الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
National Higher School of Advanced Technologies

Département du second cycle

Mémoire de Master

En vue l'obtention du diplôme de master

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Traction électrique**

Thème :

Étude Technologique des Systèmes de Séchage

Réalisé par : **YEDDOU Racha**

Encadrée par : **M.TEFFAHI Abdelkader**

2024/2025

Dédicace

À ma chère mère ,
Source infinie d’amour, de force et de prières.
Ce travail est le fruit de tes sacrifices et de ton dévouement. Je te le dédie avec tout mon cœur.

À mon père ,
Merci pour ta patience, ton soutien discret et ta confiance inébranlable.

À mon frère Moncef ,
Pour tes encouragements et ton regard toujours bienveillant. Merci d’avoir cru en moi.

À mon frère Abdou ,
Pour ta présence, tes mots simples mais puissants, et ton soutien dans les moments clés.

À toutes les personnes qui m’ont aidée, soutenue ou inspirée de près ou de loin ,
Je vous adresse ma profonde gratitude.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a donné la force, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur TEFFAHI Abdelkader, mon encadrant, pour son accompagnement constant, ses conseils éclairés, sa disponibilité et sa confiance tout au long de ce projet. Sa rigueur et son engagement ont été d'un grand soutien dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des enseignants et membres du personnel de l'université pour les savoirs transmis et leur encadrement tout au long de mon parcours académique.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à ma famille et à toutes les personnes qui m'ont soutenue, encouragée et motivée durant cette période importante de ma vie.

Résumé

Ce mémoire s'intéresse à l'étude technologique des systèmes de séchage industriels. Il présente les principes généraux du séchage, les types, les méthodes appliquées et les mécanismes de transfert (conduction, convection, rayonnement). Une attention est portée aux caractéristiques de l'air de séchage et à leur impact sur la cinétique du processus.
Il analyse aussi les principales technologies de séchoirs industriels, ainsi que l'apport de l'Industrie 4.0 en matière d'automatisation et d'optimisation énergétique.

Abstract

This thesis explores the technological study of industrial drying systems. It presents general principles, types, drying methods, and transfer mechanisms (conduction, convection, radiation). It also highlights the influence of drying air characteristics on process kinetics.
The work analyzes key industrial dryer technologies and the role of Industry 4.0 in automation and energy optimization.

ملخص

يتناول هذا البحث دراسة تكنولوجية للأنظمة الصناعية الخاصة بالتجفيف، حيث يعرض المبادئ العامة، أنواع وطرق التجفيف، وآليات انتقال الحرارة والكتلة (التوصيل، الحمل، الإشعاع). كما يسلط الضوء على خصائص هواء التجفيف وتأثيرها على سرعة العملية

يتضمن أيضًا تحليلًا لأهم أنواع المجففات الصناعية، ودور تقنيات الصناعة 4.0 في الأتمتة وتحسين استهلاك الطاقة.

Tableau des matières

Introduction générale 2

I. Généralités sur le séchage……..3

I.1 Introduction **……....**3

I.2 Historique **……..**4

I.3 Le principe du séchage**……...**5

I.4 Types de séchage…….…..5

I.4.1 Séchage naturel……..…..5

I.4.2 Séchage artificiel……..…5

I.5 Les différentes méthodes de séchage…….……..5

I.5.1 Séchage mécanique…….....5

I.5.2 Séchage chimique…… ;;……...……..6

I.5.3 Séchage thermique……...…...6

I.5.3.1 Séchage par ébullition …….…...6

I.5.3.2 Séchage par entraînement…….…...7

I.6 Les processus de séchage……...……..…..8

I.6.1 Par conduction…….....8

I.6.2 Par convection……..…9

I.6.3 Par les rayonnements……...…9

I.7 Caractéristiques de l'air de séchage…….10

I.7.1 Humidité……..…..10

I.7.2 Humidité absolue……..….10

I.7.3 Humidité relative……..….10

I.7.4 Température sèche ……10

I.7.5 Température humide de gaz …….….11

I.7.6 Caractéristiques des solides humides…….11

I.8 Cinétique du séchage……...11

I.8.1 Temps de séchage……..…11

I.8.2 Période de séchage…….11

I.9 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage…….....13

I.9.1 Influence de la température de l'air……13

I.9.2 Influence de la vitesse de l'air……..….13
I.9.3 Influence de l'humidité de l'air……..13
I.10 Avantages et inconvénients du système de séchage……..14

II. Les systèmes de séchage industriel 14
II.1 Classification des séchoirs industriels…… …14
II.2 Types de séchoirs industriels …… 15
II.2.1 Séchoir à lit fluidise……..15
II.2.2 Séchoir à pulvérisation…….……17
II.2.3 Séchoir à flot…….18
II.2.4 Séchoir à lots…….20
II.2.5 Séchoir rotatif……..….20
II.3 Consommation énergétique et rendement……..……21
II.4 Critères choix de type de séchoir……22
II.5 Innovations et contrôle intelligent dans les systèmes de séchage……...…23
II.6 Apport de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de séchage…….…24

Conclusion générale 25
Bibliographie 27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre séchage naturel et artificiel……..…..5

Tableau 2 : Tableau comparatif de la consommation énergétique des types de séchoirs…...22

Table des figures

Figure 1 : Les débuts du séchage industriel……3

Figure 2 : schéma représente le séchage mécanique……..……...5

Figure 3 : schéma représente le séchage chimique…….…...6

Figure 4 : Schéma représente le séchage par ébullition……..….7

Figure 5 : Schéma représente le séchage par entrainement…….….....8

Figure 6 : Schéma représente le séchage par conduction……....9

Figure 7 : schéma représente le séchage par convection forcée…….....9

Figure 8 : schéma représente le séchage par rayonnement……..…….10

Figure 9 : Appareillage utilisé dans le séchoir à lit fluidisé…….……..16

Figure 10 : Schéma su séchoir à pulvérisation…….…10

Figure 11 : Schéma du séchoir à flot……....19

Figure 12 : Schéma d'un séchoir à lots…….…20

Figure 13 : Schéma d'un séchoir rotatif……21

Liste des abréviations

I4.0 : Industrie 4.0

IA : Intelligence Artificielle

IoT : Internet des Objets

SCADA : Supervision, Contrôle et Acquisition de Données

API : Automate Programmable Industriel

IHM : Interface Homme-Machine

IIoT : Internet Industriel des Objets

Introduction générale

Introduction générale

Le séchage constitue une étape cruciale dans de nombreux processus industriels, notamment dans les secteurs agroalimentaire, pharmaceutique, chimique et textile. Il vise à réduire ou éliminer l'humidité présente dans les produits, afin d'améliorer leur conservation, faciliter leur manipulation ou préparer des étapes ultérieures de transformation.

Ce processus repose sur des mécanismes complexes de transfert de chaleur et de masse, influencés par divers paramètres tels que la température, l'humidité relative de l'air, la vitesse de circulation de l'air et les propriétés physico-chimiques du produit à sécher.

La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour garantir l'efficacité du séchage, la qualité du produit final et l'optimisation de la consommation énergétique. Dans un contexte industriel où la compétitivité et la durabilité sont des enjeux majeurs, le choix de la technologie de séchage appropriée revêt une importance capitale.

Les systèmes de séchage industriels doivent répondre à des exigences spécifiques en termes de capacité, de flexibilité, de consommation énergétique et de respect des normes environnementales.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les différentes technologies industrielles de séchage, d'analyser leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites, et d'identifier les critères de choix pertinents pour leur mise en œuvre dans un contexte industriel donné.

Il s'agira également d'examiner les innovations récentes dans le domaine, notamment en matière de contrôle intelligent et d'optimisation énergétique des procédés de séchage.

- La première partie de ce travail sera consacrée aux généralités sur le séchage, en abordant les principes fondamentaux, les différentes méthodes et les paramètres influençant le processus.
- La seconde partie portera sur les systèmes de séchage industriels, en présentant les types de séchoirs, leur classification, les critères de sélection et les avancées technologiques récentes.

À travers cette étude, nous visons à fournir une compréhension approfondie des technologies de séchage industriel et à proposer des pistes d'amélioration pour une utilisation plus efficiente et durable de ces systèmes.

I. Généralités sur le séchage

I.1 Introduction

Le procédé de séchage industriel représente une opération incontournable dans de nombreux domaines de production. Il a pour but d'éliminer l'humidité contenue dans les matières premières ou produits finis afin d'en assurer la stabilité, de prolonger leur durée de conservation et de faciliter leur stockage ou manipulation. Diverses technologies sont employées à cet effet, telles que le séchage par air chaud, la lyophilisation, le vide ou encore les micro-ondes. Le choix de la méthode dépend essentiellement de la nature du produit traité, des exigences de qualité ainsi que des contraintes énergétiques spécifiques à chaque industrie. [1]

Sur le plan technique, le séchage repose sur des échanges thermiques et massiques complexes. Ces transferts sont influencés par plusieurs facteurs, notamment la température ambiante, l'humidité, la vitesse de l'air circulant, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du matériau à sécher. Une maîtrise rigoureuse de ces paramètres est essentielle pour atteindre une efficacité optimale du processus tout en préservant la qualité du produit et en minimisant la consommation énergétique.

I.2 Historique

Le séchage est une technique très ancienne, utilisée depuis des millénaires par les civilisations humaines pour conserver les produits alimentaires à l'aide du soleil et du vent. Ce procédé artisanal a progressivement évolué avec le temps, notamment durant la révolution industrielle, où l'introduction de sources d'énergie modernes et de machines a permis une automatisation du processus. Depuis, le séchage a trouvé sa place dans l'industrie, où il continue d'être amélioré grâce aux connaissances scientifiques et aux besoins croissants en productivité [2].

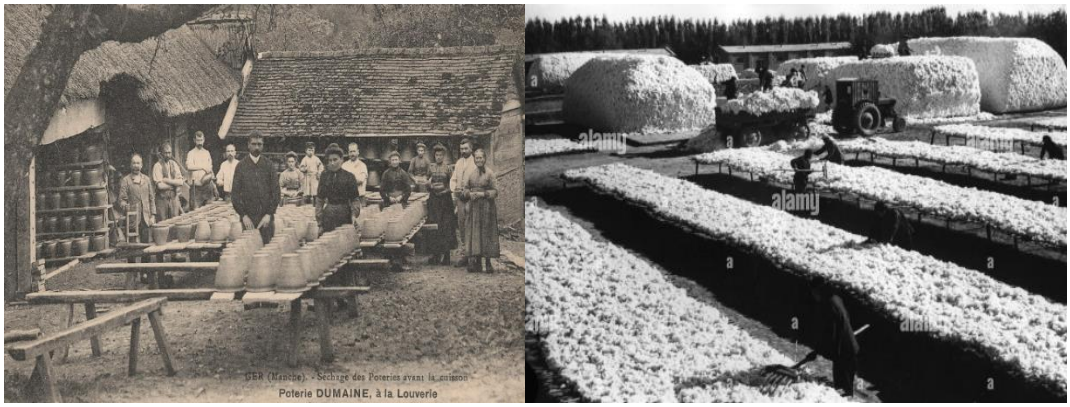


Figure 1 : Les débuts du séchage industriel.

I.3 Le principe de séchage

Le processus de séchage repose sur deux phénomènes essentiels : le transfert thermique, qui consiste à fournir de l'énergie calorifique depuis l'extérieur vers le liquide contenu dans le matériau à sécher, et le transfert de matière, qui permet à l'humidité interne de migrer vers la surface avant de se transformer en vapeur. L'efficacité du séchage dépend fortement de l'interaction entre ces deux mécanismes. [3]

I.4 Types de séchage

I.4.1 Séchage naturel

Le séchage naturel est l'une des plus anciennes méthodes utilisées pour éliminer l'humidité. Il s'effectue généralement en plein air. Malgré sa simplicité, il est encore utilisé dans certains cas pour sécher des matériaux ne nécessitant pas de conditions strictes, comme les briques. Cependant, ce type de séchage présente plusieurs inconvénients, notamment :

- l'exposition des matériaux à des conditions climatiques instables,
- Une langue durée de séchage,
- la difficulté à contrôler le taux d'humidité final,
- L'attaque par les champignons et les insectes

Un exemple de ces limites est le séchage des tissus en coton, où l'exposition directe au soleil ou aux vents changeants peut altérer la couleur du tissu, provoquer son rétrécissement, voire endommager les fibres fines, ce qui nuit à la qualité du produit. Pour toutes ces raisons, les industries se sont tournées vers des techniques de séchage industriel, afin d'obtenir des résultats plus précis et de meilleure qualité.

I.4.2 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 processus et d'atteindre le taux d'humidité souhaité des matériaux. Les méthodes de séchage les plus couramment utilisées dans l'industrie comprennent notamment :

- le séchage à l'air chaud (ou séchage traditionnel),
- le séchage à la vapeur surchauffée,

- le séchage par pompe à chaleur,
- le séchage en chambre chaude,
- et le séchage sous vide.

Type de séchage	Source d'énergie	Avantages	Inconvénients
Naturel	Soleil, vent	Ecologique, faible cout	Lent, dépend du climat
Artificiel	Energie thermique	Rapide, contrôle	Cout élevé, énergie nécessaire

Tableau 1 : Comparaison entre séchage naturel et artificiel.

I.5 Différentes méthodes de séchage

I.5.1 Séchage mécanique

L'élimination du liquide peut se faire par des forces purement mécaniques, telles que le pressage ou la centrifugation. Certains procédés de pré-concentration ou de pré-séchage peuvent être réalisés sans transfert thermique, uniquement par transfert de quantité de mouvement. [4]

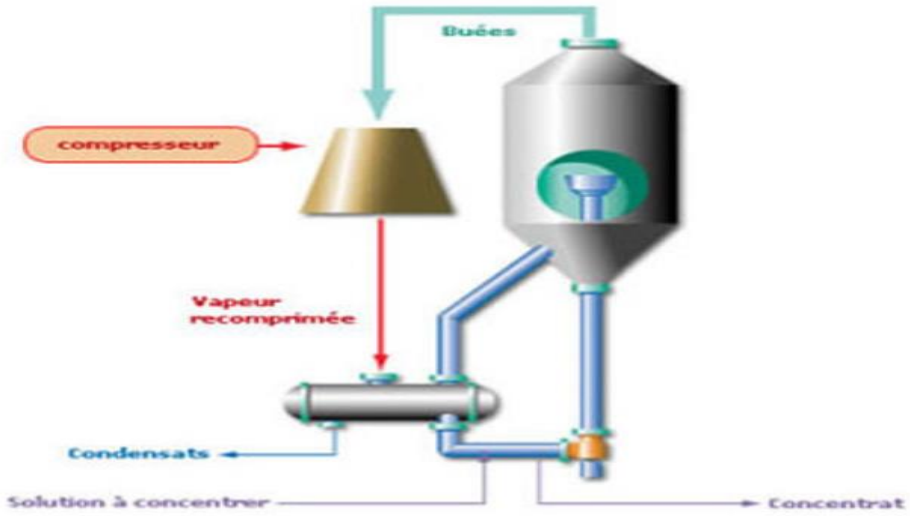


Figure 2 : schéma représente le séchage mécanique.

I.5.2 Séchage chimique

Cette méthode de séchage repose sur l'utilisation de substances déshydratantes (substances osmotiques), telles que le chlorure de calcium, afin d'absorber l'eau contenue dans le matériau à sécher. [4]

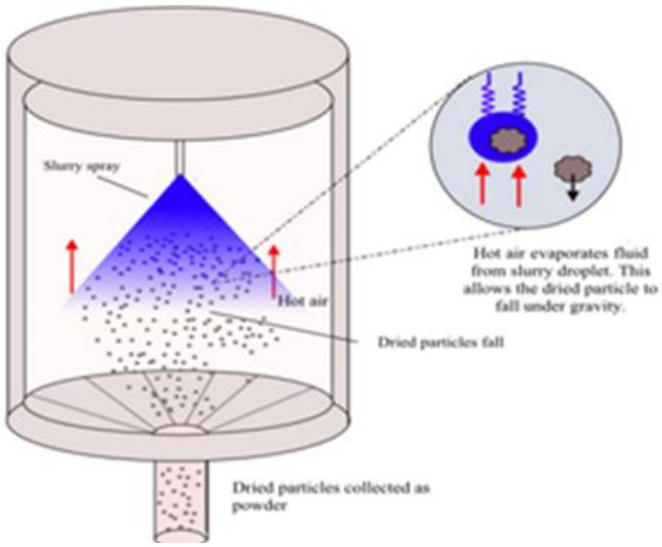


Figure 3 : schéma représente le séchage chimique.

I.5.3 Séchage thermique

Ce procédé repose principalement sur le déplacement de la masse, où l'eau doit d'abord être activée grâce à une certaine quantité d'énergie fournie par un flux thermique. Ce transfert s'effectue en deux étapes distinctes : une phase à la surface du matériau et une autre à l'intérieur de celui-ci.

- 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 :

I.5.3.1 Séchage par ébullition

L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation, cet apport est effectué :

- Par conduction à partir d'une surface chauffée au contact de produit.
- Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de microondes ou par un chauffage diélectrique.
- Par convection à partir de vapeur, d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [4]

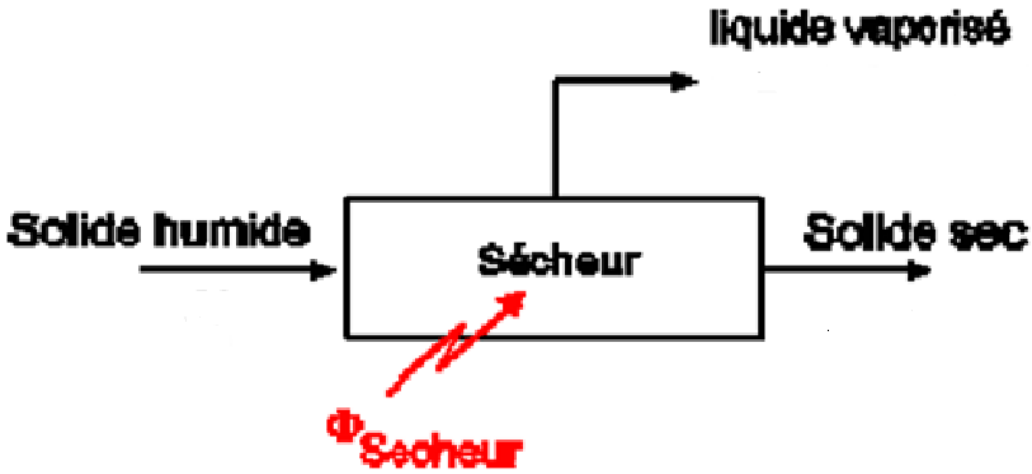


Figure 4 : Schéma représente le séchage par ébullition.

I.5.3.2 Séchage par entrainement

Quand un matériau humide est exposé à un flux d'air (ou un autre gaz) suffisamment chaud et sec, une différence de température et de pression partielle de vapeur d'eau se crée spontanément entre le matériau et l'air. Cette situation entraîne un transfert de chaleur de l'air vers le matériau dû à ce gradient de température, tandis que l'eau s'évapore du matériau vers l'air en raison de la différence de concentration en vapeur d'eau. [4]

Le séchage par entraînement (par convection) est généralement plus efficace que le séchage par ébullition.

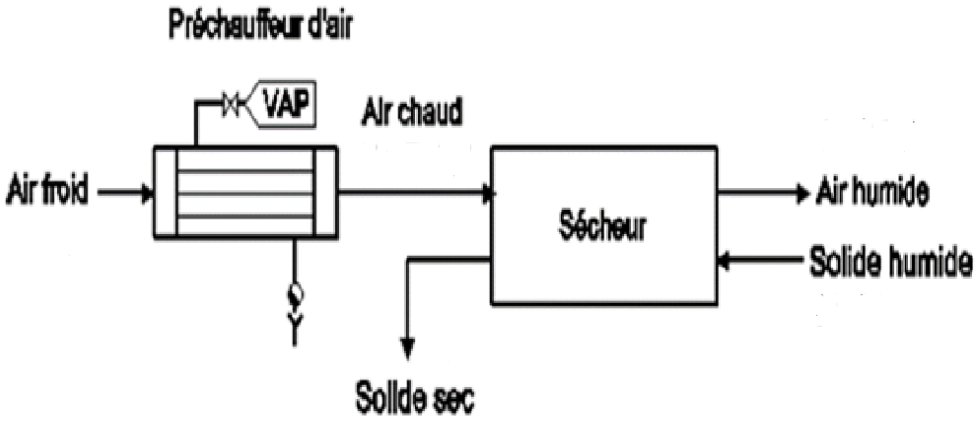


Figure 5 : Schéma représente le séchage par entrainement.

I.6 Les processus de séchage

La vaporisation du solvant continu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, La vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur.

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux.

I.6.1 Par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage n'est pas fournie par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais plutôt par un contact direct entre le produit et une surface chauffée. Les vapeurs dégagées pendant le séchage sont soit aspirées (comme dans le cas du séchage par ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit reste faible par rapport à celui requis pour un séchage convectif. Plus la différence de température entre la surface chauffée et le produit est faible, plus la surface d'échange thermique nécessaire sera grande. [5]

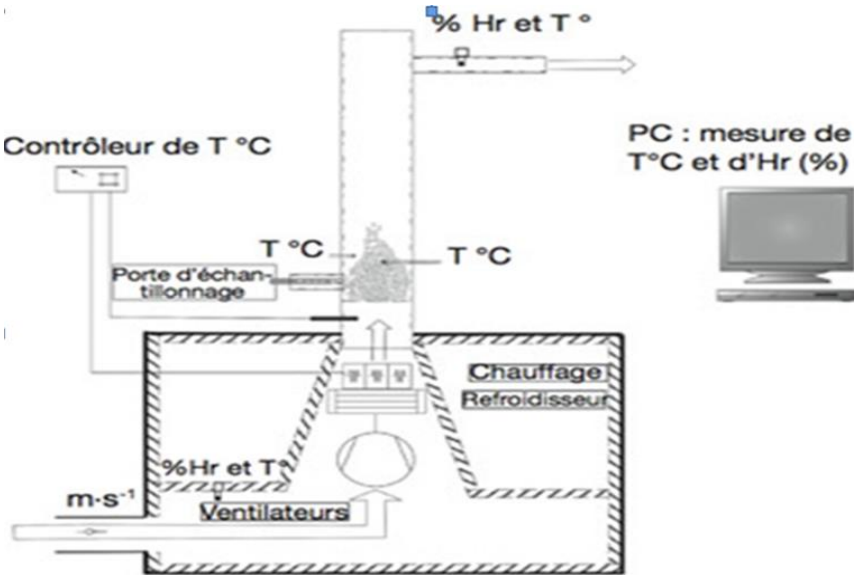


Figure 6 : Schéma représente le séchage par conduction.

I.6.2 Par convection

C'est la méthode de séchage la plus répandue dans l'industrie chimique. Le transfert thermique se fait par contact direct entre le solide humide et le gaz porteur de chaleur. Cette méthode est probablement la plus courante pour le transfert d'énergie.

Elle consiste à faire circuler un gaz (généralement de l'air) en régime turbulent autour du matériau à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques. [5]

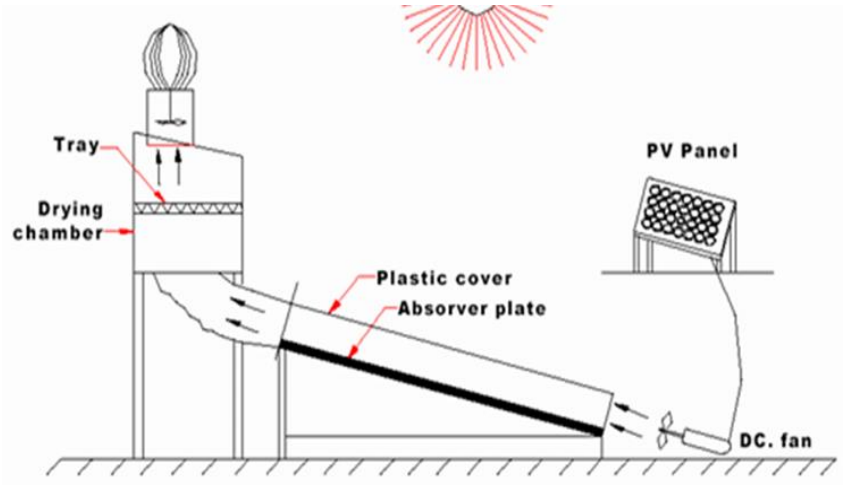


Figure 7 : schéma représente le séchage par convection forcée.

I.6.3 Par les rayonnements

Ce mode de séchage repose sur le transfert de l'énergie thermique nécessaire à l'évaporation par rayonnement. Il est particulièrement adapté au séchage de matériaux non thermosensibles.

Parmi les sources de rayonnement utilisées figurent les émetteurs thermiques fonctionnant au gaz combustible, les émetteurs électriques, ainsi que l'énergie solaire. Ce procédé se distingue par une grande efficacité dans l'élimination de l'humidité, notamment pour les produits capables de supporter des températures relativement élevées sans se détériorer.

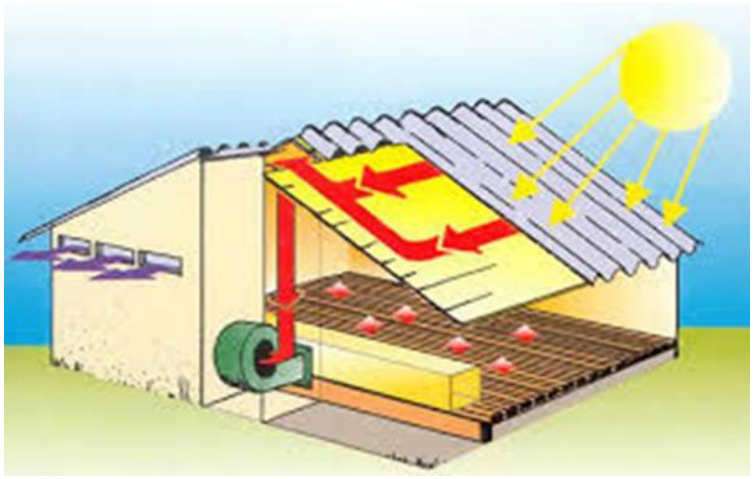


Figure 8 : schéma représente le séchage par rayonnement.

I.7 Caractéristiques de l'air de séchage

I.7.1 Humidité

Humidité, ce terme désigne le liquide continu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

I.7.2 Humidité absolue

On appelle humidité absolue ou teneur une humidité, la masse d'humidité, mélangée à un kilogramme de gaz sec.

I.7.3 Humidité relative

L'humidité relative ou degrés hygrométrique et le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

I.7.4 Température sèche

La température sèche d'un gaz est la température indiquée par un thermomètre placé dans le courant gazeux en mouvement, représentant la température du gaz au sens courant.

I.7.5 Température humide de gaz

La température humide, également appelée température de bulbe humide, correspond à la température mesurée par une sonde dont l'extrémité est enveloppée d'une mèche constamment humidifiée avec de l'eau pure, et placée dans un courant gazeux. Il est important de noter que cette température est celle d'un solide humide pendant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement.

I.7.6 Caractéristiques des solides humides

Le solide est recouvert d'un film d'eau qui adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Autour de ce solide, une couche limite est formée par de l'air saturé en vapeur d'eau, c'est-à-dire de l'air dont la pression partielle de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température.

I.8 Cinétique du séchage

I.8.1 Temps de séchage

Le temps de séchage correspond à la période nécessaire pour réduire l'humidité d'un matériau jusqu'à atteindre un niveau spécifique, garantissant ainsi sa stabilité et sa qualité. Cette durée est influencée par divers facteurs, notamment :

- Les propriétés du matériau : Sa composition chimique, sa porosité et sa capacité à retenir l'eau jouent un rôle crucial.
- L'épaisseur du produit : Plus un matériau est épais, plus l'humidité mettra de temps à migrer de l'intérieur vers la surface, prolongeant ainsi le séchage.
- Les conditions de l'air ambiant : Une température élevée et une faible humidité relative accélèrent l'évaporation de l'eau.
- La circulation de l'air : Un flux d'air constant et rapide facilite l'élimination de la vapeur d'eau à la surface du matériau, améliorant l'efficacité du séchage. [7]

I.8.2 Période de séchage

La période de séchage industriel fait référence aux différentes phases par lesquelles un produit passe pendant le processus de séchage. Ces phases sont généralement classées comme suit :

Phase 0 : période de mise en température

Phase 1 : période à allure constante

Phase 2 : période de ralentissement

Phase 0 : période de mise en température

Il y a un échange de chaleur et de matière entre l'air chaud et le produit. L'eau contenue dans le produit s'évapore et est emportée sous forme de vapeur. Pour permettre cette évaporation, il faut fournir une quantité équivalente d'énergie appelée chaleur de vaporisation.
Si l'air apporte plus de chaleur que nécessaire, le produit se réchauffe davantage jusqu'à atteindre un équilibre thermique. En revanche, si la température de surface du produit devient trop élevée, un manque d'énergie peut apparaître, ce qui provoque un refroidissement du produit.

La période de mise en température est courte et n'apparait variablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante. Ce qui explique le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase.

Phase 1 : période à allure constante

Cette phase d'évaporation continue tant que l'eau liquide peut facilement se déplacer à travers les pores du produit vers sa surface, plus vite que la vitesse d'évaporation elle-même. Plus l'air de séchage est sec (avec un faible taux d'humidité), plus cette phase devient courte. Quand la vitesse de l'air de séchage augmente, les échanges de chaleur et de matière deviennent plus efficaces. La surface de contact entre l'air et le produit s'agrandit aussi, par exemple quand on divise le produit en morceaux plus petits. De plus, une température de séchage plus élevée favorise ce processus.

Phase 2 : période de ralentissement

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Plusieurs phénomènes et propriétés sont à prendre en compte disparition de l'eau libre en surface du produit, ce phénomène correspondant au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée au contenues dans le

produit s'effectue consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit. Quand l'épaisseur du produit augmente, la vapeur d'eau doit parcourir une plus grande distance pour atteindre la surface. Cela ralentit le séchage, car le trajet plus long rend l'évacuation de l'humidité plus difficile. C'est en grande partie ce qui explique la baisse de la vitesse de séchage.

Cette phase dépend essentiellement des propriétés du produit et de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

I.9 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

I.9.1 Influence de la température de l'air

Lorsque la température de l'air utilisé pour le séchage augmente, la vitesse d'évaporation de l'eau contenue dans le produit tend à s'accélérer de manière notable. Cette accélération s'explique par une augmentation de l'énergie thermique transmise au matériau, qui dépend directement de la température de l'air. En parallèle, la température interne du produit monte elle aussi, ce qui favorise davantage le déplacement de l'humidité vers la surface. Ainsi, plus l'air est chaud, plus la diffusion de l'eau à l'intérieur du produit devient rapide et efficace. [8]

I.9.2 Influence de la vitesse de l'air

L'augmentation de la vitesse de l'air contribue à accélérer le séchage, en particulier durant les premières phases du processus, où l'humidité se trouve principalement à la surface du produit. Toutefois, lorsque l'élimination de l'eau devient limitée par sa diffusion interne au sein du matériau, l'impact de la vitesse de l'air diminue considérablement et devient presque négligeable. [8]

I.9.3 Influence de l'humidité de l'air

Le taux d'humidité présent dans l'air ambiant influence fortement la vitesse de séchage de certains matériaux. Cet effet est particulièrement marqué durant les premières étapes du séchage. Toutefois, à mesure que la température de l'air augmente, l'influence de cette humidité ambiante tend à diminuer progressivement, tout comme c'est le cas avec la vitesse de l'air.

I.10 Avantages et inconvénients de système de séchage

Le système de séchage présente plusieurs avantages importants, notamment :

- Stockage plus sûr : Le séchage réduit le taux d'humidité des produits, ce qui permet de les conserver plus longtemps de manière sécurisée.
- Réduction des pertes : En limitant les risques de détérioration, le séchage aide à diminuer les pertes de produits.
- Amélioration de la productivité et de la qualité : Le séchage permet de maintenir la qualité des produits tout en augmentant la production.
- Augmentation de la valeur et des profits : Un produit bien conservé a une valeur marchande plus élevée, ce qui entraîne de meilleurs bénéfices.

Les inconvénients liés au système de séchage :

- Coût de production élevé : Le séchage nécessite des équipements spécifiques et des ressources importantes, ce qui augmente les coûts.
- Consommation énergétique importante : Cette technique demande une grande quantité d'énergie, surtout dans les processus industriels.
- Risques liés à une mauvaise stérilisation : Une stérilisation incomplète ou mal réalisée pendant le séchage peut entraîner des dangers pour la sécurité du produit et du consommateur.

II. Les systèmes de séchage industriels

II.1 Classification des séchoirs industriels :

La classification des séchoirs industriels repose sur plusieurs critères techniques permettant de sélectionner l'équipement le plus adapté selon la nature du produit, le mode de transfert thermique, le fonctionnement et la configuration de l'installation. On distingue notamment les séchoirs fonctionnant par convection, conduction, rayonnement ou micro-ondes, chacun offrant des avantages spécifiques en termes de rendement énergétique et de qualité du produit final. Les équipements peuvent être de type continu ou discontinu, fonctionner sous vide ou à pression atmosphérique, et prendre différentes formes : séchoirs à tambour, à lit fluidisé, à bande, ou à pulvérisation. Cette diversité technologique permet d'optimiser le processus de séchage en

fonction des caractéristiques physico-chimiques du produit. Les séchoirs industriels sont classés selon :

A. Propriétés physiques du produit à sécher :

Le choix du séchoir dépend fortement des propriétés physiques de la matière, telles que sa taille, sa forme, sa teneur en humidité ou sa sensibilité à la chaleur.

B. Mode de transfert de chaleur :

Si la chaleur est transmise par un courant d'air chaud (sans contact direct), on parle de séchage convectif. Si la chaleur est transmise par contact direct avec une surface chaude, il s'agit de séchage conductif.

C. Plage de température de fonctionnement :

Les séchoirs peuvent fonctionner à haute température (au-delà de 100 °C), comme dans le cas du séchage du bois, ou à basse température (inférieure à 100 °C) pour les produits sensibles à la chaleur.

D. Mode de répartition des produits à sécher :

Séchage en couche mince : utilisé pour les fruits, les légumes et les textiles. Les produits sont étalés en fine couche et séchés rapidement grâce à un flux d'air chaud uniforme. **Séchage en couche épaisse :** adapté aux produits volumineux comme les fourrages, les céréales ou le café. L'air chaud traverse une masse de produits posée sur une grille perforée, assurant un séchage progressif.

II.2 Types de séchoir industriel

II.2.1 Séchoir à lit fluidise

Le sécheur à lit fluidisé est un équipement industriel conçu pour sécher efficacement des matériaux granulaires en les maintenant en suspension dans un flux d'air chaud. Il est composé de plusieurs éléments clés :

- Un compresseur qui génère le flux d'air nécessaire au processus.
- Un système de chauffage qui élève la température de l'air avant son introduction dans la chambre de séchage.

- Une chambre de séchage où le matériau à sécher est placé et fluidisé.
- Des instruments de mesure et de contrôle pour surveiller et ajuster des paramètres tels que la pression, la température et la vitesse de l'air.
- Un système d'enregistrement des données pour documenter les résultats du processus.

Le fonctionnement repose sur le principe de la fluidisation : l'air chauffé est introduit par le bas de la chambre de séchage, traversant une plaque perforée. Lorsque la vitesse de l'air atteint un certain seuil, les particules solides sont soulevées et mises en suspension, créant un état semblable à celui d'un fluide. Cela permet un contact optimal entre l'air chaud et chaque particule, assurant un séchage uniforme et rapide.

Ce type de sécheur est particulièrement adapté aux matériaux à structure granulaire tels que les plastiques, les produits pharmaceutiques et divers aliments. Parmi ses avantages, on note une vitesse de séchage élevée, une distribution uniforme de la chaleur et une réduction du temps de traitement. Cependant, il présente également des inconvénients, notamment une consommation énergétique relativement élevée et une complexité accrue dans la modélisation du processus de séchage, qui nécessite souvent l'utilisation de modèles de diffusion pour prédire l'évolution de l'humidité du produit au fil du temps.

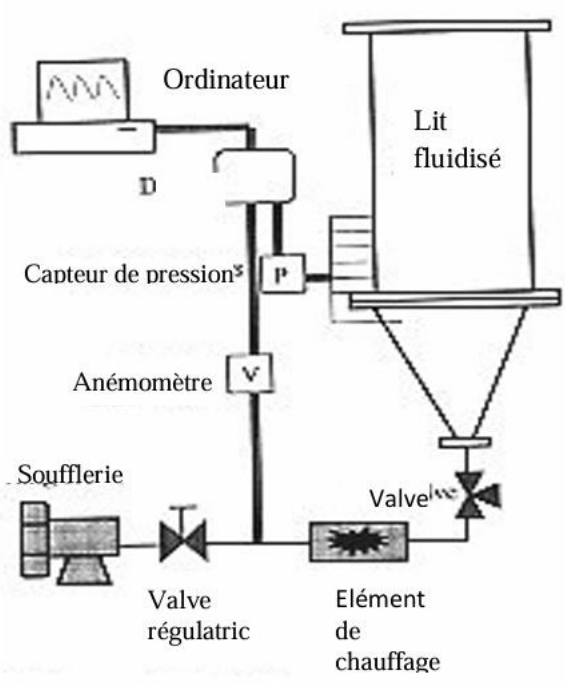


Figure 9 : Appareillage utilisé dans le séchoir à lit fluidisé.

II.2.2 Séchoir à pulvérisation

Le séchage par pulvérisation est une méthode moderne largement employée aujourd'hui. Ce procédé repose sur le principe du séchage par convection. Le matériau humide est injecté dans une chambre de séchage, où de l'air chaud est soufflé. Grâce à un atomiseur placé dans cette chambre, l'eau contenue dans le produit s'évapore rapidement, ce qui permet d'obtenir un produit sec sous forme de poudre, granulés ou agglomérats. Cette technique est particulièrement utilisée dans plusieurs secteurs industriels tels que la chimie, la pharmacie, ou encore la fabrication de céramiques.

Parmi ses nombreux atouts, on peut citer :

- Un temps de séchage très réduit,
- Une qualité de produit final élevée,
- La capacité à traiter des matières avec une humidité initiale importante,
- La possibilité de sécher des substances visqueuses ou non amorphes,
- Un coût d'entretien faible et une longue durée de vie des équipements,
- Et enfin, la possibilité d'automatiser le processus.

Néanmoins, certains inconvénients sont à relever :

- Le coût d'installation initial est élevé,
- La consommation énergétique est importante,
- Les nébuliseurs complexes ont un prix conséquent,
- Et ce procédé est souvent limité à de petites quantités de produit.

De plus, le transfert de chaleur et de masse dans ce type de sécheur ne se déroule pas en conditions stationnaires, et la dynamique complexe des fluides rend difficile l'obtention de formules exactes pour les calculs. Ainsi, on utilise fréquemment des modèles empiriques et des hypothèses simplificatrices, comme fixer des conditions constantes de transfert thermique et massique, puis extrapoler les résultats obtenus.

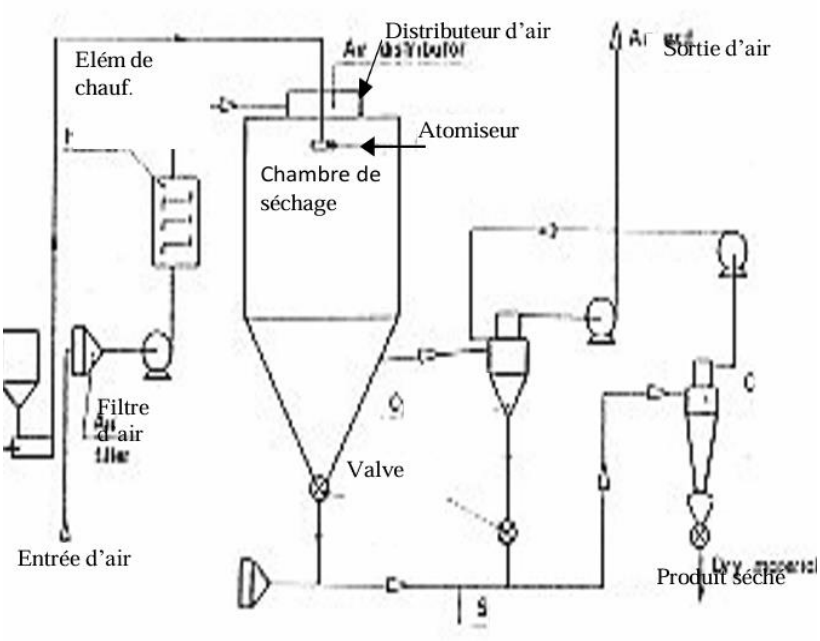


Figure 10 : Schéma su séchoir à pulvérisation.

II.2.3 Séchoir à flot

Le séchoir vertical à air chaud est composé de plusieurs éléments essentiels :

- Un suppresseur : il aspire l'air ambiant pour l'introduire dans le système.
- Un élément chauffant : il élève la température de l'air aspiré.
- Un tube vertical : c'est dans ce conduit que le produit humide et l'air chaud circulent ensemble.
- Un collecteur de produit sec : il récupère le produit une fois l'humidité évaporée.

Dans ce système, le produit à sécher est introduit dans le tube vertical en même temps que l'air chaud. La vitesse de l'air est supérieure à celle du produit, ce qui permet un contact rapide et efficace entre les deux. Le temps de séjour du produit dans le séchoir est très court, généralement entre 0,5 et 4 secondes. En raison de ce temps limité, il est parfois nécessaire de recycler une partie du produit pour assurer un séchage complet. La proportion de recyclage dépend des caractéristiques spécifiques de chaque produit.

Les avantages de ce sèche-linge incluent :

- Temps de contact réduit : le produit est exposé à l'air chaud pendant une très courte durée, ce qui préserve ses qualités.

- Température élevée à l'entrée : la chaleur disponible dès l'entrée du séchoir améliore l'efficacité du processus.
- Double fonction : en plus de sécher, le système peut également transporter le produit d'un point à un autre.
- Gain d'espace : sa conception verticale nécessite moins d'espace au sol pour l'installation.
- Simplicité de contrôle : les commandes du séchoir sont généralement simples et intuitives.
- Coûts modérés : les frais d'installation et d'entretien sont relativement faibles comparés à d'autres types de séchoirs.

Les Inconvénients de séchoir vertical à air chaud :

- Entretien régulier nécessaire : le système requiert une maintenance fréquente pour garantir son bon fonctionnement.
- Utilisation exclusive de l'air comme fluide chauffant : pour éviter tout contact indésirable avec le produit, seul l'air est utilisé, ce qui peut limiter certaines applications.
- Adapté à des produits spécifiques : le séchoir est principalement efficace pour des produits non collants, cristallins, non poreux et de petite taille. Par exemple, pour sécher un produit de 1 à 2 mm de diamètre, une vitesse d'air d'environ 25 m/s est nécessaire.

Selon Schweitzer, cette classification des séchoirs inclut également les séchoirs discontinus et les séchoirs rotatifs, offrant ainsi une gamme plus large d'options en fonction des besoins spécifiques de séchage.

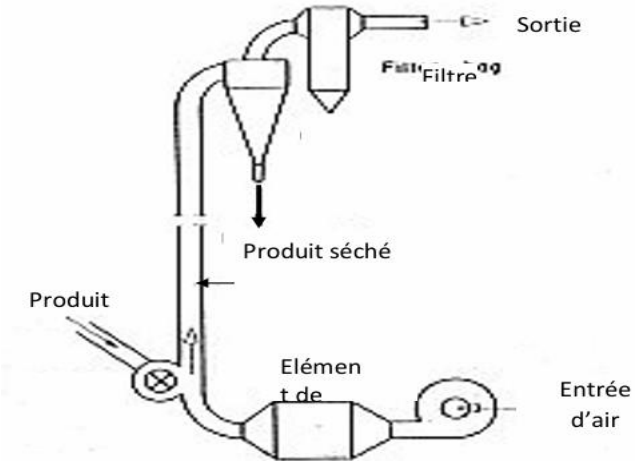


Figure 11 : Schéma du séchoir à flot.

II.2.4 Séchoir à lots

Les séchoirs discontinus sont adaptés pour le séchage de divers produits, notamment ceux produits en lots ou de manière saisonnière. Parmi eux, le séchoir à plateaux est un exemple typique.

Dans ces systèmes, un suppresseur aspire l'air ambiant, qui est ensuite chauffé par un élément chauffant. Un ventilateur assure la distribution uniforme de cet air chaud à travers la chambre de séchage, garantissant ainsi un séchage homogène des produits.

La durée du séchage dépend de la nature du produit à traiter, pouvant varier de quelques heures à plusieurs jours. Pour optimiser ce processus, la modélisation s'appuie sur les équations de transfert de chaleur et de masse, permettant de prédire et d'ajuster les conditions de séchage en fonction des caractéristiques spécifiques du produit.

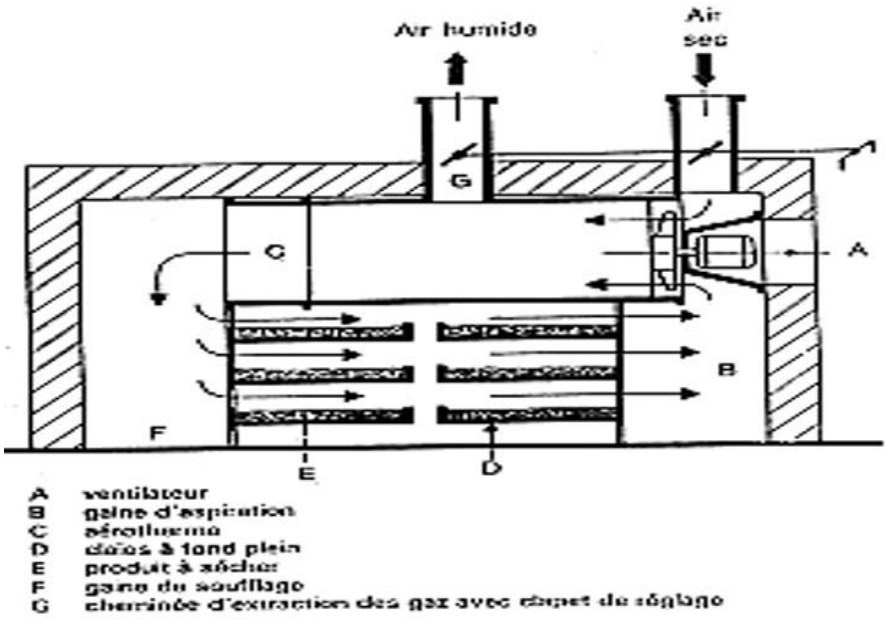


Figure 12 : Schéma d'un séchoir à lots**.**

II.2.5 Séchoir rotatif

Les séchoirs rotatifs sont particulièrement adaptés au traitement de produits non collants et de petite taille. Leur conception repose sur un cylindre rotatif incliné qui met le produit en mouvement, facilitant ainsi le séchage. L'air chaud est introduit soit dans le même sens que le mouvement du produit, soit en sens inverse, selon les besoins spécifiques du processus.

Par ailleurs, les séchoirs solaires, qui fonctionnent sous des conditions d'air asséchant variables, présentent des avantages écologiques et économiques. Cependant, leur performance peut être influencée par des facteurs environnementaux tels que l'ensoleillement et la température ambiante. D'où l'importance de mener des études approfondies sur ces modèles pour optimiser leur efficacité et garantir une qualité constante du produit séché.

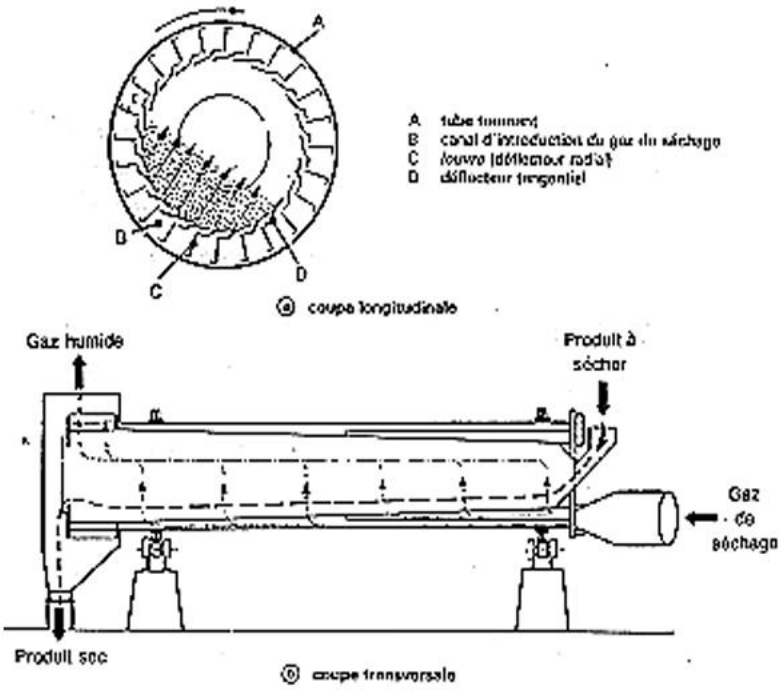


Figure 13 : Schéma d'un séchoir rotatif.

II.3 Consommation énergétique et rendement

Le séchage industriel est l'une des opérations unitaires les plus énergivores dans de nombreuses industries. La consommation d'énergie dépend principalement de la nature du produit à sécher, du type de séchoir utilisé, ainsi que des conditions de fonctionnement (température, humidité, débit d'air). En général, la chaleur nécessaire pour évaporer un kilogramme d'eau est d'environ 2 500 kJ (à pression atmosphérique), mais dans les sécheurs industriels classiques, la consommation peut facilement atteindre 3 000 à 5 000 kJ/kg d'eau évaporée à cause des pertes thermiques.

L'efficacité énergétique peut être considérablement améliorée par l'intégration de systèmes de récupération de chaleur, une meilleure isolation, et surtout par l'automatisation du contrôle des paramètres. Le rendement global (ou efficacité thermique) d'un séchoir se mesure par le rapport entre l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau et l'énergie totale consommée. Un rendement élevé signifie moins de pertes énergétiques, donc une meilleure rentabilité. [9]

Type de séchoir	Consommation énergétique moyenne (KJ/Kg H2O)	Rendement thermique(%)	Remarques
Séchoir à air chaud	3500-5000	40-60 %	Très utilisé mais peu efficace sans récupération
Séchoir à lit fluidisé	2500-3500	60-75 %	Bonne homogénéité, plus efficace
Séchoir à pulvérisation	4000-6000	35-50 %	Très énergivore, idéal pour liquides
Séchoir sous vide	2000-3000	70-85 %	Faible température, bon pour produits sensibles
Séchoir solaire industriel	500-1500 (variable)	Très variable	Dépend de l'ensoleillement, écologique

Tableau 2 : Tableau comparatif de la consommation énergétique des types de séchoirs.

II.4 Critères choix de type de séchoir

Le choix est dicté par les paramètres suivants [6] :

Caractéristiques physiques du séchoir :

- Type, taille, forme.
- Capacité de séchage.
- Modalité de chargement et de déchargement.

Performance thermique :

- Temps de séchage/taux de séchage.
- Température de l'air sécheur et l'humidité relative.
- Débris d'air.
- Efficacité de séchage.

Qualité des produits séchés :

- Qualité sensationnelle (couleur, saveur, goût, texture, arôme).
- Propriétés nutritives.
- Capacité de réhydratation.

II.5 Innovations et contrôle intelligent dans les systèmes de séchage

L'évolution des technologies industrielles a conduit à l'intégration de systèmes de contrôle intelligents dans les procédés de séchage. Ces systèmes, s'appuyant sur des capteurs avancés et des algorithmes d'apprentissage automatique, permettent une surveillance en temps réel des paramètres critiques tels que l'humidité, la température et la pression. Cette approche favorise une régulation précise du processus de séchage, optimisant ainsi l'efficacité énergétique et la qualité du produit final.

Par exemple, le système DryingPro développé par Bühler utilise une régulation intelligente de l'humidité pour maximiser le rendement du séchage. Grâce à une surveillance continue et à des ajustements automatiques, ce système permet de réduire la consommation d'énergie thermique et de minimiser les déchets, tout en garantissant une qualité constante du produit. [10]

En parallèle, l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 (I4.0), telles que l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA), transforme les systèmes de séchage traditionnels en plateformes intelligentes. Ces technologies permettent une collecte et une analyse approfondies des données, facilitant ainsi la maintenance prédictive et l'optimisation continue des processus. [11] [12]

Ces innovations marquent une étape significative vers des systèmes de séchage plus autonomes, efficaces et adaptés aux exigences croissantes de l'industrie moderne.

L’intégration des technologies issues de l’Industrie 4.0 dans les systèmes de séchage industriels permet d’améliorer significativement l’efficacité, la précision et la traçabilité des procédés.

II.6 Apport de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de séchage

L'intégration des technologies issues de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de séchage industriels permet d'améliorer significativement l'efficacité, la précision et la traçabilité des procédés. Voici quelques technologies et sigles fréquemment utilisés :

- IA : utilisée pour optimiser automatiquement les paramètres de séchage (température, humidité, débit d'air) à partir de données en temps réel.
- IoT : permet de connecter les équipements de séchage à un réseau pour surveiller leur fonctionnement à distance.
- SCADA : système de supervision qui collecte et analyse les données des capteurs pour contrôler le processus de séchage.
- API : automate programmable qui exécute les séquences de commande dans les installations de séchage.
- IHM : interface permettant aux opérateurs d'interagir avec les machines et de visualiser en temps réel l'état du système.
- IIoT : version industrielle de l'IoT, utilisée notamment pour la maintenance prédictive et le suivi continu des performances.
- S7-GRAPH : langage de programmation séquentielle utilisé dans les automates Siemens pour piloter les cycles de séchage de manière structurée et automatisée. [13]

Ces technologies offrent une meilleure automatisation, une réactivité accrue face aux anomalies, ainsi qu'une réduction de la consommation énergétique dans les systèmes de séchage modernes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire de Master intitulé « Étude technologique des systèmes de séchage », Nous avons présenté les généralités liées au procédé de séchage, en abordant son historique, ses principes fondamentaux, ainsi que les différents types et méthodes utilisés, qu'ils soient naturels, mécaniques, chimiques ou thermiques. Cette première partie nous a permis de mieux comprendre les phénomènes physiques impliqués, notamment ceux liés à la conduction, à la convection et au rayonnement. Dans un second temps, nous avons étudié en détail les caractéristiques de l'air de séchage ainsi que leur influence sur la cinétique du processus.

Ces paramètres température, humidité, vitesse de l'air ont montré leur impact direct sur l'efficacité du séchage et la qualité du produit final. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux systèmes de séchage industriels, en classifiant les principaux types de séchoirs tels que les séchoirs à lit fluidisé, à pulvérisation ou encore rotatifs. L'étude de leur fonctionnement, de leur rendement énergétique, et des critères de choix a permis d'illustrer les enjeux techniques et économiques liés à l'optimisation de ces systèmes. Nous avons également souligné l'importance croissante des innovations technologiques, notamment à travers l'intégration de systèmes de contrôle intelligent.

Les objectifs fixés ont été atteints dans la mesure des informations et des ressources disponibles. Cependant, le manque de certaines données techniques précises, souvent considérées comme confidentielles pour des raisons industrielles ou commerciales, a limité notre approfondissement sur le plan pratique. Néanmoins, ce travail constitue une base solide pouvant servir de point de départ pour des études ou applications futures dans le domaine du séchage industriel.

Bibliographie

[1] SAIREM. *The different industrial drying technologies*.

[2] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4e éd., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.

[3] Université d'Annaba, *Cours Séchage thermique - Transferts de matière*, disponible en ligne :

[4] source: le monde alimentaire, janvier-***février 2001*** (***page 21***) dans le cadre du printemps des sciences 2002 Université de Liège-Haute Charlemagne-Hemes les métiers de l'énergie-Ingénieurs de l'énergie.

[5] techniques de l'ingénieur génie des procédés séchage Théorie et calculs (par André charreau et Roland cavaillé, j2480-2;2480-22.)

[6] M. Daguenet les séchoirs solaire: théorie et pratique, 1985 .

[7] *Cours de séchage Master 2 ERM*, Département de Mécanique, Faculté de Technologie, Université de Batna 2, Algérie.

[8]A. Auteur, « Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage ».

[9] A. Bassal et J. Vasseur, *Le séchage par la vapeur d'eau surchauffée – État de l'art*, Cahier de l'AFSIA no 13, Lyon, France, 1996.

[10] Bühler Group, "DryingPro: Régulation intelligente de l'humidité pour un rendement de séchage maximum," Bühler Group

[11] SamQ, *Production 4.0 : Intégration de l'IoT, des données et de l'automatisation*, SamQ, 2025.

[12] Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec, *Feuille de route Industrie 4.0*, Gouvernement du Québec, 2019.

[13] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review," *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3928–3937, 2016.