

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique



Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique.

# Analyse des paramètres de Performances d'une tour d'atomisation

Razika SAAD

Sous la direction de M. B. BENKOUSSAS ET et M. BOUBAKEUR

Présentée et soutenue publiquement le 21/ 06/ 2016

## Composition du Jury :

Président	M. Salah LARBI,	Prof	ENP
Promoteurs	M. Bouzid BEKOUSSAS,	MC(A)	ENP
	M. Mohamed BOUBAKEUR	MAA	ENP
	M. Djamel KARI	cadre	ENAD
Examineur	M Mohamed. LATRECHE	MAA	ENP
	M. Hecene BELHANACHE	MAA	ENP

ENP 2016

**Dédicace :**

*Je dédie ce travail à :*

*Ma mère*

*Mon père*

*Mes frères: Khaled, Adel, Boubakeur, hicham et*

*Fayçal*

*Ma sœur: Atham.*

*Mes amies : Rihab, Soumia, Karima, Atham.*

*Mes collègues de classe.*

## ***Remerciement :***

Je tiens tout d'abord à remercier le Dr B. BENKOUSSAS, Dr M. BOUBAKEUR mes promoteurs côté ENP pour leur aide précieuse, leurs conseils et leur encouragement, voir la confiance qu'ils ont mis en moi dès le début de projet.

Je remercie également le Dr D. KARI, le Dr I. BOUALEM et Pr. K. Mouhammedi qui m'ont aidé beaucoup, pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour m'avoir aidé à mieux mener et intégrer mon sujet en m'orientant avec leurs conseils et directives.

Je tiens à exprimer ma gratitude pour les enseignants de l'ENP B. KEBLI, H. BENNOUR, A. ZAYED et Pr L. DJEGHLAL.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département génie mécanique pour la qualité de la formation qu'ils m'ont imprégné.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous mes camarades de promotion.

## المخلص:

الهدف هذه الدراسة ينحصر في حساب سرعة قطرة المنظف و وقته اللازم للتجفيف داخل برج الرذاذ للشركة الوطنية للمنظفات، من خلال معادلة التوازن، الحرارة و كمية الحركة. أولاً، نقوم بوصف التجهيزات المستعملة في عملية انتاج مسحوق المنظف ثم إخراج العوامل المؤثرة في ظاهرة التجفيف، بعد ذلك نقوم بحساب وقت التجفيف بدلالة هذه العوامل. أخيراً، المعادلات المتحصل عليها تم برمجتها بواسطة برنامج حسابي لأجل معرفة تغيرات وقت التجفيف بدلالة هذه العوامل .

## **Abstract**

The objective of this study is limited calculating the speed of a droplet of detergent and computing drying time in a spray tower for the national ENAD of detergents through a mass balance, heat and momentum.

First, it was a description of the equipment used in powder detergent production process, then brought out the parameters that influence on the drying phenomenon. Then, the residence time was calculated based on these. Finally, the resulting equations are programmed by MATLAB to highlight the variation in residence time according to these parameters.

**Key words:** the spray tower, spray drying, time stays, detergents.

## **Résumé :**

L'objectif de cette étude se limite à un calcul de la vitesse d'une gouttelette d'un détergent et le calcul de son temps de séchage dans une tour d'atomisation de l'entreprise nationale de détergents ENAD, à travers un bilan de masse, de chaleur et de quantité de mouvement.

Tout d'abord, on a fait un descriptif des équipements utilisés dans le processus de production de détergents poudre, puis on a fait ressortir les paramètres qui influencent le phénomène de séchage. Ensuite, on a calculé le temps de séjour en fonction de ces derniers. Finalement, les équations obtenues sont programmé sur MATLAB pour faire ressortir la variation de temps de séjour en fonction des principaux paramètres.

**Mot clés :** la tour d'atomisation, séchage par atomisation, le temps de séjours détergents.

## ***Tableau de matière***

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Nomenclatures	
Introduction Générale .....	13
Chapitre 01 : Séchage par atomisation. ....	15
1.1. Introduction : .....	15
1.2. Historique : .....	15
1.1. Avantages et inconvénients : .....	16
Les avantages : .....	16
Les inconvénients : .....	17
1.2. Structure du système de séchage par atomisation : .....	18
1.3. Principe de fonctionnement du système de séchage par atomisation... 18	
✓ Sécheur vertical à pulvérisation (Cyclone) : .....	18
✓ Sécheur horizontal à pulvérisation (Rogers) : .....	19
1.4. Les différents systèmes de séchage par atomisation : .....	20
1.5. Structure de séchage par atomisation : .....	23
1.5.1. Système de fourniture de matière première : .....	23
1.5.2. Classification d'atomiseurs : .....	25
1.5.3. Système de fourniture d'air de séchage : .....	28
1.5.4. Chambre de séchage : .....	30
1.5.5. Système de séparation et de récupération de la poudre : .....	32
1.6. Les éléments d'influence dans l'opération de séchage par atomisation : .....	34
➤ L'influence de la viscosité : .....	34
➤ L'influence de la taille de l'orifice de l'atomiseur : .....	34

➤ L'influence de la pression de l'atomiseur : .....	34
➤ L'influence du débit d'alimentation : .....	34
➤ L'influence de la teneur en matière solide du liquide : .....	35
➤ L'influence de la température de matière première : .....	35
➤ L'influence de la tension superficielle : .....	35
➤ L'influence de la température d'entrée de l'air : .....	36
➤ L'influence de la température de sortie de l'air : .....	36
➤ L'influence de la vitesse relative entre l'air et le spray : .....	37
➤ L'influence de l'humidité ambiante : .....	37
1.7. Périodes du séchage des gouttelettes : .....	37
Chapitre 02 : Présentation de l'Entreprise et des Equipements. ....	40
2.1. Introduction : .....	40
2.2. Historique : .....	40
2.3. Caractéristiques du complexe (SEG) : .....	41
➤ Superficie : .....	41
➤ Production annuelle : année 2011 .....	41
➤ Besoins (exploitation plein régime) .....	41
➤ Rythme de travail .....	41
➤ Situation géographique : .....	42
2.4. La structure de l'entreprise : .....	42
2.5. Principe de fonctionnement de la tour d'atomisation : .....	43
2.6. Le processus de fonctionnement : .....	45
2.7. Les fiches techniques des équipements : .....	46
➤ Ventilateur C408 : .....	47

➤ Ventilateur C407 : .....	47
➤ Ventilateur C411 : .....	48
➤ Le four B401 : .....	48
➤ La pompe à haute pression P407 : .....	49
➤ La tour T401 : .....	49
Chapitre 03 : Modélisation de l'opération de Séchage. ....	50
1. Introduction : .....	50
2. Les forces appliquées sur la gouttelette : .....	50
3. Transfert de chaleur : .....	52
4. Transfert de masse : .....	53
5. Le rendement énergétique : .....	56
6. Simulation de phénomène : .....	56
Chapitre 04 : Expérimentation Numérique. ....	58
1. Introduction : .....	58
✓ Les graphes : .....	58
✓ Les abaques : .....	64
Conclusion et perspectives. ....	72
Annexe .....	73
Référence .....	79

***Liste de tableaux.***

Tableau 1 fiche technique du ventilateur C408 .....	47
Tableau 2 fiche technique du ventilateur C407 .....	47
Tableau 3 fiche technique du ventilateur C411 .....	48
Tableau 4 fiche technique du four B401 .....	48
Tableau 5 fiche technique de la pompe à haute pression P407.....	49
Tableau 6 fiche technique de la tour T401 .....	49



## *Liste des figures :*

Figure 1. 1 Schéma représente la structure du système de séchage.....	15
Figure 1. 2 Schéma représente le sécheur vertical à pulvérisation.....	16
Figure 1. 3 Schéma représente le sécheur horizontal à pulvérisation.....	17
Figure 1. 4 Schéma de système ouvert.....	18
Figure 1. 5 Schéma de cycle clos.....	18
Figure 1. 6 Schéma de cycle demi-clos.....	19
Figure 1. 7 Schéma de cycle aseptique.....	20
Figure 1. 8 Organigramme représente les différents types de l'atomiseur.....	22
Figure 1. 9 Images d'un atomiseur rotatif.....	22
Figure 1. 10. Les différentes configurations de chambre de séchage à co-courant.....	28
Figure 1. 11 La configuration de chambre de séchage à contre-courant.....	28
Figure 1. 12 Les configurations de la chambre de séchage mixte.....	29
Figure 1. 13 Organigramme de la récupération de la poudre.....	30
Figure 1. 14 Schéma explique les transferts existes.....	35
Figure 1. 15 Diagramme de la variation de la vitesse de séchage en fonction de teneur en eau.....	36
Figure 2. 1 Exemples de formes de particules obtenues par séchage-atomisation.....	39
Figure 2. 2 schéma d'une tour d'atomisation.....	44
Figure 2. 3 Schéma de l'unité 400.....	46
Figure 2. 4 mis en plan de la tour T401.....	50
Figure 4. 1 La courbe de vitesse en fonction de temps de séjour.....	61
Figure 4. 2 La courbe de vitesse en fonction de vitesse initiale.....	62

Figure 4. 3 la courbe de temps de séjour en fonction de $T_{\infty}$ .....	62
Figure 4. 4 la courbe de temps de séjour en fonction de $T_i$ .....	63
Figure 4. 5 la courbe de temps de séjour en fonction de $C_e$ .....	64
Figure 4. 6 la courbe de temps de séjour en fonction de $\rho_s$ .....	64
Figure 4. 7 la courbe de vitesse en fonction de masse volumique.....	65
Figure 4. 8 la courbe de temps de séjour en fonction de rayon initial .....	65
Figure 4. 9 la courbe de vitesse en fonction de $R_0$ .....	66
Figure 4. 10 la courbe du temps séjour en fonction de $C_e$ .....	66
Figure 4. 11 a les courbes de temps de séjour en fonction de $C_e$ et $T_{\infty}$ .....	67
Figure 4. 11 b les vues agrandies de courbe de temps de séjour en fonction de $C_e$ et $T_{\infty}$ .....	68
Figure 4. 12 les courbes de temps de séjour en fonction de $T_i$ et $T_{\infty}$ .....	68
Figure 4. 13 les courbes de temps de séjour en fonction de $\rho_s$ et $T_{\infty}$ .....	69
Figure 4. 14 les courbes de temps de séjour en fonction de $R_0$ et $T_{\infty}$ .....	69
Figure 4. 15 les courbes de temps de séjour en fonction de $\rho_s$ et $T_i$ .....	70
Figure 4. 16 les courbes de temps de séjours en fonction de $R_0$ et $T_i$ .....	70
Figure 4. 17 les courbes de temps de séjours en fonction de $C_e$ et $R_0$ .....	71
Figure 4. 18 les courbes de temps de séjours en fonction de $\rho_s$ et $R_0$ .....	71
Figure 4. 19 les courbes de temps de séjours en fonction de $\rho_s$ et $C_0$ .....	72
Figure 4. 20 les courbes de temps de séjours en fonction de $t_{inf}$ et $C_0$ .....	72
Figure 4. 21 les courbes de temps de séjours en fonction de $R_0$ et $C_0$ .....	73
Figure 4. 22 les courbes de temps de séjours en fonction de $T_i$ et $C_0$ .....	73
Figure 4. 23 les courbes de temps de séjours en fonction de $T_i$ et $C_e$ .....	74

## *Nomenclatures*

$P_d$  : Le poids [N].

$R$  : La résistance de l'air [N] .

$T$  : Poussée d'Archimède [N] .

$F$  : La force de dépression [N] .

$\rho_s$  : La masse volumique de slurry  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

$\rho_a$  : La masse volumique de l'air  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  .

$R_0$  : Le rayon initial de gouttelette [m].

$g$  : L'accélération de pesanteur  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ .

$P$  : La dépression [Pa].

$C_x$  : Le coefficient de traînée.

$v_i$  : La vitesse initiale de slurry  $\left[\frac{m}{s}\right]$  .

$C_0$  : La concentration initiale de l'eau dans la gouttelette  $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$  .

$C_e$  : La concentration finale de l'eau dans la gouttelette  $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$  .

$D_{AB}$  : Le coefficient de diffusion  $\left[\frac{mol}{s}\right]$  .

$T_i$  : La température initiale de slurry [K] .

$T_\infty$  : La température de l'air chaud à l'entrée [K] .

$T_{vap}$  : La température de l'évaporation de l'eau [K] .

$t_c$  : Le temps dans la partie de transfert de chaleur [s] .

$t_m$  : Le temps dans la partie de transfert de masse [s] .

$\dot{E}_{st}$  : Taux d'augmentation de l'énergie stockée dans un contrôle [W].

$\dot{E}_{out}$  : Taux de transfert d'énergie hors du volume de commande [W] .

$\dot{E}_{in}$  : Taux de transfert d'énergie dans un volume de commande [W] .

$A_{s,h}$  : Surface de gouttelette [m<sup>2</sup>] .

$V$  : Le volume de la gouttelette [m<sup>3</sup>] .

$cp$  : La chaleur spécifique du slurry  $\left[\frac{kJ}{Kg.K}\right]$ .

$h_{air}$  : Coefficient de convection  $W/m^2.K$ .

$r$  : Le rayon de gouttelette  $[m]$  .

$\eta$  : Le rendement énergétique.

$t_{tot}$  : Le temps de séchage  $[s]$ .

$v$  : La vitesse de gouttelette  $\left[\frac{m}{s}\right]$  .

$v_{moyenne}$  : La vitesse moyenne de gouttelette  $\left[\frac{m}{s}\right]$  .

$C_{eau}$  : La concentration de l'eau dans la gouttelette  $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$ .

## ***Introduction Générale***

Les poudres existent dans une grande variété d'industrie comme la chimie, la pharmacie, les cosmétiques, l'agriculture et la nourriture.

Plusieurs procédés sont utilisés pour la production des poudres, telles que la cristallisation, la précipitation, la lyophilisation, l'extrusion, le broyage, le rouleau ou le séchage par atomisation. Ils diffèrent principalement par le matériau à transformer, par les conditions de fonctionnement et de l'énergie à utiliser (chauffage, refroidissement, forces mécaniques), et par les caractéristiques du produit final (taille, forme, cristallisé ou amorphe, la solubilité, la stabilité...).

Le séchage par pulvérisation est un processus continu qui transforme un liquide concentré en une poudre, ce qui limite les éventuelles modifications de la composition au cours du processus. Les équipements industriels sont formés essentiellement d'une tour fonctionnant avec des débits élevés de poudre, avec une consommation d'air et de l'énergie, certains sont flexibles et utilisés pour différents produits.

Le principe consiste à atomiser la charge liquide (solution, en suspension ou en émulsion) en petites gouttelettes (de 10 à 20  $\mu\text{m}$ ) afin d'augmenter la surface d'échange avec l'agent de séchage, habituellement de l'air chaud. Chaque goutte est rapidement séchée (par air), jusqu'à l'obtention d'une particule solide sèche, avec une taille proche de la taille initiale du mélange du liquide de chute.

Cette étude sur le processus de séchage par atomisation a pour objectifs de comprendre l'évolution de la chute en séchage à l'air chaud à l'intérieur d'une tour.

Tout d'abord, on va faire un descriptif pour le processus de production du détergents poudre, afin de nous familiariser avec l'opération de séchage dans ce type d'équipements et comprendre le principe de fonctionnement. Ensuite, on fait une modélisation du système, c'est-à-dire trouver le modèle mathématique qui régit l'opération de séchage afin de déterminer le temps de séjour (séchage) de gouttelettes de détergent, en étudiant les phénomènes qui se produisent pendant le séchage.

Finalement, la modélisation va nous donner une vue générale sur les paramètres qui influencent de façon directe l'opération de séchage, à savoir la température d'entrée d'air, la température d'entrée de liquide à sécher, la vitesse de ce liquide, la concentration

initiale et finale de l'eau dans la gouttelette, le rayon initial de la gouttelette et la densité de liquide à sécher. On fait varier ces derniers selon des intervalles physiques, qui vont nous permettre de faire ressortir leurs influences sur le temps de séjour, elles seront représentées sous forme de graphes et d'abaques.

## ***Chapitre 01 : Séchage par atomisation.***

### ***1.1. Introduction :***

Le séchage par pulvérisation est une technique très utilisée dans l'industrie chimique et alimentaire pour la production de poudres. Le principe de base du séchage par atomisation est la production d'une poudre très fine et homogène, obtenue à partir d'un circuit de produit liquide, par évaporation d'un solvant.

Le séchage par atomisation peut être utilisé dans toute une gamme d'applications qui nécessitent la production de poudre sans matière liquide. Cette méthode de déshydratation s'est avérée la plus utilisée dans les domaines suivants : Produits pharmaceutiques, Boissons, Parfums, colorants et extraits de plantes, Produits laitiers et à base d'œufs, Plastiques, polymères et résines, Savons et détergents, Textiles et bien d'autres produits [1].

### ***1.2. Historique :***

La technologie et l'équipement de séchage par atomisation sont apparus à la fin du dix-neuvième siècle. Le premier appareil connu était le sécheur par pulvérisation qui utilisait une buse à pression. La buse centrifuge a été inventée dans les années suivantes. Les premières conceptions étaient encore très simples et ils étaient difficiles, de les faire fonctionner, c'est pourquoi le séchage par pulvérisation n'était guère utilisé pendant cette période.

Au début du vingtième siècle avec le développement des sciences technologiques, la technologie du séchage par pulvérisation a été améliorée et est devenue de plus en plus commercialisée. Le séchage du lait a été la première application de la technologie du séchage par pulvérisation. Pendant des années, tout le long du vingtième siècle, la technologie du séchage par pulvérisation a été perfectionnée continuellement pour s'adapter davantage aux produits thermosensibles. La technologie du séchage par pulvérisation s'est développée pendant la deuxième guerre mondiale en raison de l'exigence urgente. Il s'agit de devoir diminuer la masse des aliments et des autres produits pour les transporter.

Aujourd'hui, la technologie du séchage par pulvérisation est assez parfaite. Elle est appliquée largement dans plusieurs domaines variés tels que l'industrie de produits chimiques, l'agroalimentaire, l'exploitation et le traitement des produits minéraux, les pharmacies, le microorganisme...

Le séchage par pulvérisation est la technologie unique de séchage qui est susceptible de transformer directement des matières premières liquides en produits sous forme de poudre sèche en atomisant des liquides dans le milieu d'air de séchage chaud. Les matières premières peuvent être sous forme de solution, suspension, émulsion ou pâte. Les produits secs peuvent être sous forme de poudre fine, granules ou agrégation en fonction de la propriété physico-chimique des matières premières et de la condition de fonctionnement du système de séchage. Le séchage par pulvérisation est de plus en plus recherché et appliqué largement dans plusieurs domaines variés grâce à la diversité des produits secs. Chaque sécheur est conçu et utilisé d'une façon séparée pour satisfaire les caractéristiques du produit sec. C'est pourquoi, il faut considérer les demandes du produit ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie [2].

### ***1.1. Avantages et inconvénients :***

Comparé aux autres techniques de séchage des poudres (sur rouleaux ou cylindres, en tambour ou en mélangeur), le séchage par pulvérisation présente des avantages et des inconvénients suivants [3] :

#### ***Les avantages :***

- ✓ Transformer directement les matières premières liquides en poudre sèche avec une très basse humidité.
- ✓ La forme des particules est très souvent régulière, sphérique et d'une granulométrie d'un calibrage bien adapté.
- ✓ Fonctionner continuellement et la capacité d'automatisation est haute.
- ✓ Pouvoir l'appliquer vis à vis des matières thermosensibles ainsi que des matières thermorésistantes.



- ✓ C'est très flexible dans la conception et le fonctionnement en fonction de caractéristiques du produit sec par exemple : la forme du produit (poudre fine, granules ou agrégation...), la propriété du produit (dissolubilité, poussière ou nonpoussière...).
- ✓ La durée de séchage est courte.
- ✓ Pouvoir fabriquer des sécheurs selon toutes les puissances exigées.
- ✓ Pouvoir sécher des produits inflammables et explosibles, nocifs...sans contaminer l'environnement.
- ✓ Les matières premières de séchage sont variées : la solution, l'émulsion ou la pâte...

*Les inconvénients :*

- ✓ Les frais d'investissement initiaux sont assez élevés.
- ✓ Nécessiter l'évaporation de grandes quantités de solvants. L'opération est donc énergivore, ce qui constitue un frein à son développement pour les produits de faible valeur ajoutée.
- ✓ Le produit est facilement dégradé (la perte d'arôme et de couleur) si le fonctionnement est incorrect. C'est pourquoi, il faut des opérateurs hautement qualifiés.
- ✓ Il est difficile de récupérer 100% du produit sec.
- ✓ Problèmes de poussières et les risques d'explosion à cause des particules fines.
- ✓ Exiger régulièrement l'hygiène et l'entretien des machines.

### 1.2. Structure du système de séchage par atomisation :

Il y a beaucoup de systèmes variés de séchage par atomisation qui sont fabriqués pour satisfaire les besoins du produit, toutefois ils sont également constitués par les parties principales suivantes (figure 1.1) [4] :

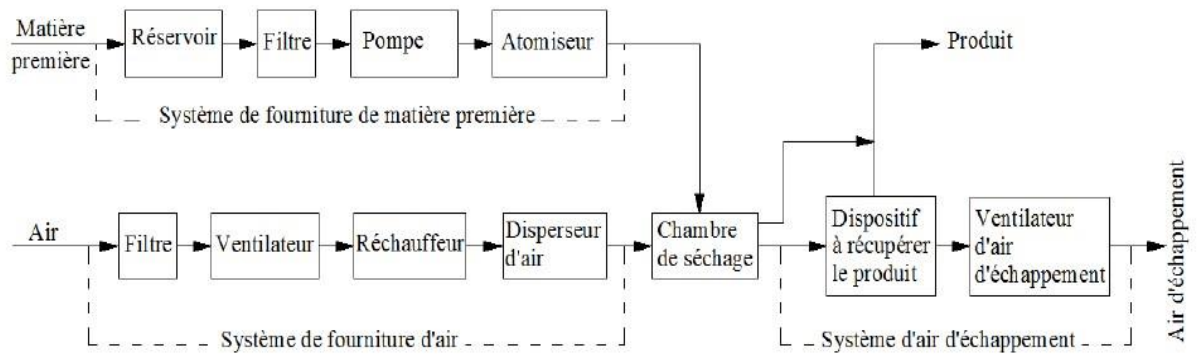


Figure 1. 1 Schéma représentatif la structure du système de séchage

### 1.3. Principe de fonctionnement du système de séchage par atomisation :

Il y a deux types de sécheur typique à pulvérisation : le sécheur vertical à pulvérisation (ou le type de Cyclone) et le sécheur horizontal (ou le type de Rogers). Le principe de fonctionnement des deux sécheurs typiques est le suivant [3]:

#### ✓ Sécheur vertical à pulvérisation (Cyclone) :

Le schéma de principe est représenté dans la figure 1.2. C'est le type de sécheur qui est très largement utilisé. D'abord, la matière première liquide est pompée à l'atomiseur et pulvérisée en gouttelettes très fines, ces gouttelettes contactent le flux d'air chaud qui est soufflé à co-courant ou contre-courant et elles perdent rapidement leur humidité alors qu'elles sont encore en suspension dans l'air de séchage. La poudre sèche est séparée de l'air humide par la force centrifuge dans le cyclone. Les particules de

poudre sont forcées à diriger vers le mur du cyclone, se déposent au fond du cyclone où elles sont transportées à la sortie, alors que l'air humide plus léger se dirige vers le tuyau d'évacuation.

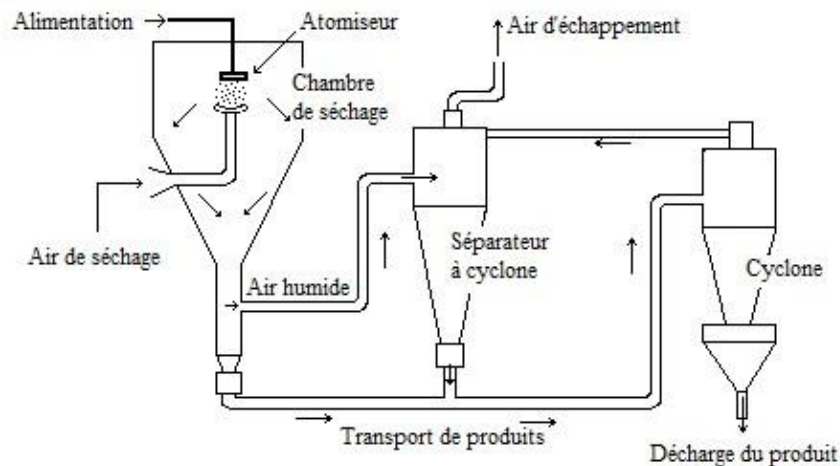


Figure 1. 2 Schéma représente le sécheur vertical à pulvérisation.

### ✓ Sécheur horizontal à pulvérisation (Rogers) :

Le schéma de principe est représenté par la figure 1.3. Ce schéma est moins répandu, on l'utilise seulement vis à vis des poudres sensibles qui ne sont pas susceptibles de résister à la friction engendrée par l'activité du cyclone. Selon ce schéma, après avoir été filtré, l'air est réchauffé par la vapeur ou le gaz chaud et soufflé dans le tuyau (A), ensuite il est introduit dans le disperseur d'air (B) et entre dans la chambre de séchage (C). L'air chaud absorbe l'humidité qui s'échappe des gouttelettes et passe le déflecteur d'air (D) pour entrer dans le filtre à manches (E) où 100% des poudres qui restent sont séparées de l'air d'échappement. Les sacs de filtre sont par intermittence secoués par le dispositif mécanique pour libérer des poudres adhérentes qui tomberont ensuite sur le plancher. L'air humide est rejeté dans l'environnement par le ventilateur (F). Le liquide de séchage est préchauffé dans le réchauffeur (G), passe par une pompe à haute pression (H) et le tuyau (I) pour venir à l'atomiseur qui se trouve à l'entrée de l'air chaud (C). Les gouttelettes sont séchées dès qu'elles sont encore en suspension dans la chambre de

séchage, la poudre qui se dépose sur le plancher est transportée au convoyeur à vis (K) par un racloir réciproque. La poudre est transférée à la sortie de la chambre de séchage (L) et ensuite elle est transportée manuellement ou par le système pneumatique au cyclone (M) où la poudre est refroidie par l'air frais.

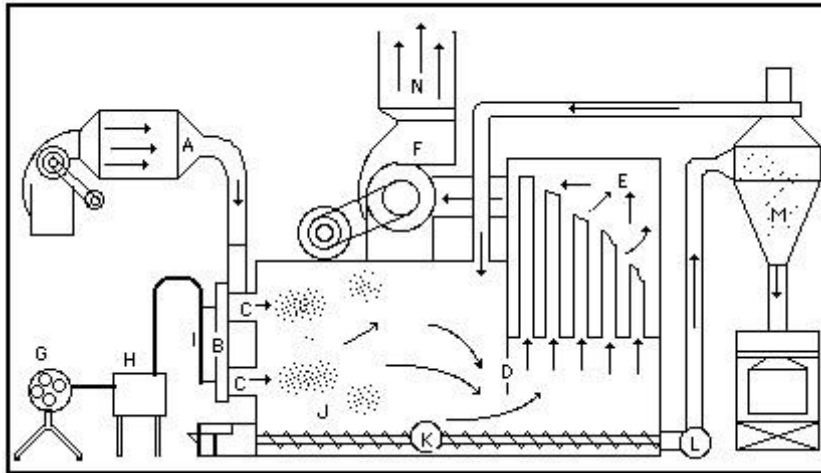


Figure 1. 3 Schéma représente le sécheur horizontal à pulvérisation

#### **1.4. Les différents systèmes de séchage par atomisation :**

Les éléments indispensables du système de séchage par pulvérisation comme : l'atomiseur, le disperseur d'air de séchage, la chambre de séchage, la partie de sortie de l'air d'échappement et d'entrée de l'air sont combinés en un système complet. Tous ces systèmes répondent aux règles de sécurité, à la protection d'environnement et satisfont aux demandes du produit sec. Selon la fonction, les systèmes de séchage par pulvérisation obéissent aux cycles suivants [5] :

##### ***Le système ouvert :***

Dans le système ouvert (figure 1.4) : l'air est introduit dans la tour, après qu'il ait passé dans le réchauffeur, il rentre dans la chambre de séchage et effectue le transfert thermique au contact avec la matière première humide, ensuite il est évacué à l'extérieur. La plupart des sécheurs industriels appliquent ce système pour sécher des matières premières qui comportent du solvant aqueux. L'air d'échappement est nettoyé par le

cyclone, les filtres à manches (bag filter), le précipitateur électrostatique ou l'épurateur humide (wet scrubber) avant de s'échapper à l'extérieur.

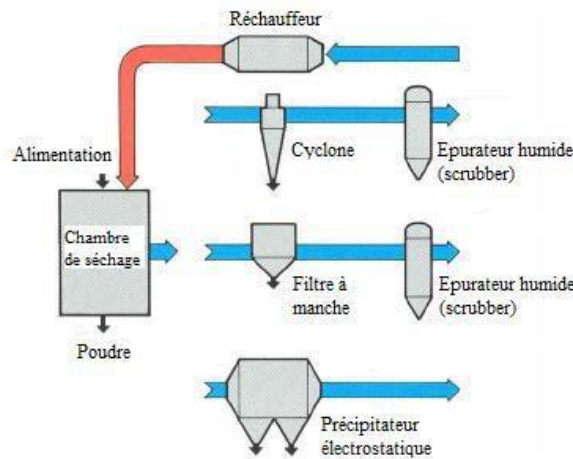


Figure 1. 4 Schéma de système ouvert.

**Le cycle clos :**

La particularité du cycle clos (figure 1.5) est que le processus de séchage se passe dans le milieu de gaz inerte, par exemple le gaz N<sub>2</sub>. Le gaz inerte circule hermétiquement dans le système de séchage.

Ce système est appliqué pour sécher des matières qui comportent le solvant organique ou quand le produit ne doit pas entrer en contact impérativement avec l'oxygène pendant le processus de séchage (par exemple, sécher ABS et PVAc par pulvérisation dans l'industrie polymère). Les appareils dans le cycle clos sont absolument hermétiques vis à vis des gaz et de la poudre. Ils sont fabriqués sur les standards de sécurité stricts. La vapeur du solvant inflammable - explosible est absorbée par

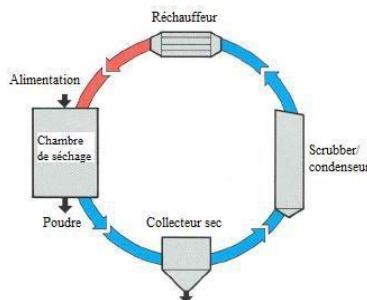


Figure 1. 5 Schéma de cycle clos

l'intermédiaire de séchage et récupérée entièrement en état liquide par le scrubbercondenseur.

### ***Le cycle demi-clos :***

On utilise le cycle demi-clos (figure 1.6) quand le processus de séchage est susceptible de créer un mélange de poudre - gaz inflammable - explosible, ou l'air d'échappement comporte des matières susceptibles de polluer l'environnement. Les risques inflammables explosifs sont prévenus en ajustant un flux d'air qui entre directement dans le réchauffeur et le flux d'air d'échappement pour diminuer la teneur en oxygène dans la chambre de séchage. Les matières nocives qui naissent au cours du processus de séchage sont réduites avant d'être rejetées dans l'environnement.

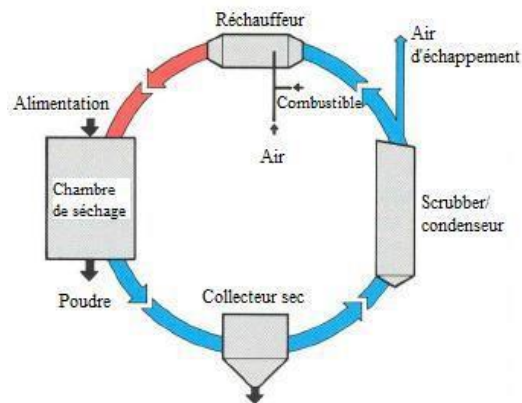


Figure 1. 6 Schéma de cycle demi-clos

### ***Le cycle aseptique :***

La particularité du cycle aseptique (figure 1.7) est : les systèmes de filtre d'air et de l'atomisation de matières premières sont absolument aseptiques. Il est interdit d'utiliser ces types de sécheur dans les endroits susceptibles de contaminer les produits.

C'est pourquoi, on doit les placer de compagnie avec une chambre d'emballage. Les appareils dans ce système sont fabriqués sur les standards spéciaux et fonctionnent sous pression faible. Le système de stérilisation et de nettoyage sont entièrement automatiques.

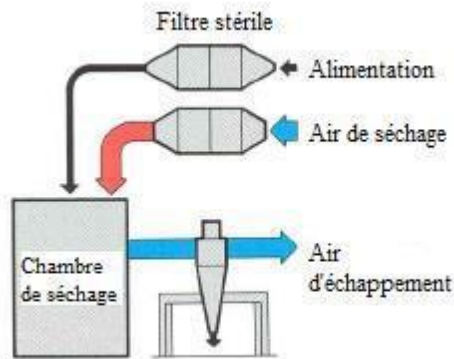


Figure 1. 7 Schéma de cycle aseptique.

## ***1.5. Structure de séchage par atomisation :***

### ***1.5.1. Système de fourniture de matière première :***

Le système de fourniture de matière première comporte le réservoir, le filtre, la pompe et l'atomiseur. Ils doivent être fabriqués pour satisfaire les règles d'hygiène et l'entretien facile [3].

#### ***Le réservoir :***

Le volume du réservoir doit être suffisamment grand, pour que le système fonctionne continuellement, même dans le cas où la fourniture de matière première est discontinuée.

On utilise souvent deux réservoirs qui fonctionnent alternativement pour assurer l'apport de matières premières au sécheur.

#### ***Le filtre :***

Il est utilisé pour éliminer les impuretés qui sont susceptibles de causer un dommage dans l'atomiseur.

***La pompe :***

Elle est nécessaire pour transporter directement la matière première à l'atomiseur ou à un réservoir secondaire qui crée une pression constante. Les différents types de pompes sont utilisés en fonction des propriétés des matières premières; par exemple: la pompe à vis est très utilisée pour plusieurs types de matériaux comme le lait, la tomate, les produits pharmaceutiques... les pompes centrifuges sont utilisées avec des solutions et des suspensions.

***L'atomiseur :***

Il est censé être le cœur du sécheur à pulvérisation. Il est utilisé pour transformer des matières premières liquides en gouttelettes avec la taille désirée et distribuer ces gouttelettes dans la chambre de séchage. Un atomiseur idéal est susceptible de créer des gouttelettes fines individuelles avec des tailles égales. La vitesse de transfert de chaleur, de masse et le temps de séchage sont égaux pour toutes les gouttelettes, cela assure l'uniformité du produit sec. La détérioration du produit est limitée par l'évaporation très rapide et un temps court de séchage.



**1.5.2. Classification d'atomiseurs :**

En fonction de la forme énergétique qui affecte le liquide, on classe les atomiseurs comme suit (figure1.8) [6]:

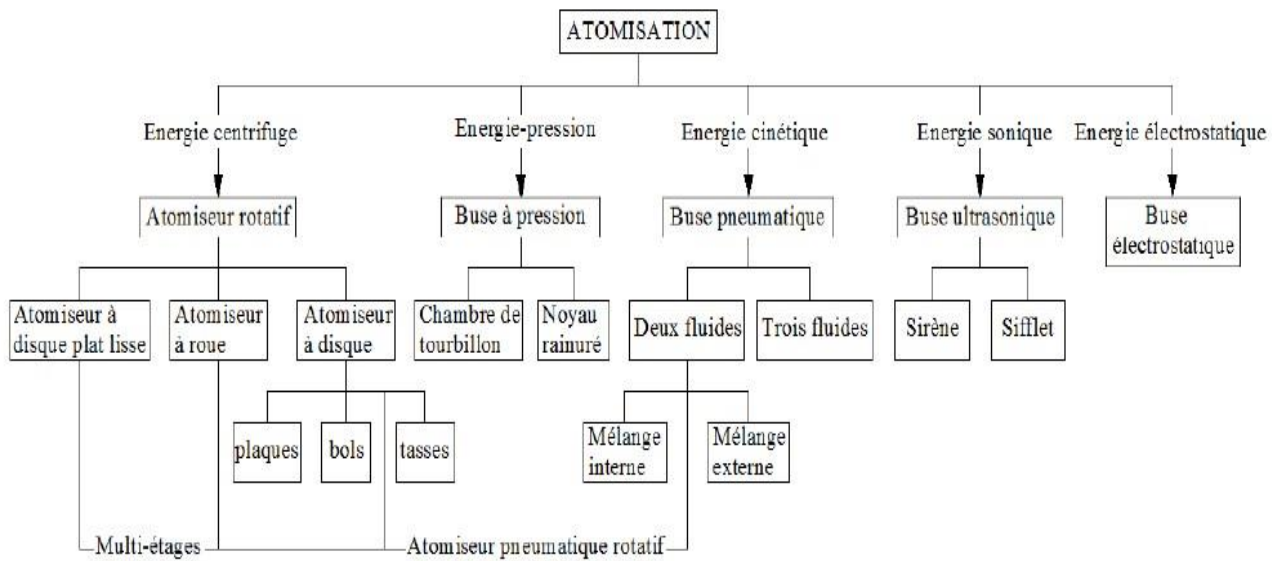


Figure 1. 8 Organigramme représente les différents types de l'atomiseur.

✓ **Atomiseur rotatif :**

Dans l'atomisation rotative (figure 1.9), la matière première liquide est accélérée par l'énergie centrifuge et obtient une très grande vitesse avant d'être déchargée dans le milieu d'air. Le liquide est centralement distribué sur la roue, le disque ou la tasse. Le

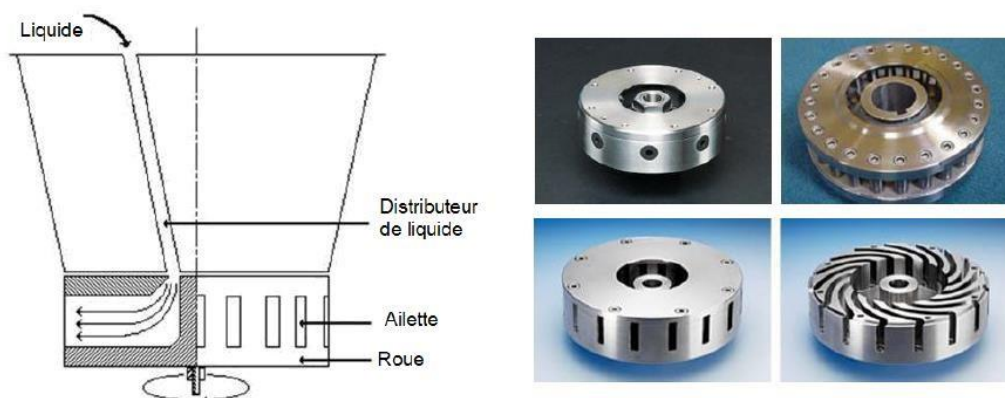


Figure 1. 9 Images d'un atomiseur rotatif.

liquide s'étend sur la surface rotative en film fin et il est déchiré en gouttelettes fines en sortant de la périphérie.

L'atomiseur rotatif est susceptible de fonctionner dans le système de basse pression et de créer des sprays avec des caractéristiques variées. Cela dépend de la vitesse rotative, du débit d'alimentation, des propriétés du liquide et de la constitution de l'atomiseur. L'atomiseur à roue est très utilisé dans l'industrie, il peut créer des gouttelettes très uniformes avec toutes les gammes de taille (de la taille fine à la taille moyenne et grosse taille).

### ✓ *Buse à pression :*

Le principe de la buse à pression est la conversion de la pression du liquide en énergie cinétique des films de liquide en mouvement. Les films liquides sont brisés sous l'influence des propriétés physiques du liquide et par l'effet frictionnel avec le milieu où les films liquides sont déchargés.

Ces films deviennent rapidement instables dès qu'une influence quelconque cause la fluctuation dans l'ordre de ces films et cela accélère la désagrégation.

La buse à pression est utilisée dans plusieurs applications variées quand la viscosité de la matière première liquide est faible et il n'y a pas des grandes particules dans la suspension. Avec la grande vitesse d'alimentation, le spray est moins uniforme et les gouttelettes sont plus grossières. De plus, une pompe haute pression est toujours exigée lors de l'utilisation de cette buse.

Toutefois, les avantages de la buse à pression sont le faible coût, le remplacement et l'entretien faciles.

### ✓ *Buse pneumatique :*

Le mécanisme de l'atomisation pneumatique est d'utiliser un gaz à la vitesse élevée pour créer une force de frottement importante sur la surface du liquide et causer la

désagrégation du liquide en gouttelettes. La désagrégation du liquide a lieu selon deux phases : dans la première phase, le liquide est déchiré en filaments et en gouttes de grandes dimensions. Dans la deuxième phase, ces formes sont divisées en gouttelettes fines.

Les gaz qui sont utilisés dans l'atomisation pneumatique peuvent être de l'air comprimé, la vapeur ou le gaz inerte pour le cycle de séchage clos. Il faut produire une vitesse relative élevée entre le gaz et le liquide pour que le liquide soit sous la condition frictionnelle optimale.

Avec la faible viscosité du liquide, la buse pneumatique peut créer des sprays qui sont caractérisés par les gouttelettes fines et une bonne homogénéité. Et inversement, les liquides plus visqueux, des gouttes plus grossières avec une faible homogénéité sont formées. La buse pneumatique est très flexible, elle peut produire des gouttes plus ou moins grandes avec une large gamme de débit d'alimentation et cela dépend de la pression du gaz.

Toutefois, les inconvénients des buses pneumatiques concernent le prix élevé du système d'air comprimé, la réduction de la capacité du sécheur car l'air frais entre dans la chambre de séchage et l'efficacité de la buse est très basse.

### ✓ *Buse ultrasonique (piézoélectrique) :*

L'atomisation ultrasonique est une technique qui est utilisée pour produire un fin spray du liquide. Grâce à l'utilisation du transducteur piézoélectrique, il est facile de former un spray extrêmement homogène et la taille de gouttelettes est très constante.

L'effet piézoélectrique : Certaines matières ont la capacité de produire de l'électricité lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée. Ou inversement, une déformation mécanique est produite lorsqu'un champ électrique est appliqué. C'est ce qu'on appelle l'effet piézoélectrique.

Le principe de fonctionnement : Dans l'atomisation ultrasonique, le spray est formé à l'aide des vibrations à haute fréquence. Ces vibrations sont produites par une

paire de cristaux piézoélectriques céramiques qui transforment l'énergie électrique en mouvement mécanique à l'aide de l'extension et de la contraction comme réponse aux pulsations électriques.

La buse ultrasonique est utilisée dans le séchage par pulvérisation, particulièrement dans les industries pharmaceutiques et alimentaires, dans la production des nanoparticules. L'atomisation ultrasonique est appliquée pour les liquides qui ne peuvent pas être pulvérisés avec succès dans l'atomiseur rotatif, la buse à pression, la buse pneumatique...en vue d'obtenir des tailles désirées de gouttelette.

### ✓ *Buse électrostatique :*

Les buses électrostatiques fonctionnent en créant un potentiel électrique autour de la buse et de la surface d'impact. Une charge électrique est induite sur la surface du liquide qui est pulvérisé, et une charge électrique opposée est induite sur la surface d'impact. Les charges semblables créées sur la surface du liquide augmentent fortement sa tension de surface, et le film du liquide est divisé en ligaments. Lorsque la charge est continûment appliquée, les ligaments sont atomisés en gouttelettes.

Le degré d'atomisation dépend du potentiel électrique créé par unité de surface. Dans la buse électrostatique, un champ électrique haute tension ( $\approx 1$  à 60 kV) est souvent appliqué. La taille des particules peut descendre jusqu'à quelques centaines de nanomètres. Outre les propriétés surfaciques du liquide, ses propriétés électriques jouent également un rôle important et doivent être connues pour une meilleure maîtrise du procédé.

### ***1.5.3. Système de fourniture d'air de séchage :***

Le système de fourniture d'air comporte le filtre d'air, le réchauffeur, le ventilateur et le disperseur d'air [7].

#### ***Le filtre d'air :***

Le filtre a un rôle important dans l'élimination des impuretés qui peuvent entrer dans la chambre de séchage avec l'air de séchage et influencer la qualité du produit. Dans le cycle de séchage clos, le filtre est aussi utilisé pour récupérer l'intermédiaire de séchage échappé qui retournera à la chambre de séchage.

#### ***Le réchauffeur d'air :***

On peut réchauffer directement ou indirectement l'air. Les sources de fourniture de chaleur peuvent être la vapeur, le gaz, l'essence, l'huile, l'électricité etcetera. La sélection de source de chaleur dépend du type de produit et de la disponibilité du combustible. Les produits de séchage peuvent être classifiés selon leur exigence de réchauffeur en quatre groupes suivants [4] :

- ✓ Les produits sont susceptibles de résister à la haute température et d'entrer en contact avec les produits de combustion tels que l'argile, les minerais concentrés et plusieurs matières inorganiques. Dans ce cas, les réchauffeurs directs à gaz ou à huile sont utilisés.
- ✓ Les produits sont susceptibles de résister à la haute température mais ne peuvent pas entrer en contact avec les produits de combustion comme les sels inorganiques, l'engrais...Pour ces produits, il faut utiliser les réchauffeurs indirects à gaz ou huile.
- ✓ Les produits sont susceptibles d'entrer en contact avec les produits de combustion mais ne résistent pas à la haute température comme les sels organiques et inorganiques...Les réchauffeurs directs à gaz et huile sont utilisés en compagnie avec le système automatique d'alarme et de contrôle de haute température.

- ✓ Les produits ne sont pas susceptibles de résister à la haute température et d'entrer en contact avec les produits de combustion tels que les produits alimentaires, plusieurs produits chimiques. Dans ce cas, il faut utiliser les réchauffeurs indirects. Avec les petits systèmes, on peut utiliser les réchauffeurs à électricité ou à phase liquide.

### ***Le ventilateur de fourniture d'air :***

Le type centrifuge est souvent utilisé pour introduire l'air de séchage dans le réchauffeur, ensuite entrer dans la chambre de séchage par le disperseur d'air.

### ***Le disperseur d'air :***

La fonction du disperseur d'air est de donner la chaleur exigée au processus de séchage, de contrôler le trajet des gouttelettes/particules et retirer rapidement l'humidité vaporisée de la zone d'atomisation.

### ***1.5.4. Chambre de séchage :***

La chambre de séchage fournit de l'espace et du temps de résidence aux particules pour que les produits obtiennent l'humidité désirée sans dégradation thermique et sans dépôts indésirables sur le mur de la chambre de séchage. La chambre de séchage est souvent fabriquée pour retirer la majorité des produits à sa base ou tous les produits sont transportés de compagnie avec l'air à l'appareil de séparation et de récupération de la poudre. La chambre de séchage est produite selon trois catégories suivantes [4]:

#### **➤ *Chambre de séchage à co-courant :***

Le flux d'air est soufflé à co-courant avec la matière première. Le disperseur d'air et l'atomiseur sont placés soit au sommet soit à la base soit au bout de la chambre. Ce type de chambre de séchage est utilisé pour les produits thermosensibles parce qu'au début l'air à haute température entrera en contact avec le flux de produit à grande humidité, ensuite la température de l'air diminuera progressivement en sens de

mouvement du flux de produit. Certains types de chambre de séchage à co-courant sont représentés dans la figure 1.10.

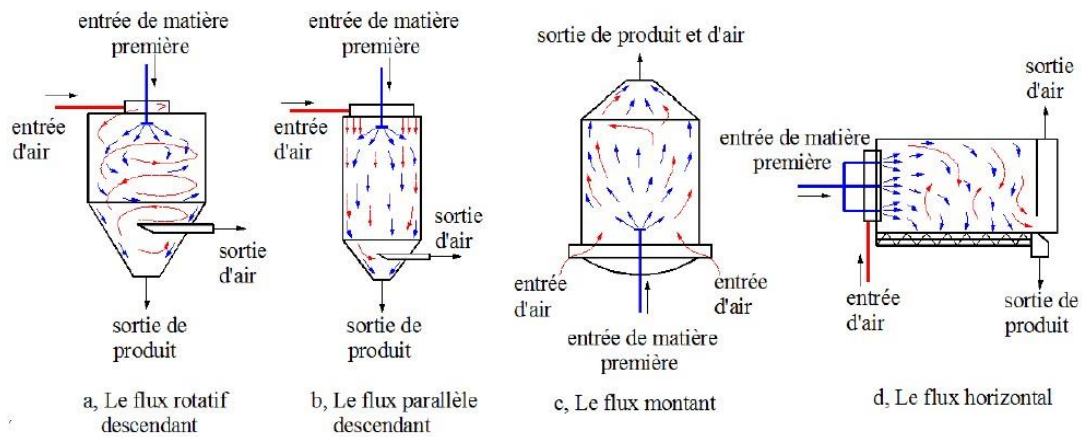


Figure 1. 10. Les différentes configurations de chambre de séchage à co-courant

➤ **Chambre de séchage à contre-courant :**

Le flux d'air est soufflé à contre-courant (figure 1.11) avec la matière première. L'atomiseur est placé face au disperseur d'air. La chambre de séchage à contre-courant ne convient pas les produits thermosensibles car l'air à haute température entrera en contact avec le produit sec, donc le produit est facilement abîmé à cause de la dégradation thermique, de la perte de l'arôme et de la couleur.

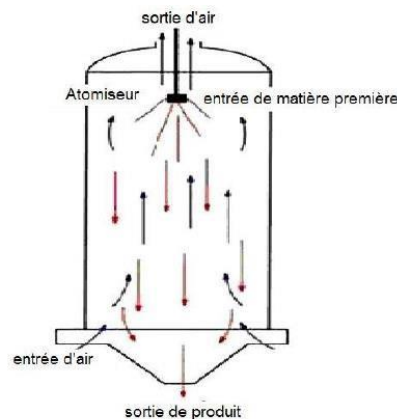


Figure 1. 11 La configuration de chambre de séchage à contre-courant.

➤ **Chambre de séchage à flux mixte :**

Le flux d'air est soufflé à la fois en co-courant et en contre-courant avec le produit (figure 1.12). Cela peut être effectué selon deux façons suivantes :

- Le flux d'air est soufflé en deux sens alors que le flux de produit est introduit en un seul sens. La sortie d'air, l'entrée d'air et l'atomiseur sont ensemble placés au sommet de la chambre.
- Le flux d'air est soufflé en un seul sens alors que le flux de produit est réparti en deux sens. L'atomiseur est placé à la base de la chambre et le produit est déchargé contre le courant d'air. L'entrée de produit se situe à la base de la chambre.

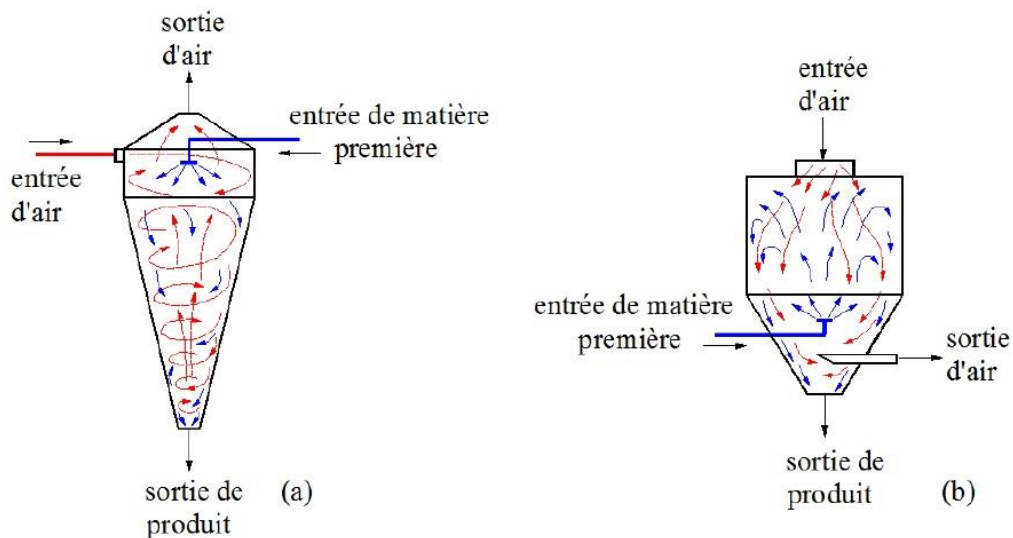


Figure 1. 12 Les configurations de la chambre de séchage mixte.

**1.5.5. Système de séparation et de récupération de la poudre :**

La poudre sèche qui sort de la chambre de séchage avec l'air d'échappement doit être efficacement séparée et récupérée pour maintenir la plus grande capacité du sécheur et éviter la pollution de l'environnement. Afin de satisfaire cette demande, on utilise souvent le filtre sec et humide. Le produit sec récupéré par le filtre sec sera transporté au traitement plus loin ou à la chambre de l'emballage. Les équipements secs (comme le cyclone, le filtre à manches (bag filter), le précipitateur électrostatique...) sont utilisés en



tant qu'étape principale de séparation et de récupération de produit. Le produit humide récupéré par le filtre humide peut recycler à la partie de prétraitement de la matière première ou simplement il est censé être un déchet effluent. Les équipements humides sont utilisés en tant que filtres supplémentaires pour éviter la pollution de l'environnement, ils épurent de l'air qui a traversé les filtres principaux dans le système. La classification des équipements de séparation et de récupération du produit est présentée dans la figure 1.13 [4] :

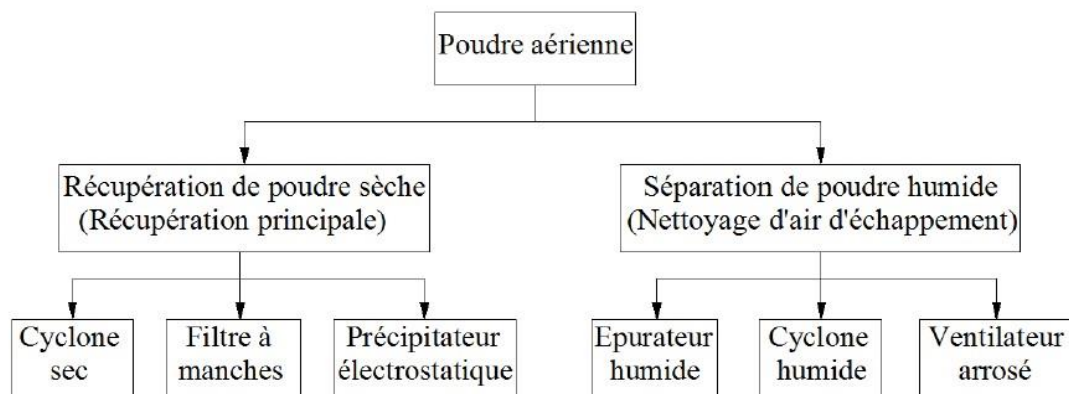


Figure 1. 13 Organigramme de la récupération de la poudre.

Le cyclone est très utilisé grâce au bas prix, au fonctionnement simple et au très peu d'entretien. L'efficacité du cyclone peut satisfaire la majorité du produit de séchage par pulvérisation sans qu'il faille des filtres supplémentaires. Toutefois, lors de l'exigence de récupération de 100% des poudres sèches, il faut l'utiliser de compagnie avec le filtre à manches. La sélection d'équipement de séparation et de récupération du produit dépend de la taille des particules, du débit d'air, de la vitesse d'air, de l'efficacité de récupération exigée ...

### ***1.6. Les éléments d'influence dans l'opération de séchage par atomisation:***

#### ***➤ L'influence de la viscosité :***

La capacité de pulvérisation du liquide dépend étroitement de la viscosité du liquide à l'atomiseur. Si la viscosité est trop élevée, le liquide atomisé a tendance à former les gouttelettes non-sphériques, les filaments ou les ficelles [8]. Afin de diminuer la viscosité du liquide, la méthode la plus simple est d'ajouter de l'eau à la solution. Mais cela cause la diminution subite de capacité du sécheur. Une méthode plus efficace est d'augmenter la température du liquide. Cela permet aussi d'augmenter la capacité du sécheur car il faut fournir moins de la chaleur pour hausser la température des gouttelettes [4].

#### ***➤ L'influence de la taille de l'orifice de l'atomiseur :***

La sélection de taille de l'orifice dépend du débit d'alimentation et de la taille désirée de gouttelettes. Afin d'obtenir les gouttelettes fines et avec un débit fixe, il faut un petit orifice. Vis à vis des gouttelettes plus grossières, les orifices plus larges sont utilisés. Lors de l'augmentation de débit, il faut utiliser les orifices plus larges ou augmenter la pression de l'atomiseur pour créer les gouttelettes plus fines [4].

#### ***➤ L'influence de la pression de l'atomiseur :***

La pression de l'atomiseur influence fortement la taille de particule du produit sec. Si on veut la taille de particule plus large, il faut utiliser la pression plus basse. Vis à vis de la taille plus fine, il est besoin de la pression plus haute. D'autre part, plus le débit d'alimentation est important, plus la pression exigée est élevée [4].

#### ***➤ L'influence du débit d'alimentation :***

Le débit d'alimentation est utilisé pour contrôler la température de sortie de l'air et pour en maintenir une valeur déterminée. Cela permet de contrôler l'humidité du

produit sec. Quand la température d'entrée de l'air augmente, il faut augmenter le débit d'alimentation pour diminuer la température de sortie de l'air. Si on augmente le débit d'alimentation alors que les conditions de séchage et de pulvérisation sont maintenues, la taille de particule et la masse volumique du produit sec augmenteront [4].

➤ *L'influence de la teneur en matière solide du liquide :*

La teneur en matière solide du liquide augmente, la taille de particule du produit sec augmentera aussi. Quand la température de séchage et le débit d'alimentation sont constants, si on augmente la teneur en matière solide, la charge de vaporisation diminuera et il en résulte que l'humidité de la poudre est plus basse. Le processus de vaporisation trop rapide est susceptible de former les particules creuses et la masse volumique totale sera plus basse [4].

➤ *L'influence de la température de matière première :*

Afin d'adapter à la pompe de matière première et l'atomiseur, l'augmentation de température du liquide qui vise à la diminution de viscosité influencera les propriétés du produit sec. Vis à vis des liquides moins visqueux sous la condition de température de la chambre, l'influence de l'augmentation de température du liquide peut être laissée passer. L'augmentation de température du liquide diminuera le total de quantité de chaleur exigé du processus de vaporisation. Toutefois la quantité de chaleur du liquide est beaucoup plus faible que celle exigée du processus de vaporisation [4].

➤ *L'influence de la tension superficielle :*

La tension superficielle influence les opérations d'atomisation et de séchage. C'est pourquoi elle influence aussi les propriétés du produit sec. Avec les matières premières à tension superficielle faible, il est facile de créer les gouttelettes plus fines, le spray comporte plus de gouttelettes fines et la distribution de la taille de gouttelette a tendance à s'étendre. Les liquides avec une tension superficielle élevée peuvent former les gouttelettes plus grossières, et la distribution de la taille de gouttelette a tendance à se restreindre [4].

➤ *L'influence de la température d'entrée de l'air :*

L'influence de la température de séchage dépend de la caractéristique de séchage de chaque type de produit. Les particules qui ont tendance à gonfler lors du séchage, en augmentant la température de séchage, la masse volumique du produit diminuera. Toutefois, si la température augmente excessivement, le processus de vaporisation se passera trop vite, donc les particules sont gonflées, brisées ou désagrégées. Il en résulte que les fractions minuscules seront agglomérées en poudre avec la masse volumique plus élevée. La température d'entrée de l'air influence aussi l'humidité de la poudre à cause du changement de l'humidité de sortie de l'air.

Le séchage à haute température va améliorer l'efficacité thermique du processus de séchage.

Toutefois, il y a trois éléments qui limitent l'augmentation de la température d'entrée de l'air [4]:

- La température d'ignition de la poudre : la poudre peut prendre feu et brûler si elle est exposée à une température plus haute que sa température d'ignition.
- Le produit peut être roussi par la haute température et la qualité du produit diminue à cause du changement de couleur et de goût.
- La capacité à absorber l'humidité de la poudre : Plus la température de séchage est haute, plus l'eau est violemment vaporisée. Cela cause l'augmentation d'humidité de l'air dans la chambre de séchage et la poudre devient gluante. Il en résulte que les dépôts et l'agglomération auront lieu dans la chambre de séchage.

➤ *L'influence de la température de sortie de l'air :*

La température de sortie de l'air influence fortement l'humidité de la poudre. Si la température de sortie est basse, l'humidité de la poudre augmentera. La température de sortie est contrôlée par le rajustement du débit d'alimentation à l'atomiseur. Quand la matière première est davantage pulvérisée, le milieu dans la chambre de séchage est

refroidi et la température de sortie de l'air diminuera. Si la fourniture de matière première n'est pas proportionnée à la demande, la température de sortie ne peut pas diminuer [4].

➤ *L'influence de la vitesse relative entre l'air et le spray :*

Quand la vitesse relative entre l'air et le spray augmente, le processus de mélange augmentera aussi et cela permet d'augmenter la vitesse d'échange de chaleur et de matière dans la chambre de séchage. Toutefois, si on augmente excessivement cette vitesse relative, les particules peuvent être déformées, brisées, désagrégées ou elles se sont agglomérées lors du contact avec les autres fractions dans le courant turbulent. Quand on augmente la vitesse relative, le temps de vaporisation sera plus court et la forme des particules du produit sec ne sera pas uniforme. Le changement de la masse volumique du produit varie selon le type de matière première et il n'y a aucune loi générale [4].

➤ *L'influence de l'humidité ambiante :*

Lors du séchage par pulvérisation des poudres très hygroscopiques, la variation d'humidité ambiante à cause du changement de saison, voire la pluie influence fortement les dépôts et l'adhérence dans la chambre de séchage. Si l'humidité ambiante est basse, la chambre de séchage est souvent propre. Mais la condition d'humidité élevée peut entraîner les dépôts et les blocs dans la chambre de séchage [4].

**1.7. Périodes du séchage des gouttelettes :**

Avec le contact entre la gouttelette et l'air de séchage (Figure 1.14), la chaleur est transférée par la convection à partir de l'air chaud à la gouttelette, et convertie en chaleur latent au cours de l'évaporation de l'eau. L'humidité évaporée est transportée dans l'air par la convection à travers la couche limite qui entoure chaque gouttelette.

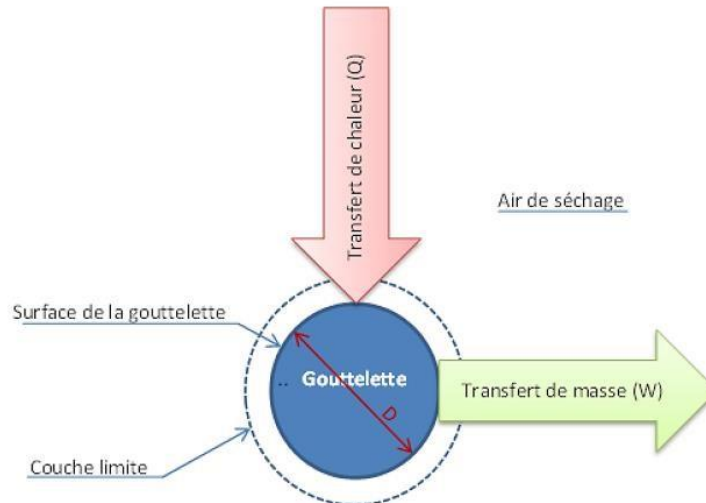


Figure 1. 14 Transfert de chaleur et de masse entre la gouttelette et l'air de séchage

La vitesse de la gouttelette quittant l'atomiseur diffère considérablement de la vitesse de l'air qui l'entoure, il y a un échange de la quantité de mouvement entre la gouttelette et l'air. Le taux de transfert de chaleur et de masse est une fonction de la température, de l'humidité et des propriétés de transport de l'air entourant chaque gouttelette. Il est également une fonction du diamètre de la gouttelette et de la vitesse relative entre la gouttelette et l'air.

L'évolution d'évaporation pour des gouttelettes commence avec l'élimination de l'humidité à une vitesse presque constante ; la température de surface des gouttelettes est constante ; la pression partielle de la vapeur à la surface des gouttelettes est constante (première période du séchage à vitesse constante). La majorité de l'humidité des gouttelettes est enlevée pendant cette période. L'humidité migre de l'intérieur de la gouttelette à un taux suffisamment élevé pour maintenir la saturation de surface. La température humide représente la température des gouttelettes. La vitesse d'évaporation peut être considérée comme constante. Ensuite, la vitesse d'évaporation diminue progressivement jusqu'à ce que le séchage soit terminé (deuxième période du séchage ou séchage à vitesse décroissante). La vitesse commence à baisser une fois que la teneur en eau des gouttelettes est réduite à la teneur en eau critique. L'évaporation des gouttelettes commence dès que les gouttelettes rentrent en contact avec l'air chaud. Le transfert d'humidité dans l'air est accompagné par l'abaissement de la température de l'air. La

diminution de la température de l'air entraîne la réduction de la force motrice pour le transfert de chaleur, et la vitesse d'évaporation peut commencer à diminuer même si la saturation de surface soit encore maintenue.

Le temps d'évaporation réelle des gouttelettes à une température fixe de l'air dépend de la forme des gouttelettes, de la composition chimique, de la structure physique, et de la concentration de solides.

Le temps réel est la somme de la période à vitesse constante et la période à vitesse décroissante jusqu'à ce que l'humidité désirée soit atteinte.

## ***Chapitre 02 : Présentation de l'Entreprise et des Equipements.***

### ***2.1. Introduction :***

La société ENAD est une entreprise nationale de production des détergents et des produits d'entretien, le complexe de détergents de Sour El Ghozlane fait partie de l'entreprise nationale (ENAD), elle se trouve à 07 Km de la ville de Sour El Ghozlane.

L'entreprise nationale des détergents et des produits d'entretien (ENAD) issue de la restructuration de la société national des industries chimiques (SNIC) fut créé en décembre 1986.

Le complexe de Sour El Ghozlane est l'un des trois complexes au niveau national, destinés à la production des détergents.

La surface totale du complexe est de 20 hectares, sa production est destinée à satisfaire toute la région centre du pays selon la capacité suivante :

- Détergent poudre moussante ; 18 000 tonnes / an
- Détergent poudre non moussante ; 12 000 tonnes / an
- Détergent liquide ; 12 000 tonnes / an □ Récurant : 6 000 tonnes /an.

### ***2.2. Historique :***

C'est dans le cadre de plan national du développement économique est social et en liaison avec les structures et organes concernés de la recherche, du développement de la production et la commercialisation dans le domaine des détergents et produits d'entretien que l'entreprise (ENAD) a envisagé d'implanter ce complexe au centre du pays au même titre que celui de AIN-TEMOUCHENT à l'Ouest de CHELGHOUMLAID à l'Est.

Initialement la signature du contrat de réalisation du complexe (Sour El Ghozlane) s'est fait avec l'entreprise de réalisation italienne (ITALCONSULT) en date du 12 novembre de l'année 1975 avec un délai de réalisation de 35 mois.

Ce constructeur, suites à quelques problèmes à dû abandonné en aout 1981.



Ensuite un autre contrat de reprise a été signé avec un deuxième constructeur italien (ITALPIANTI) le 15 mars 1984, le délai de réalisation avec ce deuxième constructeur était de 24 mois ;

- ✓ La réception provisoire du complexe a eu lieu le 26/11/1986.
- ✓ Le cout initial du projet est de 457000.000 DA.
- ✓ Le cout du projet (réévalué) est élevé à 603.516.000 DA.
- ✓ Dont une partie en devises de 147.000.000 \$.

### **2.3. Caractéristiques du complexe (SEG) :**

#### **➤ Superficie :**

- ✓ Surface totale : 20 Ha
- ✓ Surface aménagée : 13,5 Ha
- ✓ Surface couverte : 05 Ha
- ✓ Station de traitement eau : 3450,75 m<sup>2</sup>

#### **➤ Production annuelle : année 2011**

- ✓ Détergents en poudre : 39.500 T
- ✓ Détergents liquides : 200 T
- ✓ Récurrents : 300 T

#### **➤ Besoins (exploitation plein régime)**

- ✓ Eau : 60 m<sup>3</sup>/h
- ✓ Electricité : 5.500 KVA puissance installée 6000 KVA

#### **➤ Rythme de travail**

- ✓ 3 X 8 Continu.
- ✓ 3 X 8 Discontinu.
- ✓ 2 X 8 Discontinu.
- ✓ Surface.

➤ *Situation géographique :*

Le Complexe Détergents de Sour El Ghozlane est implanté en bordure Nord du chemin de Wilaya N° 127 reliant les villes de Bouira et Sour El Ghozlane au lieu-dit Bordj Ménahasse Bouché situé à huit (08) kilomètres au Nord de Sour El Ghozlane.

**2.4. La structure de l'entreprise :**

- ✓ Unité 100 : Fabrication de matières actives (surface couverte 1300 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 200 : séchages A.G sulfates DDBSNa et alpha oléfine.
- ✓ Unité 300 : Fabrication et conditionnement détergents liquides.
- ✓ Unité 400 : Fabrication et conditionnement détergents poudres (surface couverte 1250 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 500 : Fabrication et conditionnement récurrents (surface couverte 1250 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 600 : Fabrication d'emballages en carton.
- ✓ Unité 700 : Stockage et fusion soufre (surface couverte 900 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 800 : stockage et dissolution silicate.
- ✓ Unité 900 : transport pneumatique matières premières solides (surface couverte 220 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 1100 : Stockage de matières et produits intermédiaires liquides.
- ✓ Unité 1200 : Centrale thermique (surface couverte 780 M<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 1300 : Cabine électrique et réseau de distribution (surface couverte 410 M<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 1500 : Gaz Naturel.
- ✓ Unité 3100 : Magasin de stockage emballages en carton et produits finis (surface couverte 24100 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 3200 : Magasin de stockage matières premières solides
- ✓ Unité 3300 : Magasin de stockage fûts (surface couverte 2300 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 2100 : Laboratoire (surface couverte 210 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 2200 : Atelier d'entretien et garage.
- ✓ Unité 2300 : poste de garde et pesage.
- ✓ Unité 2400 : Cantine (surface couverte 1520 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 2500 : Magasin des pièces de rechange (surface couverte 1200 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 2600 : Bloc Técnico- Administratif (surface couverte 1000 m<sup>2</sup>).
- ✓ Unité 2700 : Poste de Sécurité (surface couverte 280 m<sup>2</sup>).

- ✓ Unité station de traitement eaux.

### **2.5. Principe de fonctionnement de la tour d'atomisation :**

Le principe de fonctionnement en général de la tour consiste en le séchage d'un mélange liquide '*slurry*' en utilisant l'air chaud à contre-courant tel que le *slurry* est injecté en haut et l'air chaud entre de bas avec présence d'une dépression pour réduire la vitesse de chute de *slurry* et assurer un séchage parfait.

Le *slurry* est un mélange des liquides et des solides. Il suit un processus d'homogénéisation et maturation pour être prêt afin de passer à la tour.

Le *slurry* est vaporisé dans la tour grâce aux gicleurs d'atomisation. Ces gicleurs sont placés à la partie cylindrique supérieure de la tour et sont équidistants entre eux de telle sorte les cônes de vaporisation couvrent toute la section.

Afin de distribuer uniformément l'air chaud à la partie basse est prévu un anneau à ouvertures équidistantes et réglables.

Pour enlever le produit qui s'attache inévitablement aux parois, la tour est dotée d'une bague de nettoyage actionnée périodiquement de façon à détacher des parois le produit déposé.

La direction, la vitesse et la température de l'air chaud détermine dans une large mesure les caractéristiques des petites billes creuses.

Un générateur pourvu d'un brûleur assure la production d'air chaud dont la circulation intervient grâce à trois ventilateurs.

Le premier fournit l'air nécessaire à la combustion de combustible C408 et le second alimente l'air à chauffer C407.

Enfin le troisième ventilateur C411 aspire l'air chaud de la tour et l'envoie à l'atmosphère, après séparation de la poudre fine.

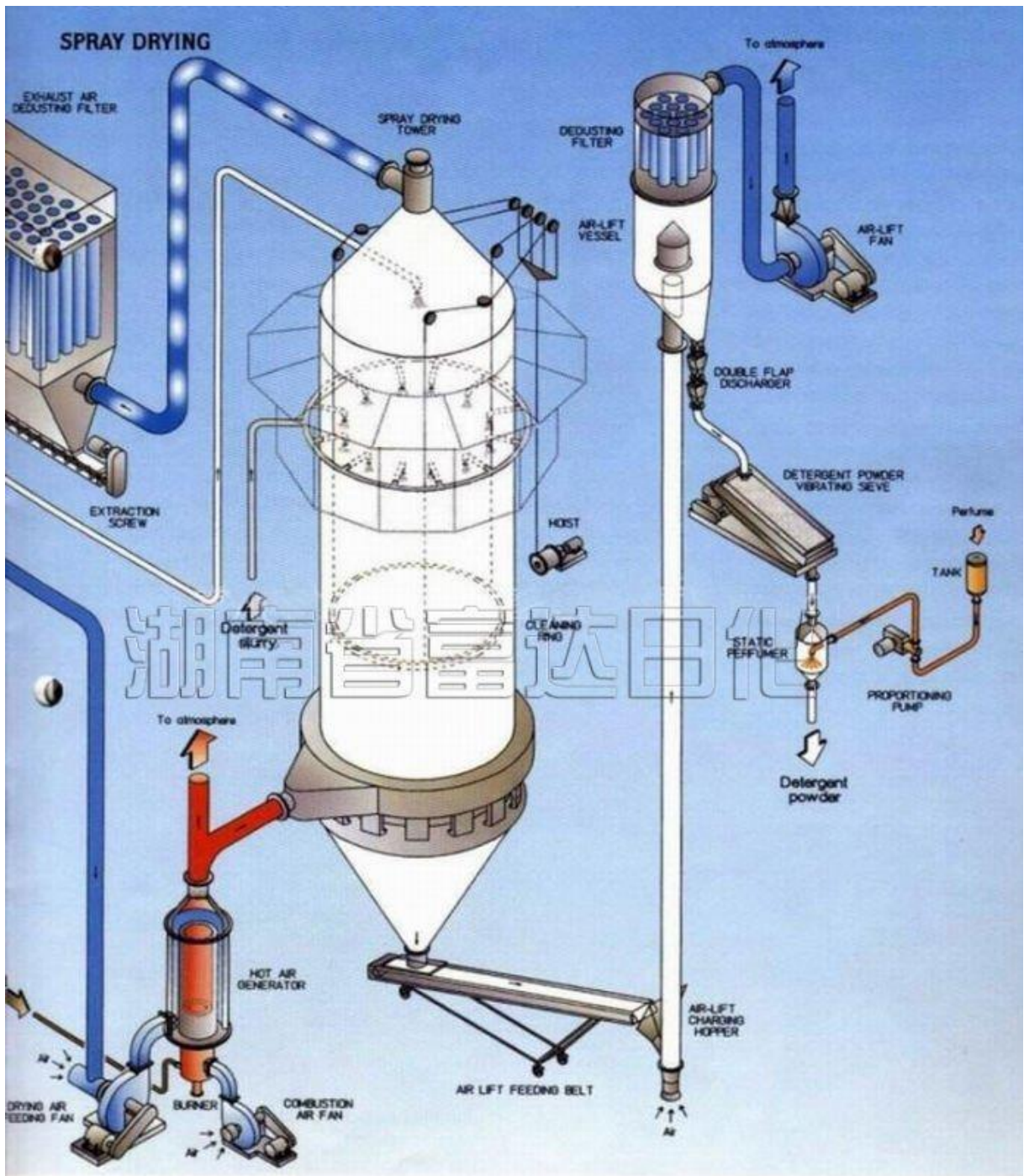


Figure 2. 1 schéma d'une tour d'atomisation

## ***2.6. Le processus de fonctionnement :***

### ***La préparation de slurry :***

Traversant la tubulure de déchargement des solides et le collecteur de récolte des liquides, les matières premières alimentent en continu le préparateur slurry R402 dont la construction a été réalisée de façon à ce que les matières premières soient bien mélangées et homogénéisées par un agitateur à haute efficacité, une fois préparée il passe par l'appareil de maturation R403. Un système de thermostat à vapeur maintient le slurry à la température désirée. Puis on trouve un groupe de filtrage et pompage depuis l'appareil de maturation aux gicleurs d'atomisation.

On peut distinguer :

- ✓ Filtre d'alimentation F406 et F407 : est un appareil à agitation muni d'une grille qui pourvoit à arrêter les grumeaux éventuels et les corps étrangers contenus dans le slurry.
- ✓ Pompe d'homogénéisation P401 et P402 : est une pompe centrifuge à couronne mobile ouverte. Cette pompe sert à briser les grumeaux et à alimenter la pompe à haute pression.
- ✓ La pompe à haute pression PHP P407 : est une pompe à piston, assure l'alimentation des gicleurs par slurry.

### ***Air chaud :***

La production de l'air chaud se fait par un four B401. L'air est fourni par un ventilateur C408 qui assure l'air pour la combustion de combustible. En suite le ventilateur C407 va aspirer l'air chaud et l'introduire à la tour à travers un anneau.

### ***Séchage :***

Le séchage se fait en utilisant l'air chaud à contre-courant produit par le four de façon à avoir le slurry injecté par les 32 gicleurs. Le séchage s'effectue pendant la chute de mélange.

### *Dépression et poudre fine :*

Pour assurer une dépression au niveau de la tour, le ventilateur C411 aspire l'air sortant de la tour d'atomisation qui porte la poudre fine. Cette poudre va être séparée à travers des cyclones et stocker dans des réservoirs pour l'utiliser ailleurs.

### *2.7. Les fiches techniques des équipements :*

Le processus de production :

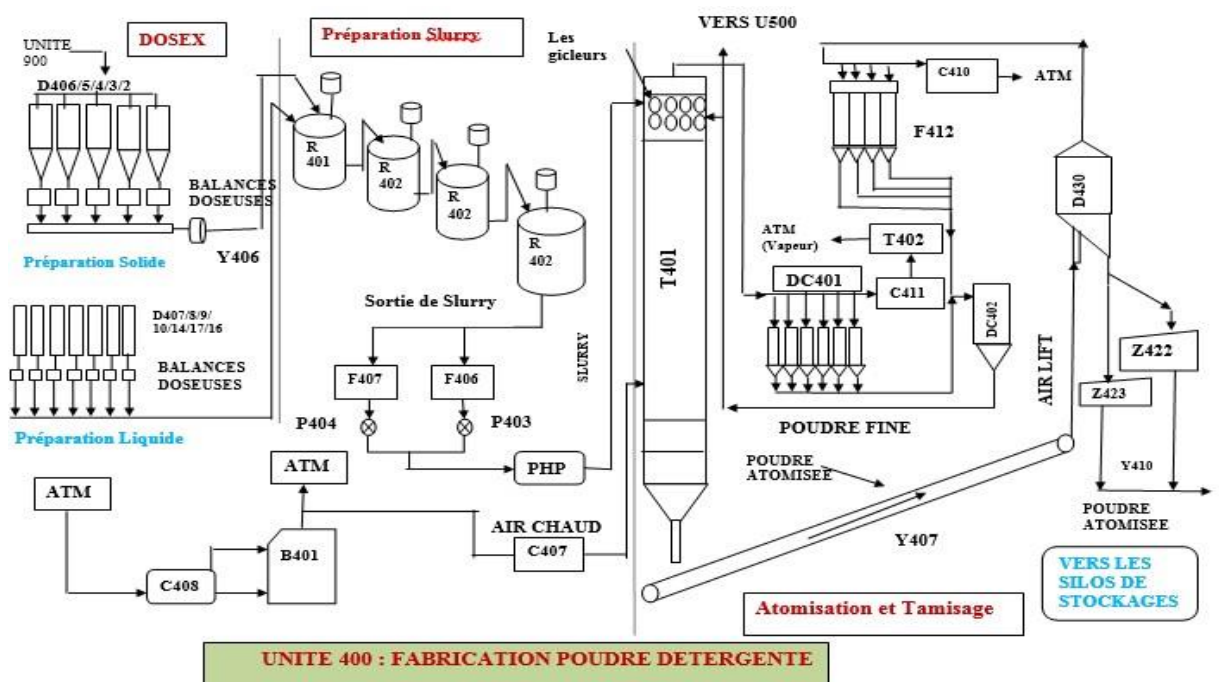


Figure 2. 2 Schéma de l'unité 400

- ✓ Ventilateurs C408, C407 et C411.
- ✓ Le four B401.
- ✓ La pompe à haute pression P407.
- ✓ Tour T401.

➤ *Ventilateur C408 :*

*Tableau 1 fiche technique de ventilateur C408*

Fournisseur	STRANICH
Type	Ventilateur centrifuge
Fluide	Air
Température de fluide	35°C
Débit	22000 Kg/ h
Pression	1470 Pa
Moteur	M160 L4 14913.25 W
Vitesse de rotation	1645 tr / min
Puissance absorbé à 35°C	12079.73 W
Orientation	0°

➤ *Ventilateur C407 :*

*Tableau 2 fiche technique de ventilateur*

Fournisseur	STRANICH
Type	Ventilateur centrifuge
Fluide	Air
Température de fluide	35°C
Débit	183000 Kg/ h
Pression	1960 Pa
Moteur	355/S 164120 W
Vitesse de rotation	700 tr / min
Puissance absorbé à 35°C	120852 W
Orientation	45°

➤ **Ventilateur C411 :**

Tableau 3 fiche technique de ventilateur C411

Fournisseur	STRANICH
Type	Ventilateur centrifuge
Fluide	Air
Température de fluide	100°C
Débit	189000 Kg/ h
Pression	3136 Pa
Moteur	400/S 253640 W
Vitesse de rotation	960 tr / min
Puissance absorbé à 100°C	223800 W
Orientation	135°

➤ **Le four B401 :**

Tableau 4 fiche technique de four B401

Fournisseur	BALLESTRA
Pression d'exercice	980 Pa
Pression de projet	1960 Pa
Température d'exercice	200-1100 °C
Température de projet	250-120 °C



➤ **La pompe à haute pression P407 :**

Tableau 5 fiche technique de pompe à haute pression P407

Fournisseur	BALLESTRA
Le type de pompe	à piston
Fluide	Slurry
Température d'exercice	50°C
Densité	1Kg/dm <sup>3</sup>
Viscosité	1.25 Pa.s
Débit	20 m <sup>3</sup> /h
Pression max	70 atm
Pression d'exercice à l'aspiration	745305.4 Pa
Nombre de cylindres	6
Course de piston	110 mm
Diamètre de piston	90 mm

➤ **La tour T401 :**

La tour est une chambre de forme cylindro-conique verticale dans laquelle le produit est pulvérisé et séché, elle a un diamètre de 10 mètre et d'une hauteur de 33 mètre ayant une capacité de production de 12.5 tonne par heures.

Tableau 6 fiche technique de la tour T401

Fournisseur	BALLESTRA
Fluide	Air/slurry
Pression d'exercice	0.01 <u>Atm</u>
Température d'exercice	100 – 300
Température de projet	325°C
Diamètre	10 m
Hauteur	30 m

## ***Chapitre 03 : Modélisation de l'opération de Séchage.***

### ***1. Introduction :***

La modélisation de l'opération de séchage par atomisation diffère d'un processus à un autre, elle dépend en principe du type de l'équipement ; la manière de mettre en contact le spray et le flux d'air chaud a une influence importante sur la vitesse d'évaporation de la gouttelette, le temps de séjour optimal de la gouttelette dans une ambiance chaude et la mesure de la formation de dépôts sur la paroi de la chambre de séchage [6].

À l'intérieur de la chambre de séchage, l'évaporation de l'eau a lieu en quelques fractions de secondes puisque les gouttelettes de très petite taille sont en contact avec un grand volume d'air chaud [10]. Ainsi, les différents processus ayant lieu pendant le séchage sont presque instantanés : formation de la gouttelette par pulvérisation, contact avec l'air sec et évaporation [11]. À l'entrée de l'atomiseur, il y a un très fort gradient de température entre l'air chaud et la surface du produit. Au fur et à mesure que les particules et l'air progressent vers la sortie, l'air, qui donne son énergie pour l'évaporation, se refroidit alors que la température superficielle du produit, de moins en moins protégé par l'évaporation, augmente. Cette augmentation de la température résulte en une chute rapide du gradient de température. Quant au gradient d'humidité, il suit la même évolution que la température : il est très élevé en début de séchage, puis diminue à la sortie de l'atomiseur et cela, à mesure où l'air devient de plus en plus humide et le produit de plus en plus sec [12].

### ***2. Les forces appliquées sur la gouttelette :***

D'après la description de processus de production de détergent poudre, on peut comptabiliser les forces appliquées sur la gouttelette. On cite le poids, la poussée d'Archimède, la force de trainée et la force de dépression créée par le ventilateur C411.

Le poids :

$$P_d = m_g \cdot g \quad (1)$$

La force de trainée :

$$R = \frac{1}{2} \cdot C_x \rho_a v^2 A \quad (2)$$

Poussée d'Archimède :

$$\mathcal{T} = m_a \cdot g \quad (3)$$

La force de dépression :

$$F = P \cdot S \quad (4)$$

On applique la loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{ex} = m\gamma \quad (5)$$

Qui se met sous la forme :

$$P - R - \mathcal{T} - F = m\gamma$$

Qui se ramène à :

$$\frac{4\pi}{3} \cdot R_0^3 \rho_s g - \frac{1}{2} \cdot C_x \rho_a v^2 A - \frac{4\pi}{3} \cdot R_0^3 \rho_a g - P \cdot S = \frac{4\pi}{3} \cdot R_0^3 \rho_s \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Qui se réduit à :

$$\frac{4\pi}{3} R_0^3 (\rho_s - \rho_a) g - P \cdot S = \frac{4\pi}{3} R_0^3 \rho_s \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \cdot C_x \rho_a v^2 A$$

Ce qui nous permet d'avoir la configuration finale de l'équation différentielle.

$$\frac{dv}{dt} + \frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s} v^2 = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} g - \frac{3P}{R_0 \rho_s} \quad (7)$$

Pour la première partie on considère seulement un transfert de chaleur, entre la gouttelette et l'air chaud telle que la température de gouttelette augmente de 50°C à 100°C.

On considère pour cela les conditions suivantes :

$$\rho_s = cte.$$

$$r = cte.$$

$$C_2 = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} g - \frac{3P}{R_0 \rho_s}$$

La résolution de cette l'équation différentielle nous donne l'expression finale de la vitesse instantanée :

$$v(t) = \frac{1}{\frac{3}{8} \frac{C_x \rho_a}{R_0 \rho_s} t + \frac{1}{v_i}} + \sqrt{\frac{8R_0(\rho_s - \rho_a) g - 24P}{3 C_x \rho_a}}$$

Le développement à venir considère une vitesse moyenne qui se traduit par l'expression de la vitesse moyenne :

$$v_{moyenne} = \frac{c_1}{a_1} - \frac{c_1 t_c a_2}{a_1^2} \ln \frac{a_2}{a_1 t_c + a_2} + \frac{c_2}{a_1} \ln \frac{a_1 t_c + a_2}{a_2}$$

Tel que :

$$a_1 = \frac{3}{8} \frac{C_x \rho_a}{R_0 \rho_s}$$

$$a_2 = \frac{1}{v_i}$$

$$a_3 = \sqrt{\frac{8R_0(\rho_s - \rho_a) g - 24P}{3 C_x \rho_a}}$$

$$c_1 = a_1 \cdot a_3$$

$$c_2 = a_1 \cdot a_2 + 1$$

### 3. Transfert de chaleur :

Le bilan du transfert est établi dans un volume de contrôle quelconque comme suit :

$$\frac{d\dot{E}_{st}}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g$$

Où l'énergie générée et l'énergie cédée par la gouttelette sont négligeables.

Qui se ramène à :

$$\rho_s V c \frac{dT}{dt} = q_s'' A_{s,h} \quad (13)$$

$$\rho_s V c \frac{dT}{dt} = q_s'' A_{s,h} \quad (14)$$

On remarque que l'expression  $\frac{dT}{dt} = \frac{q_s'' A_{s,h}}{\rho_s V c} = a$  représente une constante

Une intégration de cette dernière, nous permet de calculer le temps de séjour partiel par transfert de chaleur.

Avec

$$t_c = (T_{vap} - T_i) \frac{\rho_s V c}{q_s'' A_{s,h}}$$

$$q_s'' = h(T_\infty - T_i) \quad (16)$$

Ce qui ramène ce temps de séjour à l'expression finale suivante :

$$t_c = \frac{(T_{vap} - T_i) \rho_s R_0 c_p}{(T_\infty - T_i) 3 \cdot h_{air}} \quad (17)$$

#### 4. Transfert de masse :

Ce phénomène apparaît lorsque la gouttelette atteint la température d'évaporation de l'eau.

L'eau contenue initialement dans la gouttelette était de 40% de poids total de gouttelette et sera ramené à 7% du poids de la gouttelette à la fin du séchage.

De l'équation de diffusion de masse, on a :

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( CD_{AB} r^2 \frac{\partial x_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial \theta} \right) \\ + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( CD_{AB} \sin \theta \frac{\partial x_A}{\partial \varphi} \right) + \dot{N}_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \end{aligned} \quad (18)$$

Pour une variation radiale et sans de génération de masse  $\dot{N}_A = 0$ , on obtient :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( CD_{AB} r^2 \frac{\partial x_A}{\partial r} \right) = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (19)$$

On fait ramener cette dernière à la forme suivante :

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (20)$$

On pose

$$C(r, t) = r(r, t) \quad (21)$$

L'équation devient alors :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (23)$$

Avec des conditions initiales et aux limites :

$$C(R_0, 0) = U_0 \quad (24)$$

et

$$C(0, t) = 0 \quad (25)$$

Une intégration de cette dernière nous permet de calculer le temps de séjour

En adoptant la transformée suivante :

$$\frac{1}{D_{AB}} \int_0^{\infty} \exp(-st) \frac{\partial U}{\partial t} dt = \int_0^{\infty} \exp(-st) \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} dt$$

En posant :

$$U^* = \int_0^{\infty} \exp(-st) U dt$$

On obtient l'expression transformée suivante

$$\frac{\partial^2 U^*}{\partial r^2} = \frac{s}{D_{AB}} U^* \quad (26)$$

Qui a pour solution exacte :

$$U(r, t) = U_0 \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{D_{AB}t}}\right) \quad (27)$$

Avec

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\delta^2) d\delta \quad (28)$$

On adopte la formule approchée suivante :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + O(z^9) \right) \quad (29)$$

Et en se limitant au premier terme du polynôme :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} z$$

On obtient une solution approchée :

$$(r, t) = U_0 \frac{r}{\sqrt{\pi D_{AB} t}}$$

Correspondant à :

$$(r, t) = R_0 C_0 \frac{1}{\sqrt{\pi D_{AB} t}} \quad (30)$$

A la fin de séchage, on aura une concentration :

$$C(r_e, t_m) = R_0 C_0 \frac{1}{\sqrt{\pi D_{AB} t_m}} = C_e$$

Ce qui va nous permettre de calculer le temps de séjour partiel du transfert de masse :

$$t_m = \frac{1}{\pi D_{AB}} \left( \frac{R_0 C_0}{C_e} \right)^2 \quad (31)$$

On adopte alors un temps de séjour total cumulé à travers la somme des deux temps  $t_c$  et  $t_m$ , en adoptant le principe de dissociation des deux phénomènes, on aura alors un temps de séjours total égal à :

$$t_{tot} = \frac{(T_{vap} - T_i)}{(T_{\infty} - T_i)} \frac{\rho_s R_0 c_p}{3 \cdot h_{air}} + \frac{1}{\pi D_{AB}} \left( \frac{R_0 C_0}{C_e} \right)^2 \quad (32)$$

### ***5. Le rendement énergétique :***

La température et l'humidité de l'air sortant de la tour doivent encore être en mesure de sécher la poudre finale, c'est-à-dire être plus chaude et plus sèche (en termes de pression de vapeur d'eau) que la poudre sèche. Cela signifie que l'on ne pourra guère charger l'air sortant à plus de 20% d'humidité relative, ni le faire sortir plus froid qu'environ 80°C.

Le rendement énergétique peut être estimé approximativement par la formule :

$$\text{rendement } \eta = \frac{\text{température air chaud} - \text{température air sortant}}{\text{température air chaud} - \text{température extérieure}} \quad (33)$$

$$\eta = \frac{300 - 150}{300 - 25}$$

$$\eta = 0.54 = 54\%$$

Les valeurs typiques du rendement du séchage par atomisation sont au mieux de l'ordre de 60%, les 40% restant disparaissant avec l'air chaud évacué à l'extérieur. Cette estimation ne tient pas compte des pertes de chaleur par les parois de la tour, du cyclone et des conduites de l'air chaud, ni de la consommation des ventilateurs [13].

### ***6. Simulation de phénomène :***

On a établi un programme numérique qui nous a permis de faire les calculs (voir annexe).

Les données du problème pour calculer le temps de séjour :

$$R_0 = 0.002 \text{ m}$$

$$\rho_s = 1330 \text{ kg/m}^3$$

$$v_i = 1.33 \text{ m/s}$$

$$T_i = 50^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 300^\circ\text{C}$$



$$C_0 = 0.53 \text{ mol/m}^3$$

$$C_e = 0.093 \text{ mol/m}^3$$

On tire le calcul le temps de séjour. Il y a lieu de relever qu'on peut lier les variables d'entrées entre elles, et on montre les différents types de variation dans l'expérimentation numérique.

## Chapitre 04 : Expérimentation Numérique.

### 1. Introduction :

Ce chapitre contient les résultats obtenus par l'exécution du programme de MATLAB. Le but de ce programme est de calculer le temps de séjour et la vitesse moyenne, en plus on peut voir l'influence des variations des paramètres selon des intervalles sur le temps de séjour. On a tracé des abaques, qui sont les résultats des variations de trois paramètres à la fois.

#### ➤ Les graphes :

- ✓ Variation de la vitesse en fonction de temps de séjour :

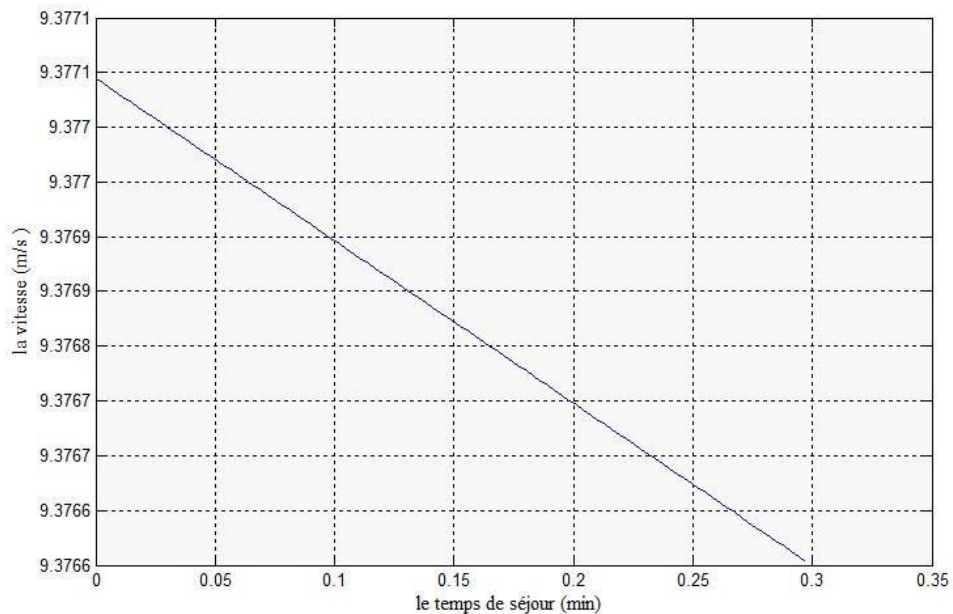


Figure 4. 1 La courbe de vitesse en fonction de temps de séjour

La figure 4.1 montre la variation de la vitesse dans la première partie (transfert de chaleur) en fonction de temps jusqu'à  $t_c$ . On constate une légère variation de la vitesse dans cet intervalle, alors on peut considérer que la vitesse est constante dans cette partie.

On considère également la vitesse constante dans la partie transfert de masse, car la variation du rayon de gouttelette est très petite, donc on considère une vitesse constante pendant la chute de la gouttelette.

- ✓ Variation de vitesse moyenne en fonction de vitesse initiale  $v_i$  :

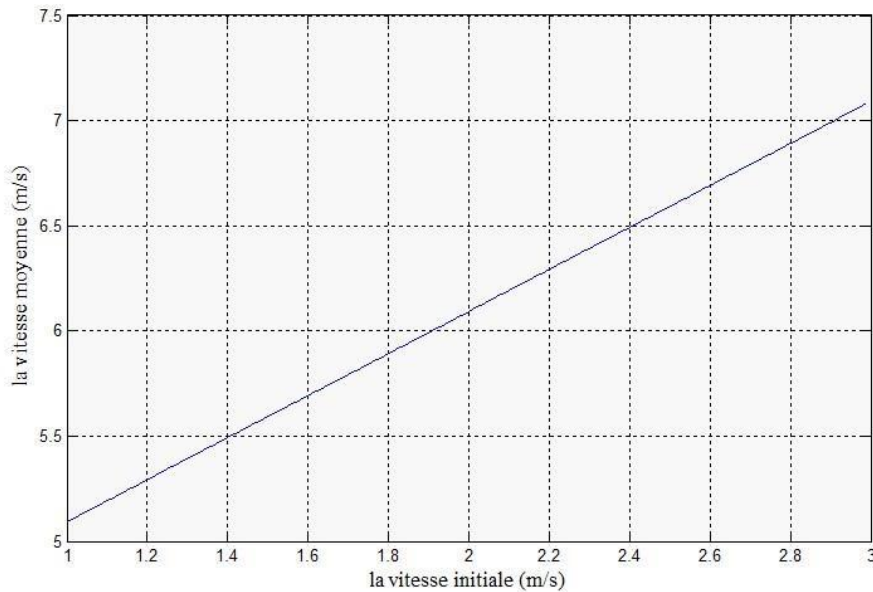


Figure 4. 2 La courbe de vitesse en fonction de vitesse initiale

Dans ce graphe, on fait varier la vitesse moyenne  $v_{moyenne}$  en fonction de vitesse initiale de slurry , le résultat de variation est représenté par une droite, telle que lorsque la vitesse initiale augmente, la vitesse moyenne augmente aussi, alors on a une proportionnalité entre les deux.

- ✓ Variation de temps de séjour en fonction de  $T_{\infty}$  :

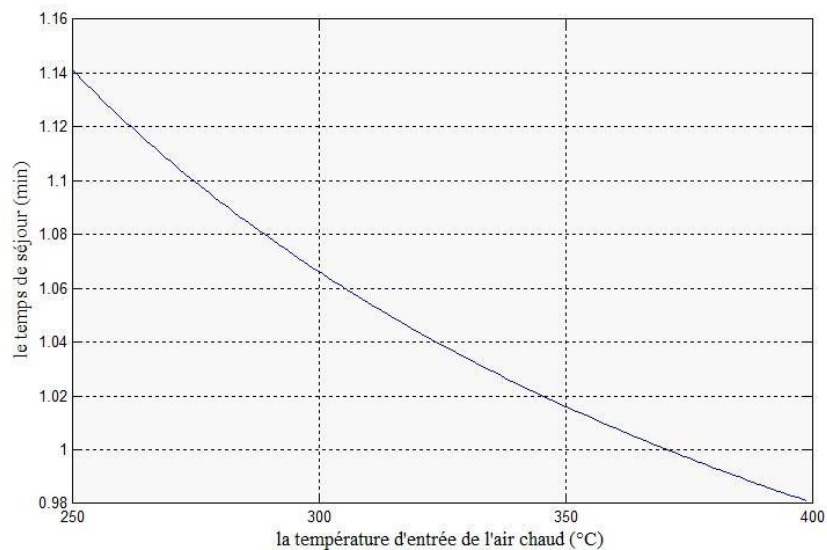


Figure 4. 3 le courbe de temps de séjour en fonction  $T_{\infty}$

Les deux courbes représentent respectivement la variation de temps pour la première partie  $T_{\infty}$  et le temps de séjours total en fonction de température d'entrée de l'air chaud, la forme des courbes est identique car on a :

$$tot = t_m + t_c$$

Et  $T_{\infty}$  influence seulement sur  $t_c$ . On constate une diminution de temps du séjour selon une courbe hyperbolique lorsqu'on augmente la température de l'air chaud.

On peut justifier cette diminution par l'augmentation de flux de chaleur, par conséquent la diminution du temps nécessaire pour atteindre la température désirée.

✓ Variation de temps de séjour en fonction de  $T_i$  :

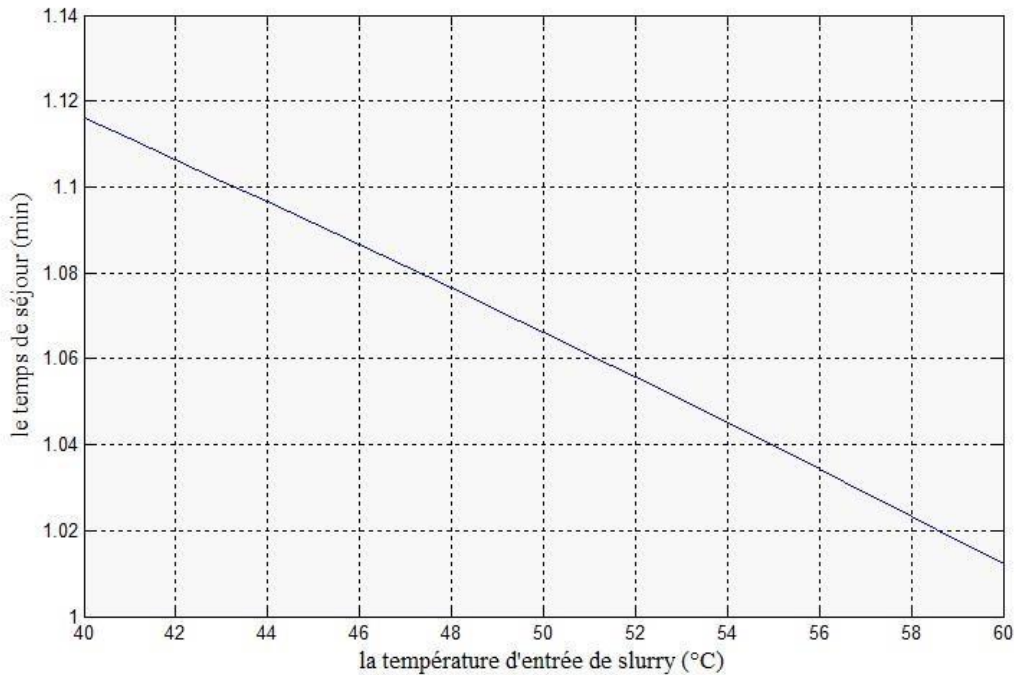
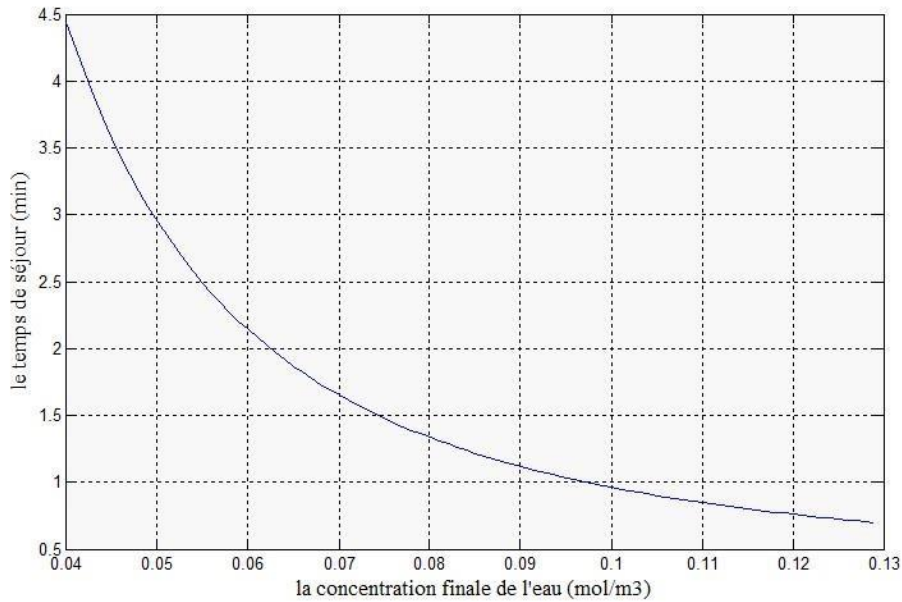
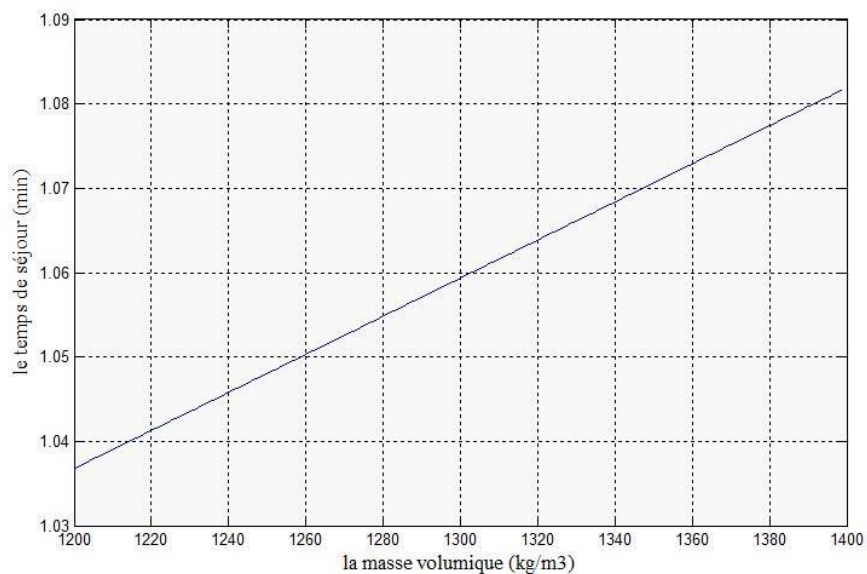


Figure 4. 4 la courbe de temps de séjour en fonction de  $T_i$

Le graphe résultant de la variation du temps du séjour total en fonction de la température initiale du slurry, on remarque une diminution de temps presque linéaire lorsque la température initiale du slurry augmente. Le temps diminue car on n'a pas besoin d'un grand flux pour augmenter la température de la gouttelette qui est proche de la température d'évaporation.

✓ Variation de temps de séjour en fonction de  $c_e$  :Figure 4. 5 la courbe de temps de séjour en fonction de  $C_e$ 

Dans ce graphe, la variation de concentration finale de l'eau dans la gouttelette  $C_e$  résulte une grande variation de temps de séjours. Le temps est très petit lorsque la concentration est plus grande car la différence entre concentration initiale et finale est petite.

✓ Variation de temps de séjour et  $v_{moyenne}$  en fonction de  $\rho_s$  :Figure 4. 6 la courbe de temps de séjour en fonction de  $\rho_s$

Pour cette variation, on remarque que le temps de séjour augmente lorsque la masse volumique de slurry augmente, on peut déduire qu'en augmentant la masse on augmente le temps du séjour.

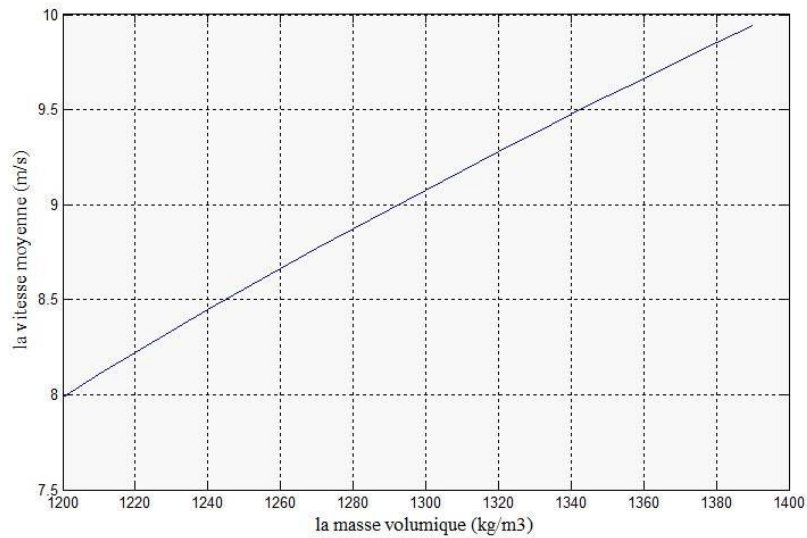


Figure 4. 7 La courbe de vitesse en fonction de masse volumique

La vitesse moyenne car augmente avec l'augmentation de la masse volumique, il résulte qu'une de masse engendre une augmentation la vitesse de gouttelette.

✓ Variation du temps de séjour et  $v_{moyenne}$  en fonction de  $R_0$ :

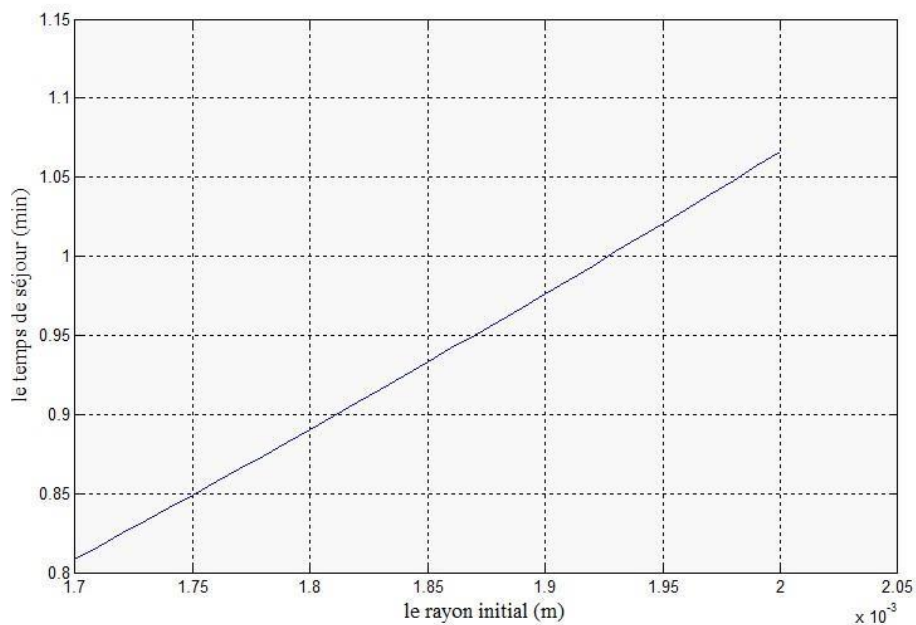


Figure 4. 8 la courbe de temps de séjour en fonction de rayon initial

La variation de rayon initial de gouttelette influence sur le temps dans les deux partie (transfert de masse et de chaleur), cette influence est proportionnelle, alors le temps total de séjour augmente avec l'augmentation du rayon initial.

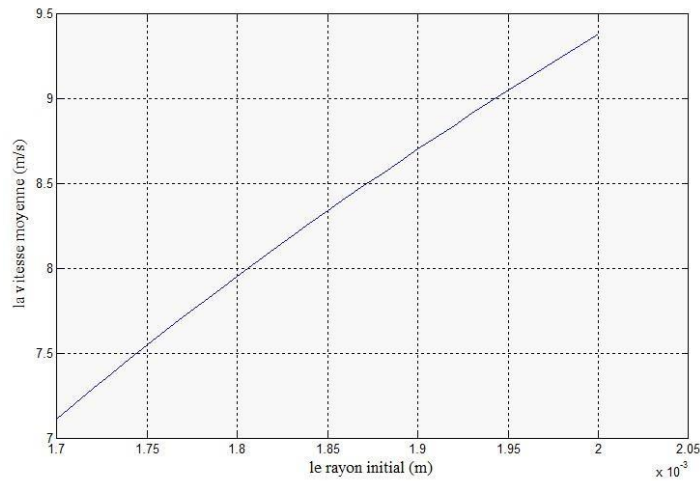


Figure 4. 9 La courbe de vitesse en fonction de  $R_0$ .

Même chose pour la vitesse moyenne, l'augmentation de rayon implique l'augmentation de masse c'est-à-dire le poids tout ça va augmenter la vitesse moyenne.

✓ Variation de temps de séjour en fonction de  $C_0$  :

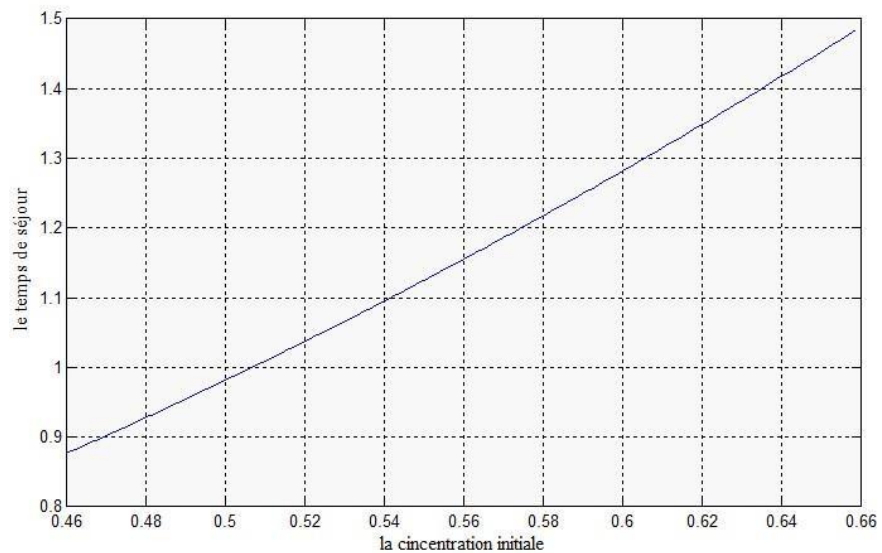


Figure 4. 10 la courbe du temps séjour en fonction de  $C_e$

L'augmentation de la concentration de l'eau initial c'est-à-dire augmenter la quantité de l'eau contenue dans la gouttelette même à une augmentation du temps nécessaire pour le séchage.

✓ *Les abaques :*

Dans cette partie on va varier deux paramètres à la fois pour voir leurs influences sur le temps de séchage.

✓ Variation de  $t_{tot}$  en fonction de  $C_e$  et  $T_\infty$  :

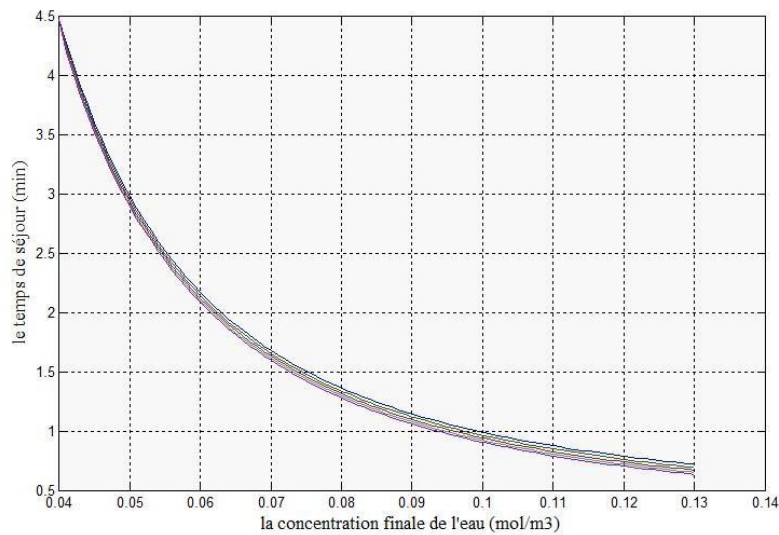
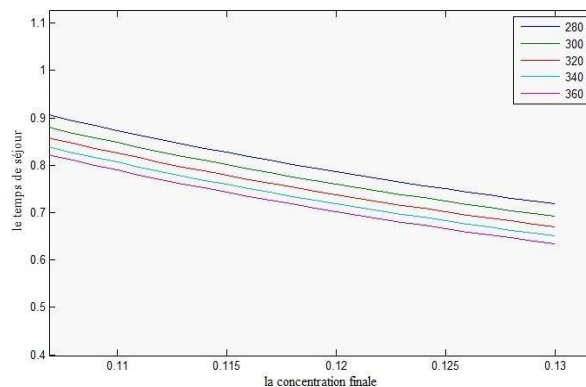


Figure 4. 11 a les courbes de temps de séjour en fonction de  $C_e$  et  $T_\infty$

Le graphe représente le temps de séchage en variant la température d'entrée de l'air chaud et la concentration finale de l'eau dans la gouttelette tel que l'accroissement de  $C_e$  et de  $T_\infty$  provoque le bassement de temps de séchage avec la variation de  $T_\infty$  a une petite influence sur le temps de séchage par rapport à  $C_e$ .





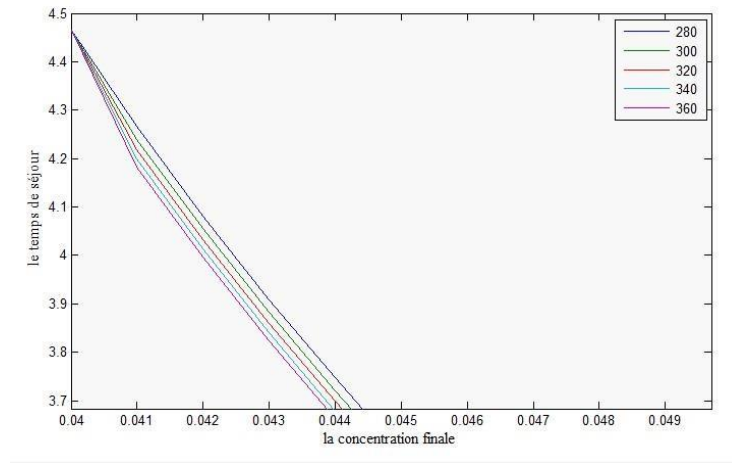


Figure 4. 11 b les vues agrandies de courbe de temps de séjour en fonction de  $C_e$  et  $T_\infty$

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $T_i$  et  $T_\infty$  :

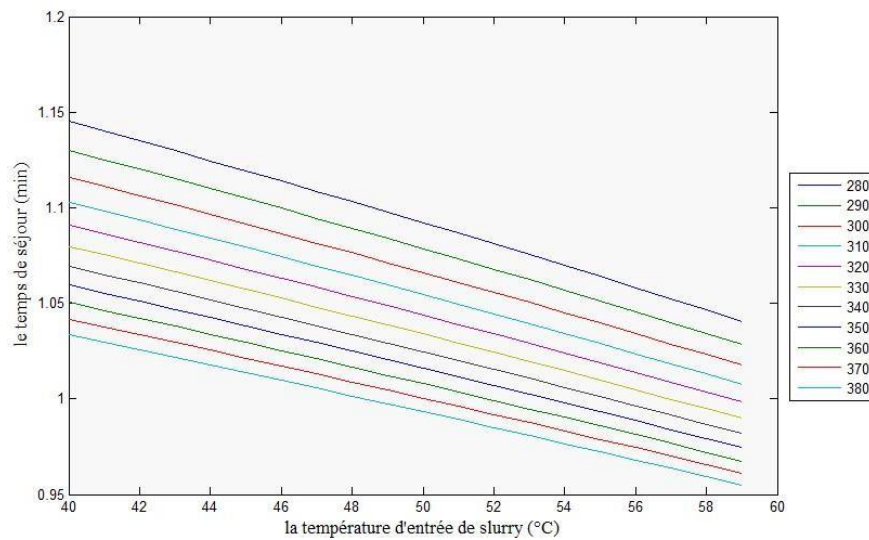


Figure 4. 12 les courbes de temps de séjour en fonction de  $T_i$  et  $T_\infty$

Même chose pour ce graphe, le temps diminue avec l'accroissement de deux paramètres, alors le temps est inversement proportionnel aux deux paramètres.

➤ Variation de  $tot$  en fonction de  $T_\infty$  et  $\rho_s$ :

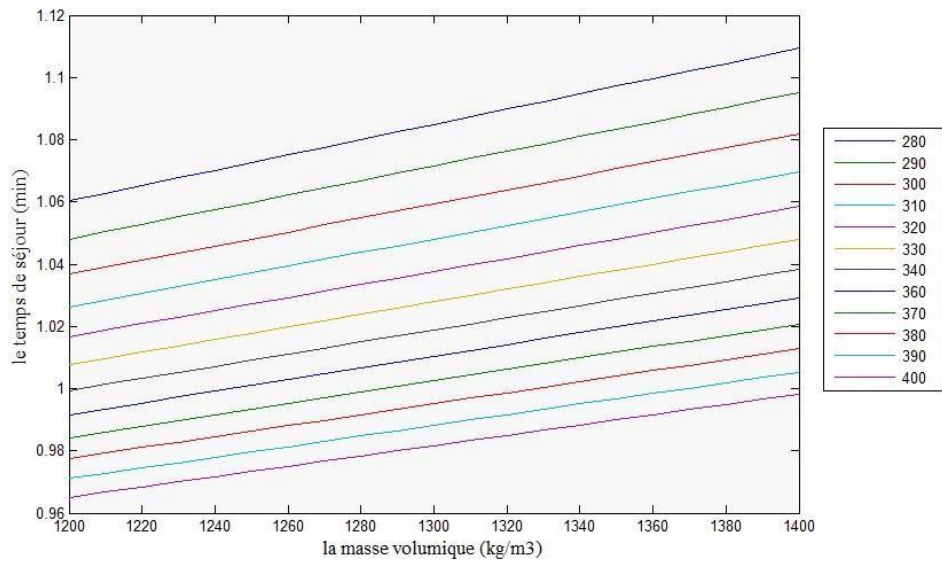


Figure 4. 13 Les courbes de temps de séjour en fonction de  $\rho$  et  $T_\infty$

✓ Variation de  $tot$  en fonction de  $R_0$  et  $T_\infty$  :

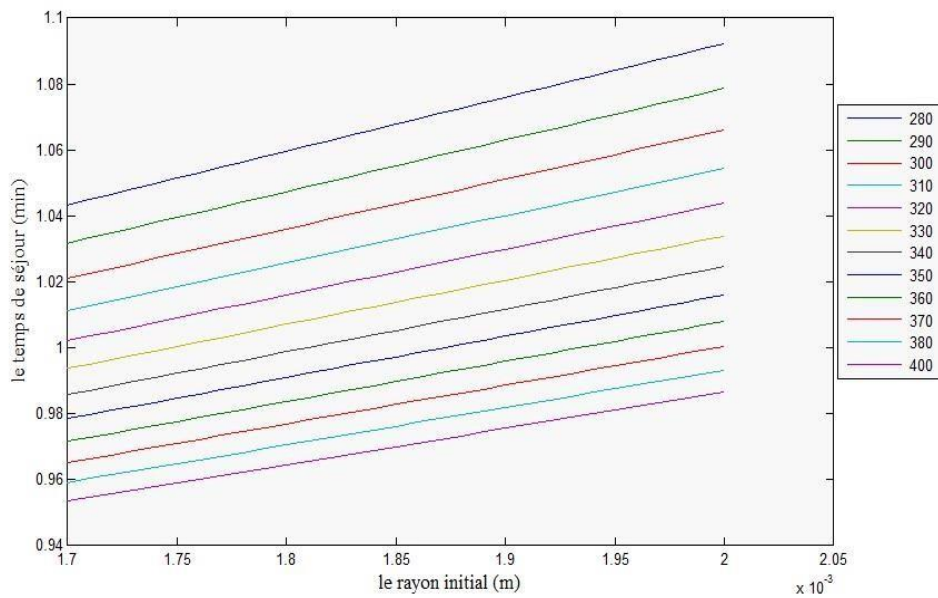


Figure 4. 14 les courbes de temps de séjour en fonction de  $R_0$  et  $T_\infty$

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $\rho_s$  et  $T_i$

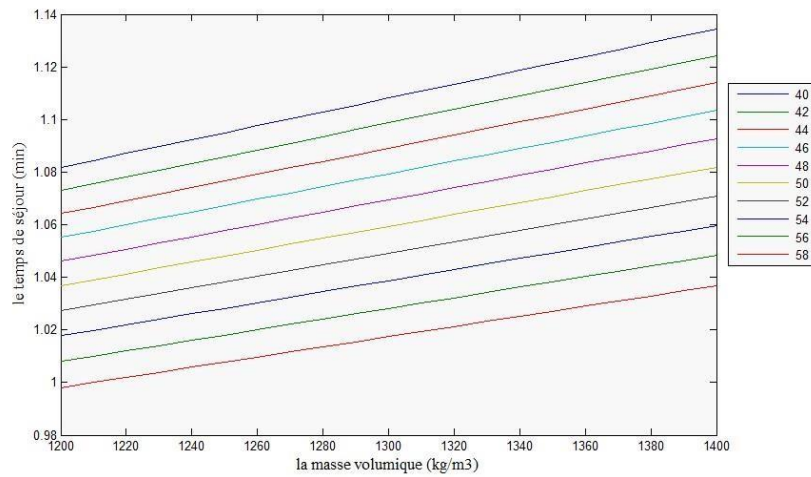


Figure 4. 15 Les courbes de temps de séjour en fonction de  $\rho_s$  et  $T_i$

Pour les abaques de figure 4.13, 4.14 et 4.15 le temps de séjour est proportionnel aux paramètres  $\rho_s$  et  $R_0$  et inversement proportionnel aux paramètres  $T_{inf}$  et  $t_i$  de plus on a plusieurs combinaisons de valeurs pour un temps de séjour.

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $R_0$  et  $T_i$ :

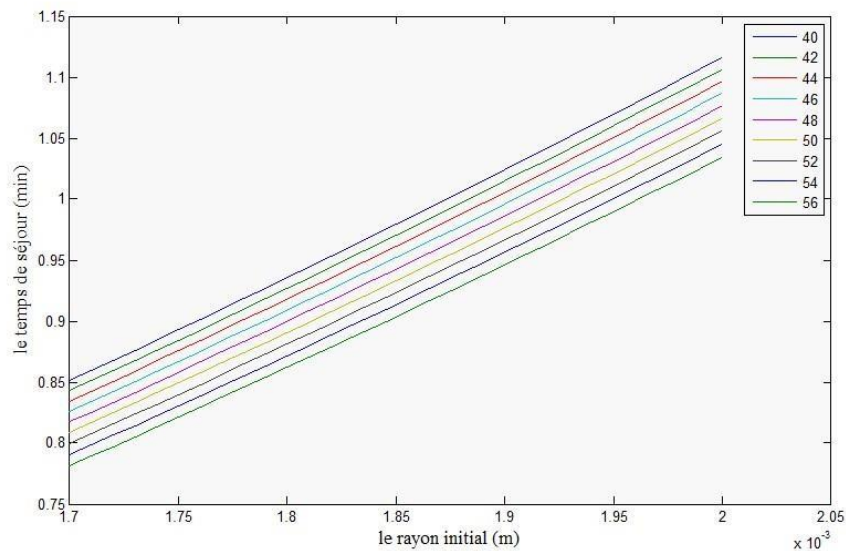


Figure 4. 16 Les courbes de temps de séjours en fonction de  $R_0$  et  $T_i$

$T_i$  Cette courbe confirme de l'augmentation de rayon initial  $R_0$  et la diminution de  $T_i$  de cause l'augmentation de temps de séjour avec l'influence de  $R_0$  est faible par rapport au  $R_0$ .

✓ Variation de  $t_{tot}$  en fonction de  $C_e$  et  $R_0$  :

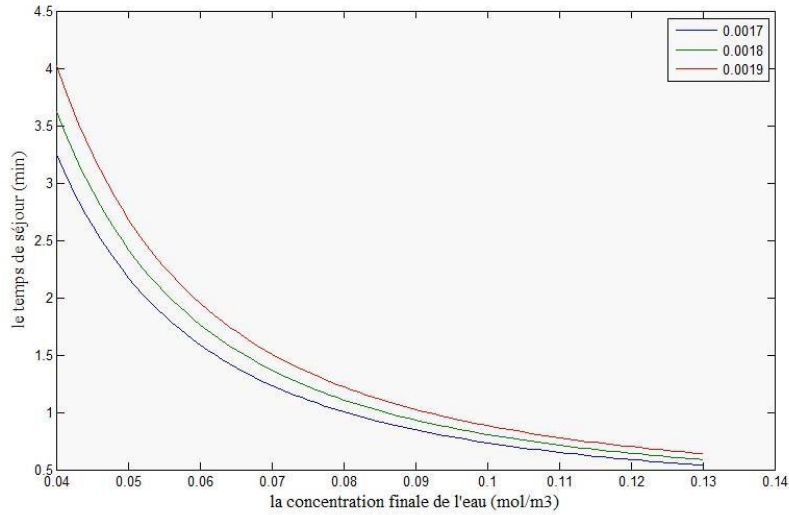


Figure 4. 17 les courbes de temps de séjours en fonction de  $C_e$  et  $R_0$

Le temps de séchage varie proportionnellement au rayon initial  $R_0$  et inversement proportionnel à la concentration initiale de l'eau dans la gouttelette avec lorsque  $C_e$  est grand le temps de séchage est très proche pour différents rayons.

✓ Variation de  $t_{tot}$  en fonction de  $\rho_s$  et  $R_0$  :

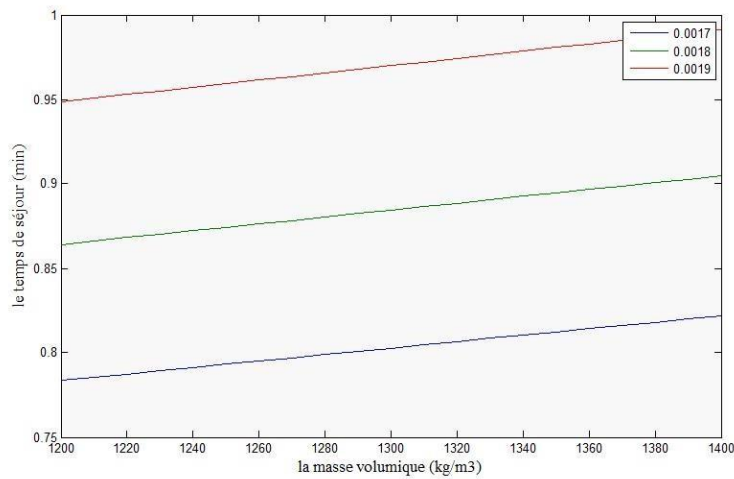


Figure 4. 18 les courbes de temps de séjours en fonction de  $\rho_s$  et  $R_0$

Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $\rho_{set} C_0$ :

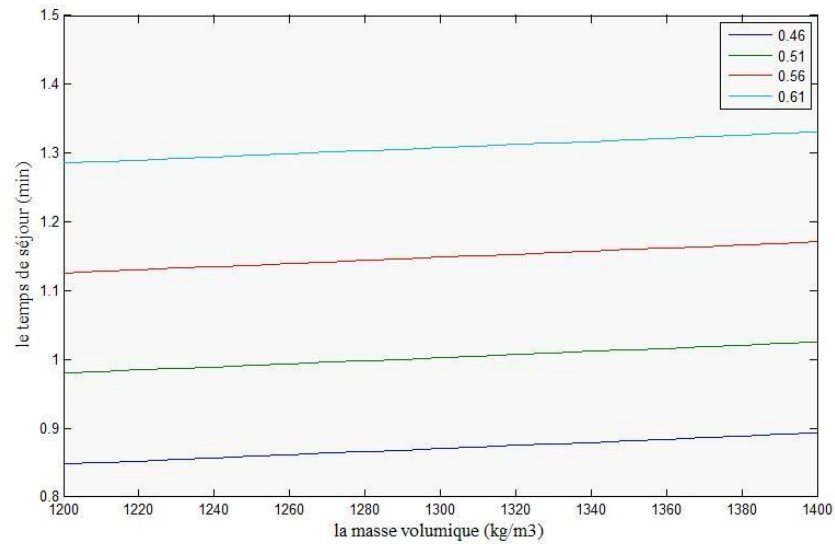


Figure 4. 19 les courbes de temps de séjours en fonction de  $\rho_{set} C_0$

Pour les courbes de figure 4.18 et 4.19 le temps augmente avec l'augmentation de  $\rho_s$  et de  $R_0$  ou  $C_0$  telle que les marge de variation de temps de séchage pour chaque valeur de  $R_0$  ou  $C_0$  de sont loin l'un de l'autre.

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $T_{\infty} \text{ et } C_0$  :

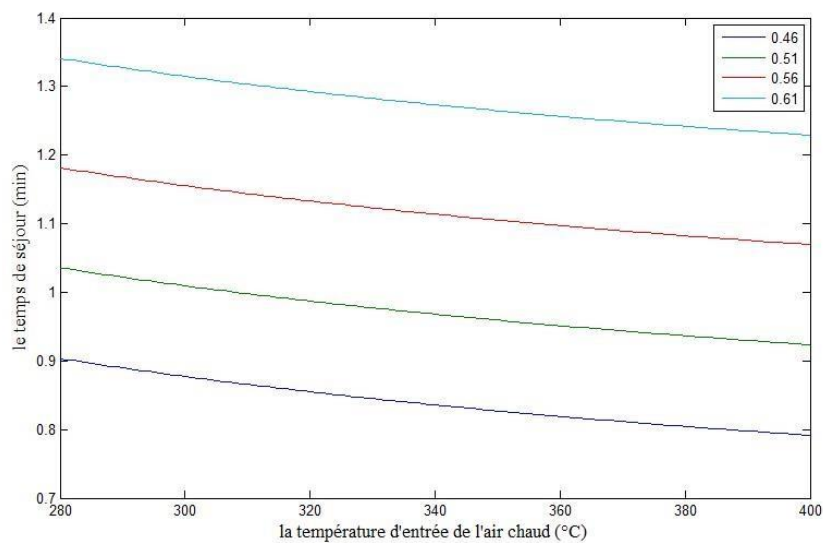


Figure 4. 20 les courbes de temps de séjours en fonction de  $t_{inf}$  et  $C_0$

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $R_0$  et  $C_0$ :

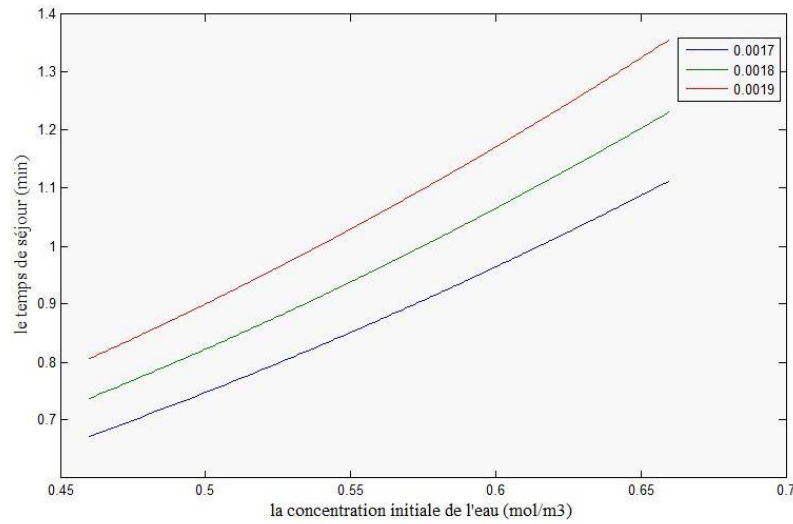


Figure 4. 21 les courbes de temps de séjours en fonction de  $R_0$  et  $C_0$

Le temps augmente avec l'augmentation de  $R_0$  et  $C_0$

✓ Variation de  $t_{ot}$  en fonction de  $T_{i\text{et}}$  et  $C_0$ :

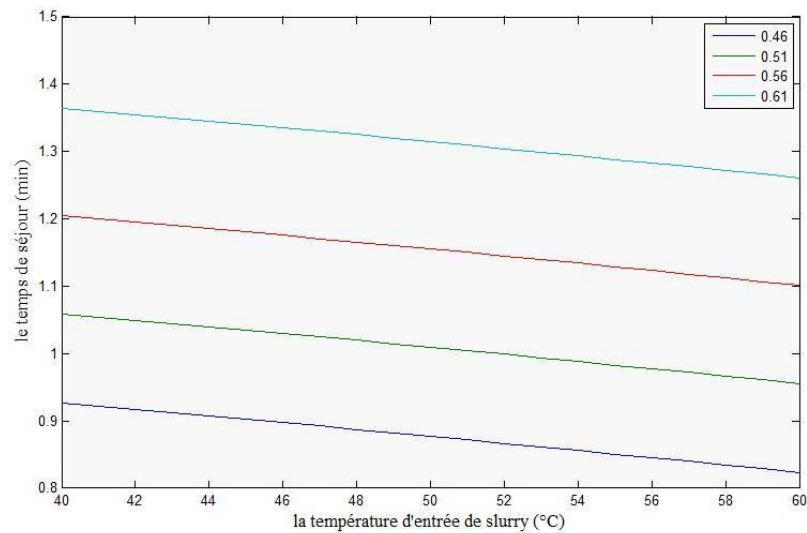


Figure 4. 22 les courbes de temps de séjours en fonction de  $T_{i\text{et}}$  et  $C_0$

On dans les courbes de figure 4.20 et 4.22, Le temps de séjour diminue avec l'augmentation  $T_{i\text{et}}$  ou  $T_{\text{et}}$  et la diminution de  $C_0$  telle que les courbes sont loin l'un de

l'autre c'est-à-dire l'influence de concentration initiale est forte sur le temps de séchage.

Variation de  $t_{tot}$  en fonction de  $T_i$  et  $C_e$  :

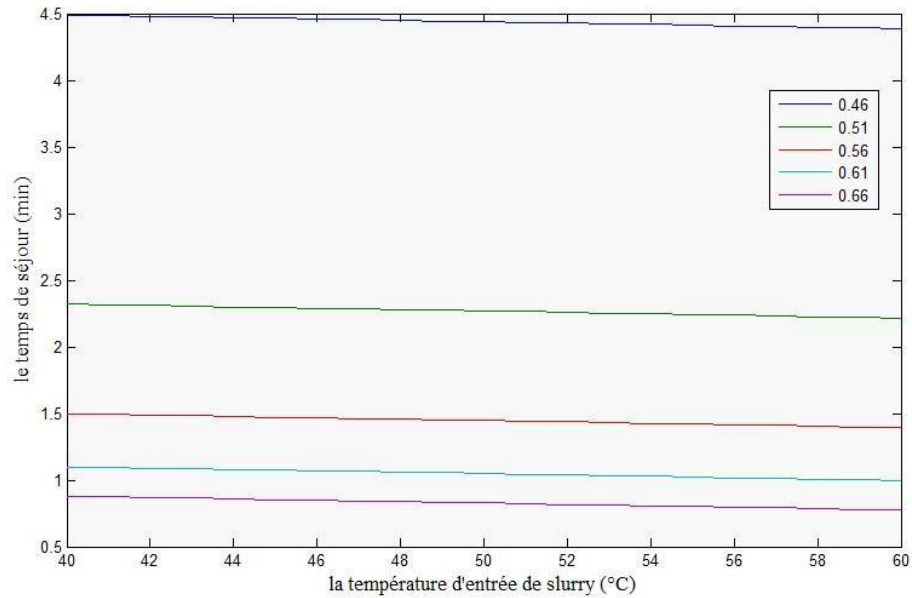


Figure 4. 23 les courbes de temps de séjours en fonction de  $T_i$  et  $C_e$

La variation de temps est inversement proportionnelle à la température initiale  $T_i$  et à la concentration finale de l'eau dans la gouttelette. Et on constate aussi que la distance entre les courbes augmente lorsque on diminue les valeurs de  $C_e$  c'est-à-dire elle a une grande influence sur le temps de séjours.

### ***Conclusion et perspectives.***

Nous avons présenté dans ce travail une étude sur un système de séchage par atomisation d'un détergent telle que le calcul de temps de séjour et l'influence des paramètres sur ce dernier.

Les paramètres qui influencent sur le temps de séjour sont : le rayon initial de gouttelette  $R_0$ , la masse volumique  $\rho_s$ , la vitesse initiale de slurry  $v_i$ , la température initiale de slurry  $T_i$ , la température d'entrée de l'air chaud  $T_\infty$ , la concentration initiale de l'eau  $C_0$  dans la gouttelette et la concentration finale  $C_e$ .

Dans la première partie du programme, on a fait varier un seul paramètre tel qu'on a trouvé que le temps de séjour diminue avec l'augmentation de  $T_\infty$ ,  $T_i$ ,  $C_e$  mais les courbes ne sont pas identiques telles que l'augmentation de  $C_e$  provoque une rapide diminution de  $t_{tot}$  par rapport à  $T_\infty$ , et la courbe de variation de  $T_i$  c'est une droite, alors l'influence de ces paramètres se diffèrent l'un de l'autre, de plus l'augmentation de  $\rho_s$ ,  $R_0$  et  $C_0$  augmente le temps de séjour mais de façon différent l'un de l'autre.

La deuxième partie c'est des abaques, on a varié deux paramètres à la fois et voir leur influence sur le temps de séjour, ces abaques aident à trouver les combinaisons de solution pour un temps de séjour donné.

Finalement, cette étude ne suffit pas pour améliorer la production de détergents car on ne sait pas l'influence de ces paramètres sur la granulométrie de la poudre, il faut prendre en considération toutes les côtés de l'étude pour avoir trouvé la bonne solution pour un bon produit.



## Annexe

Annexe 1 : résolution de l'équation différentielle donnant la vitesse et le calcul de la vitesse moyenne.

- Sans seconde membre :

$$\frac{dv}{dt} + C_1 v^2 = 0$$

$$\frac{dv}{dt} = -C_1 v^2$$

$$\frac{dv}{v^2} = -C_1 dt$$

Après intégration :

$$\int -\frac{dv}{v^2} = \int C_1 dt$$

$$\frac{1}{v} = C_1 t + C_3$$

$$v(t) = \frac{1}{C_1 t + C_3}$$

La condition initiale :

$$v(t=0) = v_l = \frac{1}{C_3}$$

$$C_3 = \frac{1}{v_l}$$

$$v(t) = \frac{1}{C_1 t + \frac{1}{v_l}}$$

- Avec seconde membre :

On pose :  $v(t) = B$

$$C_1 B^2 = C_2$$

$$B = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

Alors la solution totale :

$$v(t) = \frac{1}{C_1 t + C_3} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$v(t) = \frac{1}{\frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s} t + \frac{1}{v_l}} + \sqrt{\frac{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} g - \frac{3P}{R_0 \rho_s}}{\frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s}}}$$

$$v(t) = \frac{1}{\frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s} t + \frac{1}{v_l}} + \sqrt{\frac{8 R_0 (\rho_s - \rho_a) g - 24P}{3 C_x \rho_a}}$$

$$v_{moyenne} = \frac{1}{t_v - 0} \int_0^{t_v} v(t) dt$$

$$v_{moyenne} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \left( \frac{1}{\frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s} t + \frac{1}{v_l}} + \sqrt{\frac{8 R_0 (\rho_s - \rho_a) g - 24P}{3 C_x \rho_a}} \right) dt$$

$$v_{moyenne} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \left( \frac{1}{a_1 t + a_2} + a_3 \right) dt$$

Avec

$$a_1 = \frac{3 C_x \rho_a}{8 R_0 \rho_s}$$

$$a_2 = \frac{1}{v_l}$$

$$a_3 = \sqrt{\frac{8 R_0 (\rho_s - \rho_a) g - 24P}{3 C_x \rho_a}}$$

$$v_{moyenne} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \left( \frac{a_1 a_3 t + a_2 a_3 + 1}{a_1 t + a_2} \right) dt$$

$$v_{moyenne} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \left( \frac{c_1 t + c_2}{a_1 t + a_2} \right) dt$$

$$v_{moyenne} = \frac{c_1}{t_c} \int_0^{t_c} \frac{t}{a_1 t + a_2} dt + \frac{c_2}{t_c} \int_0^{t_c} \frac{1}{a_1 t + a_2} dt$$

$$v_{moyenne} = \frac{c_1}{t_c} \left[ \frac{1}{a_1} t - \frac{a_2}{a_1^2} \ln(a_1 t + a_2) \right] + \frac{c_2}{t_c} \left[ \frac{1}{a_1} \ln(a_1 t + a_2) \right]$$

$$v_{moyenne} = \frac{c_1}{a_1} - \frac{c_1 t_c a_2}{a_1^2} \ln \frac{a_2}{a_1 t_c + a_2} + \frac{c_2}{a_1} \ln \frac{a_1 t_c + a_2}{a_2}$$

---

Annexe 2 :

**Algorithme :**

Variables :

r0, ros, vi, ti, tinf, c0, ce

Entrée :

Afficher « entrer les valeurs  
nécessaires » Saisir r0 ros vi ti tinf c0  
ce

Traitement :

Menu=faire le choix

Menu1= calcul sur les paramètres de la tour

Calcul de temps de séjour et les vitesses,

Variation de vlm en fonction de vi,

Variation de tc en fonction de tv,

Variation de tc en fonction de tinf,

Variation de tc en fonction de ti,

Variation de tm en fonction de Ce, Variation  
de vlm et tc en fonction de ros, variation  
de tc ,tm et vlm en fonction de r0,

Variation de tc et tm en fonction de  
c0; Si (y=1)

Si (x1==1) Alors fct0 (r0, ros,

vi, ti, tinf, c0, ce) Sinon

(x1==2)

fct1 (r0, ros, ti, c0, tinf) Sinon

(x1==3)

---

```
fct3 (r0, ros, ti, tinf,
c0) Sinon (x1==4)      fct4 (r0,
ros, ti, c0) Sinon (x1==5)
fct5 r0, ros, tinf, c0) Sinon
(x1==6)      fct6 (r0, c0) Sinon
(x1==7)

      fct9 (r0, vi, ti, tinf, c0)
Sinon (x1==8)

      fct10 (ros, vi, ti, tinf, c0, ce)
Sinon (x1==9)      fct11 (r0, ros, ti,
      tinf, ce)

      Fin si

      Sinon (y==2)

      menu2= les abaques, abaq, abaq1, abaq2, abaq3, abaq4,
      abaq5, abaq6, abaq7, abaq8, abaq9, abaq10, abaq11, abaq12,
      abaq13, abaq14

      Si
(x2==1)
Alors abaq
Sinon (x2==2)
      abaq1 Sinon
(x2==3) abaq2
Sinon (x2==4)
      abaq3 Sinon
(x2==5) abaq4

      Sinon (x2==6)
      abaq5
Sinon (x2==7) abaq6
Sinon (x2==8) abaq7
Sinon (x2==9) abaq8
Sinon (x2==10)
```

abaq9 Sinon

(x2==11) abaq10

Sinon (x2==12)

abaq11 Sinon

(x2==13) abaq12

Sinon (x2==14)

abaq13

Fin si

Fin si

## *Références*

- [1] : Eurotherm by Schneider Electric [en ligne], le procédé de séchage par atomisation, [consulter avril 2016]. Disponible sur < <http://www.eurotherm.tm.fr/>>
- [2] : technique d'ingénieur, opérations unitaires : évaporation et séchage, 2012. Disponible sur < <http://www.techniques-ingenieur.fr>>
- [3] : Gomez et Saleh, mise en forme des poudre, Séchage par atomisation, principe, 2012. Disponible sur < <http://www.techniques-ingenieur.fr>>
- [4] : Masters, K. Spray drying handbook. Longman Scientific & Technical; Wiley, Burnt Mill, Harlow, Essex, England; New York.1991.
- [5] : GEA Niro A/S, 2000. Spray drying. GEA Niro A/S Powder Technology Division, Copenhagen, Denmark.
- [6] : Alessandro Gianfrancesco, séchage par atomisation : propriété de collage des particules en relation avec l'agglomération, 2009.
- [7] : Gomez et Saleh, mise en œuvre des poudres. Séchage par atomisation. Procédé, 2012.  
Disponible sur < <http://www.techniques-ingenieur.fr>>
- [8] : APV. APV dryer handbook. APV Separations Product Group, APV Limited, United Kingdom.2000.
- [9] : Ashgriz, N. Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications. Springer, New York Dordrecht Heidelberg London.2010.
- [10] : Hall, C. W. Hedrick, T. I. 1971. Drying of milk and milk products, The AVI Publishing Company, Inc.
- [11] : Masters, K. 2002. Spray-Air Contact, Particle Formation and Drying, in: Spray Drying in Practice, Spray Dry Consult International ApS, Charlottenlund, Denmark, [12] : Mafart, P. 1991. Génie industriel alimentaire: les procédés physiques de conservation, Tome 1. Paris,
- [13] : Werner J. Bauer science et technologie des aliments : principe de chimie des constituants, 2010.