

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université de SAAD DAHLEB Blida
Faculté des technologies
Département de mécanique



Projet de fin d'étude en vue d'obtention un diplôme de :

Master en Génie Mécanique

Option : *systemes thermique et énergétiques appliqué*

THEME :

Modélisation et Simulation d'un Séchoir Rotatif Industriel

Présenté par :

CHABOUNI Bilal

Septembre 2013

Remerciements :

Je souhaite profiter d'abord de l'occasion pour remercier mes parents et mon grand père, qui ont toujours été présents dans les moments agréables comme dans les moments les plus ardues. Par leur amour, leur patience et leur dévouement, ils ont su m'encourager et m'appuyer dans toutes mes décisions. Ma plus profonde gratitude s'adresse également à mes frères et mes sœurs pour leur disponibilité, leur aide et leur encouragement.

C'est avec un très grand plaisir que je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur NAHAL, Docteur à la faculté de génie mécanique de l'USDB, pour avoir bien voulu m'assister et diriger le travail que j'avais entamé sous sa direction. Je le remercie encore pour l'attention constante qu'il a portée à ce sujet, ce qui m'a permis de bénéficier de ses connaissances, sa grande expérience et pour ces ses précieux conseils. Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à exprimer ma parfaite considération et reconnaissance à tous les profs et les travailleurs du département de mécanique.

Je tiens à exprimer ma sincère amitié à C.Ahmed, C.Sidali et Ryad pour leur aide précieuse leur disponibilité leur encouragement.

Je n'oublie jamais le soutien de mes collègues, et les beaux moments que j'ai passé avec eux au département de génie mécanique, je tiens à les remercier du profond cœur.

Dédicace :

A la mémoire de mon oncle "C.Ammar" et mon chère ami "B.Sid-ahmed"

SOMMAIRE :

	Page
INTRODUCTION	1
Chapitre I : généralité sur le processus de séchage	3
I.1) Introduction	3
I.2) Définition	4
I.3) Théories descriptives du phénomène de séchage	5
I.4) Intérêt de séchage	7
I.5) Types de séchage	7
I.5.1) Séchage naturel	7
I.5.1) Séchage artificiel	7
I.6) principes de séchage	8
I.6.1) Séchage mécanique	8
I.6.2) Séchage thermique	9
I.6.1.a) Séchage par ébullition	9
I.6.1.b) Séchage par entraînement	9
I.7) Modes de séchage	9
I.7.1) Séchage par conduction	10
I.7.2) Séchage par convection	10
I.7.3) Séchage par rayonnement	11
I.7.4) Séchage par atomisation	12
I.7.5) Séchage par lyophilisation	12
I.8) Différentes étapes de séchage d'un produit humide	12
I.8.1) Obtention des courbes de séchage et interprétation	12
I.9) Principes d'apport de chaleur	15
I.9.1) Apport de chaleur par conduction ou par diffusion	15
I.9.2) Apport de chaleur par convection	15
I.9.3) Apport de chaleur par rayonnement	16
I.10) principe de séchage par la chaleur	16

I.11) domaines d'application	18
Chapitre II : Les sécheurs industriels	20
II.1) Classification des séchoirs industriels	20
II.2) les différents types de séchoirs	20
II.2.1) Les séchoirs continus	21
II.2.2) Les séchoirs statiques	28
II.3) Les équipements annexes des sécheurs	32
II.4) Technique de séchage et type de produits	33
Chapitre III : Biomasse et séchage industriel	34
III.1) Introduction	34
III.2) Définition	34
III.3) Quelques voies de conversion de la biomasse forestière en énergie ou produits énergétiques	35
III.4) Les biocombustibles solides	36
III.5) Définition de granules de bois	36
III.6) Le procédé de granulation	37
III.7) Utilisation des granules de bois : les chaudières à granulés.....	40
III.8) Les biocombustibles solides : une solution à certains enjeux environnementaux?.....	41
Chapitre IV : Modélisation et simulation d'un sécheur rotatif	42
IV.1) Mode de détermination des paramètres de calcul	42
IV.2) calcul et dimensionnement d'un sécheur rotatif	43
IV.2.1) Détermination des paramètres au cours d'essai	45
IV.2.2) Bilan de masse et d'énergie	45
IV.2.3) Modélisation du sécheur	46
IV.2.3.1) Détermination du coefficient d'échange volumique	46
IV.2.3.2) Vitesse de rotation	47
IV.2.3.3) inclinaison du tube du sécheur et le temps de séjour et de séchage	48
IV.2.3.4) Pelletage	49

IV.2.3.5) Vitesse du solide	49
IV.2.3.6) La surface d'échange	49
IV.2.4) Simulation et interprétation	50
IV.3) Définition des paramètres	51
IV.3.1) Extrapolation des résultats de laboratoire	51
IV.3.1.1) Extrapolation des résultats aérauliques et thermique	51
IV.3.1.2) Extrapolation des paramètres mécaniques	53
IV.4) Simulation	55
CONCLUSION GENERALE	61

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

Nomenclature :

A: surface d'échange (m^2)

B : constante dépendant de la granulométrie (m^{-1})

C_p : chaleur spécifique ($J/kg^{\circ}C$).

d : diamètre de la virole (m).

D : diamètre du sécheur (m).

D_i : diamètre interne du sécheur (m).

d_p : diamètre moyen des particules (μm)

F : débit spécifique du produit ($kg/m^2 \cdot s$)

G : débit spécifique d'air ($kg/m^2 \cdot s$)

h_p : hauteur des pelles (m).

K : Le coefficient de proportionnalité de la formule de Friedman et Marshall

$k_1(1/s)$, $k_2(1/s.K)$ et $k_3(1/s.K)$: constantes dépendant du produit à sécher

L : longueur totale du sécheur (m)

\dot{m} : débit massique (kg/s)

N : vitesse de rotation (tr/min)

n_p : nombre de pelles

p : pente du tube sécheur

Q : le flux thermique (W)

R : Taux de séchage ($1/s$)

T : température ($^{\circ}C$)

t : temps de séjour (s)

t_s : temps de séchage (s)

U : coefficient d'échange volumique ($w/m^3 \cdot ^{\circ}C$)

U_p : vitesse périphérique de la virole ($m \cdot min^{-1}$)

V : volume (m^3)

V_s : vitesse du solide à travers le sécheur (m/s)

W : taux d'humidité (kg/kg)

ΔT_m (K) : écart moyen de température

α : le coefficient d'échange par convection ($W/m^2.K$)

λ : conductivité thermique de la pellicule de produit ($W/m.K$)

λ_e : Chaleur latente de vaporisation (J/kg)

ρ : masse volumique apparente (kg/m^3)

φ : Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

ε : émissivité

Indice:

a: air 1 : initial s : solide

e: eau 2 : final T : tube de sécheur

p: produit v : vapeur

INTRODUCTION GENERALE :

Le séchage est un procédé complexe qui est souvent considéré comme un mélange harmonieux d'art et de science. La connaissance du transfert de chaleur et de matière simultanément qui se produit lors du séchage est un défi constant pour les ingénieurs et les scientifiques. Les séchoirs rotatifs sont principalement utilisés pour le séchage de la biomasse, de produits chimiques et de produits alimentaires où ils sont utilisés lorsqu'un séchage en continu à grande échelle est nécessaire.

La quantité totale de chaleur et de matière transférée au moment du passage du solide à l'intérieur du séchoir dépend de la surface et du temps de contact entre le gaz chaud et le solide humide. La connaissance de la distribution du temps de séjour est donc primordiale pour résoudre les équations différentielles de transfert de chaleur et de matière nécessaires pour décrire les profils de température et d'humidité le long du séchoir pour les deux phases (solide et gaz). De nombreux chercheurs ont travaillé sur la détermination du temps de séjour du solide dans les séchoirs rotatifs puisque ces appareils. Différents modèles, de la simple corrélation empirique à des modèles très complexes, ont été proposés durant les cinquante dernières années. Ces modèles utilisent généralement la géométrie du séchoir, les conditions d'opération et les caractéristiques du solide sec pour estimer le temps de séjour à l'intérieur des séchoirs. Les modèles rapportés dans la littérature ont été dérivés à partir d'expériences faites sur des séchoirs rotatifs de grandeur pilote pour des solides secs ou humides, mais ayant un comportement similaire à un solide sec.

L'opération de séchage qui consiste à éliminer l'eau libre d'un produit est très coûteuse du point de vue énergétique. En effet, dans l'industrie, il faut dans le meilleur des cas, 2,5 MJ pour évaporer un kilogramme d'eau (chaleur latente d'évaporation) [2]. En réalité, selon le séchoir, le type de produit, la phase de séchage, on peut aller jusqu'à trois (03) fois le chiffre précédent. Mais sécher est aussi coûteux économiquement compte tenu du prix de l'énergie.

Un classement par secteur d'activité des différents matériaux que l'on est amené à sécher permet d'obtenir une répartition de la consommation énergétique. Le secteur de l'agroalimentaire (y compris l'agriculture) représente environ 40 % de l'énergie consommée en séchage. Les papiers-cartons occupent, avec 30 %, la deuxième place. Les matériaux de construction sont en troisième position avec 13,5 %, viennent ensuite les industries du bois (8 %) et la chimie (7 %). L'on remarque que le secteur de l'agroalimentaire se taille la plus grande part du point de vue consommation énergétique dont la moitié de cette énergie est utilisée pour le séchage des produits agricoles (Mais, tournesol, pulpes de betteraves, raisin, prune, abricot, etc.).

La modélisation d'une opération de séchage par entraînement d'un produit donné se fait sur la base de conditions de température et d'humidité relative de l'air constantes. Ceci permet d'optimiser le temps de séchage et de surveiller le processus de déshydratation de manière à ne pas altérer la qualité du produit séché. Cela permet aussi de dimensionner au mieux les séchoirs afin de maîtriser le rapport : échange de chaleur - échange de masse, comme c'est le cas dans l'industrie.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux aspects énergétiques et massiques d'un système de séchage rotatif. Nous étudierons les possibilités d'estimation de l'évolution de l'humidité relative, des températures à l'intérieur du séchoir et de la perte de masse d'un produit au cours du séchage. Nous présentons notre travail comme suit :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les principales notions et définitions fondamentales des différents modes de transfert de chaleur à travers une étude bibliographique, en rappelant aussi des théories descriptive du séchage. Cela nous permet de connaître les différents domaines intervenant dans la mise en évidence du processus de séchage d'un corps humide.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les différents dispositifs de séchage industriel et ses caractéristiques. Nous exposons ensuite les différents équipements annexes utilisés dans les sècheurs. En fin, nous donnons un tableau qui décrit les techniques de séchage et les types de produits pour chaque technique.

Le troisième chapitre s'intéresse aux biocombustibles solides, notamment les granules de bois et leur production qui passe par une étape très intéressante qui est le séchage. Ce chapitre s'intéresse particulièrement à la production et utilisation du culture énergétique agricole.

L'objet du quatrième chapitre est de faire un bilan énergétique et massique au niveau d'un séchoir rotatif par la méthode des bilans globaux. Dans cette partie on établira une modélisation mathématique qui consistera à traduire les phénomènes de transfert de chaleur et de masse par une série d'équations mettant en évidence l'état énergétique des différents constituants du séchoir. La conception de ce modèle a été faite sur la base de connaissance d'un simulateur de laboratoire publié par Technique de l'ingénieur [11]. Puis. On va faire une simulation du phénomène de séchage dans le sécheur à l'aide de logiciel Matlab. La méthode de résolution numérique utilisée pour résoudre le système d'équations c'est la méthode de Runge-Kutta du 4^{ème} ordre.

Chapitre I :

Généralités sur le
processus de séchage

I.1) Introduction :

Le séchage est une opération qui a une grande importance dans les processus industriels de fabrication liés à des domaines tels que l'agroalimentaire, les mines ou l'industrie pharmaceutique. La connaissance du transfert de chaleur et de matière simultanée qui se produit lors du séchage est un défi constant pour les scientifiques. La quantité totale de chaleur et de matière transférée au moment du passage du solide à l'intérieur du séchoir dépend de la surface et du temps de contact.

Quoique le séchage soit une ancienne opération, la recherche-développement dans ce domaine a commencé pleinement, il y a quelques décennies. Les premiers travaux menés afin d'expliquer mécaniquement le séchage des solides sont ceux des ingénieurs du génie chimique.

C'est une opération unitaire importante et les plus omniprésentes dans les secteurs industriels majeurs. Incontestablement, il est difficile de trouver un produit utilisé quotidiennement qui n'a pas subi le séchage à un stade de sa fabrication. Le séchage qui est une opération unitaire à énergie-intense a un impact environnemental négatif dû au fait que la grande partie de l'énergie est obtenue à partir des combustibles fossiles. 12 à 25 pour cent de la consommation énergétique industrielle est attribué à la déshydratation dans les nations industrielles. Comme les économies globales prospèrent, la demande en énergie pour le séchage va augmenter. Ainsi, il faut bien comprendre cette opération et s'assurer qu'elle est conduite avec efficacité en tenant compte des contraintes du marché. Il est aussi important de se tenir au courant des technologies de séchage courantes aussi bien que celles émergentes.

Le séchage est une opération qui nécessite beaucoup d'énergie dans les opérations industrielles et comme tous les sécheurs fonctionnent avec une grande consommation d'énergie, le développement d'un modèle et d'un système de contrôle offre l'opportunité à améliorer l'opération du séchage.

I.2) Définition :

Nous appelons séchage, l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau.

Le corps humide en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide (sauf dans le cas particulier de la déshydratation d'un liquide non volatil : séchage des huiles), ce qui distingue le séchage de la concentration d'un liquide par évaporation, cas dans lequel le produit final est un concentré liquide.

La matière solide peut être de type [1]:

- Solide non hygroscopique poreux capillaire comme le sable, les solides écrasés, le Crystal non hygroscopique, le polymère et les céramiques.
- Solide poreux hygroscopique comme l'argile, le bois et les textiles.
- Solides non poreux comme le savon, la colle, plastique, produits alimentaires.

Pendant le séchage deux opérations fondamentales se produisent :

- 1- La chaleur est transférée au solide de la part de l'environnement chaud, qui est en général l'air chaud.
- 2- L'humidité est transférée comme un liquide ou une vapeur à la surface du solide.

Le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau qu'il contient (ou un autre solvant). On distingue le séchage par ébullition et par entraînement. On parle de séchage par ébullition quand le produit atteint la température d'ébullition de l'eau. Lors du séchage par entraînement le produit à sécher est mis en contact avec un courant d'air plus ou moins chaud. L'air chaud transmet une part de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers "l'agent séchant".

Au cours du séchage, l'eau contenue dans le matériau disparaît peu à peu dans l'air ambiant sous l'action de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et sa diffusion à l'intérieur du matériau.

Ces phénomènes sont sous la dépendance des caractéristiques du gaz (air ou vapeur surchauffée) environnant à savoir :

- * Sa température.
- * Son humidité relative s'il s'agit de l'air.

- * Sa vitesse.
- * Sa pression.

L'évaporation de l'eau est un phénomène qui nécessite de la chaleur et qui est d'autant plus intense que la température du matériau est élevée.

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année) [2].

I.3) Théories descriptives du phénomène de séchage

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit:

- **Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) [3], [4]**

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [5]. Autrement dit, du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits.

La diffusivité dépend de plusieurs facteurs, comme la nature du solide, et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

- **Théorie capillaire (1937) [3], [4]**

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits

granulaires. Ceaglske et Hougen démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendantes de la concentration [6].

- **Théorie Whitaker (1977) [7]**

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et de masse, pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquide et gaz) et les lois de la thermodynamique. Ensuite il applique pour chacune de phases la prise de moyenne avec certaines simplifications, en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores; ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Il aboutit à un système d'équations permettant de calculer les différents paramètres décrivant le séchage. Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

- **Théorie de Luikov (1934) [6]**

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité. Il propose que le gradient de température soit l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité. Il s'est basé sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique, et le processus de l'irréversibilité pour vérifier que le transfert de la vapeur et du liquide est divisé en deux parties: Un gradient de concentration et un gradient de température.

- **Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938) [6]**

Krischer, suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires, et dans l'état vapeur au gradient de concentration de la vapeur.

Berger et Pei proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration, et la diffusion de vapeur est due au gradient de pression de la vapeur.

- **Théorie de Philip et De Vries (1957) [4]**

Philip et De Vries, proposent que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux.

I.4) Intérêt du séchage :

Le séchage a pour intérêt :

- * D'alléger le produit.
- * De permettre (ou de faciliter) sa conservation par diminution de 'l'activité de l'eau'.

Mais en revanche :

* Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.

* Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

I.5) Types de séchage :

I.5.1) Séchage naturel :

Le séchage naturel effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Il est encore utilisé pour des matériaux dont le séchage est aisé comme les briques, mais présente des insuffisances et des inconvénients :

- * L'exposition des produits à des conditions climatiques défavorables et irrégulières.
- * Une longue durée de séchage.
- * L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis.
- * L'attaque par les champignons et les insectes (cas du bois).

Toutes ces raisons ont conduit les professionnels à s'orienter vers le séchage artificiel.

I.4) Séchage artificiel

Le séchage artificiel permet, dans une certaine mesure de pallier les inconvénients du séchage naturel : il permet de réduire considérablement la durée du séchage et d'atteindre l'humidité souhaitée des matériaux.

Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- * Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- * Le séchage à la vapeur surchauffée.
- * Le séchage par pompe à chaleur.
- * Le séchage par chambre chaude.
- * Le séchage sous vide.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage du bois.

I.6) Principes de séchage :

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement.

Deux modes de séchage peuvent être distingués :

I.6.1) Séchage mécanique :

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). L'eau sort du produit sous forme liquide (le rendement énergétique est excellent). La gravité peut suffire pour une partie de l'eau (linge qui s'égoutte). Une action plus musclée est souvent nécessaire: augmentation des forces volumiques (essorage) ou déformation du produit par compression.

Le tableau suivant nous donne quelques exemples :

Opération	Technique	Mécanisme	application
concentration	centrifugation	Sédimentation forcée	Jus de tomate
	Filtration	Tamissage	Boues résiduaire
Séchage	Ultrafiltration	Tamissage moléculaire	Lactosérum
	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamissage	Cristaux de sucre
	pressage	pression	Fourrage

Tableau (1.1) : quelques exemples de séchage mécanique

I.6.2) Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.

- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

Le séchage thermique se divise lui même en deux types :

a) Séchage par ébullition :

Le produit est porté à la température telle que la pression de vapeur d'eau du produit devient égale à la pression totale ambiante régnant dans le séchoir. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100°C pour l'eau à 1 bar). [3], [2]

b) Séchage par entraînement :

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

- * Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- * Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Le séchage par entraînement est plus important par rapport au séchage par ébullition. Généralement l'intérêt se limite à ce premier mode de séchage. [2], [3]

I.7) Modes de séchage :

La technique de séchage dépend souvent de la forme ou de l'état physique du produit à sécher. Cependant, plusieurs remarques doivent aider l'industriel quant au choix de cette dernière.

Cette opération nécessite un apport thermique important pour amener l'eau à se retirer du produit et pour assurer le transfert de masse. Généralement, le solvant évaporé est de l'eau.

Aussi, la demande énergétique de ce procédé est à minima de 1 kg de vapeur par kg d'eau évaporée. Ce changement de phase liquide-gaz, complétée par la faible efficacité de ce type de procédé, rend l'opération très coûteuse en énergie (jusqu'à plus de 1 000 kWh par tonne d'eau évaporée).

L'apport de chaleur sous pression atmosphérique peut se faire de différentes manières :

I.7.1) Séchage par conduction :

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher: le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition. [8]

Le flux thermique dans ce mode de transfert est donnée par : [3]

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad (1.1)$$

Avec :

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m. K)

$\frac{dT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit

I.7.2) Séchage par convection :

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie. Il consiste à mettre en contact, un courant de gaz chaud (généralement de l'air) qui fournit la chaleur nécessaire à la vaporisation, s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques.

La convection est un mode de transfert rapide. D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide et le produit, est augmentée. Toutefois la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter), limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage. [3]

Le thermique est donnée par l'équation suivante : [3]

$$Q = \alpha . A . (Ta - Ts) \quad (1.2)$$

Avec :

Q : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W).

A: La surface d'échange (m²)

(Ta-Ts): l'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K)

α : Le coefficient d'échange par convection (W/m². K)

I.7.3) Séchage par rayonnement : [8]

Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des

dispositifs électroniques (micro-ondes), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

En infrarouge le chauffage se manifeste sur des épaisseurs très faibles (500µm). Avec des micro-ondes on peut sécher à des épaisseurs plus importantes. Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau (l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires). Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau.

Le séchage par micro-ondes est encore peu fréquent dans l'industrie: il présente les avantages d'être propre et facile à réguler. De même son action s'effectue sur le volume du corps ce qui diminue les risques de croûtage en surface.

La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par : [10]

$$Q = A_1 \cdot C \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \cdot \varphi \quad (1.3)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (1.4)$$

Avec :

T_1 : Température de la source émettrice (K).

T_2 : Température du produit (K).

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement (m²).

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge (m²).

φ : Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

ε_1 : Emissivité du produit.

ε_2 : Emissivité de l'émetteur.

I.7.4) Séchage par atomisation : [8]

Ce procédé est applicable directement à des solutions, des émulsions ou des suspensions fines. Il permet notamment de regrouper en une seule opération la suite d'opérations de cristallisation, de filtration et d'essorage.

I.7.5) Séchage par lyophilisation : [8]

Certains produits alimentaires ou pharmaceutiques d'origine animale ou végétale doivent être déshydratés pour le stockage et le transport. Le séchage par un procédé classique

entraîne la migration des composés solubles de l'intérieur des cellules vers la périphérie des produits en même temps que l'évaporation de l'eau. Cette concentration des composés solubles à la périphérie provoque une redissolution sélective à la réhydratation et donc une dégradation de la qualité des produits. De plus les composés naturels ne supportent parfois aucun apport de chaleur sous peine d'être détruits (vitamines). La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace sans passer par la phase liquide.

I.8) Différentes étapes du séchage d'un produit humide : [8]

Dans les paragraphes qui suivent, il ne sera fait mention que de l'eau, qui est un des liquides le plus couramment évaporés. Les mécanismes qui vont être décrits s'appliquent cependant aux autres solvants (séchage des peintures, par exemple).

I.8.1) Obtention des courbes de séchage et interprétation

La courbe de séchage par entraînement d'un produit granulaire peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température sont contrôlés et maintenus constants. Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu.

En portant le taux d'humidité du produit n_s (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps t , on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure (1.1)

On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation. En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $n_s = f(t)$ donc la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du temps, on peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure est donnée sur la figure (1.2).

Krischer a proposé un autre mode de représentation : la vitesse de séchage $\frac{dn_s}{dt}$ en fonction du taux d'humidité n_s conduit à la courbe représentée sur la figure (1.3).

Ces 3 types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

« C » est le point critique du séchage.

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure 1.4).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

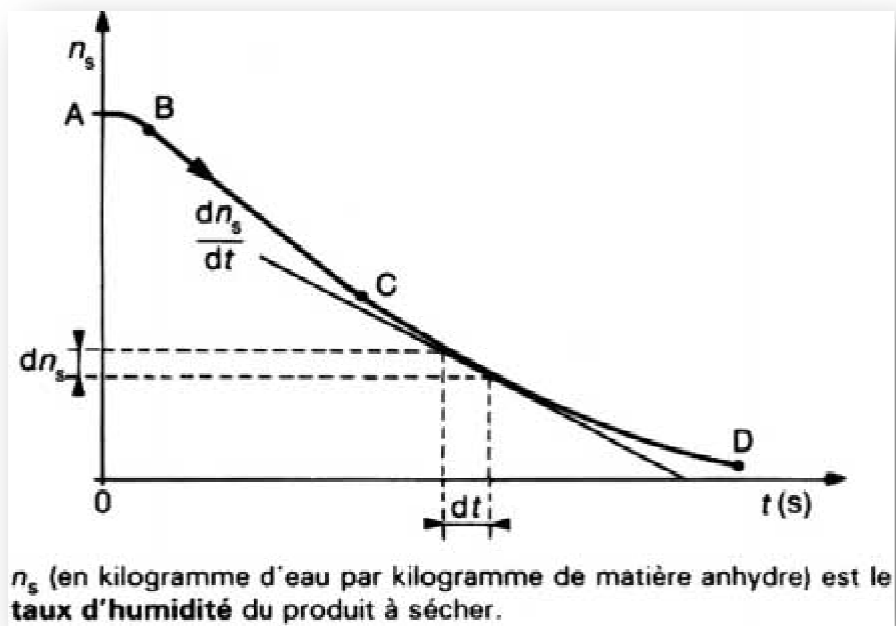


Figure (1.1) : Courbe de séchage $n_s = f(t)$

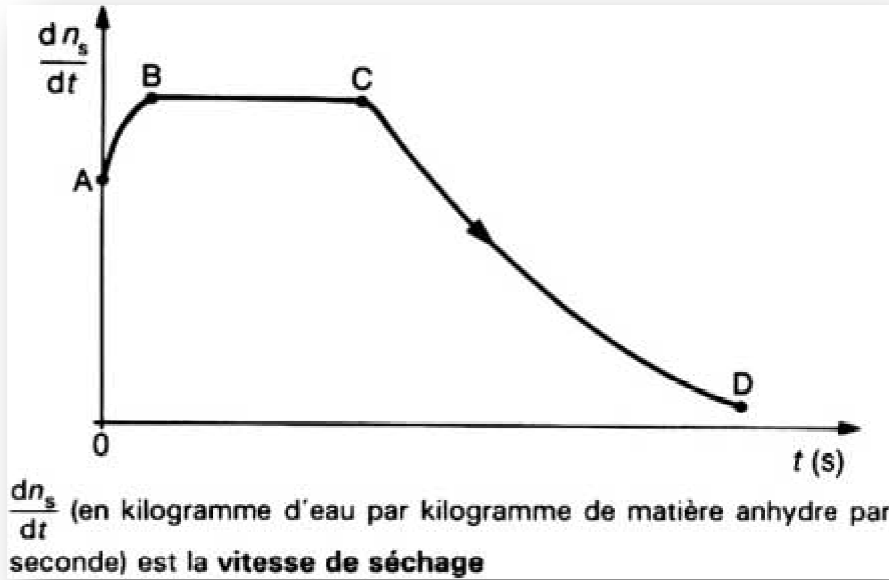


Figure (1.2) : Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = g(t)$

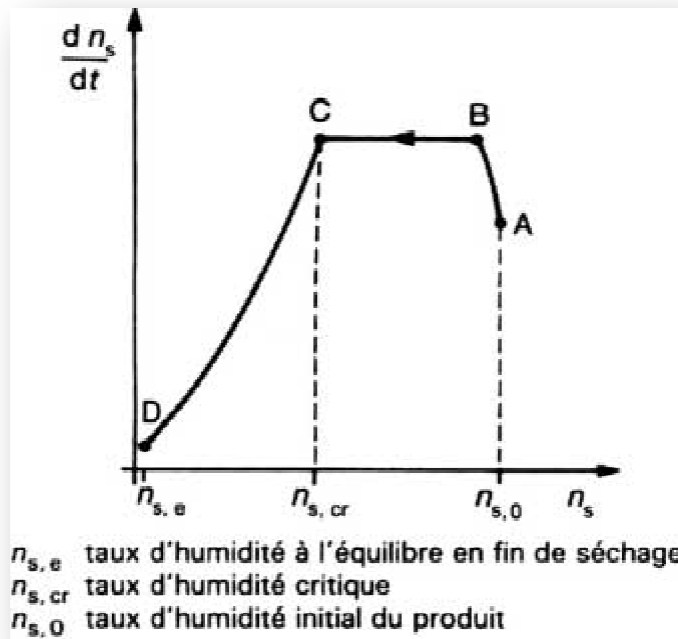


Figure (1.3) : Courbe de séchage

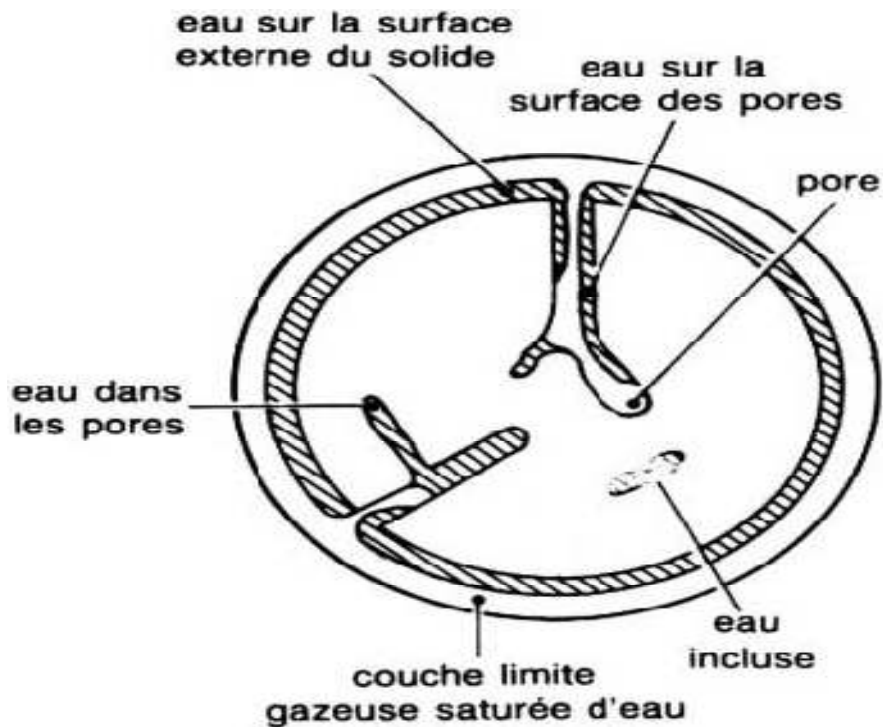


Figure (1.4): Représentation schématique d'un solide humide

I.9) Principes d'apport de chaleur :

I.9.1) Apport de chaleur par conduction ou par diffusion :

Transfert de chaleur par contact avec la surface chauffée ou la chaleur se déplace par propagation. Le mode de transfert est en générale lent

I.9.2) Apport de chaleur par convection :

Transfert de chaleur par contact avec un fluide caloporteur en mouvement ; air chaud ou vapeur surchauffée en générale (température supérieure à la température de saturation). Le mouvement du fluide peut être naturel (convection naturelle due à un gradient de température) ou, renforcé par un travail mécanique (ventilation du fluide caloporteur), donc une convection forcée qui va accélérer le transfert de chaleur.

Le fluide sécheur utilisé habituellement est l'air chaud. Cependant, le séchage à la *vapeur d'eau surchauffée* permet d'obtenir des gains importants d'énergie. Au contact du produit à sécher, cette vapeur qui n'est pas saturée en eau se désurchauffe en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit. Ce procédé ne convient pas aux produits sensibles à une très grande chaleur, mais se révèle avantageux pour ceux qui sont gorgés d'eau ou sensibles à l'oxydation. [9]

I.9.3) Apport de chaleur par rayonnement :

Les techniques énergies radiantes (UV, IR, HF, MO) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie. D'utilisation souple et précise, elles peuvent également être combinées à d'autres modes de transfert d'énergie (air chaud, conduction) ou sous certaines conditions de température ou de pression (séchage sous vide). [9]

I.10) Principe du séchage par la chaleur :

PRINCIPES	Types de produits	Equipement	Fonctionnement
<i>Séchage par entrainement à l'air chaud</i>	Entrainement de l'eau par un flux d'air chaud		
	Solide, liquide et état intermédiaire (ex : produits pâteux, pulpes, gels)	Séchoir à claies de type ATTESTA	Claies fixes et convection naturelle de l'air chaud, sans recirculation d'air
		Séchoir à claies, boucle ouverte	Claies déplacées à contre-courant du flux d'air. Sans recirculation d'air
		Séchoir à claies de types CARTIER	Claies fixes ou déplacée à contre-courant du flux d'air. Recirculation d'air.
		Séchoir solaire indirect (capteur)	L'air est chauffé par rayonnements solaires par un capteur avant d'être envoyé sur le produit
...passant au travers d'une couche de produit étalée sur des claies	Solide de taille moyenne	Séchoirs à flux d'air traversant	Claies grillagées superposées traversées par un flux d'air chaud ascendant Bandes transportant le produit traversées par un flux d'air chaud ascendant Le produit est traversé par un flux d'air ascendant dans un silo
...Passant au	Solide divisé ou	Séchoir tambour	Le produit tourne

	travers du produit divisé tombant en pluie	de petite taille		dans un tambour à axe horizontale dans lequel circule de l'air chaud. En tournant le produit retombe par gravité, perpendiculairement au flux de l'air
	...Passant au travers du produit fluidisé	Solide divisé ou de petite taille	Séchoir à lit fluidisé	Le produit est mis en mouvement par un flux d'air chaud vertical ascendant
	...Passant au travers du produit...	Solide très finement divisés	Séchoir flash	Introduction du produit très finement divisé dans un flux d'air chaud vertical ascendant
	...Passant au travers du liquide pulvérisé	Suspensions liquide	Atomiseur	Introduction du produit pulvérisé dans un flux d'air chaud co-courant ou contre-courant
	<i>Séchage par conduction</i>	Evaporation par transfert d'énergie calorifique par conduction de la surface chauffée vers le produit	Liquide relativement pâteux (ex : purée) visqueux, ou solide divisé	Séchoir à cylindres chauffés de l'intérieur par la vapeur
Séchoir à cylindre chauffé de l'extérieur				Le produit brassé à l'intérieur du cylindre tournant, sèche par contact avec la paroi interne du cylindre
<i>Séchage par rayonnement</i>				Four micro-onde
	Séchoir solaire direct	Exposition du produit aux rayons solaires		

<i>Séchage par sublimation ou lyophilisation</i>	Evaporation de l'eau par sublimation : changement de l'état de glace à l'état vapeur causée par la différence de pression de vapeur à la surface de la pression	Solide de taille moyenne ou suspension congelés	Lyophilisation	Le produit est congelé par petites quantités dans une enceinte. Par effet de dépression par une pompe à vide, la vapeur se forme par sublimation, elle est ensuite entraînée dans une enceinte communicante pour être condensée
--	---	---	----------------	---

I.11) Domaines d'application :

Si le séchage consomme autant d'énergie c'est qu'il intervient dans de nombreuses industries. Les produits concernés nous touchent souvent de près dans la vie de tous les jours.

Le choix d'une opération de séchage peut être effectué pour diverses raisons :

- le produit humide se conserve mal.
- le liquide doit être enlevé pour le déroulement de la suite du procédé.
- donner la texture et structure finale du produit.
- le coût du transport est plus élevé en présence de liquide.

a) Industrie agroalimentaire :

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. Il existe en moins 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. On peut citer par exemple :

- Les pâtes alimentaires
- Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée
- Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation
- Les légumes (pois,...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots...)
- Certains biscuits sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation
- Le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné.
- La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices...

b) Industrie papetière

Le papier est obtenu pas séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés

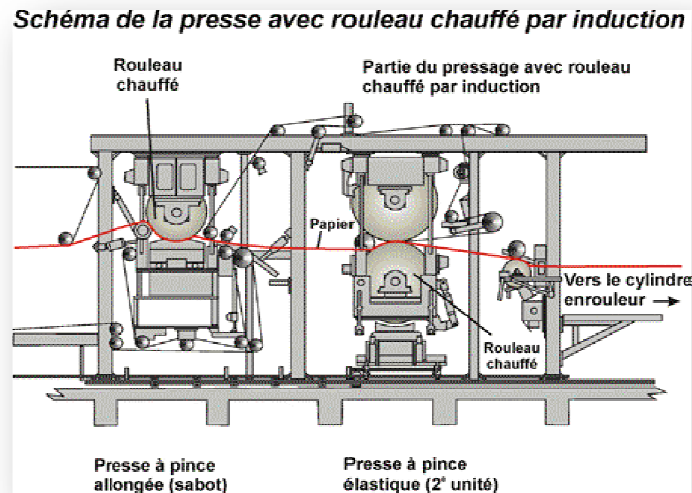


Figure (1.5) : Sécheur de pâte à papier

Source : Centre de la Technologie de l'Energie du CANMET, Canada

c) Industrie du bois

Le bois a un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme.

d) Matériaux de construction

Exemples : briques, carrelages,...

e) L'industrie céramique

Comme les assiettes, bols, plats...

f) La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique

- ✓ levure en poudre
- ✓ antibiotiques
- ✓ séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage.

g) Fonderie

Séchage des noyaux qui assurent l'élaboration des formes intérieures des pièces obtenues par moulage.

Chapitre II :

Les sécheurs industriels

II.1) Classifications des séchoirs industriels :

Les séchoirs industriels sont classés selon :

a) Propriété physique de la matière

Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir

b) Méthode d'approvisionnement en énergie

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

c) La gamme de température

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures, sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

d) mode de répartition des produits à sécher

- *Séchage en couche mince:*

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

- *Séchage en couche épaisse:*

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café...etc, l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée.

II.2) Les différents types de séchoirs: [9]

Il y a plusieurs types de séchoirs développés pour servir les divers buts de sécher des produits selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils séchent les produits, en séchoirs continus et séchoirs statiques.

- Un séchoir est dit continu : si la production se fait en continue.

- Un séchoir est dit statique : si la production se fait en batch ou en discontinue.

II.2.1) Les séchoirs continus :

a) Atomisation :

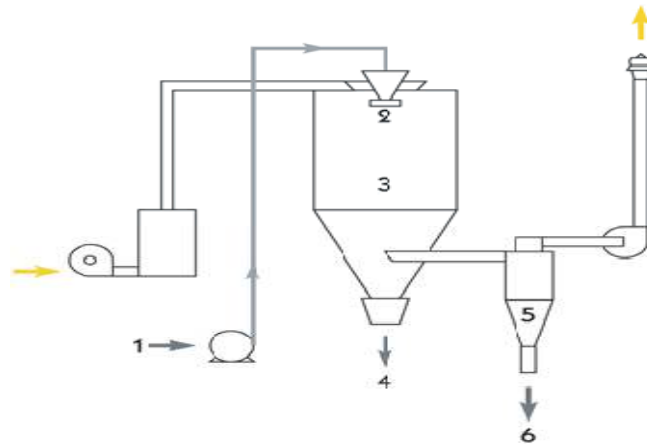


Figure (2.1) : Tour d'atomisation

- 1 : Entrée du produit humide
- 2 : Pulvérisation des particules
- 3 : Chambre de séchage
- 4 : Sortie du produit sec
- 5 : Cyclone de dépoussiérage
- 6 : Fines

🌍 Type de produits :

Produits liquide (doit être pompable) à son état initial et pulvérulent (poudres de qualité uniforme) à l'état final.

🌍 Exemples d'application :

Teneur en eau	Lait	Café	Levure	Poudres détergentes
Etat initiale	52 %	75-85 %	75 %	35 %
Etat final	3 %	3-5 %	8 %	4-10 %

🌍 Fonctionnement:

Le séchage comprend 3 étapes :

❖ 1^{ère} étape : Pulvérisation du produit

L'atomisation consiste à pulvériser la suspension à sécher en fines gouttelettes, souvent en partie haute de l'enceinte.

❖ 2^{ème} étape : Mélange air-spray et évaporation de l'eau

Les gouttes formées tombent par gravitation dans un courant d'air chaud et sèchent jusqu'à obtention d'un grain de poudre sec. Le contact de l'air avec le produit peut se faire selon un écoulement co-courant, contre-courant ou mixte.

❖ 3^{ème} étape : Séparation du produit sec de l'air rejeté

La récupération des poudres est effectuée par des cyclones, suivis ou non de filtres à manches et de laveurs de gaz.

b) Cylindre chauffant :

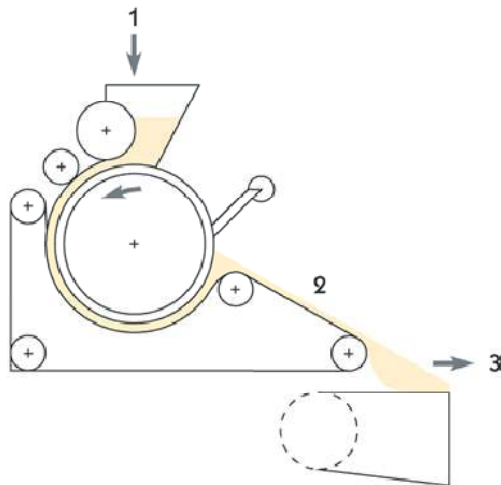


Figure (2.2) : Cylindre chauffant

1 : Entrée du produit humide

2 : Produit demi-sec

3 : Sortie du produit sec

🌍 Type de produits :

Produits liquide, pâteux ou en bande a son état initiale et pulvérulent (flocons) ou en bande à l'état finale.

🌍 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Latex de PVC	Papier - carton	Textile	Flocon de pomme d terre	Farine infantile instantanée
Initiale	Produit liquide	60 %	Produit en bande	80 %	50-64 %
Finale	Produit liquide	5 %	Produit en bande	5 %	Produit pâteux

🌍 **Fonctionnement:**

Le procédé consiste à étaler le produit humide à sécher en film mince sur la paroi externe d'un cylindre métallique, chauffé intérieurement (essentiellement par de la vapeur et par Infrarouge). C'est la face externe du cylindre qui transmet la chaleur par conduction dans la couche de produit humide en contact avec le cylindre.

Le cylindre tourne pendant que le film sèche. L'axe de rotation est horizontal et la longueur du cylindre est plus réduite que pour un tambour rotatif. Le produit sec est raclé par un couteau et emmené vers le conditionnement.

c) **Tambour rotatif :**

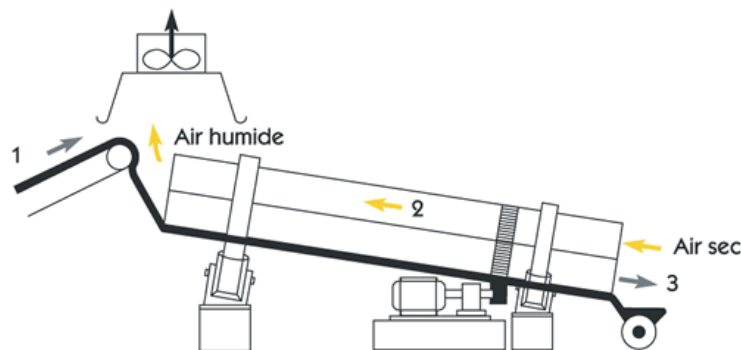


Figure (2.3) : Tambour rotatif

1 : Entrée du produit humide

2: Léchage air chaud

3 : Sortie du produit sec

🌍 **Type de produits :**

Produits fibreux, pulvérulents, granulaire, pâteux extrudable, émiettable, ou granulaire.

🌍 **Exemples d'applications :**

Teneur en eau	Sable	Pulpe de betterave	Talc	Pâtes alimentaires	Luzerne
Initiale	6-7 %	76-78 %	65 %	26,5 %	75 %
Finale	0 %	10-12 %	0,5-1,5 %	12,5 %	10-15 %

🌍 **Fonctionnement:**

Ces séchoirs sont constitués d'un tambour (cylindre), généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Le produit

humide est introduit en partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède. Le produit avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres. On distingue

➤ Séchoir tambour convectif (à léchage et brassage) :

Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est garnie d'aubes permettant de remonter le produit et de le laisser tomber en pluie au cours de la rotation. Ce système accroît considérablement la surface d'échange entre le produit et l'air et donc contribue à diminuer le temps de séchage.

➤ Séchoir tambour conducteur :

La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par des gaz de combustion. La face interne du cylindre assure par conduction la transmission de la chaleur au produit humide. Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

d) Sécheur tunnel :

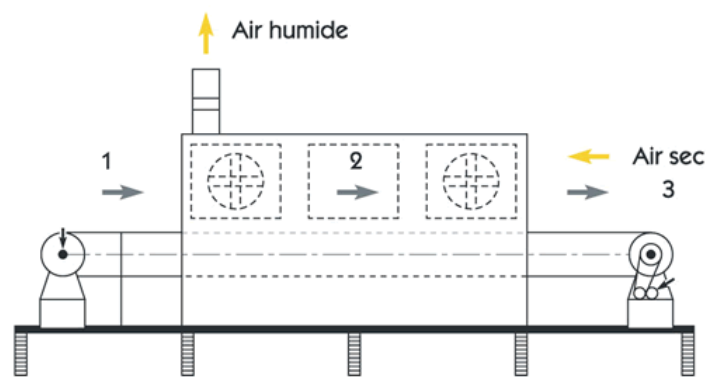


Figure (2.4) : Sécheur tunnel

1 : Entrée du produit humide

2 : Produit en défilement

3 : Sortie du produit sec

🌐 Type de produits :

Produit pâteux, pulvérulent, granulaire, fibreux. Produit plan, en forme, en morceaux

🌐 Exemples d'applications

Teneur en eau	Gélatine	Laine en bourre	Fruits et légumes	Briques et Tuiles
Initiale	6-7 %	76-78 %	65 %	26,5 %
Finale	0 %	10-12 %	0,5-1,5 %	12,5 %

🌐 **Fonctionnement:**

Un sécheur tunnel est constitué d'une enceinte fixe dans laquelle le produit à traiter se déplace longitudinalement d'une extrémité à l'autre de l'enceinte.

✓ **Transport du produit**

Le produit initial est déposé, à l'entrée du tunnel, au moyen d'un dispositif adéquat, qui peut être une bande oscillante, une vis d'étalement, un distributeur vibrant ou une boudineuse. La matière est transportée sur un tapis unique (en tôles pleines ou perforées, en grillage, en toile tissée).

✓ **Séchage du produit**

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud).

e) *Sécheur à bande :*

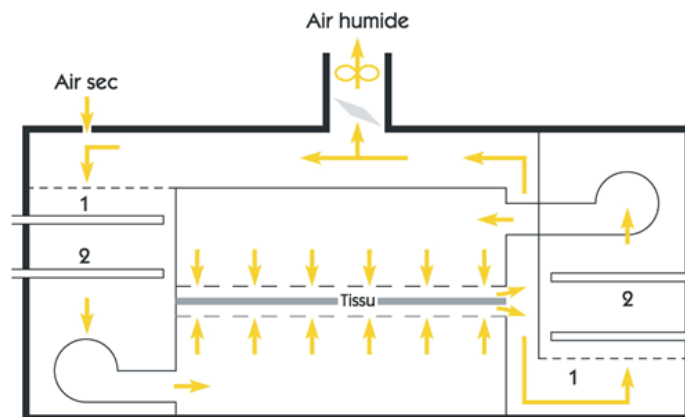


Figure (2.5) : Séchage sur rame

🌐 **Type de produits :**

Produit en bande

🌐 **Exemples d'applications :**

Teneur en eau	Laine	Couches sur papier	Pate à papier
Initiale	40 %	10 à 40 %	80 à 90 %
Finale	15 %	5 %	5 %

🌐 Fonctionnement:

Le produit défile sur une rame en étant maintenu par des picots, qui permettent d'agir sur la longueur et la largeur du produit final, c'est-à-dire sur la stabilisation dimensionnelle du produit.

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). L'utilisation des énergies radiantes est aussi possible.

✓ Séchage par aéroportance :

L'air de séchage est soufflé par des buses ou par des fentes, soit sur une seule face du produit, soit sur les deux. Les caissons de soufflage de l'air sont répartis de manière à obtenir une homogénéité de soufflage à la surface du produit.

Ce procédé est utilisé pour le séchage des textiles, qui ne peuvent pas être mis en tension (tricots, grille de verre, toiles très épaisses), pour le séchage d'enductions (textile et papier) et lors d'opérations intermédiaires de séchage.

Le séchage aéroporté se distingue de la rame en particulier par le temps de séjour du produit, sa vitesse de défilement et la capacité de traitement horaire du sécheur.

f) Sécheur silo :

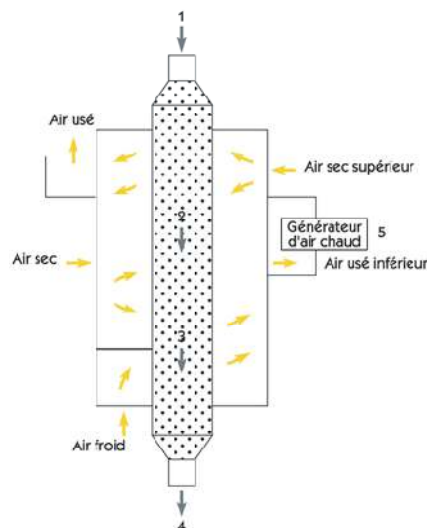


Figure (2.6) : Séchoir silo

1 : Entrée du produit humide.

2 : Zone de séchage.

3 : Zone de refroidissement.

4 : Sortie du produit sec.

5 : Recyclage de l'air usé.

🌐 Type de produits :

Produits granulaires

🌐 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Blé tendre	Maïs	Orge
Initiale	40 %	10 à 40 %	80 à 90 %
Finale	15 %	5 %	5 %

🌐 Fonctionnement:

✓ 1^{ère} étape : Alimentation du produit

Le produit humide est introduit en haut du sécheur et descend par gravité. Des trappes qui s'ouvrent et se ferment à intervalles réguliers permettent de réguler le débit de grains.

✓ 2^{ème} étape : Séchage proprement dit

La zone de séchage est munie de gaines qui irriguent la couche de grain en air chaud. Ces gaines permettent l'apport d'énergie nécessaire au séchage du grain et l'évacuation de l'air usé.

✓ 3^{ème} étape : Refroidissement et extraction du grain

De l'air froid est introduit dans les gaines, en partie inférieure du sécheur, pour amener la température du grain à température ambiante.

✓ 4^{ème} étape : Recyclage thermique de l'air usé

Cet air provenant de la partie inférieure du sécheur est recyclé, soit en partie supérieure du sécheur, soit en amont de l'installation, au niveau du générateur d'air chaud.

g) Sécheur flash :

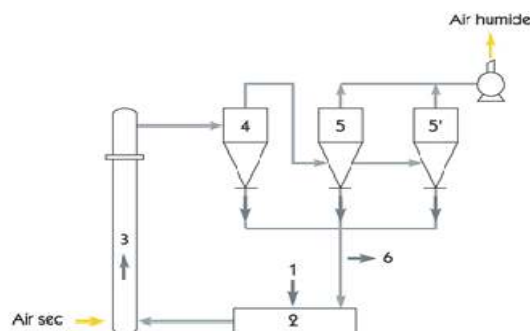


Figure (2.7) : Séchoir flash

🌐 Type de produits

Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation). Produit pulvérulent, granulaire.

🌍 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Protéines	Farine	Particules de bois	Poudre d'amidon
Initiale	50-60 %	15 %	50 %	40-45 %
Finale	8%	12 %	10 %	8-10 %

🌍 Fonctionnement:

- ✓ 1^{ère} étape : Alimentation du produit

Le produit à sécher est introduit à la base d'une colonne par un injecteur qui le disperse dans un courant d'air chaud.

- ✓ 2^{ème} étape : Entraînement du produit injecté

Le produit est transporté par le courant de gaz chaud à l'intérieur de la colonne. La surface d'échange est importante, ce qui permet un transfert rapide de chaleur et de masse.

- ✓ 3^{ème} étape : Séparation air/produit sec

En haut de la colonne, l'air et la matière sèche sont séparés par passage dans des cyclones. A la sortie des cyclones, l'air peut-être rejeté ou recyclé après filtration ou non.

II.2.2) Les séchoirs statiques :

a) *Étuve de séchage :*

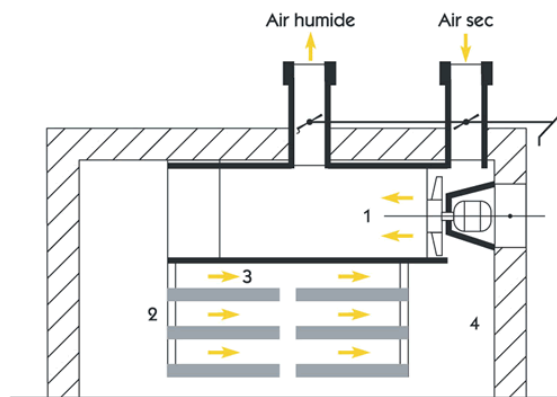


Figure (2.8) : Sécheur étuve à claie

- 1 : Soufflage de l'air de séchage
- 2 : Produit déposé sur des claies
- 3 : Léchage air chaud
- 4 : Aspiration de l'air humide

🌍 Type de produits :

Produit liquide, pâteux, produit pulvérulent, granulaire, fibreux, produit plan, en forme, en morceaux.

🌍 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Bois (résineux)	Boues d'hydroxydes métalliques	Carreaux de plâtre	Bobine de textile
Initiale	44 %	70 %	45 %	60 %
Finale	12 %	30 %	5 %	7-15 %

🌍 Fonctionnement:

Le séchage comprend 2 étapes :

- 1^{ère} étape : Chargement et séchage du produit

Le produit est placé dans une enceinte close où l'apport énergétique, nécessaire au séchage, se fait par circulation d'air chaud. Cette enceinte peut comporter une série de claies superposées sur lesquelles le solide est réparti en couches minces.

- 2^{ème} étape : Recyclage de l'air humide

L'air chargé d'humidité est aspiré hors de la chambre de séchage, au travers de condenseurs qui l'assèchent puis est renvoyé par un système de ventilation forcé.

b) **Lyophilisation :**

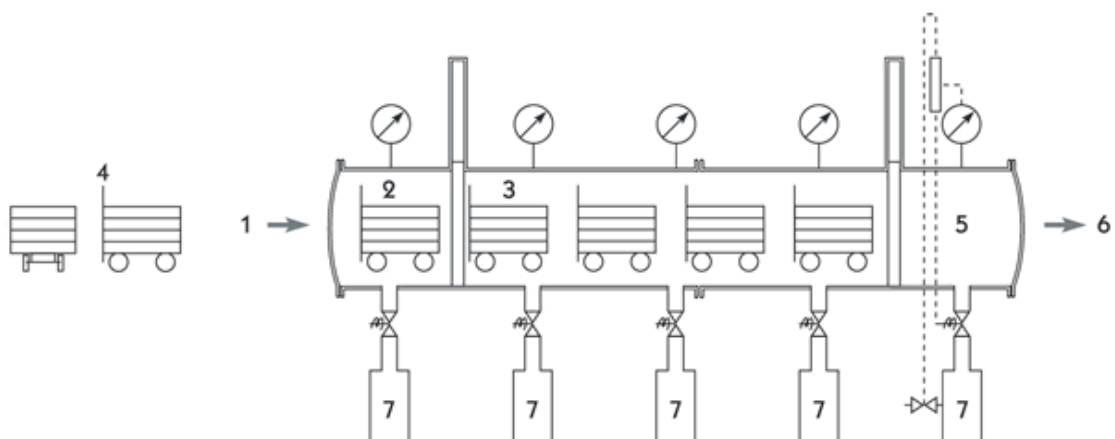



Figure (2.9) : sécheurs à chariots (Lyophilisation)


1. Entrée du produit humide

2. Mise en dépression


3. Chariot mobile (avec surface chauffante)
4. Plaque de condensation de vapeur
5. Remise en pression
6. Sortie du produit sec
7. Chambre de condensation

 Type de produits :

Produit liquide (en couche de 1,5 - 3 cm). Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation). Produit pulvérulent, granulaire, fibreux. Produit plan, en forme, en morceaux, dimensions de produit généralement de 1 mm à 1 cm.

 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Champignons	Morceaux de fraise
Initiale	Produit en lamelle	Produit en morceaux
Finale	5 %	11 %

 Fonctionnement:

Ce procédé combine l'action du froid et du vide en provoquant la sublimation de l'eau ; celle-ci passant directement de l'état glacé à l'état vapeur sans transition par la phase liquide. La lyophilisation est un procédé de séchage en trois temps :

- Congélation du produit

Le produit est congelé à basse température (-30 à -50°C). Cette étape est déterminante car elle fixera les caractéristiques cristallines du système congelé, et par là, la texture de la forme lyophilisée finale.

- Sublimation de la glace

Le produit congelé est ensuite introduit dans une enceinte de séchage travaillant sous vide poussé (pression absolue : 100 Pa). L'eau s'évapore alors par sublimation.

- Désorption finale de l'eau liée

Il s'agit d'extraire l'eau adsorbée ou emprisonnée dans les micro-capillaires.

c) **Lit fluidisé :**

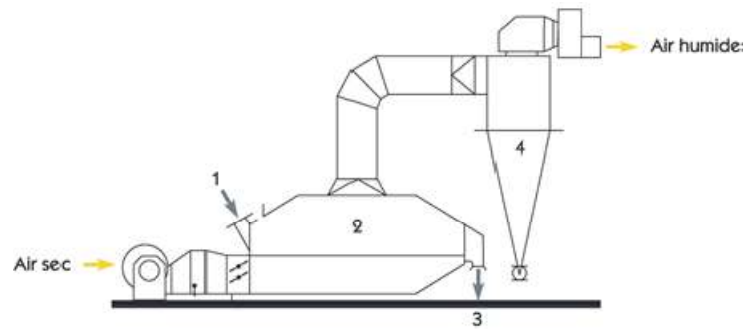


Figure (2.10) : sécheur Lit fluidisé

1 : Entrée du produit humide

2 : Chambre de fluidisation

3 : Sortie du produit

4 : Cyclone de dépoussiérage

🌍 Type de produits :

Produit liquide (sur granules déjà formés), pâteux (sous réserve du type d'alimentation), produit pulvérulent, granulaire, fibreux.

🌍 Exemples d'applications :

Teneur en eau	Colorants	Levures	Boues	Charbon broyé	Sel marin
Initiale	31 %	70 %	65 %	50 %	2 %
Finale	7 %	5 %	40 %	8 %	0.03 %

🌍 Fonctionnement:

Le séchage comprend 3 étapes :

- 1^{ère} étape : Traitement d'air

L'air extérieur, qui va servir au séchage du produit, est filtré et chauffé.

- 2^{ème} étape : Fluidisation

L'air soufflé au travers d'une plaque de diffusion, permet la fluidisation du lit de particules (i.e. la mise en mouvement du lit), qui offrent alors une surface de séchage plus importante.

Le lit est en mouvement de fluidisation homogène lorsque la vitesse de l'air de séchage est supérieure à la vitesse de fluidisation minimale et inférieure à la vitesse au-delà de laquelle se produit un entraînement des particules hors de la zone de process.

- 3^{ème} étape : Séparation du produit sec et de l'air de séchage.

d) *Sécheur à palette/vis* :

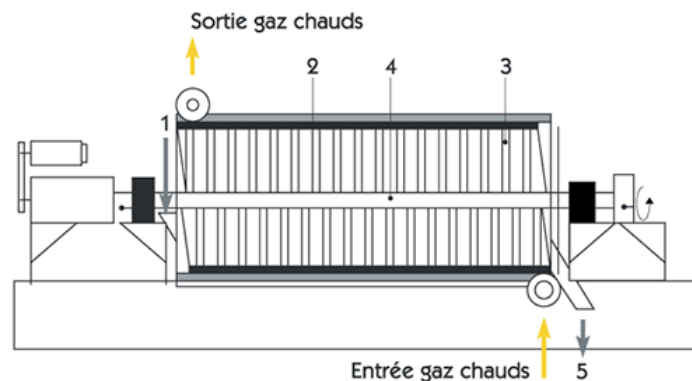


Figure (2.11) : Sécheur à palettes

1 : Entrée du produit humide

2 : Double enveloppe

3 : Palette

4 : Arbre creux

5 : Sortie du produit sec

🌐 Type de produits :

En état initiale : Produit pâteux. Produit pulvérulent, granulaire (traitement de substances hautement visqueuses, collantes et incrustantes et possibilité de sécher des produits nocifs ou inflammables)

En état finale : Produit pulvérulent, granulaire de qualité uniforme.

🌐 Exemples d'application :

Teneur en eau	Boues de peinture hydrosoluble	Boues de peinture organique
Initiale	70 %	70 %
Finale	3,2 %	2,2 %

🌐 Fonctionnement:

Le sécheur à palettes est constitué d'un corps cylindre horizontal (stator) à l'intérieur duquel tourne un arbre (rotor) muni de bras, à l'extrémité desquels sont fixées des pelles.

L'ensemble bras/pelles est remplacé par des segments de disques radiaux pour le traitement de produits pâteux. Il peut y avoir un arbre à contre-pals pour assurer un nettoyage plus efficace de l'arbre principal.

L'enveloppe extérieure est chauffée par l'intermédiaire de gaz chauds ou d'un fluide thermique. L'arbre et les palettes peuvent aussi être parcourus par un fluide thermique. Le mouvement des palettes permet un brassage intensif du produit et les surfaces d'échange supplémentaires qu'elles offrent augmentent le transfert de chaleur.

Il est nécessaire de prévoir une faible ventilation (air ou gaz inerte) ou une pompe à vide pour enlever les vapeurs de séchage.

II.3) Les équipements annexes des sécheurs :

a) Filtres

Suivant le produit à traiter des contraintes importantes peuvent être imposées à l'air de séchage. Des filtres sont donc souvent installés; ils peuvent parvenir parfois à empêcher le passage des bactéries et autres micro-organismes s'ils sont suffisamment fins.

b) Ventilateurs

Ils communiquent à l'air l'énergie mécanique nécessaire à sa traversée du sécheur.

c) Déshumidificateurs de l'air

Pour améliorer la capacité d'absorption d'eau de l'air, il est intéressant de prévoir un dispositif de déshumidification de l'air qui abaisse l'humidité de l'air avant son entrée dans le sécheur. On peut procéder par condensation en diminuant la température de l'air en dessous de son point de rosée ce qui permet d'éliminer l'eau en excès. On peut aussi passer l'air sur un support hydrophile qu'on régénère ensuite.

d) Réchauffeurs d'air

La nécessité d'abaisser l'humidité relative de l'air avant son entrée dans le sécheur pour obtenir une meilleure efficacité oblige à préchauffer l'air. On utilise à cet effet des aérothermes constitués par des tubes munis d'ailettes et traversés par des fluides caloporteurs. Une deuxième solution consiste à utiliser des brûleurs utilisant des combustibles divers (fuel, charbon, gaz).

e) Récupération thermique

Le recyclage de l'air en sortie du sécheur peut s'effectuer s'il est encore peu chargé en humidité. On renvoie donc cet air mélangé à de l'air "neuf" au niveau du préchauffage. Il est aussi parfaitement possible d'utiliser l'air en sortie souvent encore à une température élevée pour contribuer en partie au préchauffage de l'air "neuf".

II.4) Technique de séchage et type de produits : [9]

TECHNIQUE	Produit liquide	Produit pâteux	Produit pulvérulent et granulaire	Produit fibreux	Produit plan	Produit en bande	Produit en forme et en morceaux
Atomisation	■						
Sécheur tunnel		■	■	■	■		■
Etuve de séchage		■	■	■			■
Tambour rotatif		■	■	■			
Sécheur flash		■	■				
Lit fluidisé	■	■	■	■			
Sécheur à bandes						■	
Sécheur silo			■				
Cylindre chauffant	■	■				■	
Sécheur à palette / vis		■	■				
Lyophilisation	■	■	■	■	■		■

Chapitre III :

Biomasse et séchage industriel

III.1) Introduction :

L'utilisation de biomasse comme source d'énergie thermique fait intimement partie de l'histoire de l'humanité. Ce n'est que depuis l'ère industrielle que la biomasse a été remplacée par des sources d'énergie d'origine fossile (le charbon d'abord, puis le pétrole) pour combler nos besoins en énergie thermique. Aujourd'hui toutefois, avec la diminution de la disponibilité de ces ressources en énergie non renouvelable et la nécessité de réduire nos émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation de biomasse fait l'objet d'un regain d'intérêt. La filière des biocombustibles solides connaît ainsi un nouveau développement sous l'impulsion de la demande pour le chauffage dit « durable » et de l'augmentation du prix des sources d'énergie fossiles. Ces biocombustibles solides peuvent être produits à partir de toutes sortes de matières résiduelles ou de cultures dédiées d'origine forestière ou agricole.

III.2) Définition : [9]

La biomasse se définit comme la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

Toutes ces matières organiques peuvent dégager de l'énergie soit par combustion directe ou suite à une ou plusieurs étapes de transformation.

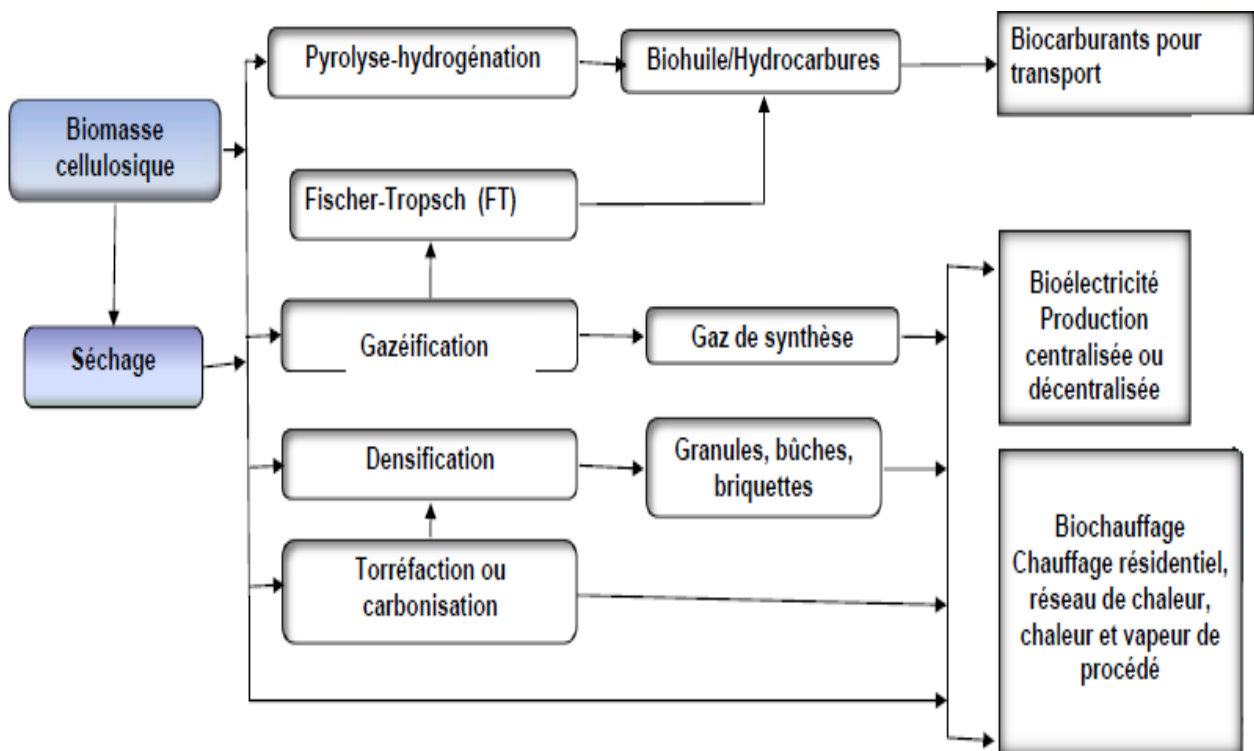
Les ressources en biomasse sont diverses. Généralement, on distingue les catégories suivantes :

- Le bois, notamment sous forme de bûches, de granulés ou de plaquettes ;
- Les sous-produits du bois qui recouvrent l'ensemble des déchets de la sylviculture et de l'industrie de première transformation du bois ;
- Les sous-produits de l'industrie de la deuxième transformation du bois, de l'industrie de la trituration et des industries agroalimentaires ;
- Les produits et sous-produits issus de l'agriculture (paille, résidus de récolte, etc.) et les plantations à vocation énergétique (saules, miscanthus...) ;
- Les déchets organiques tels que les déchets urbains, les ordures ménagères et les déchets en provenance de l'agriculture tels que les effluents agricoles ;
- Les déchets de bois qui ne contiennent pas de composés organiques halogénés ou des métaux lourds.

La biomasse doit être préalablement traitée afin de répondre aux exigences des différents procédés de conversion :

- Fragmentation (déchiquetage ou broyage).
- Tamisage (granulométrie requise).
- Séchage (teneur en humidité requise).

III.3) Quelques voies de conversion de la biomasse forestière en énergie ou produits énergétiques : [10]



➤ **Combustion :**

Oxydation complète de la biomasse en présence d'air. Energie pour chauffage, l'électricité ou les deux

➤ **Gazéification :**

Thermoconversion de la biomasse sous l'effet des températures élevées (900 – 1400°C). gaz de synthèse riche en CO et H₂.

Pyrolyse :

Décomposition thermochimique de la biomasse à des températures entre 450 et 750°C en absence d'oxygène. Biohuile , biocharbon et de gaz pyrolytiques.

➤ **Carbonisation :**

Combustion lente de la biomasse en déficit d'air et une pression supérieure ou égale à la pression atmosphérique. Biocharbon

➤ **Torréfaction :**

Décomposition thermique de la biomasse à des températures entre 200 et 300°C en absence d'oxygène et sous atmosphère contrôlée. Produits torréfiés.

➤ **Densification :**

Densifié c'est compacter afin de modifier la granulométrie et la densité.

Densifier c'est transformer la biomasse lignocellulosique en un combustible solide dans le but d'améliorer sa valorisation énergétique

III.4) Les biocombustibles solides : [10]

L'énergie des biocombustibles solides provient simplement de la conversion de l'énergie solaire captée par les plantes en énergie utilisable. Les biocombustibles solides prennent le plus souvent la forme de granules, de copeaux, de briquettes ou de bûches. Ils peuvent être produits à partir de différents types de résidus : bois (bran de scie, copeaux, écorce), cultures (pailles de blé, d'avoine ou d'orge) et meuneries (résidus d'émondage du maïs, résidus de soya et d'avoine et remoulage de blé). Ils peuvent également être fabriqués à partir de plantes énergétiques ligneuses (p. ex. : saule à croissance rapide) ou herbacées (p. ex. : panic érigé). Cette biomasse peut être utilisée à l'état brut pour produire de l'énergie (résidus ou plantes énergétiques brûlés directement dans des brûleurs ou des chaudières). Elle peut également être transformée sous forme de granules afin de faciliter son transport et son entreposage et d'obtenir un meilleur pouvoir calorifique (la granulation augmente la densité de la biomasse). Bien qu'il soit possible de produire des granules à partir d'une grande variété de biomasse, seules les granules de bois et de résidus de mouture sont produites à l'échelle commerciale au Canada actuellement. Toutefois, plusieurs centrales thermiques et électriques européennes utilisent des granules de paille pour produire de la chaleur et de l'électricité.

III.5) Définition de granules de bois :

Les granulés sont de petits bouchons cylindriques résultant du pressage. Leur matière première est constituée de petits résidus de bois laissés à l'état naturel, tels les sciures résultant du rabotage et du sciage du bois. Les grandes scieries et les entreprises débitant le bois en planches en sont les fournisseurs. Cette matière première est un produit connexe et de ce fait, se créent des synergies dans le cycle de fabrication. [10]

C'est un Petit cylindre de sciure de bois compressée sans aucun agent de liaison : la lignine et les résines contenues naturellement dans le bois assurent la cohésion de la granule.



Figure (3.1) : granulés de bois à l'état finale

III.6) Le procédé de granulation : [10]

La granulation de la biomasse permet d'obtenir un biocombustible plus facile à manutentionner et d'une plus grande densité, c'est-à-dire avec un plus grand pouvoir calorifique par unité de volume. Le procédé de granulation consiste globalement en une extrusion dans laquelle la biomasse préalablement broyée est pressée à l'aide de rouleaux sur la paroi intérieure d'une matrice cylindrique perforée (Figures 1 et 2). À la fin de ce procédé, la biomasse est sectionnée à une longueur fixe à l'aide de couteaux. La densité du produit fini varie selon plusieurs paramètres, dont le diamètre et la longueur des perforations, la composition de la matière première (cendres et fibres) et le taux d'humidité du matériel. Le procédé complet (Figure 3) nécessite toutefois des étapes de conditionnement de la biomasse brute et du produit final.

De façon générale, les étapes suivantes sont requises pour la fabrication de granules :

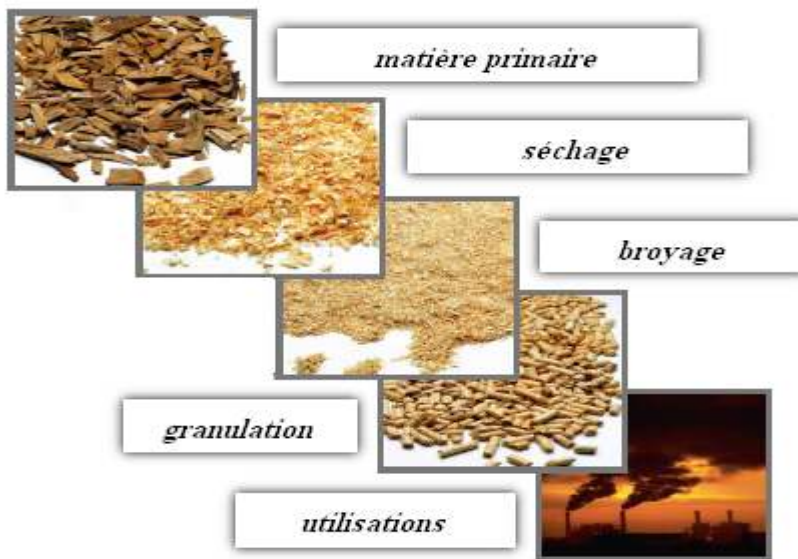
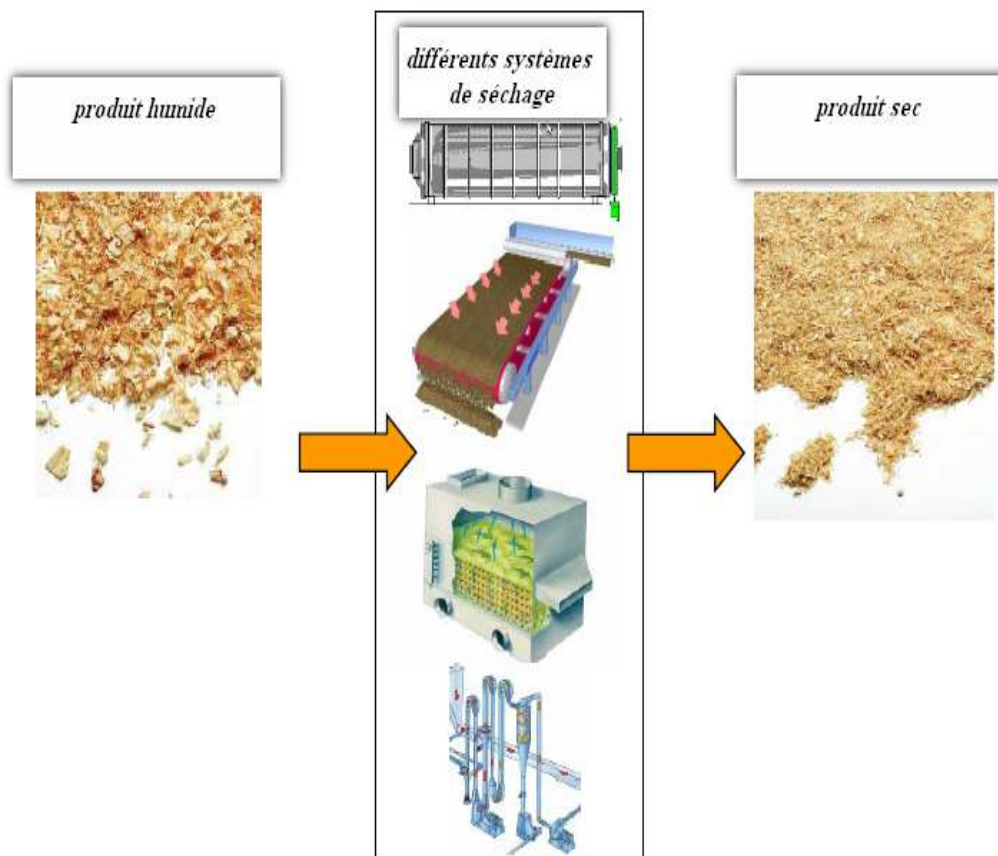


Figure (3.2) : différentes étapes de fabrication des granulés de bois

a) Séchage

Le séchage préalable de la biomasse est requis lorsque son taux d'humidité est supérieur à 15 à 20 %. C'est le cas de la biomasse provenant de la production de saules à courte rotation.

Dans le cas de la biomasse herbacée telle que le panic érigé, son taux d'humidité est généralement inférieur à 15 % au moment de la récolte, ce qui permet d'éviter cette première étape.

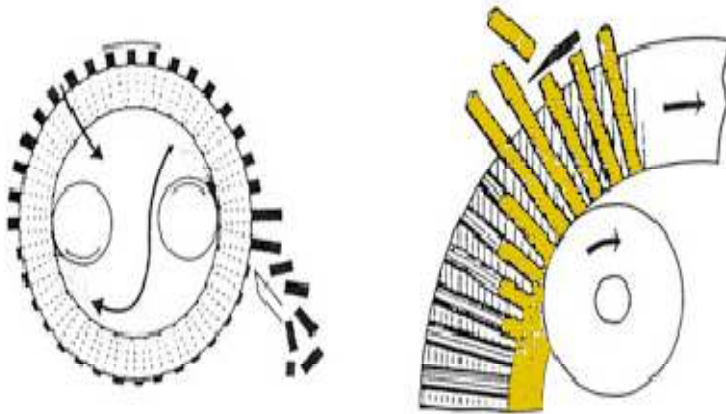


b) Broyage

Le broyage de la biomasse est effectué avec des broyeurs à marteaux. La taille visée des particules après le broyage est de l'ordre de 6 mm. La biomasse broyée est tamisée afin de ne laisser passer que les particules suffisamment fines pouvant être granulées.

c) Granulation

L'extruder est alimenté par la biomasse broyée. De l'eau chaude et de la vapeur sont parfois ajoutées lorsque la biomasse est très sèche. Cette humidité facilite l'écoulement du matériel et réduit la puissance requise par l'extruder. La biomasse est sectionnée à la sortie de l'extruder pour former les granules.



Rouleaux et couteaux pour la fabrication des granulés

Figure (3.3) : Schéma de fonctionnement d'un extruder



Figure (3.4) : Vue des granules après extrusion et avant sectionnement

d) Refroidissement

La pression exercée lors de l'extrusion peut augmenter la température de la biomasse jusqu'à 80 °C. Plus la biomasse résiste à l'écoulement, plus la température augmente. Par conséquent, les granules doivent être refroidies avant d'être entreposées. L'air utilisé pour refroidir les granules doit être filtré avant d'être rejeté dans l'atmosphère. Une fois refroidies, les granules sont prêtes à être utilisées.

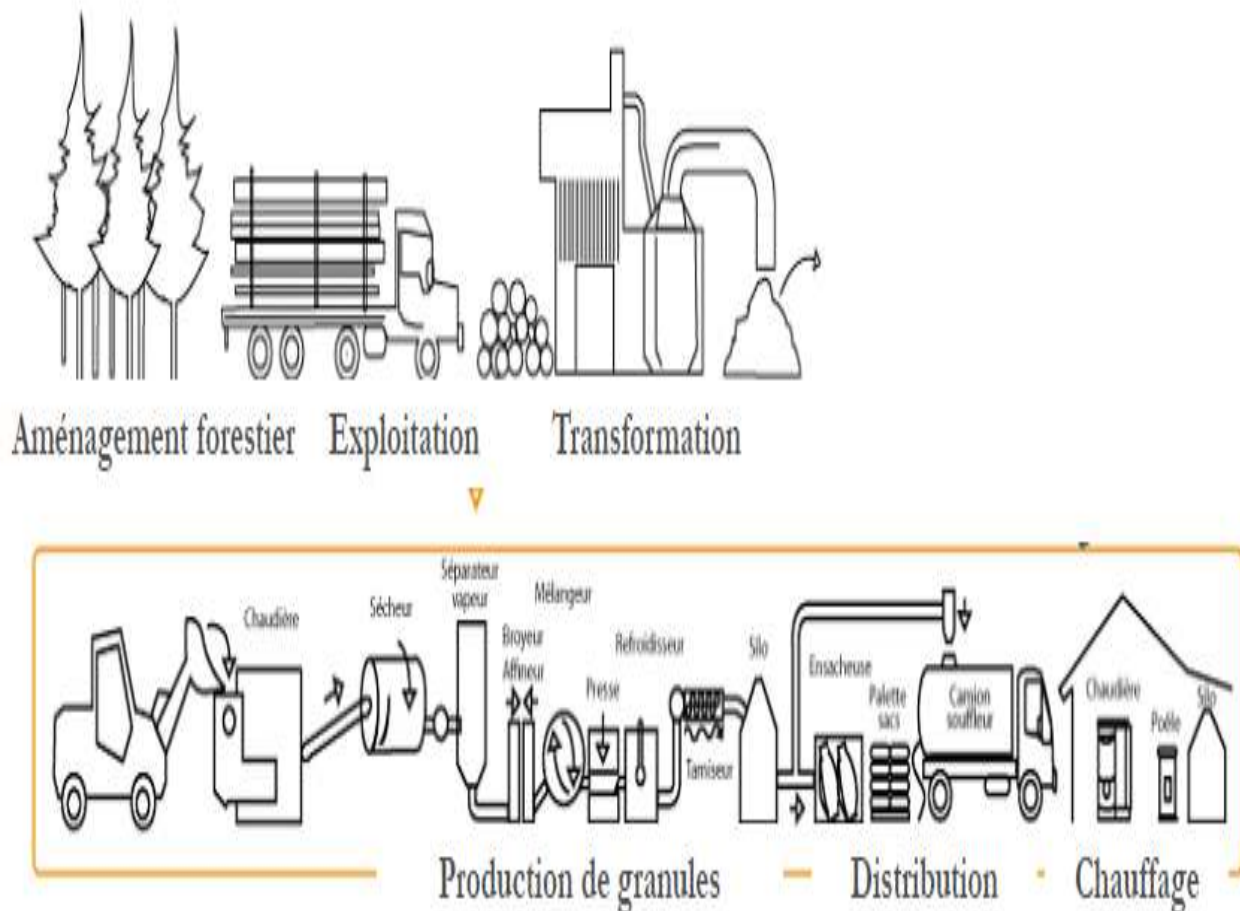


Figure (3.5) : fonctionnement du système.

III.7) Utilisation des granules de bois : les chaudières à granulés

Les chaudières automatiques aux granulés de bois sont compactes et faciles à intégrer au bâtiment. Elles sont munies d'une alimentation automatique en granulés de bois et la combustion est régulée et optimisée en permanence par une régulation poussée. Ces chaudières brûlent des granulés de sciures compactées : un combustible bois à haut pouvoir calorifique et faible taux d'humidité, d'une qualité constante et normalisé sans poussières. Le combustible est livré par camion-souffleur dans un silo de petites tailles. Le volume du silo peut être dimensionné pour assurer un an d'autonomie. Les granulés descendent au fond du silo, où une vis sans fin les conduit vers le foyer de la chaudière.



Figure (3.6) : Schéma de fonctionnement d'une chaudière à granulés

III.8) Les biocombustibles solides : une solution à certains enjeux environnementaux?

Sur le plan environnemental, le chauffage à partir de biocombustibles solides a un bilan énergétique fort positif. Par exemple, à partir d'une unité d'énergie fossile, le panic érigé pourrait produire jusqu'à 14 unités d'énergie thermique [11]. En assumant que le CO₂ émis lors de la combustion est absorbé par les plantes durant leur croissance, le chauffage à partir de biocombustibles solides permettrait une réduction des émissions de GES allant jusqu'à 90 % par rapport à un chauffage à partir de combustibles fossiles [11]. Les équipements de chauffage doivent toutefois être bien adaptés au type de biomasse utilisé afin d'éviter les émissions de particules fines qui contribuent à la formation de smog.

La culture des plantes énergétiques permet aussi de protéger le sol et les bandes riveraines contre l'érosion.

Chapitre IV :

Modélisation et
simulation d'un
sécheur rotatif

IV.1) Mode de détermination des paramètres de calcul :

Tout sécheur peut faire l'objet d'un calcul théorique, à partir des données relatives au produit à traiter, et par l'application de règles et d'équations régissant les échanges de chaleur et de matière.

Ce calcul permettra une *approche* de la solution finale, mais il ne serait pas très raisonnable de procéder à la construction du sécheur sur ces seules bases. En effet, il est indispensable de procéder à quelques essais afin de s'assurer que les paramètres retenus sont bien confirmés par l'expérimentation et que le procédé de séchage choisi est bien adapté au traitement escompté et donne au produit sec les caractéristiques attendues.

Les essais ont un double but :

- Valider le ou les procédés de séchage envisagés et retenir celui qui apparaît le mieux adapté eu égard aux qualités du produit sec obtenu ;
- Déterminer les paramètres caractéristiques nécessaires à la détermination du sécheur industriel et identifier le comportement du produit au cours de l'opération de séchage.

Les **paramètres** essentiels déterminés par les essais sont :

- les températures *sèches* et *humides* de l'air de séchage avant et après son utilisation : les essais devront permettre de fixer les valeurs maximales de ces températures afin d'optimiser le dimensionnement de l'appareil industriel
- le temps de séchage du produit dans les différentes conditions de température de l'air
- l'allure de la courbe de séchage et l'identification des différentes phases de l'opération de séchage
- la température finale du produit dans les différentes conditions de température de l'air
- les masses volumiques du produit humide, du produit sec et du produit anhydre sous la forme où il se présente
- le coefficient spécifique de ventilation, c'est-à-dire le volume d'air de séchage par unité de surface de sécheur
- les éventuelles températures et enthalpies de changement d'état du produit lorsque celui-ci présente des transformations physico-chimiques au cours de son séchage
- la capacité thermique du produit anhydre.

Ces essais peuvent être menés soit en continu, soit en discontinu. L'essai **discontinu** peut se dérouler sur une petite quantité de produit (quelques dizaines de kilogrammes) et peut

constituer un préliminaire intéressant pour une première approche. L'**essai continu**, mettant en œuvre des quantités plus importantes de produit (quelques centaines de kilogrammes), servira à contrôler et valider les constatations et les mesures effectuées lors de l'essai discontinu.

Les essais constituent une phase importante de la résolution d'un problème de séchage industriel et devraient être systématiques car, bien que coûteux, ils constituent l'une des meilleures façons de s'assurer que le procédé de séchage retenu apporte effectivement la solution attendue.

Les matériels utilisés pour ces essais (en particulier dans les cas d'essais continus) devraient avoir une taille suffisante pour éviter des extrapolations trop importantes. Il est souvent admis qu'un rapport de taille entre l'appareil industriel et l'appareil d'essai ne devrait pas se situer au-delà de 100

IV.2) Calcul et dimensionnement d'un sécheur rotatif :

Le sécheur rotatif est l'un des types les plus répandus dans l'industrie. C'est une coquille cylindrique habituellement construite de tôles en acier, légèrement inclinées, d'en général 0.3 à 5 m de diamètre, de 5 à 90 m de longueur et de vitesse de rotation de 1 à 5 tr/min. Il est habituellement actionné avec de la pression interne négative pour empêcher l'échappement de la poussière.

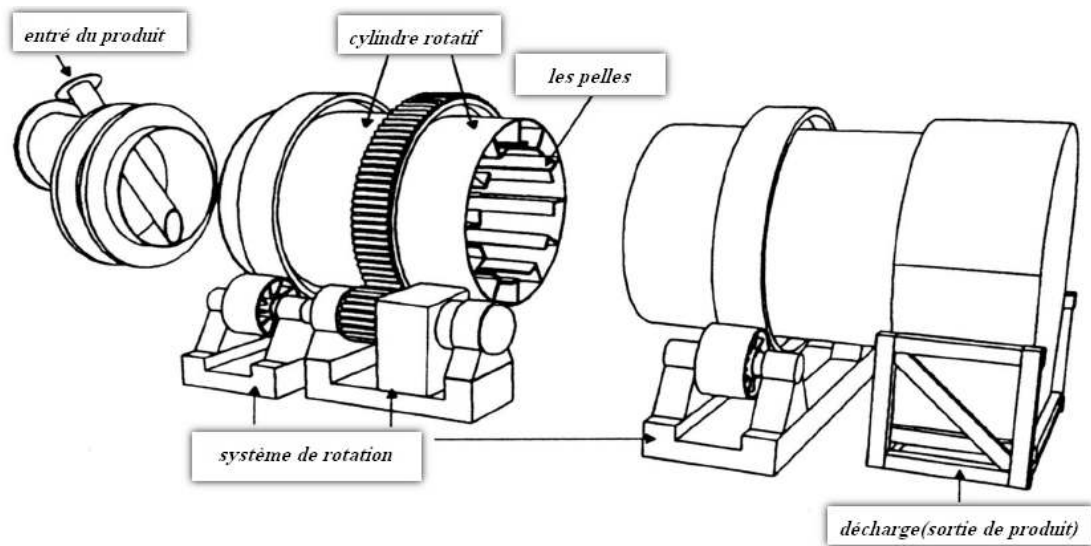


Figure (4.1) : Sécheur rotatif.

Un sécheur rotatif à deux fonctions distinctes ; il sert comme convoyeur et comme dispositif de séchage. Le mouvement des solides dans le sécheur est influencé par les mécanismes suivants : soulèvement, action de cascade, glissement et rebondissement, comme représenté sur la figure (4.2) :

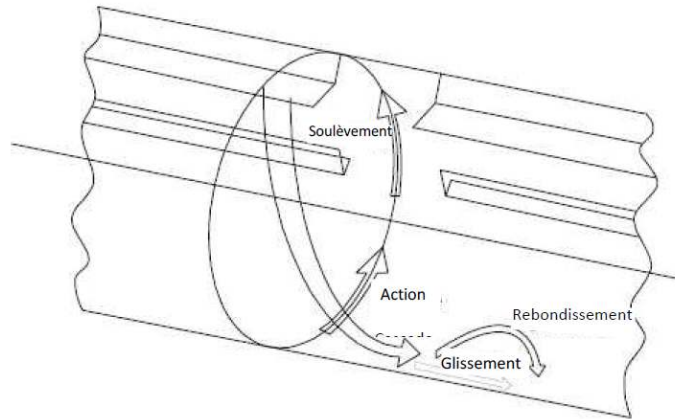


Figure (4.2) : sécheur rotatif à emplacement en cascade (Baker 1983).

Les solides présentés à l'extrémité supérieure se déplacent vers l'extrémité inférieure ou le décharge. Selon l'arrangement pour le contact entre le gaz de séchage et les solides, un sécheur peut être de type direct ou indirect, à courant d'air direct ou inverse. Un ensemble de volets (pelles) de soulèvement de diverses formes est installé à l'intérieur de la coquille pour soulever les solides afin d'assurer le contact avec le gaz. Ces configurations de volets changent de spirales à des volets droits. L'effet de la conception de volets, c.-à-d. le nombre de volets, leurs dimensions et leurs formes, sur les performances du sécheur est très difficile à mettre en évidence.

Pendant que le sécheur tourne, des solides sont pris par les volets, soulevés pour une certaine distance autour du tambour et versés par l'air dans un rideau de cascade (Figure (4.3)). La majeure partie du séchage se produit dans cette phase de transport du solide, car les solides sont en contact étroit avec le gaz. L'action de vol est également partiellement responsable du transport des solides par le tambour.



Figure (4.3) : un sécheur rotatif mise en marche.

Les facteurs intervenant dans la modélisation d'un sécheur rotatif sont de 3 types [12]:

- Les propriétés physiques des solides, telles que la dimension particulaire, la forme, la densité et le contenu d'humidité.

- Les caractéristiques du sécheur, telles que le diamètre, la longueur du tambour, la conception et le nombre de volets de soulèvement.
- Les conditions de fonctionnement, telles que le débit, la température d'alimentation, le débit et la température d'air de séchage, la pente du cylindre par rapport à l'horizon, la vitesse de rotation du tambour.

Chaque constructeur possède, en général, de nombreux éléments qui lui permettent d'estimer avec une assez bonne précision la taille requise pour résoudre un problème donné. Dans le cas contraire, l'expérimentation est le plus sûr moyen pour définir les dimensions de l'appareil industriel.

IV.2.1) Détermination des paramètres au cours d'essais :

Les essais sont en général conduits dans des appareils dont le diamètre est compris entre 0,3 et 0,5 m et la longueur entre 1,5 et 3 m. Il est préférable d'effectuer les essais en séchant en continu et en se rapprochant le plus possible des conditions de température d'air et de taux d'humidité qui seront utilisées sur l'installation industrielle.

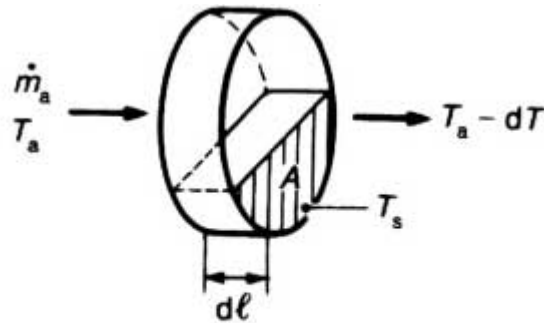
Les paramètres à mesurer pendant l'expérience sont les suivants :

- ✓ températures d'entrée et de sortie de l'air de séchage ;
- ✓ températures d'entrée et de sortie du produit ;
- ✓ débit du produit ;
- ✓ débit d'air à l'entrée ou à la sortie du sécheur ;
- ✓ taux d'humidité initial et final du produit ;
- ✓ taux d'humidité initial et final de l'air de séchage ;
- ✓ taux de remplissage (rapport du volume de produit dans le sécheur au volume du sécheur) : ce taux est évalué en mesurant la quantité de produit dans le sécheur après avoir arrêté l'alimentation de celui-ci ;
- ✓ vitesse de rotation de la virole ;
- ✓ quantité de matière recueillie dans le dispositif de dépoussiérage des gaz ;
- ✓ consommation d'énergie.

À partir des résultats obtenus, on effectuera des bilans matières sur le produit et sur le gaz.

IV.2.2) Bilan de Masse et d'Énergie :

Pour une section du sécheur de longueur dl on a :



L'air de séchage entre à la température T_a et au débit massique \dot{m}_a et ressort à la température $T_a - dT$.

Figure (4.4) Représentation schématique d'un élément du sécheur, d'épaisseur 'dl'

a- Bilan de Masse :

$$M_s \left(\frac{dW_s}{dl} \right) + M_a \left(\frac{dW_a}{dl} \right) = 0 \quad (4.1)$$

La variation du taux d'humidité du solide dans la section considérée est donnée par :

$$\frac{dW_s}{dl} = \frac{\frac{dW_s}{dt}}{\frac{dl}{dt}} = \frac{R}{V_s} \quad (4.2)$$

b- Bilan d'énergie :

$$M_s \cdot (C_{p_s} + C_{p_e} \cdot W_s) \cdot \frac{dT_s}{dl} + M_s \cdot \left(\lambda_e \cdot \frac{dW_s}{dl} \right) = -M_a \cdot C_{p_e} \cdot (T_a - T_s) \cdot \frac{dW_a}{dl} - M_a \cdot (C_{p_a} + C_{p_v} \cdot W_a) \cdot \frac{dT_a}{dl} \quad (4.3)$$

L'échange de chaleur entre l'air de séchage et le produit est donné par :

$$U \cdot A \cdot (T_a - T_s) = M_s \cdot (C_{p_s} + C_{p_e} \cdot W_s) \cdot \frac{dT_s}{dl} + M_s \cdot \left(\lambda_e \cdot \frac{dW_s}{dl} \right) \quad (4.4)$$

IV.2.3) Modélisation du sécheur : [8]

IV.2.3.1) Détermination du coefficient d'échange volumique :

Le but des essais est de déterminer un coefficient d'échange volumique qui pourra être extrapolé à d'autres conditions opératoires.

Le coefficient d'échange volumique *moyen* (en $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$) est défini par la formule suivante :

$$\overline{U}_a = \frac{Q_G}{V_T \Delta T m} = \frac{\dot{m}_a C_{pa} (T_{a.1} - T_{a.2})}{\frac{\pi}{2} D^2 L \Delta T m} \quad (4.5)$$

Avec : Q_G (W) : quantité de chaleur cédée par le gaz de séchage par unité de temps,

V_T (m^3) : volume d'un tube sécheur,

$\Delta T m$ (K) : écart moyen de température entre le gaz de séchage (air) et le produit,

\dot{m}_a ($kg \cdot s^{-1}$) : débit massique de gaz de séchage,

$T_{a.1}$ et $T_{a.2}$ (K) : températures d'entrée et de sortie du gaz de séchage,

D et L (m) : diamètre et longueur du sécheur.

Le coefficient d'échange volumique varie le long du sécheur. Il diminue en fin de séchage lorsque le produit est dans la phase à vitesse décroissante. Il faut tenir compte avec le plus grand soin des conditions dans lesquelles le coefficient d'échange volumique a été déterminé lorsque l'on veut extrapoler à d'autres conditions de fonctionnement. C'est la raison pour laquelle il est préférable d'atteindre au cours des essais un taux d'humidité inférieur ou égal à celui requis pour l'installation industrielle.

Le coefficient d'échange volumique est principalement lié au débit d'air et au diamètre du sécheur. La **formule de Friedman et Marshall** est une des expressions les plus utilisées pour définir le coefficient d'échange volumique *moyen*

$$\overline{U}_a = K \frac{G^n}{D}$$

(4.6)

' n ' est proche de 2/3 pour des débits d'air spécifiques G compris entre 0,37 et 1,87 ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

' k ' est un coefficient lié non seulement au nombre de pelles, mais aussi à leur forme : c'est un paramètre qui est fortement lié au savoir-faire du constructeur.

$$K = \frac{\overline{U}_a}{\left(\frac{G^3}{D}\right)} \quad (4.6.a)$$

Le débit d'air spécifique G varie selon les produits à traiter et, notamment, en fonction de leur granulométrie. En général, G varie entre 0,5 et 5 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Pour les engrais, G est proche de 4,2 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; pour du sable, il est proche de 1,8 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ et, pour des produits chimiques cristallisés, la valeur habituelle est de 1,5 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

$$G = \frac{\dot{m}_a}{D^2 \frac{\pi}{4}} \quad (4.7)$$

IV.2.3.2) Vitesse de rotation :

L'extrapolation de la vitesse de rotation se fait sur la base de la **vitesse périphérique**.

Celle-ci s'exprime de la façon suivante :

$$U_p = \pi N d \quad (4.8)$$

Avec : U_p (m.min⁻¹) : vitesse périphérique de la virole.

N (tr.min⁻¹) : vitesse de rotation.

d (m) : diamètre de la virole.

La vitesse périphérique est une caractéristique variant d'un constructeur à l'autre. Elle dépend non seulement du produit à sécher, mais aussi des équipements internes du tube. Dans la pratique, la vitesse périphérique varie entre 10 et 30 m · min⁻¹. Le choix de la vitesse de rotation résulte d'un compromis entre de bonnes performances thermiques et une puissance d'entraînement la plus faible possible.

IV.2.3.3) Inclinaison du tube du sécheur et le temps de séjour et de séchage :

L'inclinaison est la pente du tube, conjuguée à la vitesse de rotation de celui-ci, qui permet l'avancement du produit dans le sécheur. Le même résultat est obtenu par certains constructeurs en utilisant des tubes horizontaux mais avec des pelles inclinées par rapport à l'axe du tube.

La pente du tube est déterminée en considérant que le temps de séchage, défini par exemple d'après la quantité de produit contenue dans le tube, doit être égal au temps de séjour obtenu par la rotation de l'appareil. Soit t_s (min) le temps de séchage défini par l'expérience :

$$t_s = \frac{V_p}{\dot{m}_{p,1}} \rho_{app} = \frac{D^2 \frac{\pi}{4} L \epsilon' \rho_{app}}{\dot{m}_{p,1}} \quad (4.9)$$

Avec : V_p (m³) : volume de produit contenu dans le tube.

ϵ' : Coefficient de remplissage (varie de 0,1 à 0,3).

$\dot{m}_{p,1}$ (kg.s⁻¹) : débit massique de produit à l'entrée du sécheur.

ρ_{app} (kg.m⁻³) : masse volumique apparente de produit.

La pente du tube est déduite des autres caractéristiques du sécheur par la formule suivante:

$$t_s = t = 0.23 \frac{L}{d p N^{0.9}} \pm 1.97 \frac{B L G}{F} \quad (4.10)$$

Avec : t (min) : temps de séjour dû à la rotation,

L (m) : longueur de la virole,

d (m) : diamètre de la virole,

p : pente du tube ou tangente de l'angle que fait la virole avec l'horizontale,

G ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) : débit spécifique d'air.

B (m^{-1}) : constante dépendant de la granulométrie :

$$B = 5 (\overline{d_p})^{-0.5} \quad (4.10.a)$$

dans laquelle d_p (μm) est le diamètre moyen des particules.

N ($\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) : vitesse de rotation.

F ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$) : débit spécifique de produit entrant dans le sécheur.

$$F = \frac{4 \dot{m}_p}{D_s^2 \pi} \quad (4.10.b)$$

Le deuxième terme de l'équation permettant de calculer le temps de séjour dans le sécheur industriel.

Le signe (+) dans la formule ci-dessus correspond à une circulation opposée de l'air et du produit dans le sécheur (contre-courant).

Le signe (–) correspondant à une circulation à co-courant.

IV.2.3.4) Pelletage :

Le pelletage désigne l'équipement interne du sécheur rotatif. Son rôle est de brasser le produit, de le faire progresser le long du tube et de créer une pluie de particules (figure 4.3) aussi uniforme que possible de manière à obtenir de bons transferts thermiques. Il n'existe pas de règle générale pour définir un pelletage. C'est sur ce point que l'expérience du fabricant se manifeste pleinement. De plus, un bon pelletage doit prendre en compte l'évolution des caractéristiques du produit le long du sécheur. C'est le cas notamment des produits très humides qui collent et mottent en début de séchage et qui se désagrègent en fin de traitement.

La hauteur des pelles (h_p) dépend du taux de remplissage. Elle est dans la plupart des cas comprise entre $D/12$ et $D/8$. Leur nombre (n_p) sur une section varie entre 6 et 10, D étant exprimé en metre.

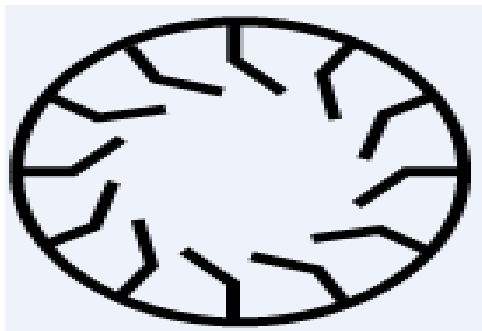


Figure (4.5) : les pelles dans un cylindre rotatif

IV.2.3.5) Vitesse du solide :

La vitesse du solide dans le sécheur est fonction de la longueur du sécheur et du temps de séjour du solide dans le sécheur :

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (4.11)$$

IV.2.3.6) Surface d'échange :

La surface d'échange, qui est la surface de passage de l'air de séchage est donnée par :

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} - \frac{\dot{m}_p}{\rho V_s} \quad (4.12)$$

IV.2.4) Simulation et interprétation :

Les caractéristiques de l'air de séchage et du produit à traiter le long du sécheur sont obtenues par simulation numérique grâce aux équations (4.1) à (4.12). Pour la simulation on suppose que :

- ✓ Le coefficient de transfert de chaleur volumétrique est constant le long du sécheur.
- ✓ Le transfert de chaleur par conduction dans le solide ou dans l'air de séchage est négligeable.
- ✓ La diffusion de la vapeur d'eau dans la direction axiale est négligeable.
- ✓ La chaleur exigée pour la vaporisation de l'eau est constante.
- ✓ La vitesse linéaire de l'air de séchage est constante.
- ✓ La distribution de la matière est régulière
- ✓ Pas de réactions chimiques dans le solide pendant le séchage.
- ✓ La température du solide et de l'air de séchage et l'humidité de la matière sont des fonctions du temps et de la distance.
- ✓ Les pertes de chaleur du sécheur vers l'extérieur de l'enceinte sont très petites.

Pour permettre la résolution numérique des équations du modèle, les équations (4.1) à (4.4) ont été réarrangées sous la forme suivante :

$$\frac{dW_p}{dl} = \frac{R_w}{V_s} \quad (4.13)$$

$$\frac{dW_a}{dl} = \frac{\dot{m}_p R_w}{\dot{m}_a V_s}$$

(4.14)

$$\frac{dT_p}{dl} = \frac{U A (T_a - T_p) - \left(\frac{\dot{m}_p \lambda_e R_w}{V_s}\right)}{\dot{m}_p (Cp_p + Cp_e W_p)} \quad (4.15)$$

$$\frac{dT_a}{dl} = \frac{\dot{m}_p Cp_v (T_a - T_p) \frac{R_w}{V_s} - U A (T_a - T_p)}{\dot{m}_a (Cp_a + Cp_v W_a)} \quad (4.16)$$

Le modèle est non linéaire à cause du taux du séchage R_w qui décrit le progrès de séchage dans le sécheur. Ce taux est généralement une fonction non linéaire qui comporte les caractéristiques du solide et la température de l'air de séchage durant la chute du taux de séchage, comme cela a été prouvé par plusieurs chercheurs (Van Krevelen & Van Hoftijzer Sharples et al, Kisakurek, Brasil & Seckler [14]).

Dans cette étude, on suppose que le taux de séchage est une fonction linéaire de l'humidité de la matière, de la température de la matière et de la température de l'air de séchage autour du point de fonctionnement :

$$R_w = k_1 W_p + k_2 T_p + k_3 T_a \quad (4.17)$$

Où k_1 (1/s), k_2 (1/sk) et k_3 (1/sk) sont des paramètres déterminés expérimentalement.

IV.3) Définition des paramètres :

Ce modèle inclue différents types de paramètres, il y a des paramètres qu'on peut définir à partir de la théorie et d'autres à partir d'expérience.

Dans cette étude, nous nous sommes inspirés des expériences de séchage, qui ont été faites dans un labo de mesure sur un sécheur électrique [13]. A Chaque intervalle de temps, un échantillon de la matière (calcite) est prélevé et séché. Ces expériences sont faites pour différents valeurs d'humidité initiales, à trois niveaux de température de l'air du séchage.

IV.3.1) Extrapolation des résultats de laboratoire : [8]

Des essais de séchage d'un produit minéral ont été effectués dans les conditions suivantes:

- Dimensions du sécheur *pilote* (à cocourant) : $D = 300$ mm ;
 $L = 2\ 000$ mm ;
- Température initiale de l'air de séchage : $T_{a,1} = 450$ °C ;

- Température finale de l'air de séchage : $T_{a,2} = 140 \text{ °C}$;
- Température initiale du produit : $T_{p,1} = 10 \text{ °C}$;
- Température finale du produit : $T_{p,2} = 100 \text{ °C}$;
- Débit massique d'air avant le réchauffage : $\dot{m}_{a,1} = 375 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$;
- Débit massique de produit humide à sécher : $\dot{m}_{p,1} = 255 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

IV.3.1.1) Extrapolation des résultats aérauliques et thermiques :

➤ La moyenne logarithmique des écarts de température entre l'air de séchage et le produit :

$$\Delta T_m = \frac{(T_{a,1} - T_{p,1}) - (T_{a,2} - T_{p,2})}{\ln \frac{(T_{a,1} - T_{p,1})}{(T_{a,2} - T_{p,2})}}$$

A.N : $\Delta T_m = 166,8 \text{ °C}$

➤ Le coefficient *moyen* d'échange volumique :

A.N : D'après l'équation (4.5)

$$\overline{U}_a = \frac{375 \times 1003 \times (723 - 413)}{(0,3^2 \times \frac{\pi}{4} \times 2) \times 166,8 \times 3600} = 1374 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{k}^{-1}$$

➤ Le débit spécifique d'air :

A.N : de l'équation (4.7), on aura :

$$G = \frac{375}{0,3^2 \times \frac{\pi}{4} \times 3600} = 1,47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

➤ Le coefficient de proportionnalité K de la formule de Friedman et Marshall

A.N : l'équation (4.6.a) nous donne : $K = 1374 / \left(\frac{1,47^{2/3}}{0,3} \right) = 319$

Les recherches ont montré qu'on peut traiter un débit de produit de $\dot{m}_p = 12000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ pour ces conditions, on procédera donc de la façon suivante :

➤ Calcul du diamètre de l'appareil :

Les conditions étant les mêmes, on considère que le débit d'air est proportionnel au débit de produit à traiter, donc égal à :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{a,1}}{\dot{m}_{p,1}} \dot{m}_p$$

A.N : $\dot{m}_a = 375 \times \frac{12000}{255} = 17647 \text{ kg.h}^{-1}$ soit $4,9 \text{ kg.s}^{-1}$

Le débit spécifique d'air étant le même pour conserver les mêmes vitesses, le diamètre de l'appareil devra être égal à :

De l'équation (4.7) : $D = \left(\frac{\dot{m}_a}{G} * \frac{4}{\pi} \right)^{1/2}$

A.N : $D = 2,06 \text{ m}$

➤ Calcul du coefficient d'échange volumique proportionnel:

A.N : D'après l'équation (4.6) $\bar{U}_a = 319 \times 1.47^{2/3} / 2.06 = 200 \text{ W.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$

➤ Calcul de la longueur de l'appareil :

De l'équation (4.5), Le volume de l'appareil sera égal à :

$$V_T = \frac{\dot{m}_a C_{pa} (T_{a,1} - T_{a,2})}{\bar{U}_a \Delta T_m}$$

A.N : $V_T = 46 \text{ m}^3$

Mais : $V_T = L D^2 \frac{\pi}{4}$

La longueur s'élèvera donc à : $L = \frac{V_T}{D^2 \pi/4}$

A.N : $L = 13,8 \text{ m}$

Dans la pratique, on sélectionnera un tube de sécheur de 2,1 m de diamètre et 14 m de longueur.

Si le taux d'humidité du produit et, éventuellement, la température d'attaque avaient été différents, il aurait fallu recalculer le débit d'air et recommencer le calcul en considérant que le débit spécifique d'air est constant.

➤ les paramètres k_1 , k_2 et k_3 : [13]

$$k_1 = 10^{-3} \text{ 1/s}$$

$$k_2 = 0$$

$$k_3 = 10^{-9} \text{ 1/sk}$$

IV.3.1.2) Extrapolation des paramètres mécaniques :

➤ Vitesse de rotation :

L'extrapolation de la vitesse de rotation se fait sur la base de la vitesse périphérique, Dans l'essai précédemment décrit, la virole tournait à 16 tr. min^{-1} . Donc, d'après la formule (4.8), la vitesse périphérique égale à :

$$\text{A.N : } U_p = \pi \times 16 \times 0,3 = 15 \text{ m. min}^{-1}$$

La vitesse de rotation de l'appareil industriel ($D = 2.1 \text{ m}$) devra donc être égale à :

$$\text{A.N : } N = \frac{15}{\pi \times 2,1} = 2,3 \text{ tr. min}^{-1}$$

➤ Inclinaison du tube du sécheur :

Les essais ont montré que l'on pouvait atteindre le taux d'humidité final requis avec un taux de remplissage 'ε' égal à 0,25 pour un produit à sécher de masse volumique apparente égale à 1200 kg.m^3

Dans le sécheur pilote de l'essai précédent ($L = 2 \text{ m}$ et $D = 0.3 \text{ m}$), le temps de séchage et d'après l'équation (4.9) est égal à :

$$\text{A.N : } ts = \frac{0.3^2 \times \pi / 4 \times 2 \times 0.25 \times 1200}{255} = 0,17 \text{ h} = 10 \text{ min}$$

La taille moyenne des particules 'd_p' étant de 1,5 mm. A partir de la formule (4.10.a) le coefficient *B* sera égal à :

$$\text{A.N : } B = 5 \times (1500)^{-0.5} = 0.13 \text{ m}^{-1}$$

Par ailleurs, de l'équation (4.7) on a :

$$\text{A.N : } G = \frac{4.9 \times 4}{2.1^2 \times \pi} = 1.41 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

Et de l'équation (4.10.b) :

$$\text{A.N : } F = \frac{12000 \times 4}{2.1^2 \times \pi \times 3600} = 0.96 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

Le deuxième terme de l'équation (4.10), permettant de calculer le temps de séjour dans le sécheur industriel (longueur : $L = 14 \text{ m}$), s'élève à :

$$\text{A.N : } t = 1.97 \times \frac{0.13 \times 14 \times 1.41}{0.96} = 5.27 \text{ min}$$

L'appareil fonctionnant à co-courant. De l'équation (4.10), la pente sera égale à :

$$\text{A.N : } p = 0.23 \times \frac{14}{2.1 \times 2.3^{0.9} \times (10 + 5.27)} = 0.0474$$

➤ Hauteur et nombres des pelles :

$$\text{A.N : } hp = \frac{D}{10} = 0.21 \text{ m}$$

$$np = 8 \times D = 16.8 \text{ pelles}$$

Les résultats obtenus sont enregistrés dans le tableau suivant :

Paramètres	Résultats
ΔT_m	166,8 K
\overline{U}_a (D=0,2 m)	1374 w/m ³ .K
G	1,47 kg/m ² .s
K	319
\dot{m}_p	12000 kg/h
\dot{m}_a	17647 kg/h
D	2,06 m
\overline{U}_a (D=2,06 m)	200 W/m ³ .K
L	13,8 m
k_1	10 ⁻³ 1/s
k_2	0
k_3	10 ⁻⁹ 1/s.K
N	2,3 tr/min
t_s	10 min
t	5,27 min
p	0,0474
h_p	0,21 m
np	16,8 pelles

Tableau (4.1) : Tableau des résultats a l'état d'équilibre

IV.4) Simulation :

Pour valider le modèle, les données de l'état d'équilibre ont été obtenues à partir de la sécheuse pilote. Les paramètres et les données d'exploitation à l'équilibre sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur de l'état	Variable	Valeur de l'état
-----------	------------------	----------	------------------

	d'équilibre		d'équilibre
V_s	$3,34 \cdot 10^{-3}$ m/s	Cp_a	1,080 kJ/kg.K
\dot{m}_p	0,0708 kg/s	Cp_e	4,8 kJ/kg.K
\dot{m}_a	0,1004 kg/s	Cp_p	0,840 kJ/kg.K
$T_{a,1}$	723 K	Cp_v	2,1 kJ/kg.K
$T_{p,1}$	283 K	k_1	10^{-3} 1/s
$W_{a,1}$	0,015 kg _v /kg _{a,s}	k_2	0
$W_{p,1}$	0,02 kg _e /kg _{p,s}	k_3	10^{-9} 1/s.K
		U	1,374 kJ/s.m ³ .K
		λ	2261 kJ/kg

Tableau (4.2) : valeurs des paramètres et des variables pour simulation

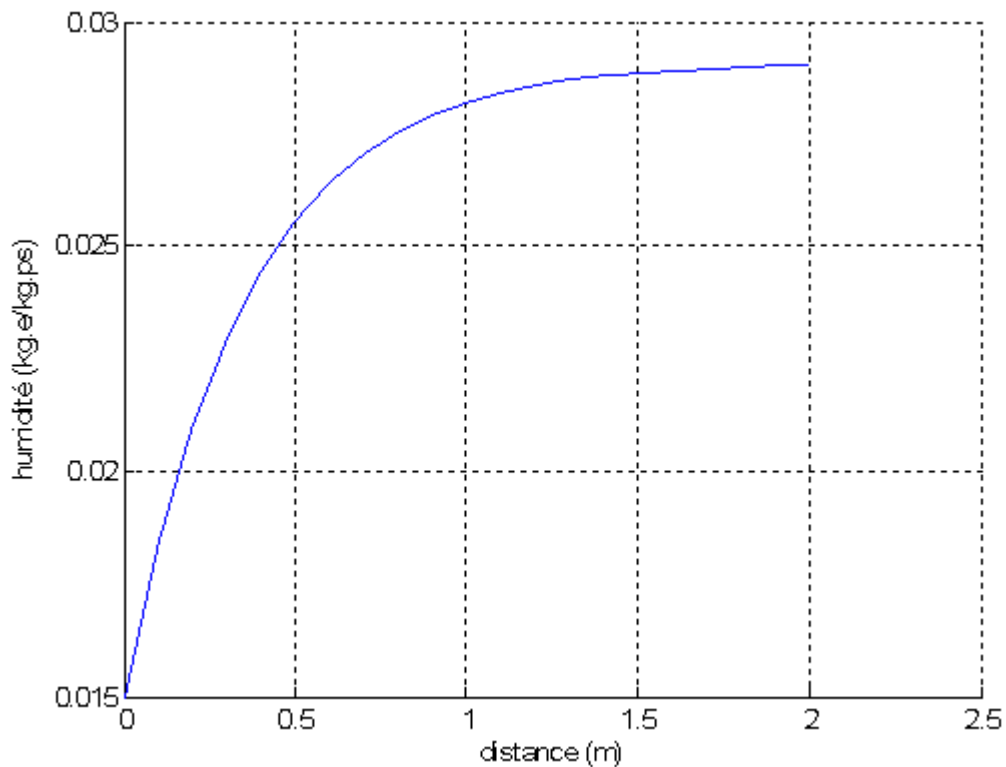


Figure (4.6) : Evolution du taux d'humidité de l'air dans le séchoir.

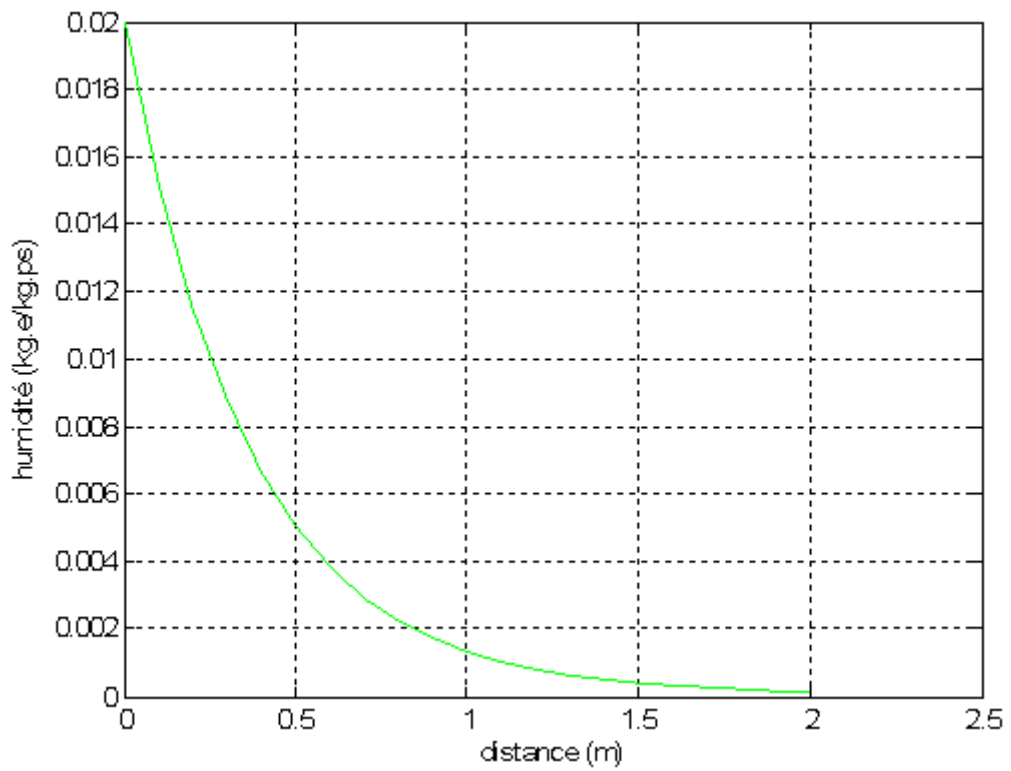


Figure (4.7) : Evolution du taux d'humidité de produit dans le séchoir.

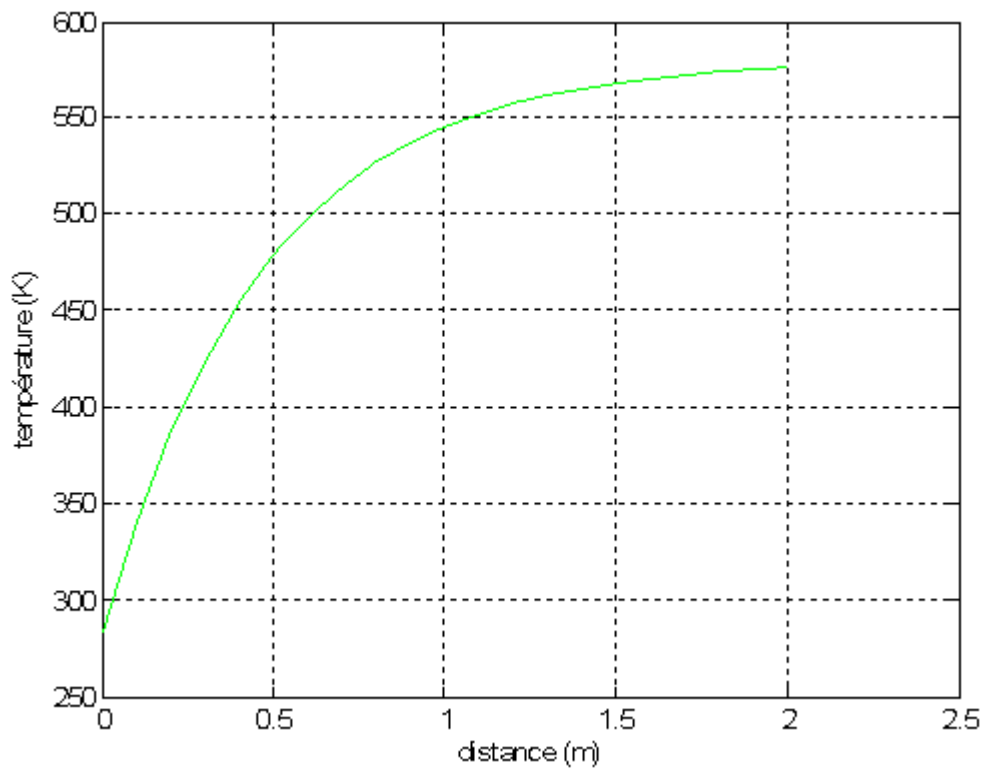


Figure (4.8) : Evolution de la température de produit dans le séchoir.

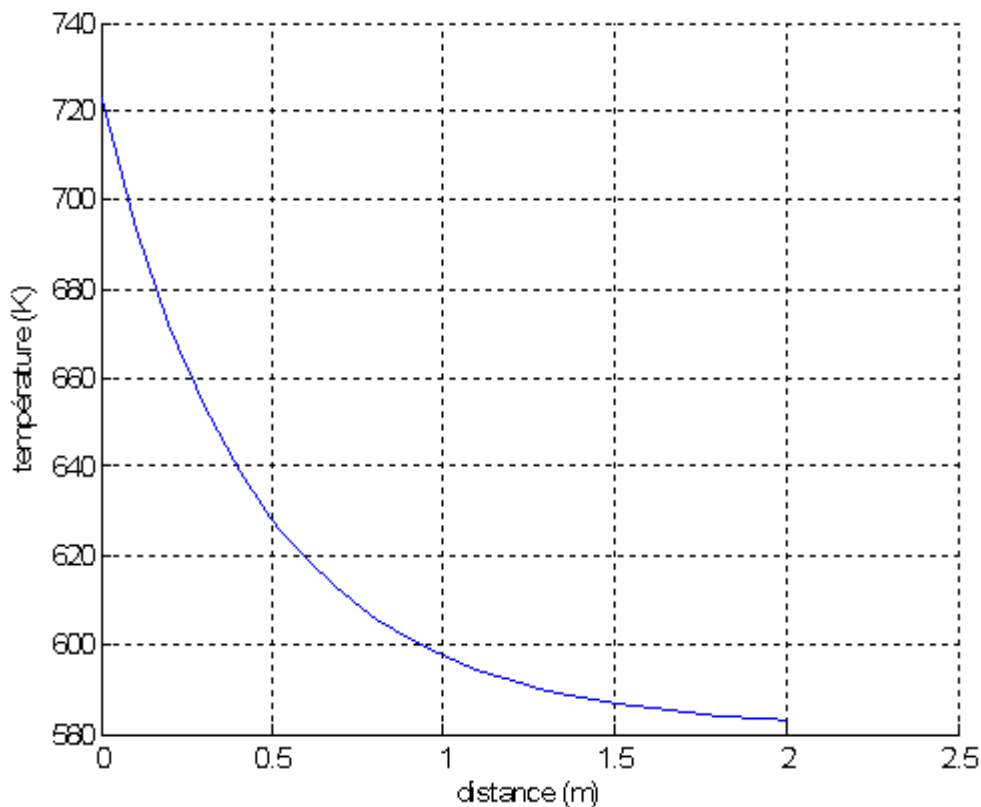


Figure (4.9) : Evolution de la température de l'air dans le séchoir.

La courbe qui montre le taux d'humidité de la matière figure (4.7) tend vers un ralenti comme il est prévisible dans le phénomène du séchage.

Le transfert d'humidité entre le produit et l'air séchant, peut être représenté par cette courbe qui décrit l'évolution de la teneur en eau du produit ou l'eau dégagée par évaporation du produit est récupérée par l'air chauffé (figure (4.6)). Cette courbe met en évidence le déroulement habituel du séchage. La première phase (figure (4.7)) étant de très courte durée relativement au temps global de séchage est non décelable.

L'allure décroissante de la courbe de séchage de Calcite présente deux phases :

1) Une première phase de séchage à allure décroissante rapide, appelée souvent « deuxième phase de séchage », correspondant à des taux d'évaporation d'humidité importantes. Pendant cette période d'un peu plus d'un demi (1/2) mètre, c'est essentiellement de l'eau libre (figure (4.10)) qui diffuse du produit vers sa surface est évaporé. Pour cette phase, seules les conditions externes (surface de contact, pression partielle du liquide, température, volatilité du liquide) ont une influence primordiale.

2) Une deuxième phase de séchage étendue dans le temps comparée à la première phase. La vitesse de séchage diminue avec le temps, car la quantité de liquide a diminué à tel point

que des zones sèches apparaissent à la surface du solide. Dans cette étape, l'évaporation de l'eau devient de plus en plus difficile. C'est ce que nous pouvons voir sur la courbe (figure (4.7)) où les points de la teneur en eau du produit se resserrent de plus en plus (faible variation) traduisant ainsi une perte d'humidité de plus en plus difficile. En plus de l'effet de la température et de l'humidité relative de l'air de séchage, l'influence de la teneur en eau de calcite, à ce stade du processus de séchage, se fait sentir beaucoup plus durant cette période. Nous dirons donc que de plus en plus que l'humidité absolue du produit diminue moins importante est la quantité d'eau évaporée, ce qui est en réalité est vrai. Les forces capillaires deviennent beaucoup plus importantes. Durant cette période, la vaporisation des eaux liées, qui est très difficile, nécessite des quantités d'énergies importantes.

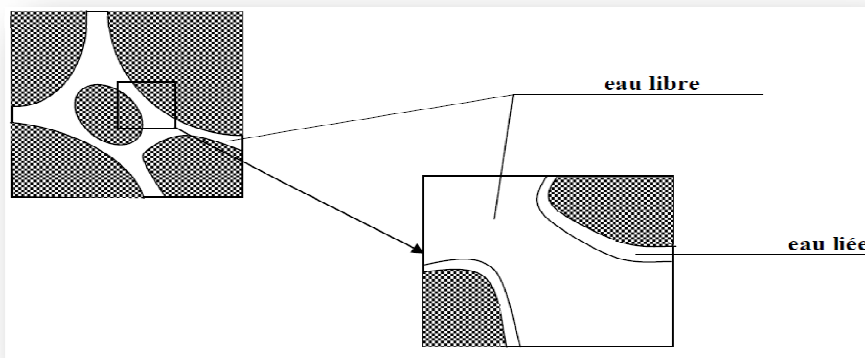


Figure (4.10): Les différents types d'eau dans le matériau

Le taux d'humidité de l'air augmente jusqu'à ce que toute l'humidité de la matière soit évaporée figure (4.6).

En ce qui concerne la variation de température de produit, la figure (4.8) montre qu'il y a une montée en température du produit durant le temps de séchage, et ce grâce à l'échange convectif entre l'air chaud et le produit humide. La figure (4.8) montre également que la température de la matière augmente dès qu'elle entre en contact avec l'air chaud.

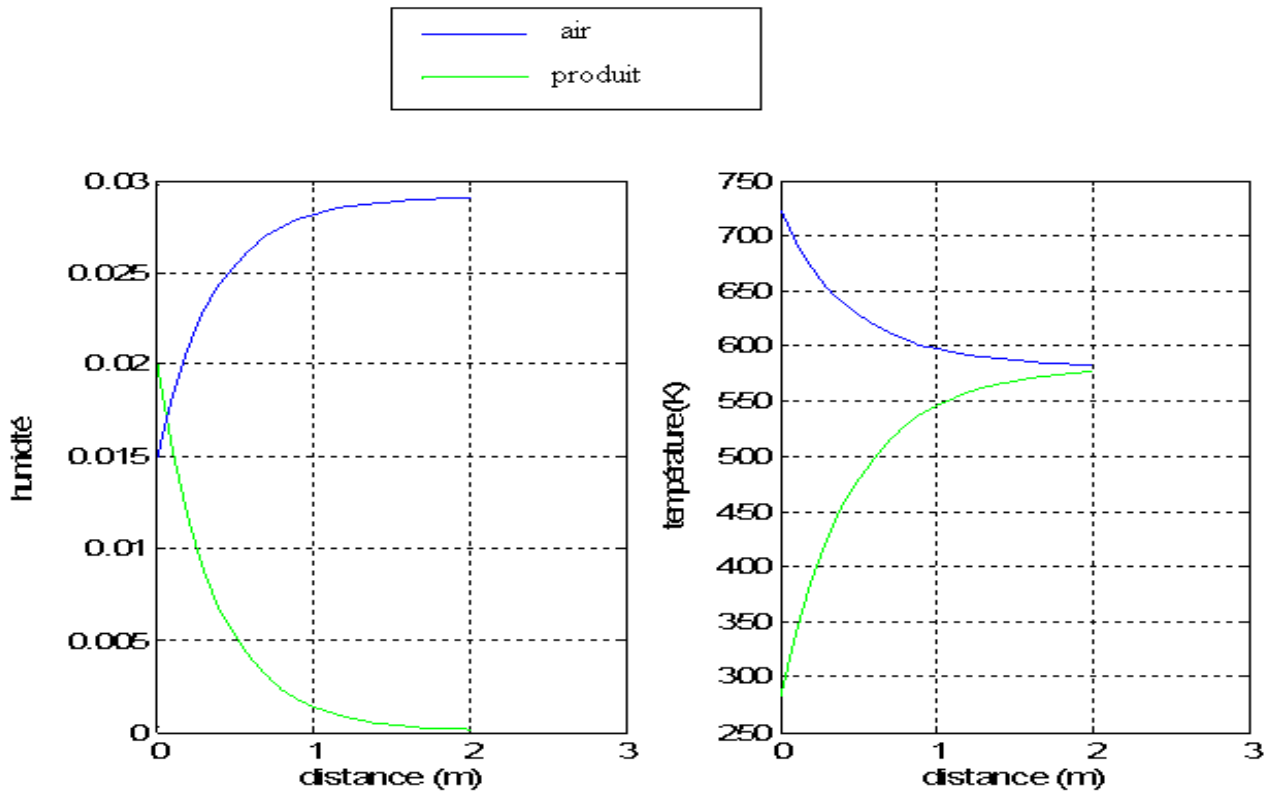


Figure (4.11) : Evolution du taux d'humidité et de la température du produit et de l'air
(Etat d'équilibre : Pente=0.047)

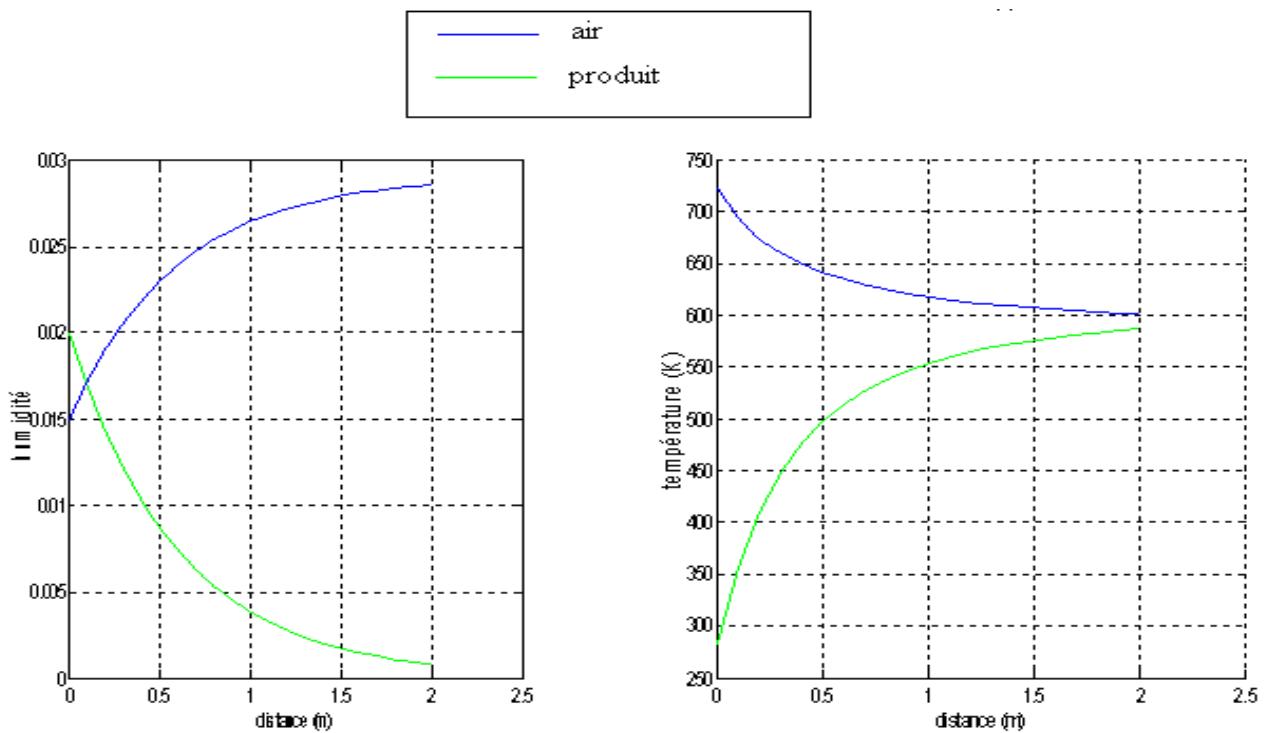


Figure (4.12) : Evolution du taux d'humidité et de la température du produit et de l'air
(pente=0.061)

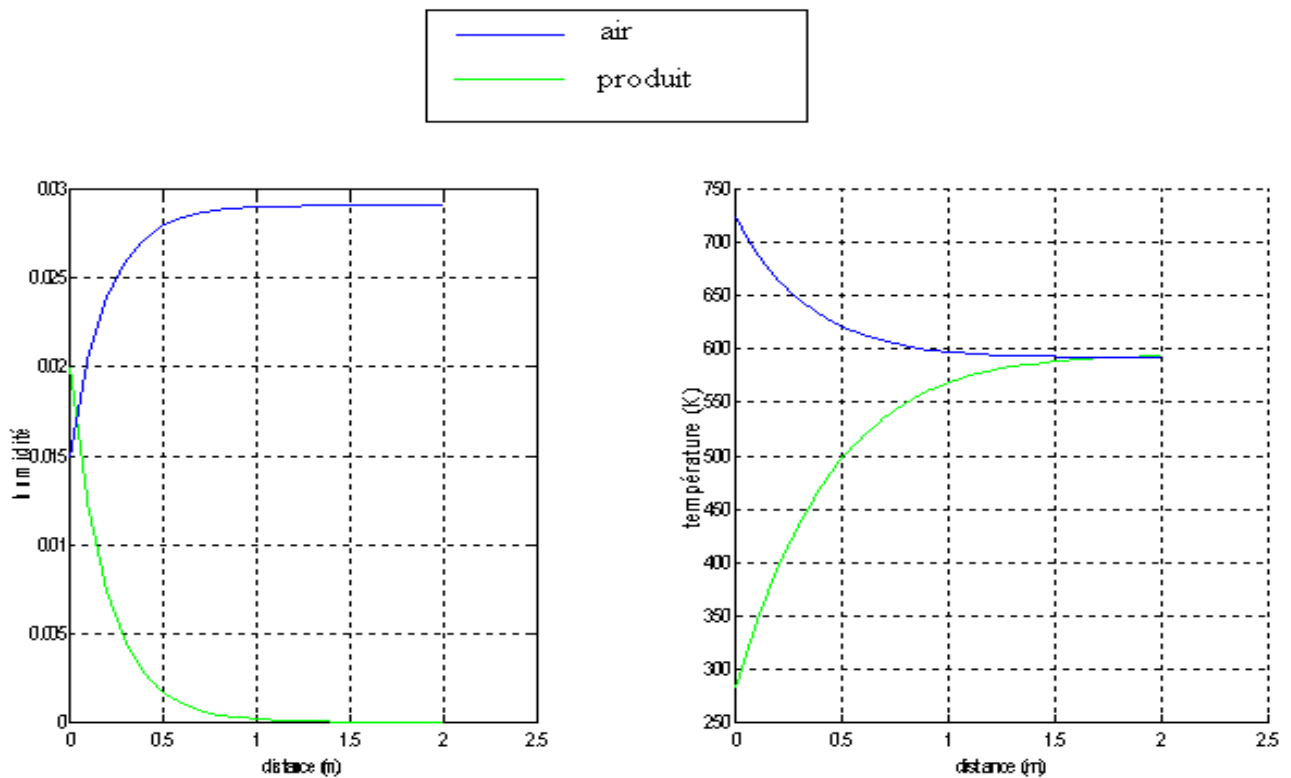


Figure (4.13) : Evolution du taux d'humidité et de la température du produit et de l'air (pente=0.033)

De la figure (4.12), on a changé la valeur de la pente de 0,047 à 0,061 donc le produit va se déplacer plus rapidement dans le cylindre, et cette conséquence a une incidence directe sur la qualité du produit à la sortie où nous notons qu'il y a de plus d'humidité dans le produit par rapport à l'état d'équilibre. Nous notons également que l'écart de température à la sortie est plus important dans cette situation

D'après la figure (4.13) où on a diminué la valeur de la pente de 0,047 à 0,033 nous observons que la calcite a séché plus rapidement par rapport à l'état d'équilibre, où l'on voit que l'humidité de produit a diminué de façon spectaculaire dans environ un mètre, et cela est dû à la baisse de la vitesse du matériel à l'intérieur de cylindre, ce qui a conduit le produit à l'exposition de l'air chaud pendant une période plus longue. Les températures dans ce cas sont presque identiques à la sortie du sécheur.

CONCLUSION

Le travail que nous avons effectué nous a permis de développer un modèle numérique qui décrit le comportement thermique d'un séchoir rotatif et détermine la cinétique de séchage des produits

Au vue de la complexité de l'approche théorique nécessitant des hypothèses simplificatrices pour arriver à une formulation mathématique du phénomène physique de séchage, le modèle obtenu ne peut donner que des résultats qui dépendent des conditions dans lesquelles il a été établi. Il n'existe pas, à notre sens, de modèle généralisé pouvant prédire la cinétique de séchage d'un produit quelconque et pour n'importe quelle condition.

Ce travail a porté sur le développement d'un modèle linéaire dont les résultats de la simulation ont montrés sa fiabilité car les courbes qui représentent l'humidité de la matière ont bien reproduit le phénomène du séchage rotatif. Ce modèle a également pris en évidence l'importance de la pente du sécheur, cette grandeur représente une valeur principale qui doit être manipulée pour agir sur les variables de sorties.

Ce travail nous a donné une idée sur le processus de séchage dans un four rotatif. Nous pouvons conclure, que le séchage dans ce type de four s'effectue en trois zones, la première de mise en régime des transferts thermiques et massiques, la deuxième où s'effectue l'évaporation d'eau et enfin une troisième où le produit cède son eau difficilement évaporable.

Les réponses du modèle linéaire obtenues sont presque similaires aux ceux du processus réel, ce qui nous a permis de conclure qu'il y a un accord assez satisfaisant entre la théorie et l'expérimentale, ce qui est, à notre sens, encourageants.

Bibliographie :

[1] www.Ulg.ac.be/sciences

LEONARD ANG2LIQUE. Université de LIEGE. Faculté des sciences appliquées. (2002)

[2] **Bimbenet J.J**

Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire

Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34

Cité par H. Madjoudj (1984)

[3] **Charreau A., Cavaille R.**

Séchage théorie et pratique

Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 2480-1; 2480-23 (1991)

[4] **Daoud Mihoubi,**

Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation.

Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application (2004)

[5] **A. Bondil, J. Hrabovsky**

Isolation thermique, tome, édition Eyrolles. Cité par N. Chalal

[6] **Lyes Bennamoun.**

Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local

Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique. (2001)

[7] **S. Whitaker. (1980)**

Heat and mass transfer in granular porous media

Advances in drying I, Hemisphere publication, pp 23-61 (1980)

[8] **Techniques de l'ingénieur**

Articles relatifs au séchage. Théorie et calculs

[9] **ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.**

Département de l'industrie et agriculture.

Industrie des énergies décarbonnées.

[10] **Québec**

Centre de recherche industriel.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.

Québec wood

[11] **Samson**

Source d'énergie de biomasse pour le chauffage en sericulture.

[12] **Kelly J J** rotary drying. *Mujumdar A S (ed) Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker, Inc., New York, 1:161-183. (1995).*

[13] **LEENA YLINIEMI**

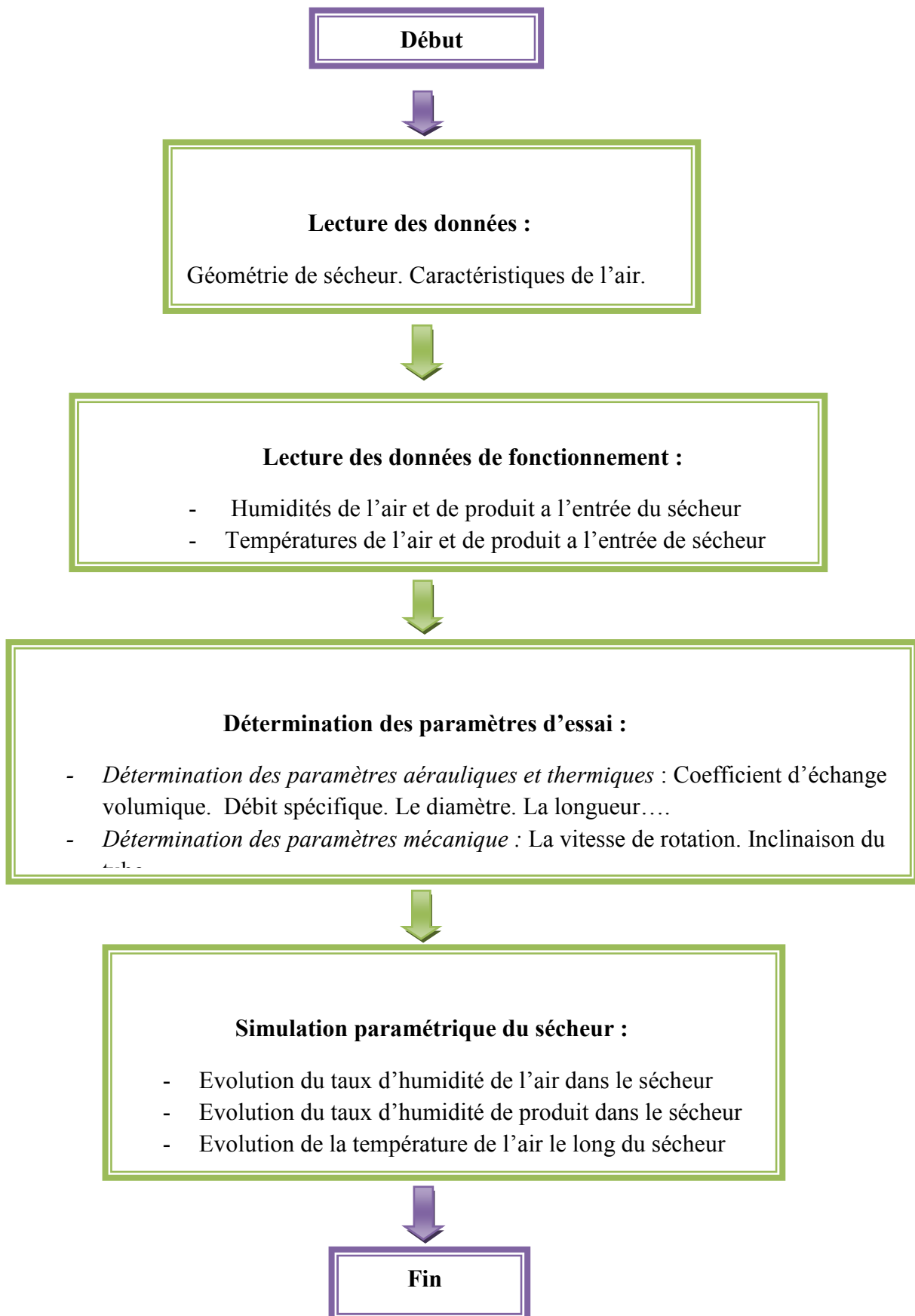
Advanced control of a rotary dryer. OULUN YLIOPISTO, OULU 1999

[14] **Sharples K, Glikin P G & Warne R** Computer simulation of rotary driers
Trans.Instn. Chem.Engrs 42:T275-T284. (1964).

ANNEXE 01 : QUELQUES DEFINITIONS

- **Température sèche** : c'est la température indiquée par une sonde nue placée dans l'air.
- **Température humide** : c'est la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche humidifiée en permanence par de l'eau pure et placée dans un courant d'air. Cette température est en général inférieure à la température sèche du fait de l'évaporation endothermique de l'eau placée sur la sonde. La température sèche et la température humide sont égales quand l'air est saturé de vapeur d'eau.
- **Enthalpie** : cette grandeur représente le *contenu énergétique* de l'air humide. L'enthalpie s'exprime en joules par kilogramme d'air sec. En fait, elle représente une variation d'énergie par rapport à un état de référence : on considère en général que l'enthalpie est nulle à 0 °C.
- **Température de rosé** : c'est la température à laquelle se condense l'humidité contenue dans l'air.
- **Humidité relative** : c'est le rapport de la pression de vapeur d'eau à une température donnée à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température.
- **Température de saturation adiabatique** : on peut considérer que les processus de séchage se déroulent en général d'une manière adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec le milieu extérieur. Dans ces conditions, les points représentatifs des caractéristiques de l'air (température et taux d'humidité) vont se déplacer sur une droite appelée *droite de saturation adiabatique*. Le point d'intersection de cette droite avec la courbe de saturation définit la *température de saturation adiabatique*. Il se trouve que, pour le mélange eau-air, la température de saturation adiabatique constitue une bonne approximation de la température humide.
- **L'isotherme d'adsorption** est la courbe d'équilibre entre le tau d'humidité du produit et l'humidité relative de l'air, pour une température donnée. Pour une même humidité relative de l'air, plus la température augmente et plus le taux d'humidité du produit en équilibre avec cet air sera faible. Cela résulte de la nature exothermique des phénomènes d'adsorption. Les isothermes d'adsorption diffèrent aussi suivant les produits.
- **Humidité** : Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.
- **Taux d'humidité** : C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité **par rapport à la matière anhydre**.
- **États de siccité** : Un **corps anhydre** est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps *sec* ou *séché* correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

ANNEXE 02: ORGANIGRAME



ANNEXE 03 : LA METHODE DE RUNGE-KUTTA 4

Les méthodes de Runge-Kutta sont des méthodes d'analyse numérique d'approximation de solutions d'équations différentielles. Elles ont été nommées ainsi en l'honneur des mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhelm Kutta lesquels élaborèrent la méthode en 1901.

Ces méthodes reposent sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, plus précise, et ainsi de suite.

Principe :

C'est un cas particulier d'usage très fréquent, noté RK4.

Considérons le problème suivant :

$$y' = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$$

La méthode RK4 est donnée par l'équation :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

où

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3)$$

L'idée est que la valeur suivante (y_{n+1}) est approchée par la somme de la valeur actuelle (y_n) et du produit de la taille de l'intervalle (h) par la pente estimée. La pente est obtenue par une moyenne pondérée de pentes :

- k_1 est la pente au début de l'intervalle ;
- k_2 est la pente au milieu de l'intervalle, en utilisant la pente k_1 pour calculer la valeur de y au point $t_n + h/2$ par le biais de la méthode d'Euler ;
- k_3 est de nouveau la pente au milieu de l'intervalle, mais obtenue cette fois en utilisant la pente k_2 pour calculer y ;
- k_4 est la pente à la fin de l'intervalle, avec la valeur de y calculée en utilisant k_3 .

Dans la moyenne des quatre pentes, un poids plus grand est donné aux pentes au point milieu.

$$\text{pente} = \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6}.$$

La méthode RK4 est une méthode d'ordre 4, ce qui signifie que l'erreur commise à chaque étape est de l'ordre de h^5 , alors que l'erreur totale accumulée est de l'ordre de h^4 .

Ces formules sont aussi valables pour des fonctions à valeurs vectorielles.