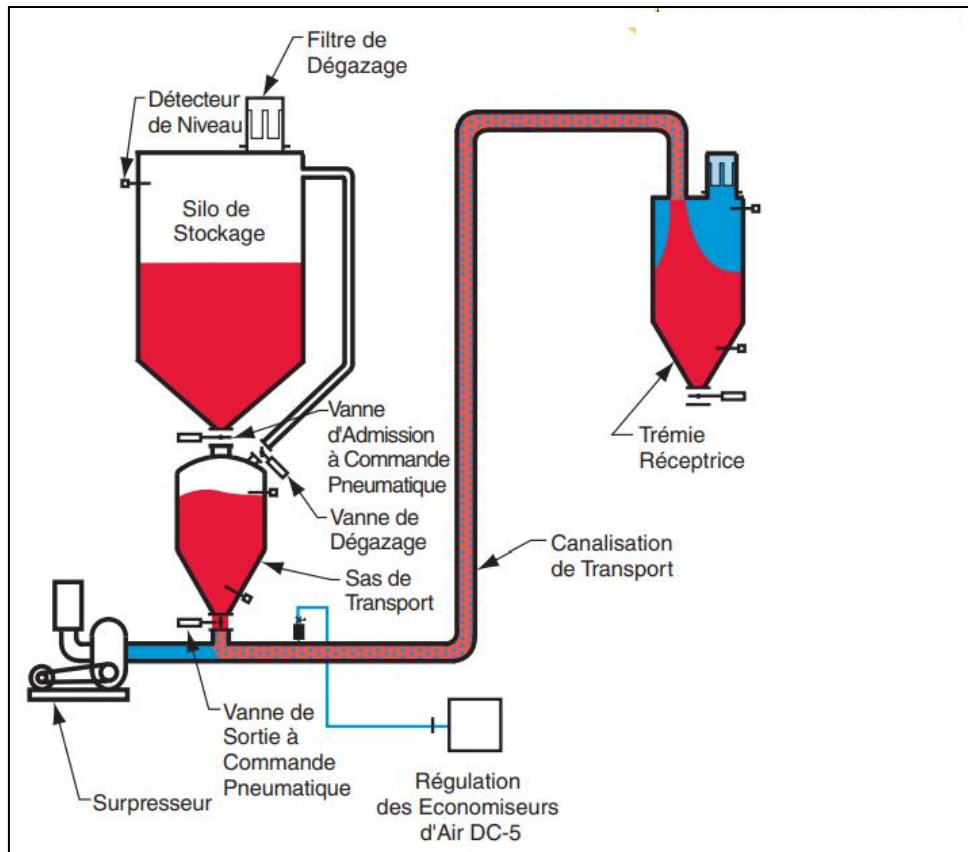


Figure 1.10: Transport pneumatique en phase diluée par lots.[3]

1.3.2 Modèle mathématique pour le transport pneumatique en phase diluée:

L'élément le plus important d'un système conventionnel de transport pneumatique en phase diluée est le compresseur, ce dernier doit délivrer un débit d'air qui tiendra compte du rapport de charge massique et de la capacité du système (débit de la matière), avec une pression suffisamment élevée pour permettre d'acheminer la matière vers le silo d'arrivée.

a) *Incompressibilité de l'air:*

D'après la dynamique des gaz, les effets de la compressibilité dans un écoulement seront négligeables tant que le nombre de Mach reste inférieur à une valeur d'environ 0.3. Rappelons ici que le nombre de Mach est défini comme le rapport entre la vitesse d'écoulement v et la vitesse locale du son a :

$$M = \frac{v}{a} \quad (1.2)$$

En assimilant à un gaz parfait la vitesse du son aura pour expression :

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (1.3)$$

avec :

γ : rapport des chaleurs spécifiques (= 1.4 pour l'air)

R: constante spécifique du gaz (=287.14 J/kg.K pour l'air)

T: température de l'air (en K)

a :vitesse du son (en m/s)

En portant l'équation (1.2) dans l'équation (1.3) on obtient:

$$v = M\sqrt{\gamma RT} \quad (1.4)$$

Pour $M=0.3$, et une température limite de transport supposée de 273K (0°C), on obtient:

$$v \approx 99.48 \text{ m/s}$$

Pour toute valeur de la température supérieure à la valeur limite ci-dessus, autrement dit pour toute valeur pratique de la température, la vitesse d'écoulement correspondant à l'apparition des effets de compressibilité sera supérieure à la valeur calculée ci-dessus. Dans la pratique, le pouvoir abrasif de la matière nous impose d'opérer avec des vitesses inférieures à environ 30 m/s. On est donc en présence de vitesses d'écoulement bien en-deçà de la limite de compressibilité dans un système de transport pneumatique. Les effets de compressibilité seront donc négligés dans le cadre de cette étude.

On peut ainsi appliquer l'équation de Bernoulli généralisée à travers l'écoulement avec une masse volumique de fluide constante entre la sortie du compresseur (1) et la sortie du filtre (2) :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho_a v_1^2 + \rho_a g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho_a v_2^2 + \rho_a g z_2 + \Delta p \quad (1.5)$$

avec :

ΔP : perte de pression entre (1) et (2).

z : côte verticale par rapport à un niveau de référence arbitrairement choisi.

Pour un régime d'écoulement permanent, incompressible et une conduite de section constante la vitesse sera constante :

$$v_1 = v_2 = v \quad (1.6)$$

Pour que l'écoulement soit garanti, la pression à la sortie du filtre doit être au moins égale à la pression atmosphérique. Posons donc:

$$p_2 = p_{atm} \quad (1.7)$$

On obtient ainsi la pression minimale au refoulement du compresseur:

$$p_1 = p_{atm} + \rho_a g H + \Delta p \quad (1.8)$$

où $H = z_2 - z_1$ est la hauteur géométrique du système.

b) Calcul des pertes de charge:

Pour un transport pneumatique en phase diluée, les particules de la matière sont en suspension dans l'air, la fluidisation des matières granuleuses a fait l'objet de nombreuses recherches et de thèses de doctorats, notamment sur les pertes de charge.[1]

Dans la plupart des ouvrages, les pertes de charge sont calculées en considérant l'air uniquement, puis divers abaques et formules empiriques sont introduits pour tenir compte de l'ajout des particules solides [4]. La perte de pression globale est ainsi modélisée en trois termes :

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_s + \Delta p_{acc} \quad (1.9)$$

Δp_a : perte de pression monophasique (écoulement d'air uniquement)

Δp_s : perte de pression due à l'ajout des particules solides

Δp_{acc} : perte de pression due à l'accélération des particules.[1]

avec :

$$\Delta p_a = \Delta p_{lin} + \Delta p_{sin} \quad (1.10)$$

Δp_{lin} , perte de pression linéaire, donnée par la relation de Darcy-Weisbach:

$$\Delta p_{lin} = \frac{f_a L}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_a v^2 \right) \quad (1.11)$$

avec :

L: longueur de la conduite

D: diamètre de la conduite

f_a : coefficient de frottement de l'air, dépendant de la rugosité relative $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$ et du nombre de Reynolds (R_e), donné dans le cas d'une conduite cylindrique par l'expression :

$$R_e = \frac{\rho_a V D}{\mu} \quad (1.12)$$

avec :

μ : viscosité dynamique de l'air ($\mu = 1.85 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m.s}$)

ρ_a : masse volumique de l'air ($\rho_a = 1.184 \text{ kg/m}^3$, conditions standards)

Pour $R_e < 2000$, l'écoulement est laminaire et le coefficient de frottement peut s'exprimer analytiquement comme suit :

$$f_a = \frac{64}{R_e} \quad (1.13)$$

Dans le cas des écoulements turbulents, f_a peut être déterminé à partir du diagramme de Moody ci-dessous en fonction de R_e et (ε/D) .

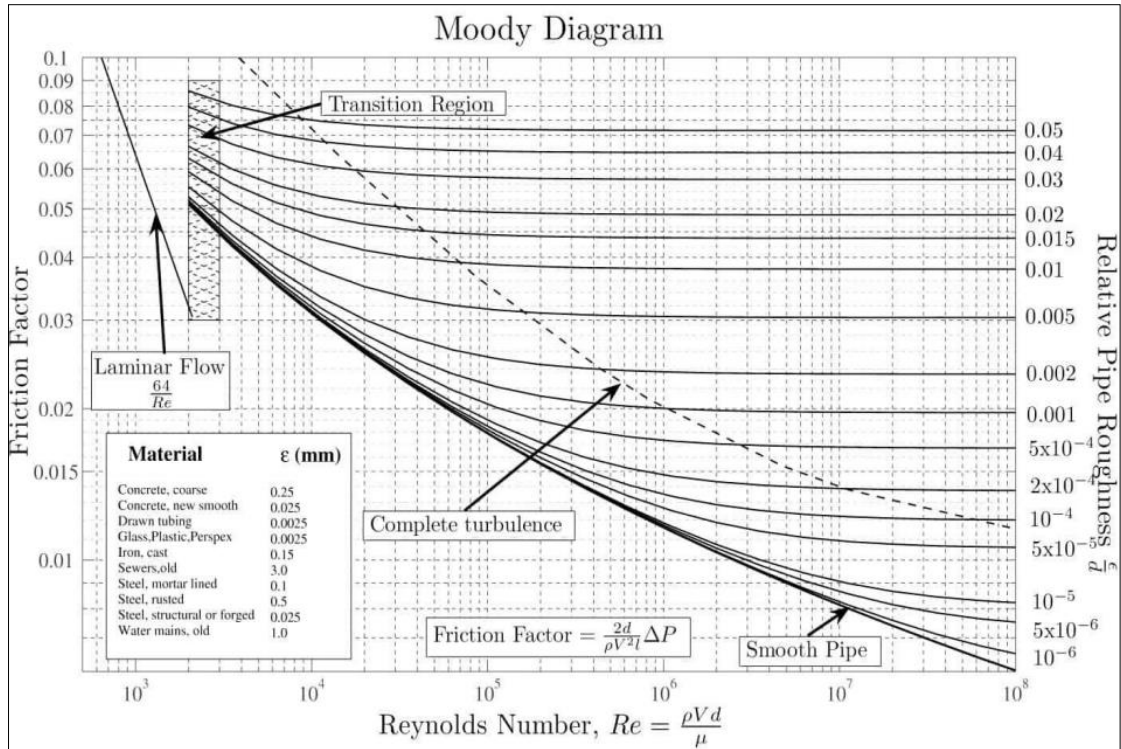


Figure 1.11: Diagramme de Moody.

Les pertes de pression singulières sont dues aux différentes singularités présentes dans la conduite, en particulier les coudes et le filtre cyclone :

$$\Delta p_{sin} = \sum K_i \left(\frac{1}{2} \rho_a v^2 \right) \quad (1.14)$$

Les coefficients de perte "K_i", sont fournis pour chaque singularité par les abaques des constructeurs, ils peuvent être alternativement évalués par simulation CFD [5].

L'une des méthodes de calcul de Δp_s consiste à passer par l'évaluation d'un facteur de perte additionnel ξ qui permet de traiter cette perte comme une fraction de la perte monophasique :

$$\Delta p_s = \xi \Delta p_a \quad (1.15)$$

Ce facteur est donné par la relation ci-dessous[3]:

$$\xi = \frac{\pi f_s}{8 f_a} \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} \right)^{0.5} \phi \quad (1.16)$$

avec:

$$f_s = \frac{0.026}{R_e^{0.85}} + \frac{0.0034}{R_e^{0.6}} \quad (1.17)$$

Pour imprimer une certaine vitesse aux particules à l'entrée de la conduite, un ajout de pression est requis, ce dernier est considéré comme une perte de pression due à l'accélération des particules et il est calculé grâce à la relation suivante [1]:

$$\Delta p_{acc} = \frac{(1 + \phi)\rho_a v^2}{200} \text{ (en mbar)} \quad (1.18)$$

Un examen des équations (1.9) à (1.18) nous permet de relever que les pertes de pression sont fonction de la vitesse d'écoulement (v) et du diamètre de la conduite (D):

$$\Delta p = f(D, v) \quad (1.19)$$

Afin de rationaliser l'utilisation de l'énergie dans le système, il est nécessaire de minimiser les pertes de pression, on sera donc amenés à déterminer le diamètre D de la conduite et la vitesse v de l'écoulement de manière à minimiser Δp .

c) Débit volumique d'air:

Par définition, le débit volumique Q à travers une section S perpendiculaire au sens de l'écoulement a pour expression:

$$Q = S \cdot v \quad (1.20)$$

Pour une conduite cylindrique ($S = \pi D^2 / 4$) et le débit s'exprimera comme suit :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (1.21)$$

Le débit volumique peut également s'exprimer en fonction de la capacité du système (débit massique de matière : \dot{m}_s) et du rapport de charge massique (ϕ), qui sont des données du problème et permettront donc d'obtenir la valeur numérique du débit. En effet, à partir de l'équation (1.1) qui définit le rapport de charge, on obtient tout d'abord l'expression du débit massique d'air :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_s}{3.6\phi} \quad (1.22)$$

Mais ce dernier est lié au débit volumique par l'expression (1.23) suivante:

$$\dot{m}_a = \rho_a Q \quad (1.23)$$

En combinant les équations (1.22) et (1.23), on obtient finalement l'expression recherchée du débit volumique en fonction du rapport de charge et de la capacité du système :

$$Q = \frac{\dot{m}_s}{3.6\phi\rho_a} \quad (1.24)$$

A présent, le débit volumique peut être éliminé par la combinaison des équations (1.21) et (1.24) pour montrer que la vitesse d'écoulement et le diamètre de la conduite ne sont pas des variables indépendantes, on a en effet à partir de ces deux équations :

$$v = \frac{4\dot{m}_s}{3.6\pi\phi\rho_a D^2} \quad (1.25)$$

Ceci nous amène à considérer la chute de pression Δp à travers le système comme fonction du seul diamètre de la conduite :

$$\Delta p = f(D) \quad (1.26)$$

Pour minimiser les pertes de charge il faut augmenter le diamètre, mais cela va accroître le coût de l'installation tout en réduisant la vitesse d'écoulement (débit volumique constant), alors que cette dernière doit être suffisamment élevée pour permettre la fluidisation de la matière.

La vitesse minimale de fluidisation est donnée (en m/s) par la corrélation de Goossens et Coll [5]:

$$v_{min} = \frac{\mu}{\rho_a d_m} (33,7^2 + 0.0408 G_a)^{0.5} - 33.7 \quad (1.27)$$

Tel que:

$$d_m = \frac{R_0}{R_1} d_s d_a$$

$$R_0 = (1 - x_a)\rho_a + x_a\rho_s$$

$$R_1 = (1 - x_a)\rho_a d_a + x_a\rho_s$$

$$x_a = \frac{1}{1 + \phi} (\text{fraction massique de l'air})$$

$$G_a = \frac{d_m \rho_a (\rho_m - \rho_s) g}{\mu^2}$$

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_a}{\rho_a} + \frac{1 - x_a}{\rho_s}$$

d_s et d_a , densités de la matière et de l'air respectivement avant le mélange.

Pour limiter le risque de bouchage de la conduite, il est nécessaire d'adopter pour la vitesse une valeur supérieure à la vitesse minimale de fluidisation, en multipliant v_{min} par un coefficient de sécurité "k_s" supérieur à l'unité mais pas trop, pour maintenir les pertes de charge assez proches du strict minimum correspondant à la vitesse minimale de fluidisation :

$$v = k_s v_{min} \quad (1.28)$$

1.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, des concepts de base ont été introduits concernant les systèmes de transport pneumatique. Le système de transport en phase diluée a été analysé et les grandes lignes d'un modèle mathématique simple pouvant être utilisé pour dimensionner un tel système, a été présenté. Cependant, le problème qui nous a été posé dans le cadre de ce projet concerne le transport d'une matière très dense. Aussi, nous traiterons dans le chapitre suivant, avec plus d'emphase, les concepts fondamentaux qui sont en relation avec les systèmes de transport pneumatique en phase dense.

Chapitre 2: Le système de transport pneumatique en phase dense

2.1 Introduction:

Le transport pneumatique en phase diluée, présenté au chapitre précédent est déconseillé pour certaines applications. C'est notamment le cas des matières abrasives dont la vitesse de transport ne doit pas dépasser une certaine limite au risque de détériorer les parois internes de l'équipement, ou encore des matières de densité élevée dont le transport en phase diluée requiert des vitesses suffisamment importantes pour permettre leur fluidisation, ce qui implique une consommation d'énergie importante. Lorsqu'on est confrontés à de telles situations, on opte pour un procédé de transport en phase dense, procédé qui fera l'objet du présent chapitre.

2.2 Notions sur le transport pneumatique en phase dense

2.2.1 Description du procédé :

Contrairement à la phase diluée, dans un système de transport pneumatique en phase dense, la matière et le gaz sont séparés, l'air comprimé pousse un lot de matière pour l'acheminer vers le point d'arrivée, le rapport de charge massique est supérieur à 20, il est même le plus souvent supérieur à 100 dans la pratique, la phase dense est utilisée pour des matières de densité importante.[1]

Généralement le système est innovant, la matière passe du silo de stockage vers la conduite par l'intermédiaire d'un sas de transport, ce dernier servant à doser la quantité de matière adéquate pour un débit d'air déterminé, le transport s'effectue par lots, un lot correspondant à une charge du sas (**Figure 2.1**). [3]

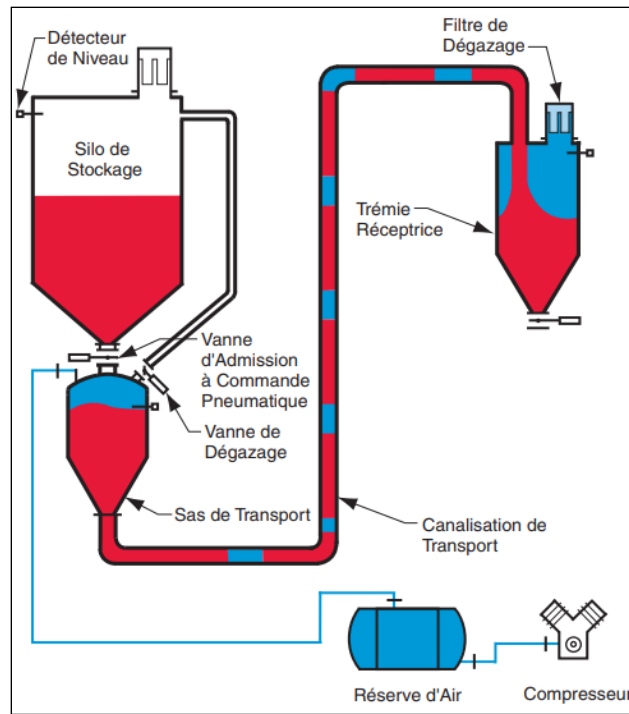


Figure 2.1: Transport en phase dense par lots avec sas de transport [3]

Une autre configuration permet d'obtenir un régime d'écoulement continu dans les conduites. On dispose alors de deux sas de transport disposés en parallèle, leurs sorties convergent vers le même pipe de transport. Les deux sas fonctionnent en alternance, durant le remplissage d'un sas le second se vide et envoie la matière vers la conduite, et inversement (**Figure 2.2**).

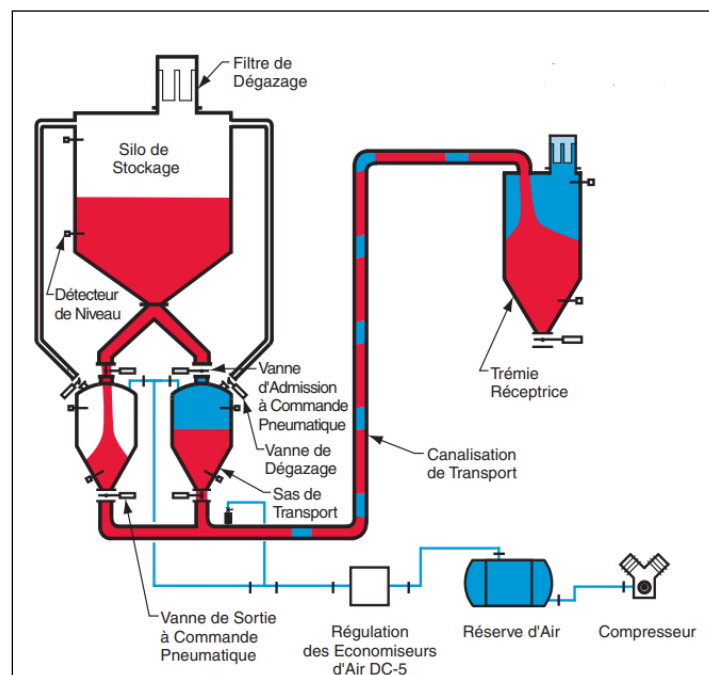


Figure 2.2: Transport en phase dense en continu avec deux sas de transport [3]

Certains systèmes conventionnels ne sont utilisés que pour le transport sur de courtes distances [3]. L'inconvénient principal des systèmes de transport pneumatique en phase dense en régime continu réside dans les coûts d'installation et de maintenance élevés dus notamment à l'ajout d'un sas supplémentaire [7].

Dans ce qui suit, nous allons développer un modèle mathématique qui nous permettra d'analyser puis de dimensionner les éléments principaux d'un système de transport pneumatique en phase dense par lots avec un seul sas de transport, situé en dessous du silo de stockage.



Figure 2.3 : Sas de transport

Eléments du système:

- (1) Arrivée air comprimé
- (2) Vanne silo-sas
- (3) Conduite dégazage
- (4) Capteur de niveau
- (5) Vanne sas-conduite
- (6) Enceinte du sas
- (7) Injecteur d'air

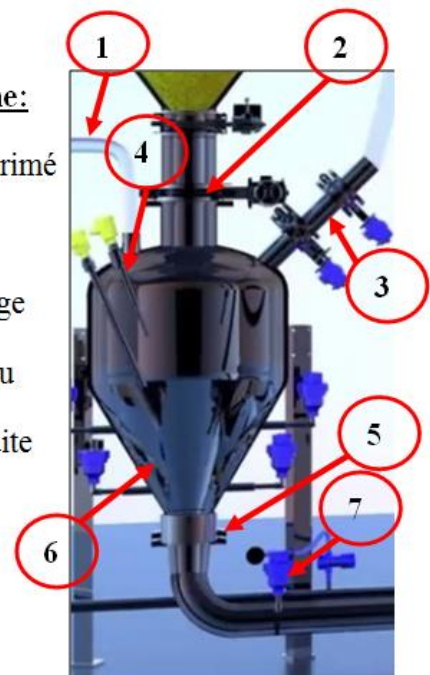


Figure 2.4: Composants du sas de transport

L'écoulement est discontinu et s'effectue en trois étapes:

- **Remplissage du sas:** La vanne d'admission à commande pneumatique (Elément 2 sur la Figure 2.4) s'ouvre et alimente le sas en matière à partir du silo. La vanne de sortie du sas (5) reste fermée au cours de cette phase de remplissage. L'air qui se trouve à l'intérieur du sas est évacué via la vanne de dégazage qui reste ouverte tout au long du remplissage. Lorsque la quantité de matière dans le sas atteint le niveau désiré, détecté par le capteur (4), les vannes silo-sas et de dégazage se referment marquant la fin de cette première phase.

- **Compression :** De l'air en provenance du réservoir d'air comprimé est introduit dans le sas via la conduite (1), juste après la phase de remplissage et la pression exercée sur la matière monte au fur et à mesure que la quantité d'air poussée dans le sas augmente. Quand la

pression atteint la valeur de service, la vanne d'alimentation en air se referme et la troisième et dernière phase peut commencer.

- **Vidage du sas:** Au terme de la phase de compression, la pression exercée par l'air sera suffisante pour convoyer la matière à travers la vanne de sortie à commande pneumatique (5) qui s'ouvre alors, puis la conduite de transport. Certains systèmes sont dotés d'injecteurs (7) permettant d'ajouter de l'air à la sortie du sas pour subdiviser le lot.

2.2.2 Description d'un cycle de fonctionnement et introduction des grandeurs intervenant dans l'analyse mathématique du fonctionnement du système:

Comme mentionné ci-dessus, un cycle de fonctionnement du système comporte les étapes suivantes :

- Remplissage du sas de volume (V_{sas}) avec la charge de matière de masse (m_s) qui viendra y occuper un volume (V_s). Au cours de cette opération, l'air sera évacué à pression constante par la vanne de dégazage vers le silo où la pression servira à faciliter l'écoulement de la matière vers le sas à travers la vanne de remplissage. Au terme de cette opération qui prendra fin avec la fermeture de la vanne de remplissage et de la vanne de dégazage, l'air occupera un volume (V_a) au-dessus de la matière dans la partie supérieure du sas. On définit le rapport :

$$\tau = \frac{V_{sas}}{V_a} \quad (2.1)$$

Ce qui nous permet d'exprimer le volume occupé par la matière dans le sas à l'issue de l'étape de remplissage en fonction du volume du sas et du paramètre τ :

$$V_a = \frac{V_{sas}}{\tau} \quad (2.2)$$

et :

$$V_s = V_{sas} - V_a = V_{sas} \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right) \quad (2.3)$$

- La mise sous pression du sas grâce à l'injection d'air comprimé provenant du ballon de stockage, permettra d'y porter la pression (P_a) à une valeur suffisante pour qu'à la fin de la détente de l'air qui suivra l'ouverture de la vanne de sortie du sas, toute la charge de matière accompagnée de la quantité d'air nécessaire pour le transport sera

évacuée vers la conduite, tout en garantissant une pression de fin de détente (P_d) capable d'empêcher l'écoulement de s'inverser.

- La détente amenant l'air dans le sas de (P_a) à (P_d), à l'ouverture de la vanne de sortie, va permettre l'écoulement et la progression périodique des lots de matière dans la conduite de transport, chaque lot correspondant à une charge du sas. Dans la conduite, les lots de matière sont séparés par des lots d'air dont la pression sera d'autant plus élevée qu'on se rapproche du sas. Après chaque cycle, la pression à travers la conduite sera décroissante de (P_d) à la sortie du sas jusqu'à (P_{atm}) à l'autre extrémité de la conduite ou sera recueillie la matière.
- La période d'un cycle de fonctionnement (T) s'obtient par le rapport de la masse d'une charge du sas (m_s) sur le débit de matière à convoier (\dot{m}_s). Si la masse est exprimée en (kg) et le débit en (t/h) , la période exprimée en seconde sera donnée par :

$$T = \frac{3.6m_s}{\dot{m}_s} \quad (2.4)$$

En tenant compte de l'équation (2.3), on peut mettre cette expression sous la formule :

$$T = \frac{3.6\rho_s V_s}{\dot{m}_s}$$

Soit :

$$T = \frac{3.6\rho_s}{\dot{m}_s} \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right) V_{sas} \quad (2.5)$$

- **Vitesse moyenne de l'écoulement, diamètre de la conduite et longueur des lots de matière et d'air :**

Pour avoir plus d'un lot de matière dans la conduite, il est nécessaire que le volume de la conduite V_c soit supérieur à celui du sas dès que τ devient supérieur ou égal à 2. Pour un volume du sas V_{sas} donné, réduire τ conduit à une diminution de la période (eq.2.5), ce qui peut poser problème au niveau de la réalisation des opérations. On doit donc avoir une valeur de τ au moins égale à 2, mais une valeur élevée signifie une pression d'air importante. Introduisons le paramètre α , le rapport entre le volume de la conduite V_c sur celui du sas V_{sas} :

$$\alpha = \frac{V_c}{V_{sas}} \quad (2.6)$$

On aura donc :

$$V_c = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L = \alpha V_{sas}$$

D'où l'expression du diamètre de la conduite :

$$D = \sqrt{\frac{4\alpha V_{sas}}{\pi L}} \quad (2.7)$$

Cette expression montre que, la longueur de la conduite étant fixée par le cahier des charges, la valeur du diamètre sera d'autant plus importante que le volume de la conduite sera plus grand devant le volume du sas.

La vitesse moyenne de transport se calcule comme suit :

$$\bar{v} = \frac{\dot{m}_s/3.6}{\frac{\rho_s \pi D^2}{4}} = \frac{\dot{m}_s L}{3.6 \alpha \rho_s V_{sas}} \quad (2.8)$$

Le débit de matière (\dot{m}_s) étant donné en (t/h) et les autres grandeurs en SI. Cette vitesse sera d'autant plus faible que le volume de la conduite sera plus important, autrement dit que le diamètre de la conduite sera plus grand. En tout cas, sa valeur ne doit pas atteindre la vitesse limite de fluidisation de la matière transportée.

La vitesse moyenne correspond à la distance parcourue au cours d'un cycle sur la période (T), tandis que la vitesse actuelle de mouvement correspond à la même distance mais seulement sur le temps d'ouverture de la vanne sas/conduite. Soit :

$$\sigma = \frac{t_d}{T} \quad (2.9)$$

Où (t_d) est le temps durant lequel la vanne sas/conduite reste ouverte et (T) la période. La vitesse actuelle (v) s'obtient de la vitesse moyenne (\bar{v}) comme suit :

$$v = \frac{\bar{v}}{\sigma} \quad (2.10)$$

Tous les lots de matière ont la même longueur (L_s) dans la conduite. Cette dernière est donnée par le rapport de la masse (m_s) d'un lot sur le produit de la masse volumique (ρ_s) de la matière par la section de la conduite :

$$L_s = \frac{m_s}{\rho_s \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} \quad (2.11)$$

En tenant compte des équations (2.7) et (2.3), cette expression devient:

$$L_s = \frac{V_s}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{\tau - 1}{\tau} \frac{V_{sas}}{\frac{\alpha V_{sas}}{L}} = \frac{\tau - 1}{\alpha \tau} L \quad (2.12)$$

Les lots d'air qui sont associés aux lots de matière n'ont pas tous la même longueur. En revanche, ils doivent avoir la même masse (m_a) qui se détend de façon isotherme en allant du lot constitué à la fermeture de la vanne de sortie du sas où l'air sera à la pression P_d , jusqu'à la sortie dans l'atmosphère où la pression est P_{atm} , en passant par tous les lots d'air intermédiaires, on aura donc:

$$\frac{P_d}{\rho_d} = \dots = \frac{P_i}{\rho_i} = \dots = \frac{P_{atm}}{\rho_{atm}} = cte \quad (2.13)$$

La masse volumique de l'air dans le lot qui se trouve à la sortie du sas, sera par conséquent :

$$\rho_d = \rho_{atm} \frac{P_d}{P_{atm}} \quad (2.14)$$

A présent, soit β le rapport de la masse de matière (m_s) dans chaque lot sur la masse d'air (m_a) qui l'accompagne :

$$\beta = \frac{m_s}{m_a} \quad (2.15)$$

On aura alors:

$$m_a = \frac{m_s}{\beta} = \frac{\rho_s V_s}{\beta} = \rho_s V_{sas} \frac{\tau - 1}{\beta \tau} \quad (2.16)$$

D'un autre côté, cette masse d'air, on peut l'exprimer dans les conditions (ρ_d, P_d) du premier lot qui fait extension dans la conduite au volume d'air du sas en fin de détente, soit:

$$m_a = \rho_d \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L_d = \frac{\rho_d V_c}{L} L_d = \rho_d \alpha V_{sas} \frac{L_d}{L} = \rho_{atm} \frac{P_d}{P_{atm}} \rho_d \alpha V_{sas} \frac{L_d}{L} \quad (2.17)$$

En identifiant les équations (15) et (16) on obtient:

$$L_d = \left(\frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_d} \right) \frac{1}{\beta} \left(\frac{\tau - 1}{\alpha \tau} L \right) = \left(\frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_d} \right) \frac{L_s}{\beta} \quad (2.18)$$

On montre également que la longueur L_{ai} d'un lot d'air de rang (i) en commençant à partir de la sortie de la conduite, sera:

$$L_{ai} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_i} \right) \frac{1}{\beta} \left(\frac{\tau - 1}{\alpha \tau} L \right) = \left(\frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_i} \right) \frac{L_s}{\beta} \quad (2.18')$$

Pression d'injection P_a :

La pression d'injection d'air comprimé P_a s'obtient à partir de la pression de fin de détente P_d en appliquant la loi de la détente isotherme entre les états définis par (P_a, V_a) et $(P_d, V_{sas} + \frac{\pi D^2}{4} L_d)$, soit:

$$P_a V_a = P_d \left(V_{sas} + \frac{\pi D^2}{4} L_d \right) \quad (2.19)$$

d'où:

$$P_a = P_d \left(\frac{V_{sas}}{V_a} + \frac{\frac{\pi D^2}{4} L_d}{V_a} \right)$$

$$P_a = P_d \left(\tau + \frac{\alpha V_{sas} L_d}{V_a L} \right)$$

$$P_a = P_d \left(\tau + \alpha \tau \frac{L_d}{L} \right) = P_d \tau \left(1 + \frac{\tau - 1}{\tau} \frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \frac{P_{atm}}{P_d} \frac{1}{\beta} \right)$$

$$P_a = \tau P_d + \frac{\tau - 1}{\beta} \left(\frac{\rho_s}{\rho_{atm}} \right) P_{atm} \quad (2.20)$$

Air nécessaire pour le transport:

L'air qui est nécessaire pour le transport, sera fourni par l'unité d'air comprimé comprenant essentiellement un compresseur et un ballon de stockage. L'air qui accompagne la matière à travers la conduite et correspondant à la masse (m_a) par cycle introduite précédemment, ne représente qu'une fraction de l'air injecté dans le sas, l'autre fraction sera évacuée du sas après la détente vers le silo à travers la vanne de dégazage.

Soit (m_{inj}) la masse d'air injectée dans le sas par cycle. Cette masse sera injectée dans le volume (V_a) occupé au début de l'opération par de l'air à la pression (P_d). A la fin de l'opération, la pression de l'air qui occupera toujours le volume (V_a) sera portée à la valeur P_a . On aura donc:

$$m_{inj} = (\rho_a - \rho_d) V_a = \frac{\rho_{atm} V_{sas}}{P_{atm} \tau} (P_a - P_d) \quad (2.21)$$

En tenant compte de l'équation (2.20), cette dernière expression devient:

$$m_{inj} = \frac{\rho_{atm} V_{sas}}{P_{atm} \tau} \left[(\tau - 1) P_d + \frac{\tau - 1}{\beta} \frac{\rho_s}{\rho_{atm}} P_{atm} \right] \quad (2.22)$$

Fraction de la masse d'air transportée avec la matière, (ε), et rapport de charge massique (φ):

En divisant l'équation (2.16) par l'équation (2.22) membre à membre, on obtient:

$$\varepsilon = \frac{m_a}{m_{inj}} = \frac{\rho_s V_{sas} \frac{\tau - 1}{\beta}}{\frac{\tau - 1}{\tau} \left(\rho_{atm} \frac{P_d}{P_{atm}} + \frac{\rho_s}{\beta} \right) V_{sas}}$$

soit:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\rho_s}{\beta}}{\frac{\rho_s}{\beta} + \rho_{atm} \frac{P_d}{P_{atm}}} \quad (2.23)$$

Le rapport de charge massique défini comme:

$$\phi = \frac{\dot{m}_s}{3.6 \dot{m}_{inj}}$$

s'obtient finalement comme suit:

$$\phi = \frac{\dot{m}_s}{3.6 \dot{m}_a \frac{\dot{m}_{inj}}{\dot{m}_a}} = \beta \varepsilon \quad (2.24)$$

Détermination de la pression qui doit régner à la sortie du sas en fin de détente:

Cette pression, nous l'avons désigné par P_d dans les paragraphes précédents. Pour la déterminer, nous allons adopter la procédure visant à évaluer la pression qui règne dans chaque lot d'air en commençant par le lot le plus proche de la sortie, puis en balayant la conduite jusqu'à la sortie du sas. le système sera analysé à l'instant où la vanne de sortie du sas se referme. On se placera dans la situation la plus défavorable où l'on est en présence d'un lot d'air à la sortie du sas et d'un lot de matière à l'autre extrémité de la conduite; ce cas correspond aux valeurs les plus élevées de la pression dans les lots d'air respectifs. Dans chaque lot d'air la masse (m_a) reste la même, mais elle occupera un volume qui va en augmentant à mesure qu'on se rapproche de la sortie, à cause de la détente isotherme que subit l'air des lots avec la baisse de pression à laquelle ils seront soumis.

En affectant l'indice (1) au premier lot qui se trouve à la sortie de la conduite, on peut écrire pour chaque lot (i):

$$\frac{P_i}{\rho_i} = \frac{P_{atm}}{\rho_{atm}} = cte \quad (2.25)$$

A l'instant où la vanne de sortie du sas se referme, l'écoulement s'arrête et les différents lots de matière seront soumis aux forces représentées sur les schémas des figures (2.5) à (2.7) ci-après.

Modélisation de la force de résistance (C_x) de la conduite au déplacement des lots de matière:

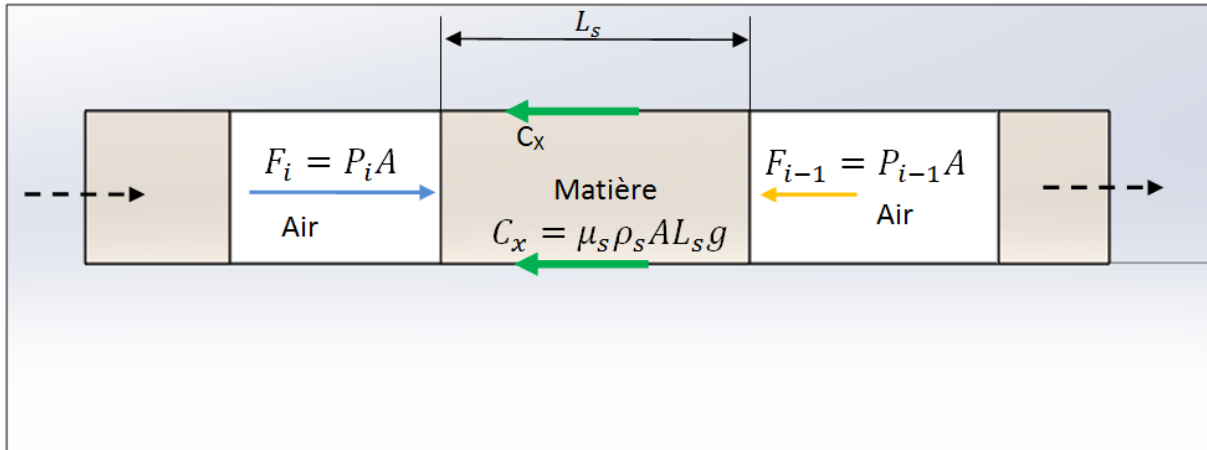


Figure 2.5 : Bilan des forces sur un lot (i) situé dans la partie horizontale de la conduite de transport

En réalité, sous l'effet de la pression, l'air s'introduit quelque peu dans la matière, sans aller, dans ce cas, jusqu'à la fluidiser, il va également se placer entre les lots de matière et la paroi pour former un film très mince. La pression qui doit s'établir dans ce film va compenser exactement le poids du lot de matière pour l'empêcher d'établir un contact direct avec la paroi lors de son déplacement qui deviendra alors plus facile. Dans ces conditions, les lois de Coulomb permettent de poser pour la force de résistance C_x au déplacement du lot de matière, traité comme un solide :

$$C_x = \mu P \quad (2.26)$$

ou $P = \rho_s g A L_s$, est le poids du lot de matière qui est égal à la résultante radiale des forces de pression agissant sur le lot pour le maintenir en suspension.

μ est un coefficient de frottement solide-solide, il existe deux types de coefficients:

- le coefficient d'adhérence (μ_s), appelé aussi, "coefficient de frottement statique"
- le coefficient de frottement proprement dit (μ_d), appelé également "coefficient de frottement dynamique".

En règle générale, les valeurs du coefficient de frottement statique, lié à la limite du glissement, sont supérieures à celles correspondant au frottement dynamique. Ces valeurs peuvent varier suivant les conditions d'interface.

Le tableau ci-après fournit à titre indicatif les valeurs de ces deux coefficients pour quelques situations usuelles.

Tableau 2.1: Valeurs indicatives des coefficients d'adhérence (μ_s) et de frottement (μ_d)[8]

Nature des matériaux en contact	Adhérence (μ_s)		Frottement (μ_d)	
	A sec	Lubrifié	A sec	Lubrifié
Acier sur acier	0.18	0.12	0.15	0.09
Acier sur fonte	0.19	0.1	0.16	0.08 à 0.04
Teflon sur acier	0.04	---	0.04	---
Nylon sur acier	---	---	0.35	0.12
Bois sur bois	0.65	0.2	0.4 à 0.2	0.16 à 0.04
Métaux sur bois	0.6 à 0.5	0.1	0.5 à 0.2	0.08 à 0.02
Métal sur glace	---	---	0.02	---
Pneu de voiture sur route	0.8	---	0.6	0.3 à 0.1 sol mouillé

Dans l'application de la loi de Coulomb, il est recommandé d'utiliser μ_s pour avoir une estimation maximale du frottement. cependant dans le cas qui nous concerne ici, nous sommes en droit de choisir une valeur assez faible de μ_s , étant donné l'effet "coussin d'air" présent à l'interface et qui réduit considérablement la résistance au mouvement. Mais nous optons pour une valeur de $\mu_s = 0.25$, suffisamment élevée afin de compenser pour les pertes de charge singulières (coudes, vannes et filtres) dont nous ne tiendrons pas compte de manière explicite dans nos calculs.

Nous considérons également la même valeur de C_x pour tous les lots, qu'ils soient situés dans la partie horizontale ou la partie verticale, sauf que dans ce dernier cas, il y aura le poids de la colonne de la matière qui s'ajoutera à C_x . Les lots pourraient se présenter dans l'une des trois situations schématisées dans les figures (2.5) à (2.7). Nous allons à présent établir les conditions d'équilibre statique d'un lot de matière (i) soumis aux forces représentées sur le schéma de la figure (2.5) et qui sont (en projection dans le sens de l'écoulement):

- F_{i-1} et F_i : forces exercées par les lots d'air (i-1) et (i) situés de part et d'autre du lot de matière (i) ;

- C_x : force d'adhérence du lot de matière (i) qu'il faudra surmonter pour le mettre en mouvement ;
- Au cours de la phase de mouvement, on pourrait également prévoir une surpression (Δp_i) qui va agir dans le même sens que $P_i = F_i/A$; A étant l'aire de la section droite de la conduite, pour compenser la perte de charge du lot d'air qui se déplacera à chaque fois d'une distance ($L_{ai} + L_s$).

Dans le cas d'un lot (i) situé dans la partie horizontale de la conduite, figure (2.5) ci-dessus, la pression P_i agissant en amont du lot de matière (i) devra satisfaire l'équation:

$$P_i A = (P_{i-1} A + C_x) + \Delta p_i A$$

En réintroduisant l'expression de C_x (eq.2.26) avec $\mu = \mu_s$ et le poids P remplacé par son expression, puis divisant par A; on obtient:

$$P_i = P_{i-1} + \mu_s \rho_s g L_s + \Delta p_i \quad (2.27)$$

Ici Δp_i représente la perte de pression par frottement visqueux de l'air du lot (i) au cours de son déplacement d'une distance ($L_{ai} + L_s$) correspondant à une détente complète d'un cycle de fonctionnement du système. Elle se calcule grâce à l'équation de Darcy-Weisbach:

$$\Delta p_i = \frac{f(L_s + L_{ai})}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_{ai} v^2 \right) \quad (2.28)$$

ρ_{ai} étant la masse volumique de l'air qui occupe le lot (i), masse volumique qui est liée à la pression P_i , compte tenu de l'équation (2.25) par :

$$\rho_{ai} = \rho_{atm} \frac{P_i}{P_{atm}}$$

v, vitesse actuelle de mouvement

D, diamètre de la conduite

L_s , longueur des lots de matière

L_{ai} , longueur du lot d'air (i)

Le coefficient de frottement visqueux de l'air est fonction du nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_{ai} v D}{\mu_a} \quad (2.29)$$

et de la rugosité relative (ε/D).

Pour calculer (f), on utilise la corrélation de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.30)$$

A présent, en portant dans l'équation (2.28), les expressions de ρ_{ai} et L_{ai} , on obtient:

$$\Delta p_i = \frac{f L_s}{D} \left(\frac{1}{\beta} + \frac{\rho_{atm}}{\rho_s P_{atm}} P_i \right) \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2 \right) \quad (2.31)$$

Ensuite, portons cette dernière expression dans l'équation (2.25), il vient:

$$P_i = P_{i-1} + \mu_s \rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2 \right) + \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2} \right) + P_i \left(1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2} \right) \right)$$

D'où l'on obtient finalement pour la pression de l'air agissant dans le sens de l'écoulement sur un lot de matière (i) situé dans la partie horizontale de la conduite, l'expression :

$$P_i = \frac{P_{i-1} + \mu_s \rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2 \right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2} \right)} \quad (2.32)$$

Pour un lot situé totalement dans la partie verticale de la conduite (voir figure (2.6)), à la force C_x viendra s'ajouter le poids du lot de matière ($\rho_s A g L_s$), et la pression que l'air doit appliquer pour pouvoir pousser un tel lot sera :

$$P_i = \frac{P_{i-1} + (\mu_s + 1) \rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2 \right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2} \right)} \quad (2.33)$$

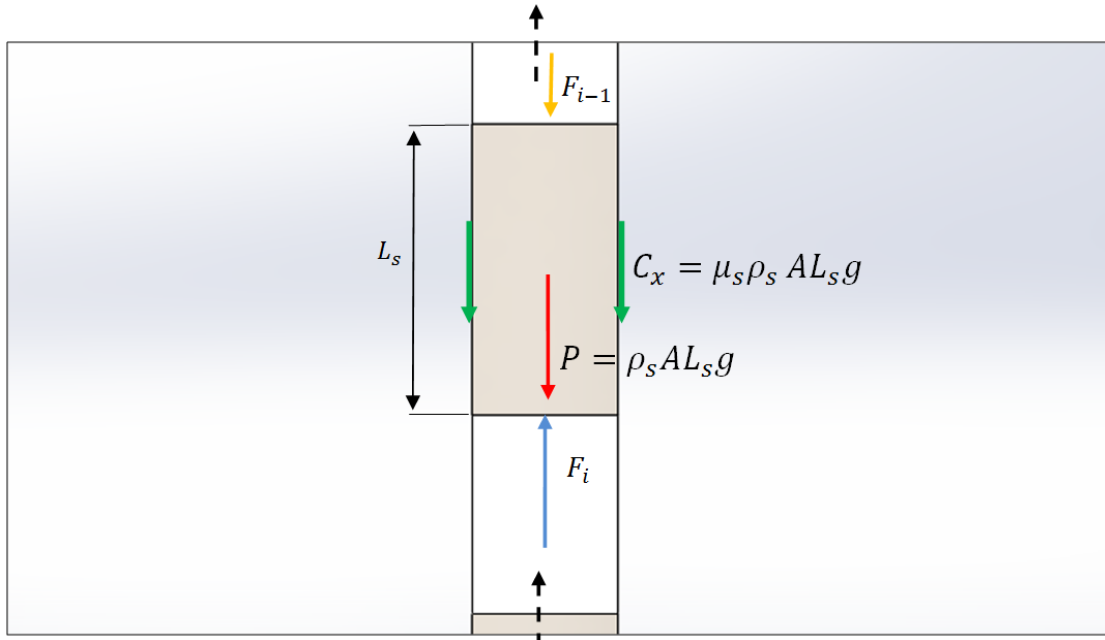


Figure 2.6 : Bilan des forces sur un lot (i) situé dans la partie verticale de la conduite de transport

Finalement, pour un lot chevauchant la partie verticale et horizontale de la conduite, (h) désignant la longueur occupée horizontalement (voir figure (2.7)) ci-après, l'expression de la pression doit ajouter à C_x uniquement le poids de la partie verticale du lot, on aura par conséquent:

$$P_i = \frac{P_{i-1} + (\mu_s + 1)\rho_s g L_s - \rho_s g h + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)} \quad (2.34)$$

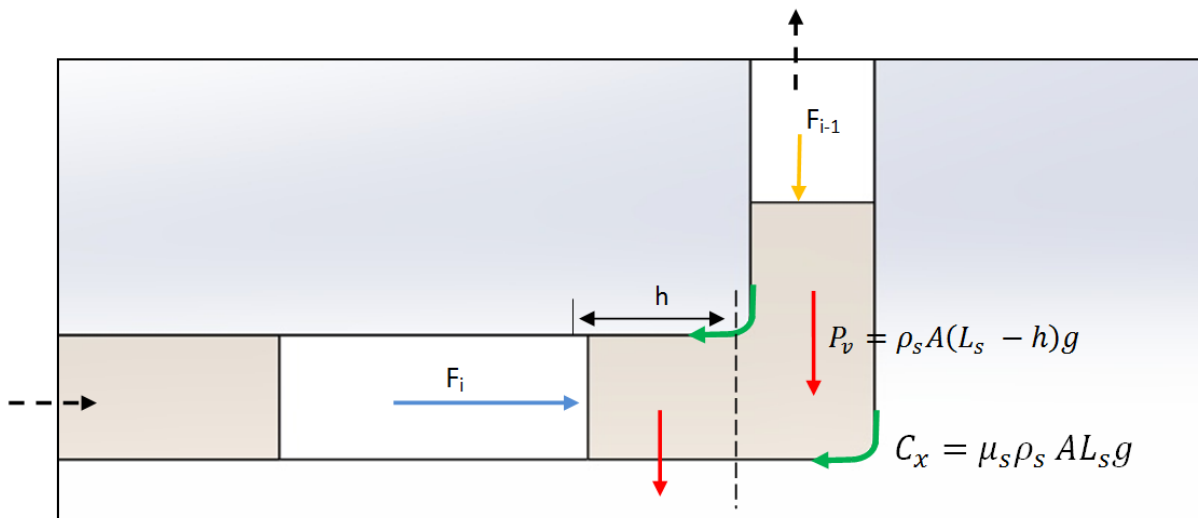


Figure 2.7 : Bilan des forces sur un lot (i) situé en partie à l'horizontale et en partie à la verticale de la conduite de transport

2.3 Conclusion :

Les équations développées dans ce chapitre seront exploitées au chapitre 3 suivant. Dans une analyse de l'impact que certains paramètres définis au cours de ces développements peuvent avoir sur les performances du système étudié, des conditions liées à ces paramètres seront tirées pour en tenir compte lors du dimensionnement, et appliquées pour un cas pratique dont les données sont spécifiées dans un cahier des charges.

Chapitre 3 : Analyse paramétrique du système, résultats et interprétations

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à une analyse paramétrique des performances du système de transport pneumatique en phase dense qui fait l'objet de notre étude, en exploitant le modèle mathématique développé au chapitre 2.

Les paramètres en fonction desquels cette analyse sera menée, sont :

- Le rapport β du débit de matière \dot{m}_s sur le débit d'air \dot{m}_a qui poursuit sa détente dans les différents lots à travers la conduite de transport jusqu'à son évacuation dans l'atmosphère à la sortie.
- Le volume du sas V_{sas} dont la valeur impacte très sensiblement les caractéristiques du système, et tout particulièrement la fréquence des cycles opératoires.
- Le rapport τ du volume du sas V_{sas} sur le volume V_a , partie de V_{sas} que l'air occupera à la fin de l'opération de remplissage. C'est surtout la pression d'injection d'air P_a qui sera impactée par une variation de ce paramètre.
- Le rapport α du volume V_c de la conduite de transport sur celui du sas. Une fois qu'on aura choisi une valeur pour V_{sas} , conformément aux standards, une plus grande valeur de α aura tendance à augmenter le nombre de lots ainsi que le diamètre de la conduite, étant donné que sa longueur est fixée à une valeur de 60 m dans le projet. Cependant, seules certaines valeurs de α permettent de satisfaire certaines contraintes fonctionnelles du système, c'est pourquoi ce paramètre ne sera pas utilisé comme une variable complètement indépendante vis-à-vis des autres paramètres, mais plutôt comme une variable dont on recherchera la valeur qui adapterait le système aux conditions de fonctionnement établies par le jeu des autres paramètres.

3.2 Procédure de calcul :

Les calculs, exécutés grâce au logiciel "MATLAB", suivront la procédure dont les étapes sont décrites ci-après :

3.2.1 Déclaration des données :

Longueur de la partie horizontale de la conduite : $L_H = 50 \text{ m}$;

Longueur de la partie verticale de la conduite : $L_v = 10 \text{ m}$;

Débit de transport de la matière : $\dot{m}_s = 20 \text{ t/h}$;

Conditions atmosphériques ambiantes : $P_{atm} = 101\,300 \text{ Pa}$; $\rho_{atm} = 1.18 \text{ kg/m}^3$;

Viscosité dynamique de l'air : $\mu_a = 1.85 * 10^{-6} \text{ Pa.s}$

Masse volumique de la matière transportée : $\rho_s = 1100 \text{ kg/m}^3$

Coefficient de frottement statique à l'interface matière/paroi : $\mu_s = 0.25$;

Variables: α ; τ ; β ; V_{sas}

3.2.2 Calculs préliminaires:

$$V_s; m_s; m_a; D; v; L_s; f$$

3.2.3 Calcul du premier élément (**Lots d'air et de matière à la sortie de la conduite**):

$L_{s1} = L_s$:

- $L_{s1} < L_v$: Le lot est dans la branche verticale

$$P_1 = \frac{P_0 + (\mu_s + 1)\rho_s g L_{s1} + \frac{f L_{s1}}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_{s1}}{D} \frac{\rho_{atm}}{P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)}$$

- $L_{s1} > L_v$: Une partie du lot est dans la branche horizontale sa longueur est $(L_{s1} - L_v)$:

$$P_1 = \frac{P_0 + \mu_s \rho_s g L_{s1} + \rho_s g L_v + \frac{f L_{s1}}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_{s1}}{D} \frac{\rho_{atm}}{P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)}$$

$$\rho_1 = \rho_{atm} \frac{P_1}{P_{atm}}$$

$$L_{a1} = \frac{L_s \rho_s P_{atm}}{\phi \rho_{atm} P_1}$$

On pose :

$$x = L_{s1} + L_{a1}$$

Vérifier si $x < L$ ($L = L_v + L_H$)

3.2.4 Calcul des éléments restants consécutivement:

- $0 < x < (L_v - L_s)$: Le lot est vertical

$$P_i = \frac{P_{i-1} + (\mu_s + 1)\rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)}$$

- $(L_{s1} - L_v) < x < L_v$: Une partie du lot seulement de longueur $(L_v - x)$ est verticale.

$$P_i = \frac{P_{i-1} + \rho_s g (L_v - x) + \mu_s \rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)}$$

- $x > L_v$: Le lot est dans la partie horizontale de la conduite

$$P_i = \frac{P_{i-1} + \mu_s \rho_s g L_s + \frac{f L_s}{\beta D} \left(\frac{1}{2} \rho_s v^2\right)}{1 - \frac{f L_s \rho_{atm}}{D P_{atm}} \left(\frac{v^2}{2}\right)}$$

$$\rho_i = \rho_{atm} \frac{P_i}{P_{atm}}$$

$$L_{ai} = \frac{L_s \rho_s P_{atm}}{\phi \rho_{atm} P_i} = L_{a,i-1} \frac{P_{i-1}}{P_i}$$

La longueur du tronçon parcouru devient :

$$x = L_{s1} + (i - 1)L_s + \sum_{j=1}^i L_{aj}$$

si $x = L$, Cela signifie qu'on vient d'effectuer les calculs pour le dernier lot

si $x > L$, Cela signifie que $L_{s1} < L_s$, on pose alors pour le premier lot

$$L_{s1} = L_s - (x - L)$$

Et on reprend les calculs jusqu'à ce que $x \approx L$, puis on retiendra les résultats suivants :

les (P_i) , (ρ_i) ; L_{ai} ; L_s ; D ; v ; m_s ; m_a ; et on calculera $m_{a,inj}$; ε ; \dot{O} ... à l'aide des équations introduites au chapitre 2.

3.3 Présentation des résultats et leur interprétation

Des résultats extraits de l'analyse paramétrique dont la procédure a été décrite plus haut, sont présentés ci-après sous forme de tableaux et de graphes.

Sur le tableau (3.1), on peut noter qu'en fixant le volume du sas à une valeur de 0.75 m^3 et le rapport τ à 2, les valeurs de α qui correspondent à un mode opératoire adapté du système, dépendent de la valeur de β . Ainsi, par exemple si $\beta = 100$, alors α doit prendre la valeur 3 pour répondre à la condition qu'à chaque fermeture de la vanne de sortie du sas, après chaque envoi dans la conduite de la charge correspondant à un cycle, un lot de matière s'établit à l'autre extrémité, c'est-à-dire à la sortie, de sorte que la condition aux limites du problème soit vérifiée, soit :

$$\sum_{i=1}^n (L_{si} + L_{ai}) = L$$

Cette condition doit nécessairement être satisfaite, même si pour cela, la longueur L_{s1} du premier lot doit être corrigée à plusieurs reprises.

Tableau 3.1 : Valeurs de α donnant lieu à une configuration satisfaisant les contraintes opératoires du système

B	Valeurs permises pour α					
100	3					
250	1,45	2,3	3			
550	1,95	2	3			
800	1,7	1,75	2,6	2,65	3,5	
850	1,7	2,55	2,6	3,4	3,45	3,5

Pour $\beta = 100$, ce processus n'aboutit pour aucune valeur $\alpha < 3$.

Pour les autres valeurs de β , les résultats présentés au tableau montrent que plusieurs valeurs de α sont possibles.

Tableau 3.2 : Caractéristiques du système en fonction de α pour $\beta = 800$;

$$V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3 \text{ et } \tau = 2$$

A	1,7	1,75	2,6	2,65	3,5
Diamètre (mm)	147,12	149,27	181,95	183,69	211,10
Vitesse (m/s)	0,30	0,29	0,19	0,19	0,14
Pa (bar)	7,69	7,67	7,66	7,65	7,65
Pd (bar)	3,25	3,25	3,24	3,24	3,23
Longueur d'un lot de matière (m)	22,06	21,43	14,42	14,15	10,71
Longueur du dernier lot de matière (m)	21,02	21,31	13,66	14,09	10,16
Nombre de lots	2	2	3	3	4

Cependant, d'après les graphes de la figure (3.1) ci-dessous et les résultats affichés au tableau (3.2) ci-dessus, une augmentation de la valeur de α entraîne une augmentation du diamètre (D), une diminution de la longueur (L_s) des lots et éventuellement un plus grand nombre de lots (n), mais elle sera sans aucune incidence sur la pression. Il est donc inutile de choisir une configuration possible avec une valeur de α plus grande.

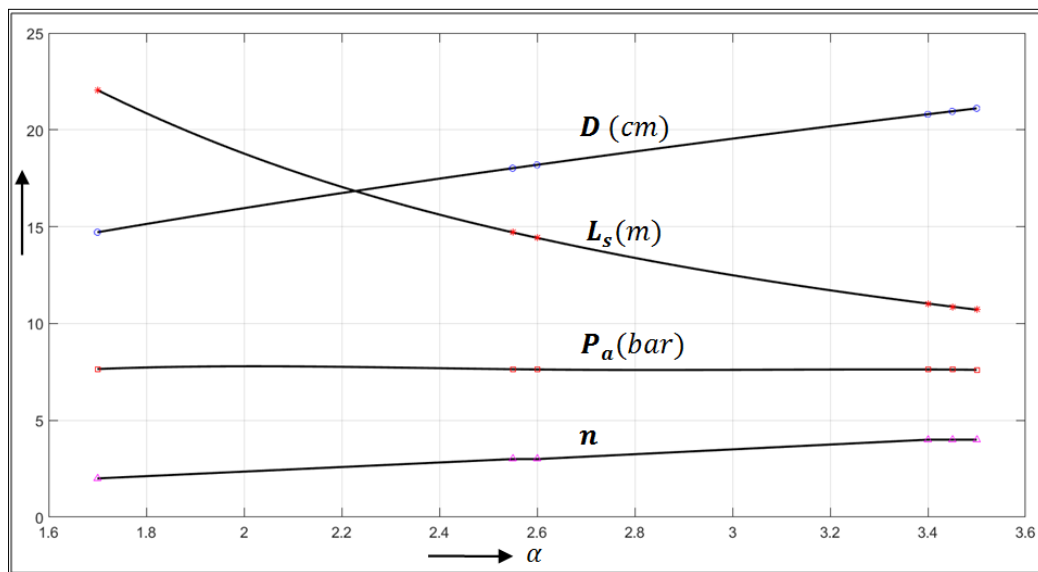


Figure 3.1 : Evolution de la pression d'injection d'air P_a du nombre de lots (n) et de leurs dimensions (D et L_s) en fonction de α pour $\tau = 2$; $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$ et $\beta = 850$

Les résultats du tableau (3.3) ont été obtenus pour chaque valeur de β , pour la configuration correspondant à la plus petite valeur satisfaisante de α . La pression d'injection d'air (P_a) et la pression de fin de détente (P_d) sont représentées en fonction de β à la figure (3.2), tandis que la masse m_a d'un lot d'air et la fraction ε qu'elle représente de la masse m_{inj} de l'air injecté

par cycle sont montrées à la figure (3.3). Finalement, sur la figure (3.4), on a représenté le rapport de charge massique φ en fonction de β .

Tableau 3.3 : Pressions et masses d'air dans le sas (m_{inj}) et dans les lots (m_a) pour différentes valeurs de β et pour $\tau = 2$; $V_{sas} = 0.75 m^3$

β	100	250	500	750	800	1000
$P_a(\text{bar})$	14,263	9,334	8,015	7,714	7,689	7,606
$P_d(\text{bar})$	2,410	2,778	3,063	3,227	3,254	3,331
$m_a(\text{kg})$	4,125	1,650	0,825	0,550	0,516	0,4125
$m_{inj}(\text{kg})$	5,178	2,864	2,163	1,960	1,937	1,868
$\varepsilon = m_a/m_{inj}$	0,797	0,576	0,381	0,281	0,266	0,221
$\varphi = \beta\varepsilon$	79,668	144,050	190,702	210,487	212,940	220,874

Pour des valeurs de $\beta < 500$, la pression d'injection décroît de façon significative à mesure que β augmente, puis, pour des valeurs supérieures, elle commence à tendre asymptotiquement vers une pression d'environ 7.5 bar.

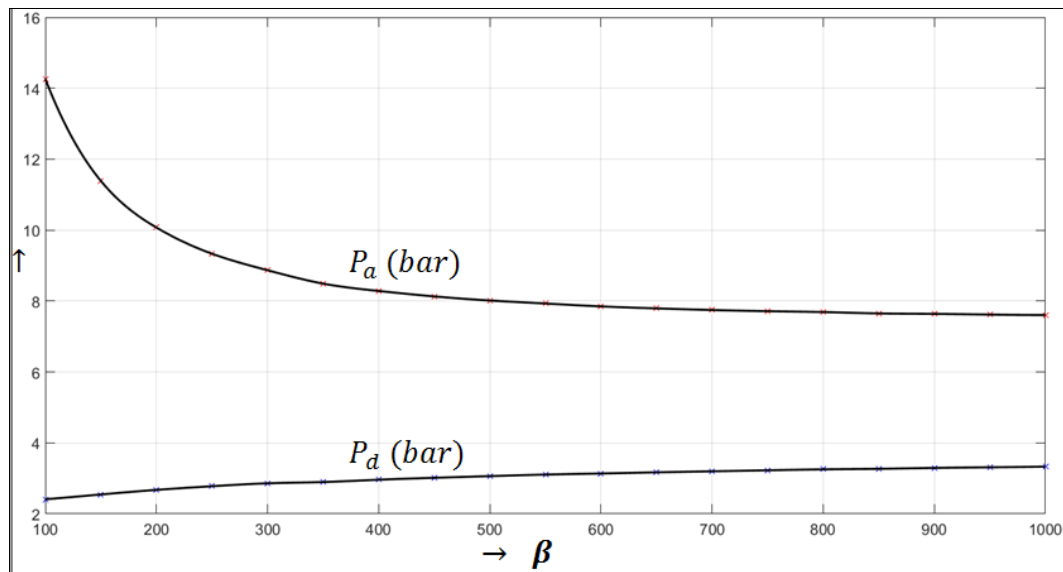


Figure 3.2 : Evolution de la pression d'injection d'air P_a et de la pression de fin de détente P_d en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 m^3$

En examinant l'expression analytique (2.20) de P_a en fonction de P_d et de β pour une valeur constante de τ , on relève deux contributions bien distinctes à la pression P_a :

- Une contribution de la pression de fin de détente (P_d) à travers un premier terme (τP_d) : Ce terme tend à faire croître la pression P_a puisque la pression P_d croît légèrement avec β ;

- Une contribution explicite de β à travers un second terme $\left(\frac{\tau-1}{\beta} \frac{\rho_s}{\rho_{atm}}\right) P_{atm}$: Ce terme tend à amener une décroissance de P_a lorsque β augmente, et comme il comporte le rapport constant (ρ_s/ρ_{atm}) dont la valeur est relativement importante, il donne lieu à des valeurs de P_a élevées pour des valeurs relativement basses de β tout en dominant le premier terme, causant ainsi une décroissance rapide de P_a . A mesure que β évolue vers des valeurs plus élevées, la contribution de ce second terme s'amenuise et la pression P_a devient impactée quasi uniquement par le premier terme ($P_a \rightarrow \tau P_d$).

La masse d'air m_a qui accompagnera chaque lot de matière dans la conduite sera d'autant plus importante que la pression P_a sera plus élevée, la croissance de la pression de fin de détente P_d restant quasiment insignifiante avec l'augmentation de β . Il est donc logique de retrouver pour l'évolution de m_a en fonction de β sur la figure (3.3) une allure semblable à celle de P_a de la figure (3.2). La masse d'air qui accompagne chaque lot de matière va donc décroître à mesure que β prendra des valeurs plus élevées, ce qui constitue d'ailleurs une évidence d'après la définition de β . Plus encore, m_a va représenter une fraction (ε) décroissante de la masse d'air injectée dans le sas à chaque cycle en fonction de β .

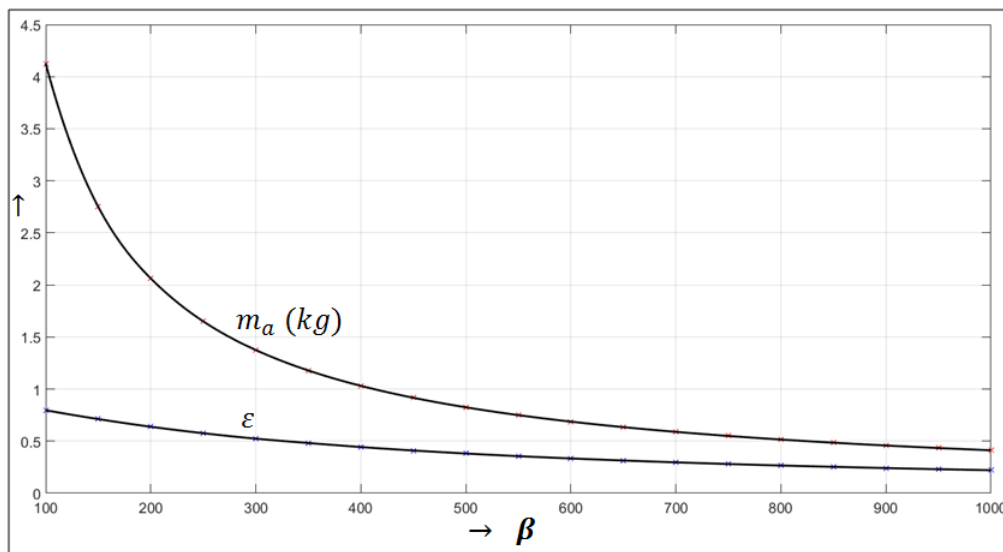


Figure 3.3 : Evolution de la masse d'un lot m_a et de sa fraction ε par rapport à la masse d'air injectée par cycle, en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 m^3$

Le rapport de charge massique φ , produit de β par ε , va tout d'abord croître avec β (tant que la fraction d'air constitutive des lots ε reste supérieure à environ 0.5), puis il tendra vers une valeur limite à mesure que la décroissance de ε viendra compenser l'augmentation de β (voir figure (3.4) ci-dessous).

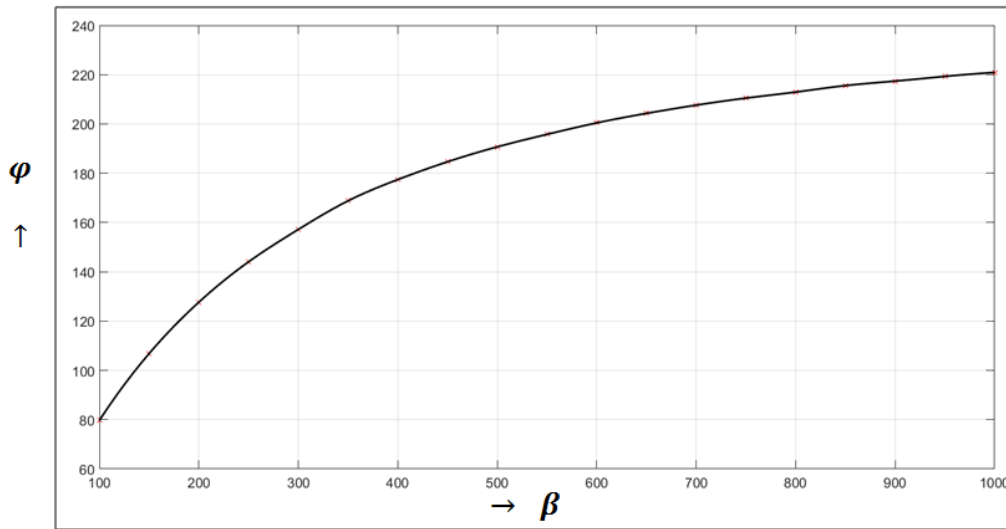


Figure 3.4 : Evolution du rapport de charge massique φ en fonction de β pour $\tau = 2$ et $V_{sas} = 0.75 \text{ m}^3$

Le paramètre τ impacte directement la valeur de la pression d'injection d'air P_a (à travers le terme (τP_d) comme il a été mentionné plus haut dans cette section). Dans le cas du système étudié, la matière, ayant une masse volumique de 1100 kg/m^3 , devant être expédiée sur une longueur de conduite de 60 m à une hauteur de 10 m, la pression nécessaire en fin de détente (P_d) doit dépasser une valeur d'environ 3.5 bar, d'après nos calculs. Le choix d'une valeur supérieure à 2 pour τ conduirait donc à des valeurs de la pression d'injection de l'ordre de 10 bars et plus, ce qui est de nature à compliquer l'unité de production d'air comprimé. D'un autre côté, le choix d'une valeur plus petite pour τ conduirait à une diminution de la charge du sas par cycle et réduirait la période (T) de ce dernier alors même que, dans ces conditions, la détente nécessiterait plus de temps étant donné que la pression de l'air sera plus basse dans le sas. Il faut cependant mentionner que la valeur de la période n'est impactée par τ de manière significative que dans le domaine des faibles valeurs de ce paramètre. Au-delà d'une certaine valeur qui augmente avec le volume du sas, l'effet de τ sur la période s'atténue

considérablement et cette dernière reste sensible uniquement à la valeur du volume du sas, valeur avec laquelle elle augmente linéairement (voir figure (3.5)). Pour atteindre des valeurs de la période dépassant une minute, avec une valeur de $\tau = 2$, il faut que le volume du sas soit supérieur à 600 L.

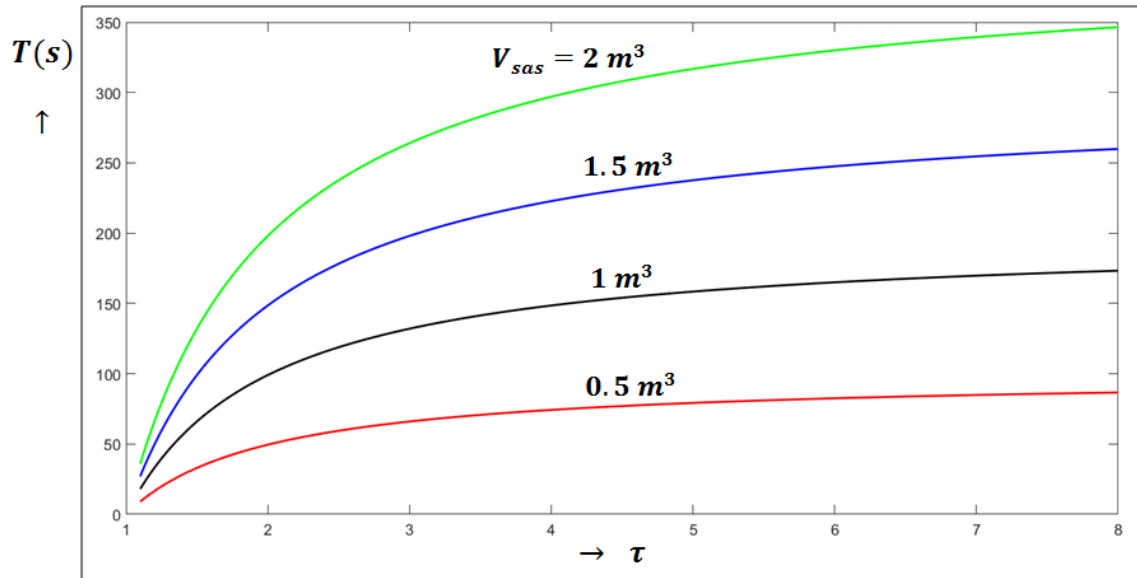


Figure 3.5 : Evolution de la période d'un cycle de fonctionnement en fonction de τ pour différentes valeurs de V_{sas}

3.3 Conclusion:

Suite à l'analyse des effets des différents paramètres de dimensionnement du système, ces derniers sont fixés de manière à obtenir les dimensions les plus optimales tout en tenant compte des contraintes du cahier des charges. Cette étape est suivie par la conception de l'équipement qui sera traitée dans le prochain chapitre.

Chapitre 4: Conception de l'équipement

4.1 Introduction

Après avoir arrêté les paramètres caractéristiques de l'équipement dans le chapitre précédent (Pression de service, diamètre de la conduite, débit d'injection,...etc.), on procède à présent à sa conception. Pour être certain de répondre aux besoins du client, la conception sera précédée d'une analyse fonctionnelle, cette dernière servira également à l'anticipation des exigences liées aux différentes disciplines intervenant dans le cycle de vie du produit. La conception sera réalisée avec le logiciel SOLIDWORKS.

4.2 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur. Les besoins peuvent être de plusieurs natures : explicites ou implicites, et les fonctions nécessaires à leur satisfaction peuvent être des fonctions de service ou d'estime ou encore des contraintes imposées par un client, un milieu environnant particulier ou par des règlements.[10]

Des notions qui reviennent très fréquemment dans l'analyse fonctionnelle sont définies ci-après:[11]

- **Critère d'appréciation** : Caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée.
- **Niveau d'appréciation** : Grandeur repérée sur une échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction.
- **Flexibilité**: Ensemble d'indications exprimées par le demandeur sur les possibilités de moduler le niveau recherché pour un critère d'appréciation.
- **Classe de flexibilité** : indication littérale placée auprès d'un niveau d'un critère d'appréciation, permettant de préciser son degré de négociabilité ou d'impérativité;
- **Limite d'acceptation** : niveau de critère d'appréciation au-delà duquel le besoin est jugé non satisfait.

L'analyse fonctionnelle peut s'effectuer en plusieurs étapes: [12]

1. Prévoir les phases du cycle de vie du produit.
2. Définir le milieu d'utilisation et représenter le produit par une ellipse au centre (diagramme de Pieuvre)
3. Identifier les éléments extérieurs en relation avec le produit, les schématiser par une ellipse et tracer les relations.
4. Caractériser les fonctions de service.
5. Valider les fonctions de service.
6. Réaliser le cahier des charges fonctionnel.

4.2.1 Les besoins du client:

Dans l'analyse fonctionnelle, il est nécessaire de clarifier les besoins du client mentionnés dans le cahier des charges. Dans le cas présent, à savoir un système de transport pneumatique en phase dense, également appelé "Dense convoyeur", le besoin est exprimé comme suit:

Le client souhaite transporter du plâtre avec une capacité de 20tonnes/heure sur une distance horizontale de 50m (+/-5m), et une distance verticale de 10m.

4.2.2Prévision des phases du cycle de vie du produit:

La première étape dans l'analyse fonctionnelle consiste à imaginer les différentes phases du cycle de vie du produit en commençant par la fabrication des composants, jusqu'à sa fin de vie, et ce, en citant les différentes contraintes à prendre en considération pour la conception sans préciser la solution, ainsi que les divers corps de métiers concernés par la phase de vie en question (parties prenantes), cette partie est résumée dans le Tableau(4.1)ci-après.

4.2.3 Diagramme de Pieuvre:

Pour schématiser les relations entre le système à étudier et le milieu extérieur, un modèle connu sous le nom de diagramme de Pieuvre est adopté dans l'analyse fonctionnelle, ce diagramme (voir Figure 4.1) relie le système aux composants du milieu qui l'entoure, par des fonctions principales et des fonctions contraintes.

Tableau 4.1: Prévion des phases du cycle de vie du produit

Phase du cycle de vie	Caractéristiques	Parties prenantes
Matière première	<ul style="list-style-type: none"> - disponibilité sur le marché - coût d'approvisionnement (ISO: 14100) - propriétés - dimensions des équipements 	<ul style="list-style-type: none"> - fournisseur - transporteur - client
Fabrication	<ul style="list-style-type: none"> - procédés de fabrication - nombre de pièces (à usiner) - nombre de pièces (standards) - dimensions des équipements 	<ul style="list-style-type: none"> - fabricant (techniciens, ouvriers, ingénieurs,...)
Assemblage sur atelier	<ul style="list-style-type: none"> -Type d'assemblage (permanent ou pas) - nombre de pièces (à assembler) - nombre de pièces (standards) - nombre de pièces (modulables) - dimensions des équipements - poids 	<ul style="list-style-type: none"> - équipe de montage (atelier)
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - faciliter le transport - nombre de pièces (à assembler) - nombre de pièces (standards) - nombre de pièces (modulables) - dimensions des équipements - poids 	<ul style="list-style-type: none"> - transporteur - client
Assemblage sur site	<ul style="list-style-type: none"> -Type d'assemblage (permanent ou pas) - nombre de pièces (à assembler) - nombre de pièces (standards) - nombre de pièces (modulables) - dimensions des équipements - poids -prévoir des anneaux de levage 	<ul style="list-style-type: none"> - équipe de montage (site)
Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> - faciliter l'exploitation - être clair sur les performances de l'équipement et ses limites 	<ul style="list-style-type: none"> - l'opérateur
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> - faciliter l'accès - nombre de pièces (standards) - améliorer la durée de vie des composants - MTBF - MTTR 	<ul style="list-style-type: none"> - personnel d'entretien
Fin de vie et mise en rebut	<ul style="list-style-type: none"> - le nombre de pièces à recycler - faciliter le désassemblage 	<ul style="list-style-type: none"> - client

Fonctions principales:

Ce sont les fonctions qui répondent à la question: que fait cet équipement? A quoi sert-il?, Elles sont notées FP1, FP2..., ces fonctions sont généralement précisées dans les cahiers des charges et indiquent clairement les besoins.

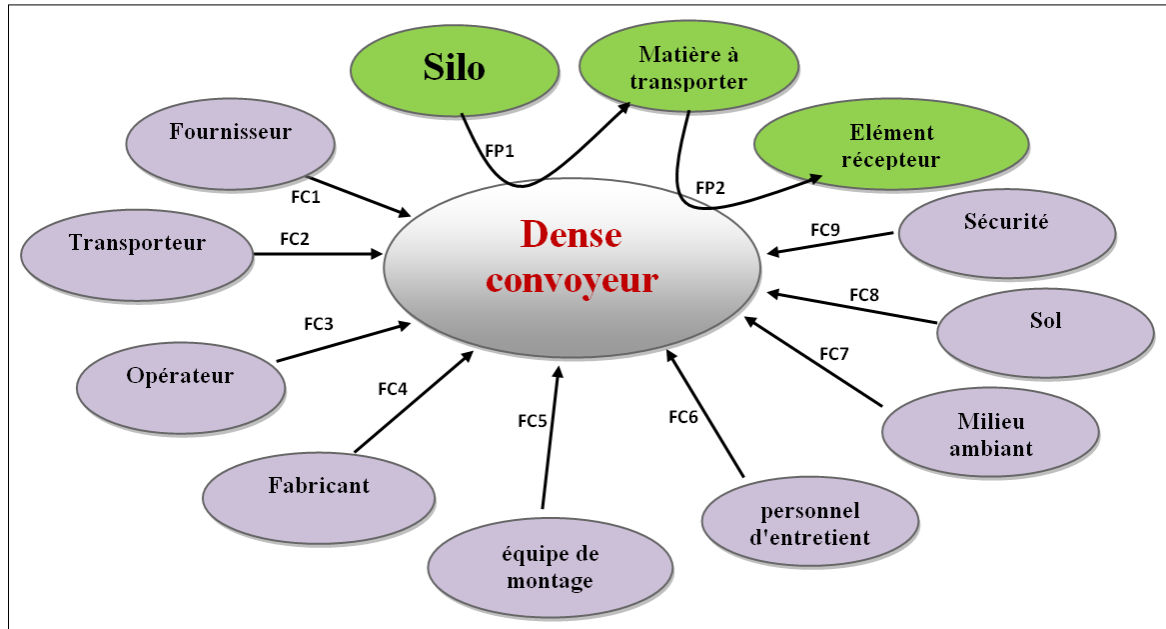


Figure 4.1: Diagramme de Pieuvre du dense convoyeur

Fonctions contraintes:

Dans certains cas, les exigences du client ne sont pas suffisantes pour définir le système au complet, dans ce cas des questions complémentaires doivent être posées, les plus pertinentes sont du genre : Que faut-il faire de plus pour réaliser le produit ? Comment assurer la bonne exécution des phases de production?... Ces fonctions sont notées FC1, FC2, ...

Tableau 4.2: Les fonctions de service

Fonctions principales	Fonctions contraintes
FP1: Récupération de la matière du silo FP2: Transporter la matière vers l'élément récepteur	FC1: Assurer la fourniture de la matière première FC2: Faciliter le transport de la matière première FC3: Améliorer l'ergonomie FC4: Optimiser la fabrication FC5: Faciliter le montage FC6: Optimiser la maintenance FC7: Adapter le système aux conditions météorologiques FC8: Résister au séisme FC9: Respecter la réglementation liée à la sécurité

4.2.4 Cahier des charges fonctionnel:

Après avoir spécifié les différentes fonctions de service, on doit les caractériser avec les critères qui les définissent le mieux, en prenant en compte si disponible la flexibilité, on dresse le tout dans le tableau du Cahier des charges fonctionnel ci-dessous.

Tableau 4.3: Cahier des charges fonctionnel du dense convoyeur

Fonctions de service	Critères	Niveau	Flexibilité	
			Limite d'acceptation	Classe
FP1: Récupération de la matière du silo	- Débit de remplissage			1
	- Dimensions du silo			0
	- Volume de remplissage			1
	- Propriétés de la matière	Plâtre	---	0
	- Nombre de sas	1	---	0
FP2: Transporter la matière vers l'élément récepteur	- Distance horizontale	50m	+/-5m	1
	- Distance verticale	10m	---	0
	- Débit de transport	20 t/h	---	0
	- Propriétés de la matière à transporter	Plâtre	---	0
	- Pression d'air admis dans le sas			0
	- Nombre de sas	1	---	0
FC1: Assurer la fourniture de la matière première	- Prix de la matière première			1
	- Proximité du lieu de fourniture			2
FC2: Faciliter le transport des composants	- Distance de transport des composants entre l'atelier et le site			2
	- Masse des composants			2
	- Moyen de transport			3
FC3: Améliorer l'économie	- Commandes de l'équipement			2
FC4: Optimiser la fabrication	- Types de procédés de fabrication			2
	- Nombre d'étapes de fabrication			2
FC5: Faciliter le montage	- Types d'assemblage			2
	- Nombres de pièces à assembler			2
FC6: Optimiser la maintenance	- Fiabilité des composants			1
	- Prix des composants			1
	- MTBF			1
	- MTTR			1
	- Accessibilité			1
	- Assurer le vidage en fin de service			0
FC7: Adapter le système aux conditions météo	- Résistance à la corrosion			0
	- Plage de températures admissible			2
FC8: Résister à un séisme	- Centre de gravité			1
	- Fréquence propre			2
FC9: Respecter la réglementation liée à la sécurité	- Journal officiel - autres réglementations			0

Pour indiquer l'importance d'une fonction par rapport à d'autres, une échelle de 1 à 5 est ajoutée exprimant le degré de flexibilité des critères liés à la fonction en question, ce degré est connu sous le nom de classe [10].

4.3 Conception:

4.3.1 Sas de transport:

Etant l'élément principal du système, le sas de transport nécessite une conception particulière respectant les standards et les normes auxquels sont liés ses composants illustrés ci-dessous:

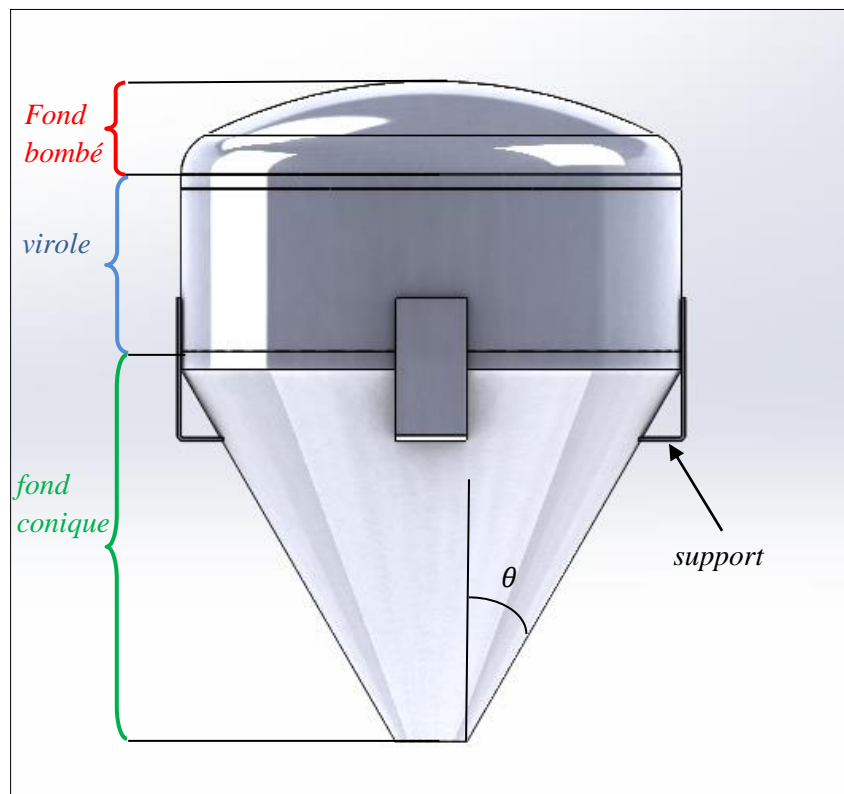


Figure 4.2 : Eléments constitutifs de la géométrie d'un sas de transport

Pour la conception du sas, on tiendra compte des contraintes suivantes:

- Le volume du sas doit être égal à 1400L tel que demandé par "Bimeca process"
- Afin de réduire l'encombrement, le détecteur de niveau doit être placé le plus loin possible de la vanne de remplissage de matière, il doit également se placer dans la partie cylindrique (virole) pour simplifier le perçage de son orifice d'emplacement. Il doit se situer alors dans la partie la plus basse possible de la virole, cette position impose que la matière doit occuper uniquement la partie conique du sas, autrement dit:

$$V_s = V_{c\hat{o}ne} \quad (4.1)$$

$V_{c\hat{o}ne}$: Volume du fond conique

- Etant donné que $\tau = 2$, l'équation (4.1) impose que le volume du cône et de la partie cylindrique doivent être identiques, soit:

$$V_{cyl} = V_{c\hat{o}ne} = \frac{V_{sas}}{2} \quad (4.2)$$

V_{cyl} : Volume de la partie cylindrique (le volume du fond bombé étant négligé).

$$V_{cyl} = \frac{\pi d^2}{4} h_{cyl} \quad (4.3)$$

$$V_{c\hat{o}ne} = \frac{\pi d^2}{12} h_{c\hat{o}ne} \quad (4.4)$$

h_{cyl} : Hauteur de la partie cylindrique,

$h_{c\hat{o}ne}$: Hauteur de la partie conique,

d : Diamètre de la virole (également diamètre du fond bombé et diamètre supérieur du cône),

En combinant les équations (4.2) (4.3) et (4.4) on obtient:

$$h_{cyl} = \frac{h_{c\hat{o}ne}}{3} \quad (4.5)$$

et :

$$V_{sas} = \frac{\pi d^2}{6} h_{c\hat{o}ne} \quad (4.6)$$

- L'angle de la tête du cône (θ) tel qu'illustré à la Figure 4.2 ci-dessus, a pour valeur standard 30° [16], donc:

$$h_{c\hat{o}ne} = \frac{\sqrt{3}}{2} d \quad (4.7)$$

Le volume du sas aura alors pour expression:

$$V_{sas} = \frac{\sqrt{3}\pi d^3}{12} \quad (4.8)$$

D'où on tire l'expression du diamètre en fonction du volume du sas:

$$d = \left(\frac{4\sqrt{3}}{\pi} V_{sas} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.9)$$

On obtient alors le diamètre minimal du cylindre pour la valeur de V_{sas} demandée (1.4m^3) :

$$d_{\text{min}} = 1.456\text{m}$$

Les dimensions du fond bombé sont imposées par la norme NFE-81-102-GRC [13] dont un extrait des catalogues est inséré en annexe.

Pour limiter l'encombrement radial, on choisit parmi les valeurs du diamètre proposées dans le catalogue, la plus proche de d_{min} par excès afin d'obtenir pour le volume du sas au moins une valeur de 1400L, soit donc:

$$D_s = 1.5\text{m}$$

Pour tenir compte du volume du fond bombé, et corriger ainsi les dimensions calculées précédemment en le négligeant, on a eu recours à la conception avec le logiciel SOLIDWORKS, qui permet d'évaluer les dimensions des modèles géométriques créés et leur apporter les rectifications nécessaires.

Le choix de l'épaisseur fait l'objet de la prochaine section où l'on s'intéresse à l'étude de la résistance du sas aux efforts auxquels il est soumis au cours de son utilisation.

Simulation RDM:

Au cours du fonctionnement, la paroi intérieure de la partie cylindrique du sas est soumise à une pression qui monte jusqu'à 7.7 bar (pression de service), tandis que le fond conique doit supporter la charge de matière dont la masse s'élève à 770 kg (masse d'un lot de solide). Pour s'assurer de l'aptitude du sas à résister à ces sollicitations, plusieurs simulations sont effectuées avec le logiciel SIMSOLID.

Le matériau est choisi selon les conditions suivantes :

- limite élastique suffisamment élevée ;
- optimisation de la masse du sas ;
- disponibilité dans le marché à des prix avantageux.

Ces critères nous ont mené à choisir l'acier S235, dont les propriétés sont récapitulées dans le tableau ci-dessous [14]:

Tableau 4.4 : Propriétés de l'acier S235

Masse volumique	7800 kg/m ³
Module de Young	205 GPa
Coefficient de Poisson	0.3
Limite d'élasticité	235Mpa

Le tableau ci-dessous présente les paramètres exploités dans la simulation :

Tableau 4.5: Paramètres de la simulation

Matériau	Acier S235
Chargement	9 bars de pression appliquée sur la paroi
Appuis	Encastrement au niveau des pieds des supports
Maillage	20.10 ⁶ éléments triangulaires
Epaisseur de soudage	Bout à bout x1 / Angle x0.7
Epaisseur de la tôle	- 5mm, 10mm, 15mm

Comme détaillé ci-dessus trois simulations ont été effectuées pour trois valeurs de l'épaisseur de la tôle : 5 mm, 10 mm puis 15mm. Ces valeurs ont été choisies en consultant la norme NFE-81-102-GRC [13], ainsi que les épaisseurs usuelles utilisées pour cette nuance [13,16].

Ci-dessous la répartition des contraintes équivalentes de Von-mises pour les trois cas:

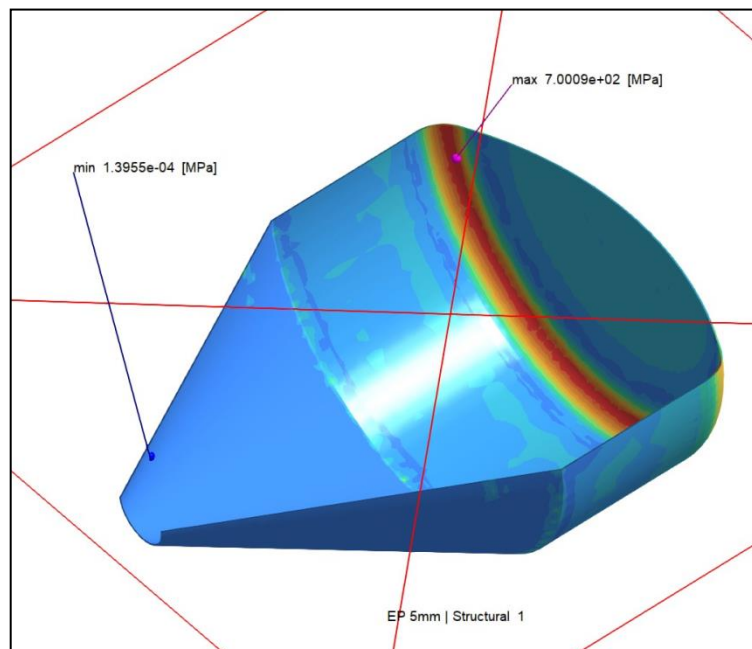


Figure 4.3a: Répartitions des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 5mm d'épaisseur

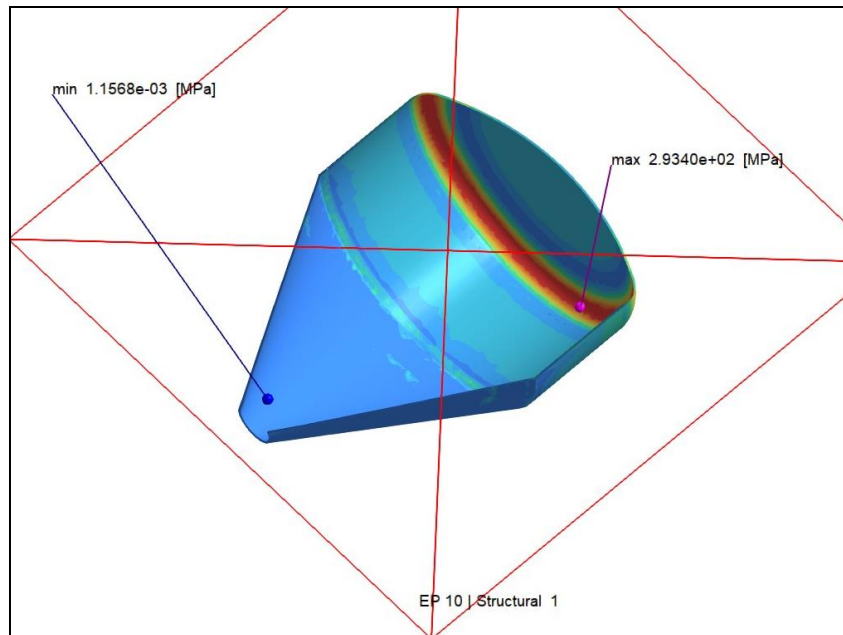


Figure 4.3b : Répartitions des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 10mm d'épaisseur

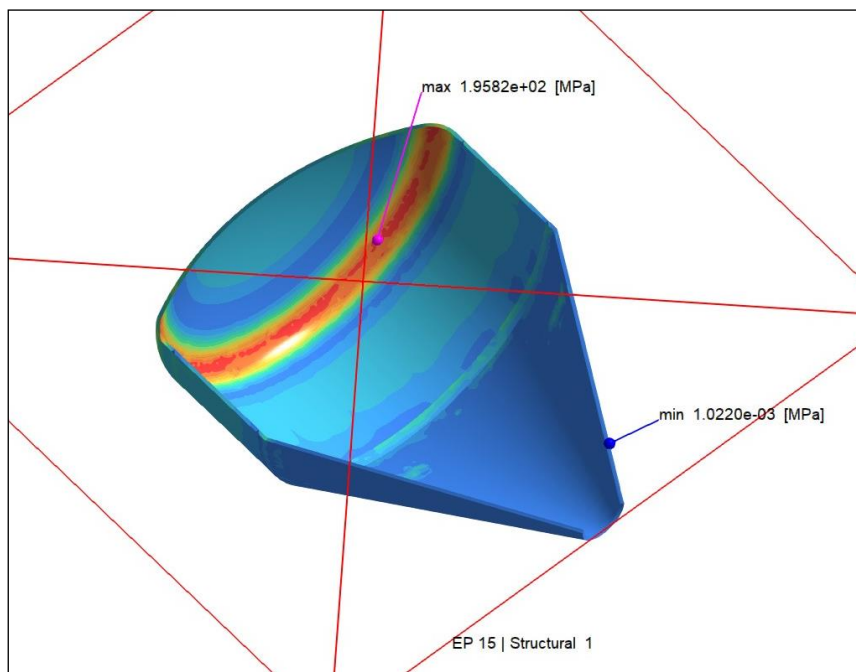


Figure 4.3c : Répartition des contraintes équivalentes de Von-mises pour une tôle de 15mm d'épaisseur

Pour les épaisseurs de 5mm (figure 4.3a) et 10 mm (figure 4.3b), on remarque que la contrainte équivalente de Von-mises dépasse la limite élastique du matériau, la rupture se produit effectivement au niveau de la zone de concentration de contrainte située entre la virole et le fond bombé. En revanche en utilisant une tôle de 15 mm d'épaisseur (figure4.3c),

la contrainte équivalente de Von-mises (195.82Mpa) sera inférieure à la limite élastique du matériau (235MPa), cette valeur de l'épaisseur est donc retenue, ce qui nous permet de disposer d'un coefficient de sécurité de 1,2.

Tableau 4.6 : Résultats de la simulation pour différente épaisseurs de la tôle

Epaisseur (mm)	Contrainte min (Mpa)	Contrainte max (Mpa)	Coefficient de sécurité	décision
5	$1.39 \cdot 10^{-4}$	700.09	0.34	Refusé
10	$1.16 \cdot 10^{-3}$	294.4	0.8	Refusé
15	$1.2 \cdot 10^{-3}$	195.82	1.2	Accepté

On rappelle que la pression sur la paroi cylindrique appliquée dans la simulation est de 9bars (Tableau 4.7) au lieu de la pression de service (7.7 bar). Ce surdimensionnement a pour but d'adapter le sas pour d'autres convoyeurs ayant des pressions de service plus élevées. Voici le modèle 3Ddes composants du sas obtenu avec SOLIDWORKS:

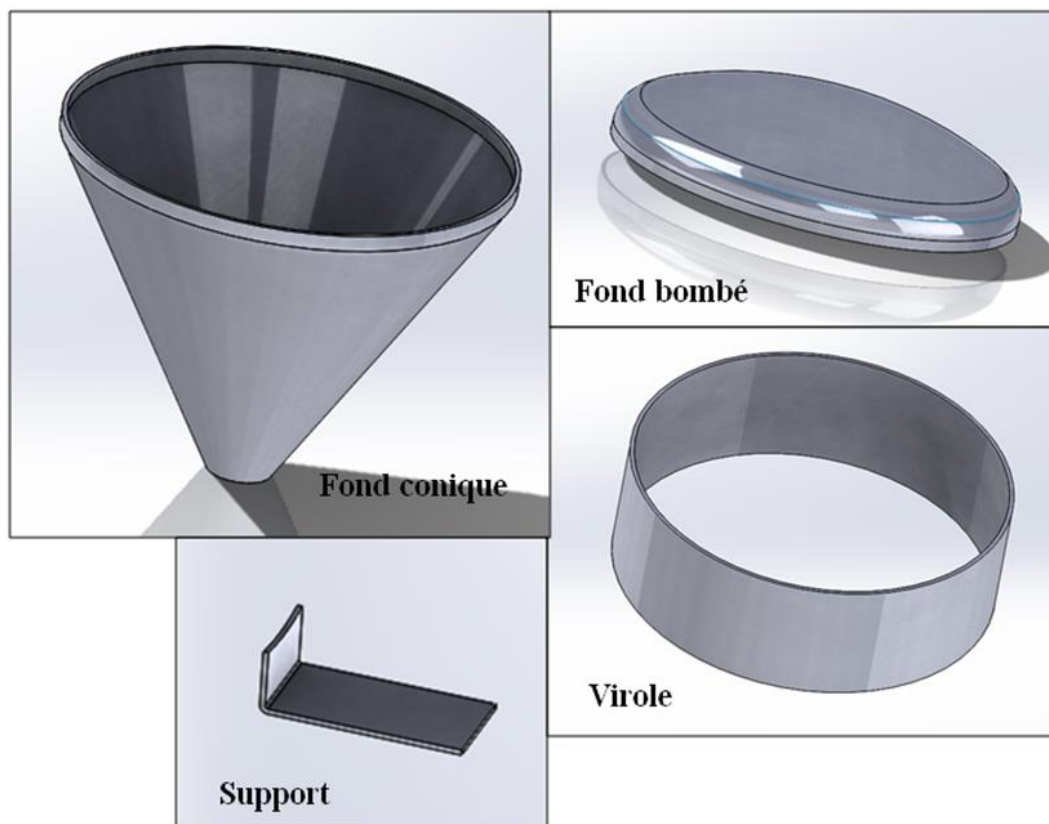


Figure 4.4 : Conception 3D des éléments du sas

4.3.2 Conduite de transport:

Connaissant le diamètre de la conduite de transport ($D=200\text{mm}$), les dimensions normalisées fournies par la référence [14] nous renseignent sur son épaisseur qui est de 19,1mm. en assemblant cette conduite avec les coudes et les brides de raccordement au sas, on obtient la configuration finale de la conception qui se présentera comme ci-dessous.

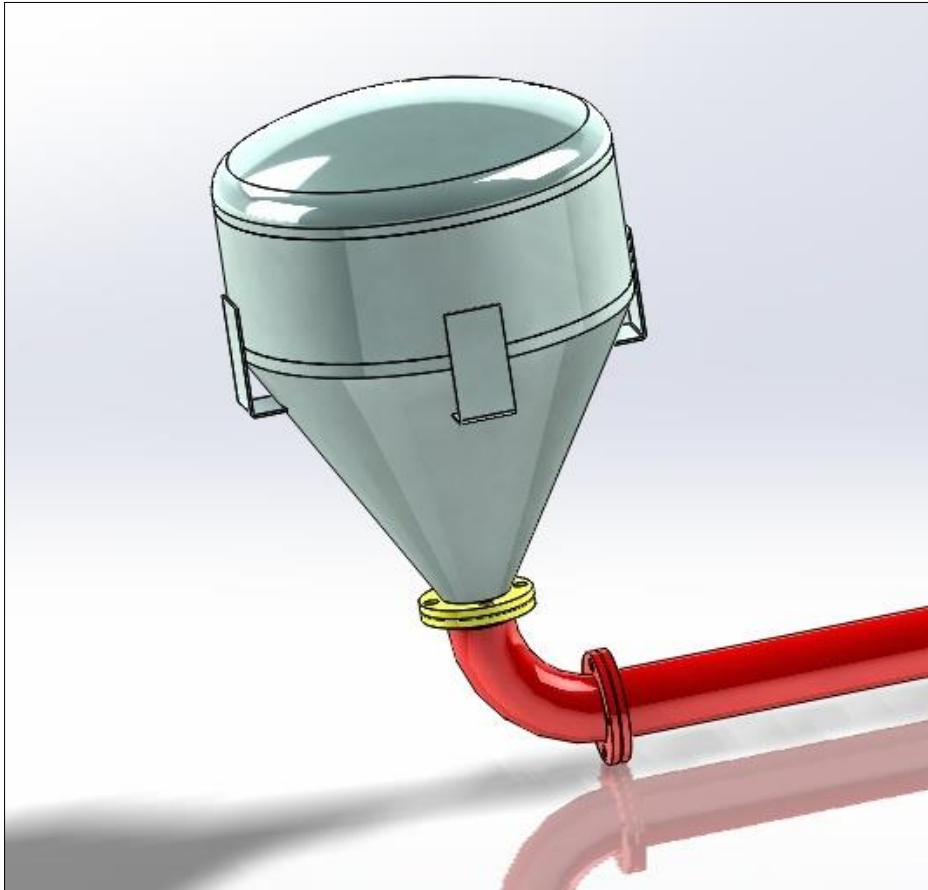


Figure 4.5 :Assemblage final du dense convoyeur

4.4 Conclusion:

Les dimensions et la géométrie de l'équipement déterminées, reste à réaliser les mises au plan et choisir les accessoires restants (capteurs de niveau, pressostat, vannes,...) disponibles sur le marché afin de finaliser la conception, ce qui permettra par la suite de passer à la réalisation et la fabrication du dense convoyeur.

Conclusion générale:

L'étude qui nous a été proposée par "Bimeca Process", un bureau d'études dans l'ingénierie mécanique, a pour objectif de dimensionner un système de transport pneumatique pour convoier du plâtre au niveau d'un site avec un débit et sur un parcours dont la longueur et la hauteur sont explicités dans le cahier des charges.

La matière étant très dense, nous avons opté d'emblée pour un transport en phase dense. Pour ce type de transport, nous n'avons trouvé que des études basées sur des approches empiriques (utilisation d'abaques et de corrélations). Nous avons donc développé un modèle mathématique fondé sur deux hypothèses principales :

- Partout à travers le système de convoyage, l'air est assimilé à un gaz parfait et subit des détente isothermes.
- La matière est convoyée séparément en lots traités comme des corps solides indéformables, dont le mouvement à l'intérieur de la conduite est facilité par la formation d'un mince coussin d'air au contact de la paroi, ce qui nous a permis d'approcher la réaction normale de la paroi (radiale dans ce cas) par le poids du lot de matière, puis d'appliquer la loi de Coulomb pour exprimer la résistance au mouvement que subissent les lots, avec un coefficient de frottement dont la valeur a été estimée pour tenir compte à la fois de la couche d'air que s'interpose entre le bloc de matière et la paroi d'un côté, et d'un autre côté les résistances dues aux singularités de la conduite dont nous n'avons pas suffisamment de détails pour les inclure explicitement dans les calculs.

L'exploitation du modèle sur MATLAB nous a permis d'effectuer une analyse paramétrique du système et de mettre en évidence l'impact que certains choix peuvent avoir sur les caractéristiques et les performances du système. C'est ainsi que nous avons pu constater que le volume du sas doit être suffisamment important pour réduire la fréquence des cycles de fonctionnement et permettre aux organes de régulation d'opérer avec des constantes de temps raisonnables.

Un autre facteur important est la fraction du volume du sas qui sera occupée par l'air au début de la détente (τ). Une valeur importante de ce paramètre, donnera une pression d'injection d'air élevée, tandis qu'une faible valeur de τ entrainera également une plus grande fréquence des cycles de fonctionnement. Une valeur de 2 pour ce paramètre semble constituer un bon compromis entre ces deux effets antagonistes. Pour avoir une période d'un cycle de fonctionnement qui dépasserait une minute, avec $\tau = 2$, il faudra un volume de sas supérieur

à 600 L. La pression d'injection est également impactée jusqu'à un certain point par le rapport de charge solide \emptyset . En effet, tant que la valeur de ce rapport reste suffisamment basse, la pression sera élevée, mais quand la valeur de \emptyset dépasse un certain seuil, qui se situe d'après nos calculs autour des 200, la pression atteint sa valeur minimale pour une valeur de τ donnée, valeur qui dans notre cas tourne autour de 7,5 bar.

Afin de pouvoir effectuer une comparaison avec les résultats d'une étude menée par un autre bureau d'étude pour satisfaire le même cahier des charges, nous avons pris la même valeur pour le volume du sas, soit $V_{sas} = 1400 L$. le système proposé par cette étude présente les caractéristiques suivantes :

- Nombre de cycles par heure: 17
- Pression de service (injection dans le sas) 6 bars relatifs
- pression d'injection secondaire (au niveau du coude) 3 bars relatifs

Les résultats de la dite étude sont comparés aux nôtres dans le tableau ci-dessous:

Tableau comparatif de nos résultats avec ceux d'une étude concernant le même projet

	Nos résultats	Résultats de l'étude
Pression de service (bar relatif)	6.5	6
Pression d'injection secondaire (bar relatif)	--	3
Fréquence (cycles/ heure)	26	17

Nous pouvons relever, à partir de cette comparaison que dans notre cas, on a besoin de 9 cycles supplémentaires par heure pour répondre aux exigences du cahier des charges, mais les résultats montrent qu'ils ont opté pour un système avec injecteurs d'air dans la conduite, système qui utilise donc plus d'air pour le transport, ce qui lui donne ce léger avantage sur les performances de notre application.

Dans la quête de l'amélioration continu des recherches, nous proposons d'exploiter des options qui nous n'avons pas pu exploiter faute de temps, on site parmi ces dernières:

- Les simulations CFD pour les écoulements diphasiques, (en optant pour les différentes approches de modélisations de l'écoulement tel que les approches eulérienne et lagrangienne).
- Envisager une seconde injection d'air au niveau du coude à la sortie du sas.
- Etablir des modèles plus précis pour déterminer le coefficient de frottement statique

Bibliographie:

- [1] David Mills, "Pneumatic Conveying Design Guide - Third Edition", University of Newcastle in NSW, Australia, 2016.
- [2] <https://www.claudiuspeters.com/en-GB/3002/pneumatic-conveying>
- [3] pdf.industry.fr, "Dynamic Air Inc. 16 concepts de transport pneumatique", Dynamic Air.
- [4] Chandana Ratnayake, "A Comprehensive Scaling Up Technique for Pneumatic Transport Systems" Department of Technology Telemark University College (HiT-TF) Kjølnes Ring, N-3914 Porsgrunn Norway, 2005.
- [5] Arun Kaliappan, Sam Vimal Kumar, Ajay Rajagopal, "EVALUATION OF PRESSURE DROP IN A CYCLONE SEPARATOR BY USING CFD ANALYSIS", Kumaraguru College of Technology, 2019.
- [6] V.Thonglimp, N.Hiquily, C.Laguerie, "vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches de mélanges de particules solides fluidisées par un gaz", Institut de génie chimique, LA.CNRS, Toulouse, 1983.
- [7] K. Konrad, "Dense-phase Pneumatic Conveying: Review", University of Cambridge, Department of Chemical Engineering.
- [8] [http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique du solide /charbonnieres/ mecanique/132_lois_du_frottement_sec_lois_de_coulomb.html](http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique%20du%20solide%20/charbonnieres/mecanique/132_lois_du_frottement_sec_lois_de_coulomb.html)
- [9] David Mills, Mark G. Jones, Vijay K. Agarwal, " Handbook-of-pneumatic-conveying-engineering" University of Newcastle in NSW, Australia, Indian Institute of Technology, New Delhi, 2004.
- [10] Robert Tassinari, "Pratiques de l'Analyse Fonctionnelle - troisième édition", 20/01/2003
- [11]: <http://siitechnologie.spip.acrouen.fr>, "Cahier des charges, canne de randonnée éclairante rechargeable", Lycée Jacques Prévert.
- [12] Jean-Loup Presnier, Jean-marie Virely, "Analyse Fonctionnelle du Besoin", Université Paris Saclay, 16/05/2006.
- [13] <https://www.slideshare.net/DVAI/fonds-grc-nfe-81102>
- [14] <http://iut.univ-lemans.fr/gmp/cours/rebiere/proprietesmecaniques.html>

[15] <https://www.pgprocess.fr/wp-content/uploads/2021/03/correspondances-des-dimensions-des-tuyauteries.pdf>

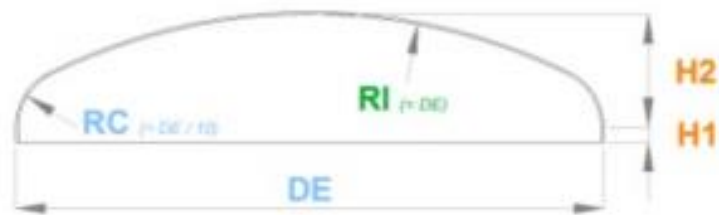
[16] documentation interne "Bimeca Process"

ANNEXE I : Extrait des catalogues des dimensions des fonds bombés

Norme NFE-81-102-GRC [12]



FONDS GRC NFE 81 102



Valeur du rayon de bombage:

$RI = DE$

Valeur du rayon de carre:

$RC = 0.1 \times DE$

Valeur de la flèche intérieure théorique:

$H2 = RI - \sqrt{\{(RI-RC)^2 - (K-RC)^2\}}$ avec $K = (DE - 2E)/2$

DE	E		H2		RI	V
	de	à	de	à		
200	2	4	38	37	200	1.4
250	2	4	47	47	250	2.6
300	2	4	57	56	300	4.2
350	2	4	66	66	350	6.3
400	2	6	76	75	400	5.4
450	2	6	86	84	450	8
500	2	6	95	94	500	11
550	2	6	105	104	550	15
600	3	6	115	113	600	19
650	3	6	124	123	650	25
700	3	6	134	133	700	31
750	3	6	144	142	750	38
800	3	8	154	151	800	47
850	3	8	163	161	850	56
900	4	8	173	170	900	67
950	4	8	182	180	950	79
1000	4	15	192	187	1000	92
1100	4	20	211	204	1100	123
1200	4	20	230	226	1200	160
1300	4	20	249	242	1300	204
1400	4	20	269	262	1400	256
1500	4	20	288	281	1500	316
1600	4	20	307	300	1600	384
1700	4	20	326	320	1700	461

DE	E		H2		RI	V
	de	à	de	à		
1800	4	20	346	339	1800	549
1900	4	20	365	358	1900	647
2000	4	20	385	378	2000	755
2100	4	20	404	397	2100	875
2200	6	20	422	417	2200	1007
2300	6	20	442	436	2300	1152
2400	6	20	461	455	2400	1310
2500	6	20	481	475	2500	1483
2900	6	20	558	552	2900	2321
3000	6	20	577	572	3000	2571
3100	8	20	597	591	3100	2838
3200	8	20	616	610	3200	3123
3300	8	20	636	630	3300	3427
3400	8	20	655	649	3400	3750
3500	8	20	673	668	3500	4062
3600	8	20	693	688	3600	4423
3700	8	20	712	707	3700	4805
3800	8	20	731	727	3800	5208
3900	8	20	751	746	3900	5633
4000	8	20	770	765	4000	6080
4100	8	20	790	785	4100	6740
4200	8	20	809	804	4200	7250
4300	8	20	828	823	4300	7780
4400	8	20	848	843	4400	8340
4500	8	20	867	862	4500	8930

DE diamètre extérieur du fond.

E épaisseur du flanc de départ

H2 hauteur intérieure hors bord droit

RI rayon emboutissage

V volume approximatif en litres hors bord droit

H1 hauteurs de bords droits préférentielles

E	2	3 - 4	5 - 6	8 - 10	12	15	18 - 20
H1	20	25	40	50	55	60	70

ZI de la Petite Motte 77220 TOURNAI-EN-BRIE
 Tél : 01.64.81.50.50 – Fax : 01.64.84.50.56
info@dvai.fr – www.dvai.fr