

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DU 20 AOÛT 1955 - SKIKDA
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Polycopie de cours : Opérations unitaires dans les I.A.A.

À l'usage des étudiants de Master 1 en Agroalimentaire et Qualité des Produits

Dr. Imen LAIB

Module : Opérations unitaires dans les industries agroalimentaires

Sommaire

Liste des figures et des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Séchage des produits alimentaires

1. Définition du séchage	2
2. Les différentes formes de l'eau dans les aliments.....	3
o 2.1. Eau libre	3
o 2.2. Eau liée	3
3. L'Humidité Relative d'Equilibre (HRE)	4
o 3.1. Définition	4
o 3.2. Importance de l'HRE	4
4. Activité de l'eau.....	5
o 4.1. Définition	5
o 4.2. Importance de l'activité de l'eau.....	5
5. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau.....	5
6. Influence de l'état physique sur la fixation de l'eau.....	10
7. Conséquences sur la stabilité des aliments.....	10
8. L'air humide	11
9. Diagramme enthalpique de l'air humide.....	12

Chapitre 2 : Différents modes de séchage

1. Séchage par entraînement.....	19
2. Séchage par ébullition.....	19
3. Intérêt et inconvénients du procédé de séchage.....	20
o 3.1. Intérêt du procédé de séchage.....	20
o 3.2. Inconvénients du procédé de séchage	21
4. Phénomènes et mécanismes de transfert de chaleur et de matière lors du séchage	22
o 4.1. Séchage convectif	22
o 4.2. Séchage par conduction.....	24
o 4.3. Séchage par rayonnement.....	24
▪ 4.3.1. Séchage par infrarouges.....	25
▪ 4.3.2. Séchage par radiofréquences	25

Chapitre 3 : Calculs sur les séchoirs

1. Différentes étapes de la cinétique de séchage.....	27
---	----

1.1. Phase de mise en température (AB)	28
1.2.Phase à vitesse constante ou période à allure constante (BC)	29
1.3.Phase à vitesse décroissante ou période de ralentissement (CD)	29
2. Analyse de la cinétique de séchage de différents produits	31
○ 2.1. Produits non hygroscopiques et peu déformable.....	31
○ 2.2. Produits alimentaires et agricoles.....	31
3. Variabilité du comportement et classification des produits	32
4. Paramètres influençant le séchage	33
○ 4.1. Influence de la température.....	33
○ 4.2. Influence de l'épaisseur ou du diamètre de la découpe.....	35
○ 4.3. Influence de l'humidité relative de l'air	36

Chapitre 4: Bilans sur les séchoirs

1. Généralités	37
2. Principes fondamentaux de l'utilisation de l'énergie dans les séchoirs	37
○ 2.1. Charge d'évaporation.....	38
○ 2.2. Alimentation en énergie du séchoir.....	38
3. Analyse énergétique des systèmes de séchage	42
○ 3.1. Bilan massique et énergétique.....	42
▪ 3.1.1. Bilan de matière.....	45
▪ 3.1.2. Bilan énergétique pratique.....	45
▪ 3.1.3. Consommation énergétique massique (CEM) et rapport de consommation énergétique (RCE).....	48
○ 3.2. Analyse Pinch.....	49
4. Stratégies pour réduire la consommation d'énergie	51
5. Évaluation des durées de séchage	52
Références Bibliographiques	57

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre 1 : Séchage des produits alimentaires

- Figure 1** : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau.....7
Figure 2 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' a_w11
Figure 3 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine.....13

Chapitre 2 : Différents modes de séchage

- Figure 1** : Schéma traduisant les niveaux de température et d'humidité générant des flux de chaleur et de matière lors d'un séchage par convection d'air.....23

Chapitre 3 : Calculs sur les séchoirs

- Figure 1** : Différentes représentations des courbes de cinétique de séchage.....28
Figure 2 : Exemples de courbe de séchage pour différents produits.....33
Figure 3 : Vitesse de séchage cardon en fonction de la température.....34
Figure 4 : Influence de la température sur la cinétique de séchage du pois.....35
Figure 5 : Effet de l'épaisseur de la découpe sur la vitesse de séchage du cardon.....36

Chapitre 4 : Bilans sur les séchoirs

- Figure 1** : Diagramme psychrométrique de Mollier avec les lignes de fonctionnement pour un séchoir convectif à chauffage indirect.....41
Figure 2 : Transfert entre l'air et la surface du produit.....45
Figure 3 : Courbes composites et (b) courbes composites globales pour un procédé typique en phase liquide.....50
Tableaux :
Tableau 1 : CEM et RCE en fonction des modes de séchage.....49

Module : Opérations unitaires dans les industries agroalimentaires

Introduction générale

Les opérations unitaires représentent l'ensemble des transformations physiques appliquées aux matières premières au sein des industries agroalimentaires (IAA), sans altérer leur nature chimique. Elles constituent les fondations de tout procédé de transformation alimentaire, permettant d'assurer la qualité, la stabilité et la sécurité des produits finis.

Ce cours a pour objectif de familiariser les étudiants avec les principes fondamentaux du séchage, une opération clé de conservation des denrées alimentaires. Le séchage permet de réduire la teneur en eau des produits afin d'en prolonger la durée de vie, de faciliter leur transport et leur stockage, tout en préservant leurs caractéristiques nutritionnelles et sensorielles.

Le programme aborde successivement :

- Les généralités sur les notions d'équilibre et d'activité de l'eau, ainsi que les propriétés de l'air humide, indispensables à la compréhension des phénomènes de transfert.
- Les différents modes de séchage, notamment le séchage par entraînement et par ébullition.
- Les calculs sur les séchoirs, incluant l'analyse des cinétiques et des périodes de séchage.
- Enfin, les bilans énergétiques, permettant d'évaluer la consommation et la durée optimale du procédé.

Prérequis : Ce cours nécessite des bases en :

- **Thermodynamique appliquée**, notamment les notions de chaleur sensible, chaleur latente et équilibres vapeur-liquide.
- **Transferts de chaleur et de matière**, pour comprendre les mécanismes couplés mis en jeu dans le séchage.
- **Propriétés physico-chimiques des aliments**, en particulier la structure de l'eau et son rôle dans la stabilité des produits.

Public cible

Ce cours s'adresse aux **étudiants de Master 1 – Agroalimentaire et Qualité des Produits**, dans le cadre de leur formation en **procédés de transformation et conservation des aliments**. Il vise à leur fournir les compétences nécessaires pour analyser, concevoir et optimiser les procédés de séchage dans une optique de qualité, d'efficacité énergétique et de durabilité industrielle.

Chapitre 1 : Séchage des produits alimentaires

1. Définition du séchage

Le séchage est une opération unitaire fondamentale des procédés agroalimentaires et chimiques, visant à éliminer totalement ou partiellement l'eau contenue dans un matériau solide ou semi-solide, principalement par évaporation sous l'effet de la chaleur. Cette opération combine donc un transfert de chaleur (de la source chaude vers le produit) et un transfert de matière (de l'eau du produit vers l'air ambiant ou un autre gaz de séchage).

Sur le plan thermodynamique, le séchage consiste à fournir l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons entre l'eau et la matrice du produit (eau libre, eau liée physiquement ou chimiquement), puis pour vaporiser cette eau et l'évacuer vers le milieu extérieur. Le processus implique généralement deux phases distinctes : une première phase à vitesse constante, durant laquelle l'eau libre s'évapore de la surface du produit, suivie d'une phase à vitesse décroissante, où la diffusion interne de l'eau vers la surface devient le facteur limitant.

Du point de vue microbiologique et biochimique, le séchage permet de réduire l'activité de l'eau (a_w) du produit, limitant ainsi le développement des micro-organismes (bactéries, levures et moisissures) et ralentissant les réactions enzymatiques et chimiques indésirables (oxydation, brunissement non enzymatique, hydrolyse, etc.). Par conséquent, cette opération contribue à améliorer la stabilité, la conservation et la durée de vie des denrées alimentaires.

En agroalimentaire, le séchage est largement utilisé pour la préservation des fruits, légumes, céréales, viandes, poissons et produits laitiers, tout en facilitant leur transport, stockage et formulation dans divers produits dérivés. Cependant, la qualité finale du produit séché (couleur, texture, goût, valeur nutritionnelle) dépend fortement des conditions opératoires (température, humidité relative, vitesse de l'air, pression) et de la nature du matériau.

Ainsi, le séchage n'est pas uniquement une opération de déshydratation, mais une étape critique de transformation qui doit concilier l'efficacité énergétique, la sécurité microbiologique et la préservation des caractéristiques sensorielles et nutritionnelles du produit.

2. Les différentes formes de l'eau dans les aliments

L'eau contenue dans les aliments ne possède pas toujours les mêmes propriétés. Ces différences dépendent essentiellement de la manière dont elle interagit avec les macromolécules constitutives de la matrice alimentaire ainsi qu'avec les autres molécules d'eau présentes. En fonction de ces interactions, l'eau peut exister sous plusieurs formes, dont les principales sont l'eau libre et l'eau liée. Ces deux formes se distinguent par leur degré de mobilité, leur disponibilité et leur rôle dans la stabilité des aliments.

2.1. Eau libre

Définition

L'eau libre correspond à la fraction d'eau qui peut circuler librement à l'intérieur de la structure d'un aliment. Elle est maintenue à l'intérieur des pores grâce à deux phénomènes essentiels : l'effet capillaire, qui attire l'eau dans les microcavités des aliments, et l'effet osmotique, qui tend à équilibrer les concentrations en eau entre différentes zones ou solutions. Une partie de cette eau libre peut également être associée à l'eau d'hydratation des macromolécules, mais elle conserve la plupart des propriétés physiques et chimiques de l'eau pure, ce qui la rend hautement disponible pour diverses réactions.

Caractéristiques de l'eau libre :

- **Disponible** : L'eau libre constitue la portion d'eau directement impliquée dans les réactions chimiques et biochimiques. Elle est donc essentielle aux processus métaboliques tels que la fermentation, la germination ou encore la décomposition enzymatique.
- **Mobile** : Sa mobilité élevée permet une circulation aisée à travers la matrice alimentaire, facilitant ainsi la diffusion des nutriments, des ions et des métabolites.
- **Impact sur l'activité microbienne** : En raison de sa disponibilité, l'eau libre crée un milieu favorable à la croissance et à la prolifération des micro-organismes, influençant de manière directe la durée de conservation et la qualité hygiénique des produits alimentaires.

2.2. Eau liée

Définition de l'eau liée :

L'eau liée, quant à elle, représente la fraction d'eau intimement associée aux macromolécules telles que les protéines, les glucides ou certaines fibres. Elle forme autour de ces composants une fine couche stable, maintenue par divers types de liaisons — hydrogène, ioniques ou encore dipôle-dipôle. En raison de ces interactions, cette eau est beaucoup moins mobile et présente une stabilité nettement supérieure à celle de l'eau libre.

Caractéristiques de l'eau liée :

- **Fixe** : L'eau liée est fortement retenue au sein de la matrice, ce qui limite considérablement ses déplacements. Elle n'est donc pas disponible pour participer aux réactions chimiques ou biologiques.
- **Résistance à la congélation** : Contrairement à l'eau libre, cette eau ne gèle pas facilement à basse température, car les liaisons établies entre l'eau et les macromolécules sont plus fortes que les interactions entre les molécules d'eau elles-mêmes.
- **Non disponible** : En raison de ces interactions étroites, l'eau liée ne peut ni favoriser la croissance microbienne ni intervenir dans les transformations chimiques ou enzymatiques.

3. L'Humidité Relative d'Équilibre (HRE)

3.1. Définition :

L'Humidité Relative d'Équilibre est le rapport entre la pression de vapeur de l'eau dans un aliment et la pression de vapeur de l'eau à la température ambiante. Elle est généralement exprimée en pourcentage.

L'HRE est un indicateur de la quantité d'humidité présente dans un aliment par rapport à la quantité d'humidité que l'air peut contenir à la même température.

3.2. Importance de l'HRE :

- **Contrôle de la qualité** : Un HRE approprié permet de conserver la texture et la fraîcheur des aliments. Par exemple, un HRE trop élevé peut favoriser la croissance de micro-organismes, tandis qu'un HRE trop bas peut entraîner un durcissement ou une déshydratation des aliments.
- **Équilibre hydrique** : À l'HRE, l'aliment est en équilibre avec l'humidité ambiante. Cela signifie que le taux d'humidité de l'aliment ne change pas, ce qui est crucial pour maintenir la qualité des produits alimentaires au cours du stockage.
- **Applications pratiques** : L'HRE est utilisé dans le contrôle de l'humidité dans le stockage des aliments, dans le séchage, et pour déterminer les conditions de conservation idéales pour différents types d'aliments

$$\text{HRE} = \frac{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température } \theta}{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau saturante à la température } \theta} \times 100$$

$$\text{HRE} = \frac{P_w}{P_{w0}} \times 100 \quad (1)$$

4. Activité de l'eau

4.1. Définition :

L'activité de l'eau (notée a_w) est un indicateur qui mesure la disponibilité de l'eau pour les réactions chimiques et la croissance microbienne. Elle est exprimée comme un rapport entre la pression de vapeur de l'eau dans un aliment et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température.

- L'activité de l'eau varie entre 0 (absence totale d'eau) et 1 (eau pure). La plupart des aliments ont une a_w comprise entre 0,2 et 0,9.

4.2. Importance de l'activité de l'eau :

- **Croissance microbienne** : La disponibilité de l'eau, mesurée par l'activité de l'eau, est un facteur déterminant pour la croissance des bactéries, des levures et des moisissures. Par exemple, la plupart des micro-organismes ne peuvent pas se développer à des niveaux d' a_w inférieurs à 0,6.
- **Réactions chimiques** : L'activité de l'eau influence également les réactions enzymatiques et chimiques dans les aliments. Une a_w plus élevée favorise des réactions telles que l'oxydation et la dégradation des nutriments, ce qui peut affecter la qualité et la durée de conservation des aliments.
- **Formulation des produits** : Les fabricants utilisent l'activité de l'eau pour formuler des produits alimentaires en ajustant l'humidité et en ajoutant des agents conservateurs pour contrôler la croissance microbienne.

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (2)$$

La disponibilité de l'eau dans les aliments, mesurée par l'Humidité Relative d'Équilibre et l'activité de l'eau, est essentielle pour comprendre et contrôler la qualité, la sécurité et la durée de conservation des produits alimentaires. La gestion de ces paramètres permet aux professionnels de l'industrie alimentaire d'optimiser les conditions de stockage, de prolonger la durée de conservation et d'améliorer la qualité sensorielle des aliments.

5. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

L'activité de l'eau (a_w) dans un produit alimentaire dépend essentiellement de deux facteurs principaux :

- sa **teneur en eau totale (X)**, c'est-à-dire la quantité d'eau présente par rapport à la matière sèche,
- et la **température (T)** à laquelle se trouve le produit.

Pour une température donnée, la relation entre la teneur en eau (X) et l'activité de l'eau (a_w) ou l'humidité relative d'équilibre (HRE) – peut être représentée graphiquement par une isotherme de sorption d'eau.

Selon le sens du transfert d'humidité, on distingue deux types d'isothermes :

- **Isotherme d'adsorption** : obtenue expérimentalement en partant d'un produit totalement ou partiellement déshydraté, auquel on fait adsorber progressivement de l'eau jusqu'à atteindre l'équilibre.
- **Isotherme de désorption** : obtenue en partant d'un produit initialement humide ou saturé en eau, que l'on sèche progressivement jusqu'à des valeurs plus faibles d'humidité d'équilibre.

Ces courbes sont généralement non superposables, en raison du phénomène d'hystérésis : le chemin suivi lors de la désorption (séchage) diffère de celui suivi lors de l'adsorption (réhydratation). Cette différence traduit des modifications irréversibles de la structure interne du produit, telles que la perte de porosité, la dénaturation des protéines ou la contraction des matrices polysaccharidiques.

Ainsi, lors du séchage (passage de $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$), la structure du produit peut se réorganiser de manière à piéger ou à exclure une partie de l'eau, modifiant sa capacité ultérieure d'adsorption.

Représentation graphique :

La courbe d'isotherme d'adsorption ou de désorption (figure 1) est tracée en représentant :

- En abscisse (x) : l'activité de l'eau (a_w) ou l'humidité relative d'équilibre (HRE) exprimée en pourcentage (%).
- En ordonnée (y) : la teneur en eau du produit (X), exprimée en g d'eau pour 100 g de matière sèche, ou en pourcentage de matière sèche (% MS).

Ces courbes permettent de décrire le comportement hygroscopique d'un aliment, c'est-à-dire sa capacité à absorber ou à libérer de l'eau en fonction de l'humidité ambiante.

Interprétation et importance technologique :

Les isothermes d'adsorption–désorption constituent un outil fondamental pour :

- **Prédire la stabilité des aliments** : elles permettent de déterminer les conditions d'humidité et de température assurant la conservation optimale sans altération microbienne ni réaction de dégradation (Maillard, oxydation, etc.).
- **Concevoir les procédés de séchage et de stockage** : en connaissant la relation entre a_w et X , on peut ajuster les paramètres technologiques pour atteindre l'humidité cible sans compromettre la texture ni la valeur nutritive.

- **Caractériser la nature de l'eau présente dans la matrice** : les différentes zones de la courbe (faible, moyenne et forte a_w) correspondent à des types de liaisons différentes entre l'eau et les constituants du produit (eau liée, faiblement liée et libre).

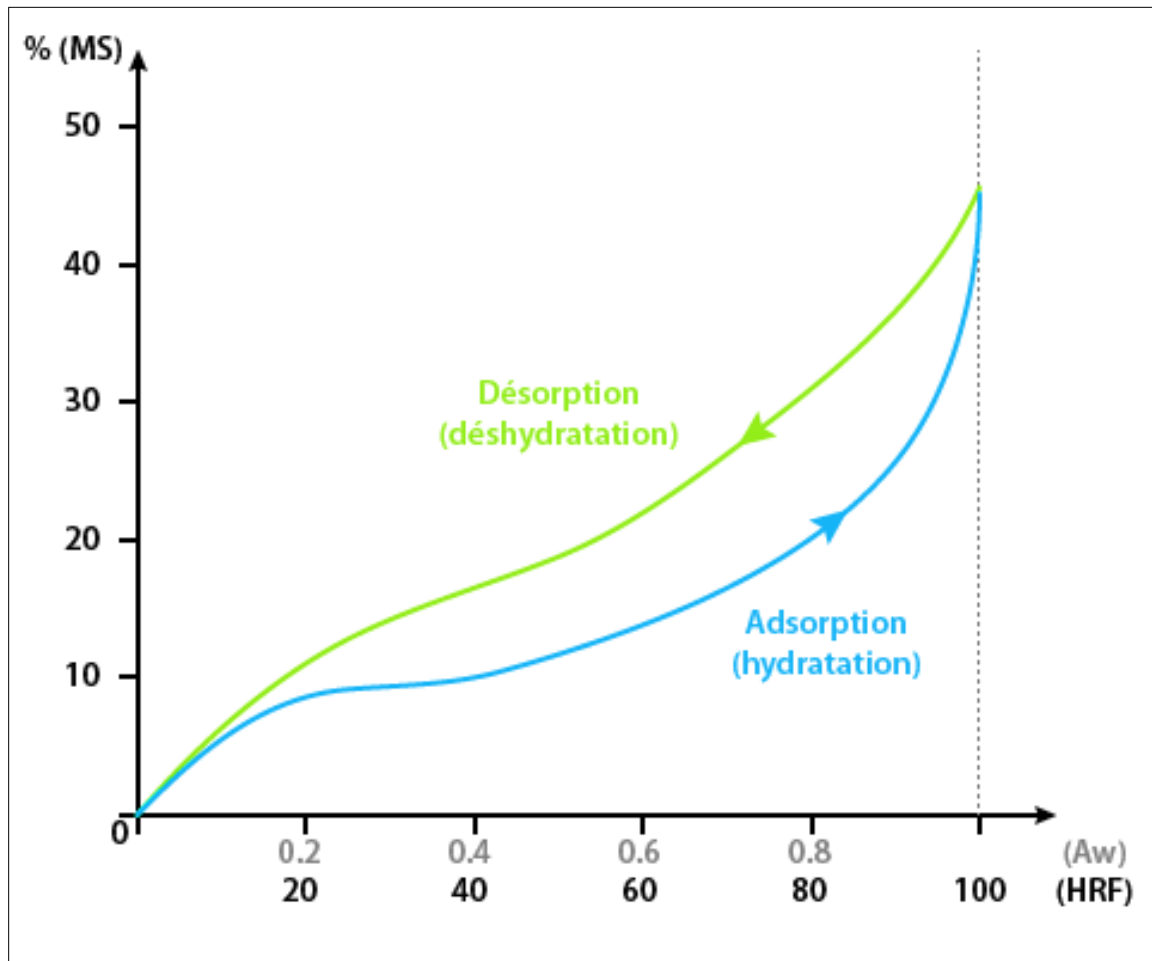


Figure 1 : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

En séchage, on s'intéresse particulièrement à la courbe de désorption qui peut être divisée en 3 zones (**Figure 1**) :

L'étude des isothermes d'adsorption de l'eau permet de distinguer plusieurs zones caractéristiques correspondant à différents états de l'eau dans le produit. Ces zones reflètent la nature des interactions entre les molécules d'eau et les constituants de la matrice alimentaire, ainsi que la progression de l'hydratation.

- **Zone 1 ($0 < a_w < 0,2$)**

Dans cette première zone, l'eau s'adsorbe à la surface du produit pour former progressivement une monocouche moléculaire. Cette étape correspond à la constitution d'une première couche d'eau fortement retenue par des forces de Van der Waals établies entre les groupements hydrophiles du substrat et les molécules d'eau.

Au fur et à mesure de l'adsorption, la surface externe et les parois internes des pores se recouvrent uniformément. L'eau se trouve alors dans un état fortement lié, caractérisé par une grande rigidité et la présence de liaisons hydrogène intenses entre les molécules d'eau et les constituants du produit. Le passage vers la zone suivante ne s'effectue qu'une fois cette monocouche totalement formée et la surface de l'aliment entièrement saturée par les molécules d'eau.

• **Zone 2 ($0,2 < a_w < 0,6$)**

Cette seconde zone correspond à une étape d'adsorption supplémentaire des molécules d'eau sur la monocouche initialement constituée. Les molécules d'eau s'associent entre elles par liaisons hydrogène, ou bien s'introduisent dans les pores plus profonds du matériau par capillarité.

Dans cette région, l'isotherme d'adsorption présente une forme quasiment linéaire, traduisant une relation proportionnelle entre l'humidité relative et la teneur en eau. L'état physique de l'eau y est intermédiaire entre solide et liquide, indiquant une mobilité accrue mais encore limitée par les interactions avec la matrice.

• **Zone 3 ($a_w > 0,6$)**

Au-delà d'une activité de l'eau de 0,6, l'eau se trouve essentiellement à l'état liquide à l'intérieur des pores du matériau. Cette fraction d'eau, dite micro-capillaire, constitue une phase continue susceptible de se déplacer librement. C'est dans cette zone que les aliments deviennent particulièrement sensibles à la prolifération microbienne et aux dégradations chimiques, car l'eau disponible est élevée.

Phénomène d'hystérésis :

L'analyse comparative des isothermes d'adsorption et de désorption révèle que les deux courbes ne se superposent pas parfaitement. Pour une même teneur en eau, l'équilibre atteint lors de la désorption correspond à des valeurs d'activité de l'eau (a_w) plus faibles que celles observées lors de l'adsorption. Ce décalage est connu sous le nom de phénomène d'hystérésis, et il se manifeste uniquement pour des valeurs de a_w supérieures à 0,2.

Ce comportement s'explique par deux raisons principales :

- **Structure poreuse des aliments :** Les pores présentent généralement une ouverture plus étroite en surface qu'en profondeur. Ainsi, la pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage des pores est plus élevée que celle requise pour leur vidange. Cette différence de comportement à l'absorption et à la désorption génère l'hystérésis.
- **Composition spécifique des fruits et légumes :** Ce phénomène est particulièrement marqué dans ces produits, car leurs sucres naturels tendent à former des solutions

sursaturées qui, lors de la déshydratation, ne précipitent pas. Cette propriété retarde la libération de l'eau et accentue le décalage entre les deux courbes.

Les isothermes d'adsorption de l'eau constituent un outil essentiel pour comprendre le comportement hygroscopique des aliments. Leur analyse offre plusieurs types d'informations selon la perspective adoptée — qu'elle soit thermodynamique, structurelle ou technologique.

- **Du point de vue thermodynamique :** Les isothermes permettent d'obtenir des indications précieuses sur les enthalpies de sorption, c'est-à-dire sur l'énergie échangée lors des phénomènes d'adsorption ou de désorption de l'eau. Elles renseignent également sur la nature des liaisons qui unissent les molécules d'eau à la matière sèche de l'aliment. Ainsi, la forme de l'isotherme traduit la force des interactions entre l'eau et les constituants du produit — protéines, polysaccharides, sucres ou sels minéraux.

- **Du point de vue structurel :** L'étude des isothermes permet de mieux appréhender l'influence de la structure physique du matériau sur sa capacité à adsorber ou à désorber l'eau. Des paramètres tels que la taille des particules, l'état amorphe ou cristallin des constituants et la surface spécifique jouent un rôle déterminant dans ces phénomènes. Ces facteurs structuraux conditionnent la vitesse et l'intensité des échanges d'humidité entre l'aliment et son environnement. Ils expliquent également les différences de comportement observées entre les produits pulvérulents, fibreux ou compacts.

- **Du point de vue technologique :** Les isothermes d'adsorption trouvent une application directe dans l'industrie agroalimentaire. Elles sont indispensables pour prédire la durée de conservation des denrées, maîtriser les procédés de séchage, et prévenir certains défauts technologiques tels que le collage ou la prise en masse des produits déshydratés et pulvérulents. La composition chimique du produit influence fortement la forme de son isotherme : la proportion relative de protéines, amidon, sels minéraux et saccharose détermine la quantité d'eau que l'aliment peut fixer à un taux d'humidité donné. L'objectif recherché est souvent d'obtenir des valeurs d'activité de l'eau (a_v) faibles, afin d'assurer la stabilité du produit. Pour y parvenir, on peut recourir à certains additifs hygroscopiques tels que le sel ou le saccharose, capables d'abaisser l'activité de l'eau sans modifier significativement la teneur totale en eau. Ces additifs sont particulièrement efficaces pour les aliments à humidité moyenne inférieure à 35 %, correspondant à une plage d'activité de l'eau comprise entre 0,6 et 0,8. Dans ces conditions, les produits — tels que les saucissons secs, fruits secs ou biscuits — peuvent rester stables pendant plusieurs semaines lorsqu'ils sont conditionnés dans des emballages hermétiques.

6. Influence de l'état physique sur la fixation de l'eau

L'état physique du composé joue un rôle déterminant dans sa capacité à retenir l'eau. À une humidité donnée, le saccharose amorphe retient davantage d'eau que le saccharose cristallisé. En effet, la transition d'un état amorphe à un état cristallin s'accompagne d'une expulsion partielle d'eau, conséquence directe de la réorganisation du réseau cristallin. Cette transformation dépend simultanément de l'humidité ambiante et de la température.

Lors du processus de cristallisation, l'eau libérée tend à dissoudre les cristaux situés en surface, tandis que les couches internes du matériau poursuivent leur cristallisation et se solidifient, conduisant à un phénomène de prise en masse. Parallèlement, l'eau expulsée peut se relocaliser sur d'autres constituants du produit, entraînant une texture collante ou un ramollissement superficiel.

Quelques exemples concrets illustrent ce comportement :

- Le café soluble déshydraté tend à se prendre en masse au fil du temps, en particulier lorsque l'emballage perd son étanchéité.
- Le lait en poudre subit le même type de transformation sous l'effet de l'humidité.
- Les bonbons deviennent collants à la surface (du fait du passage des cristaux à l'état amorphe) et durs à l'intérieur, en raison de la cristallisation interne et de l'expulsion d'eau vers la périphérie.

7. Conséquences sur la stabilité des aliments

De manière générale, plus l'activité de l'eau (a_w) d'un aliment est faible, plus celui-ci présente une stabilité élevée au cours du temps (figure 2). En effet, la réduction de la disponibilité en eau limite la prolifération des micro-organismes (bactéries, levures, moisissures) et ralentit les réactions biochimiques et physicochimiques susceptibles d'altérer la qualité du produit. Parmi ces réactions figurent notamment l'oxydation des lipides, la dénaturation des protéines, la dégradation enzymatique ou encore les réactions de brunissement non enzymatique (Maillard).

La maîtrise de a_w constitue donc un paramètre clé pour le contrôle de la sécurité microbiologique, de la texture et de la stabilité organoleptique des denrées alimentaires. Par exemple, une diminution excessive de a_w peut induire un durcissement du produit ou une perte d'arômes volatils, tandis qu'une a_w trop élevée favorise le ramollissement, la recristallisation du sucre ou le développement microbien.

Ainsi, l'étude des isothermes d'adsorption revêt une importance particulière : ces courbes décrivent la relation entre la teneur en eau d'un aliment et l'humidité relative de l'air environnant à température constante. Elles constituent un outil prédictif essentiel pour évaluer

le comportement hygroscopique des aliments soumis à différents traitements technologiques (séchage, lyophilisation, enrobage, etc.) ou conditions de stockage.

Grâce à ces isothermes, il devient possible d'anticiper les modifications physiques (changement de texture, agglomération, effritement) et chimiques (oxydation, brunissement, perte de nutriments) pouvant affecter la qualité globale du produit au cours du temps. Leur utilisation permet ainsi d'optimiser la formulation, le conditionnement et la durée de conservation des aliments, tout en garantissant leur sécurité et leur acceptabilité sensorielle

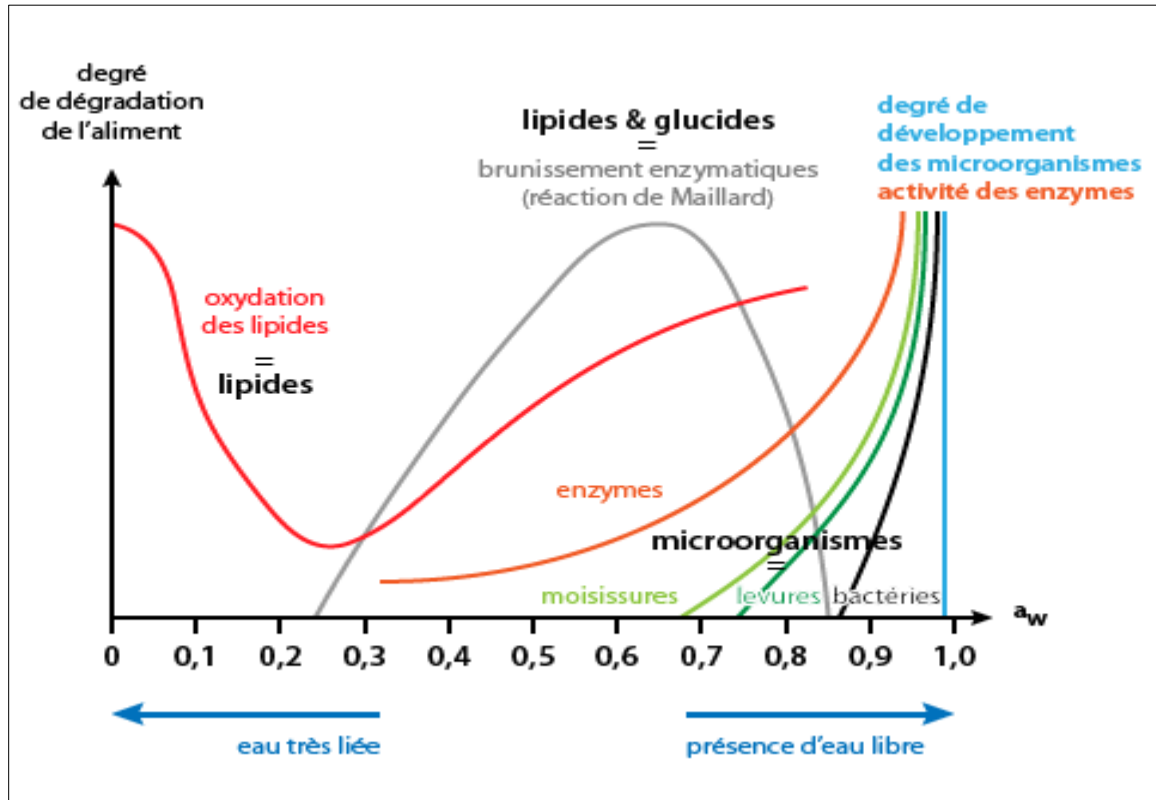


Figure 2 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' a_w

8. L'air humide

L'air humide joue un rôle essentiel dans le séchage des produits alimentaires, car il constitue à la fois le vecteur de transfert de chaleur et de transfert de matière. Ce mélange d'air sec et de vapeur d'eau permet de fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le produit et d'évacuer la vapeur formée.

La capacité de l'air à absorber l'humidité dépend de sa température et de son humidité relative (HR) : un air chaud et sec possède un fort pouvoir de séchage, tandis qu'un air plus humide ou plus froid réduit la vitesse d'évaporation. Lors de son passage à travers le produit, l'air se charge progressivement en vapeur d'eau, ce qui entraîne une augmentation de son humidité absolue et une diminution de sa température, traduisant le transfert d'énergie vers le

produit. À mesure que l'air s'humidifie, son pouvoir de séchage diminue, jusqu'à atteindre un état proche de la saturation, où il ne peut plus absorber d'eau.

Le séchage se poursuit tant qu'il existe un gradient d'humidité entre le produit et l'air, jusqu'à l'atteinte de l'équilibre hygroscopique. La maîtrise des caractéristiques de l'air humide (température, humidité relative, débit) est donc primordiale pour contrôler la cinétique de séchage, préserver la qualité du produit et optimiser le rendement énergétique du procédé.

8.1. Diagramme enthalpique de l'air humide

Le diagramme psychrométrique (Figure 3) (ou enthalpique) constitue un outil graphique fondamental en génie des procédés et en ingénierie agroalimentaire. Il permet de représenter de manière synthétique et visuelle les propriétés thermodynamiques de l'air humide, c'est-à-dire le mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Cet outil est particulièrement utile pour l'étude, la conception et le contrôle des opérations unitaires impliquant des échanges d'énergie et de matière entre l'air et les produits, notamment dans les procédés de séchage, de climatisation, de réfrigération et de conditionnement d'air.

Le diagramme psychrométrique constitue un instrument pratique et efficace permettant d'analyser et d'évaluer les besoins énergétiques liés au contrôle des conditions de séchage, qu'il s'agisse du chauffage ou du refroidissement de l'air, de la déshumidification ou encore de l'humidification. Il facilite également la compréhension des transformations subies par l'air humide au contact du produit, et permet d'assurer une mise en œuvre optimale des procédés industriels. Ainsi, la maîtrise de ce diagramme est indispensable pour piloter correctement les opérations de séchage, garantir la qualité du produit final et optimiser l'efficacité énergétique du système.

Grandeurs mesurables et détermination de l'état de l'air :

Pour déterminer l'état exact de l'air humide, il suffit de connaître deux grandeurs physiques indépendantes parmi les suivantes :

- température sèche (t_s),
- température humide (th),
- température de rosée (tr),
- humidité absolue (x),
- humidité relative (Hr),
- enthalpie (h).

Toutes les autres propriétés peuvent ensuite être lues ou déduites à l'aide du diagramme psychrométrique.

Ainsi, la compréhension de ce diagramme permet d'analyser et de prévoir le comportement de l'air dans divers contextes — séchage, climatisation, stockage, ou encore traitement thermique des aliments — en reliant les phénomènes thermiques et hygrométriques de manière claire et précise.

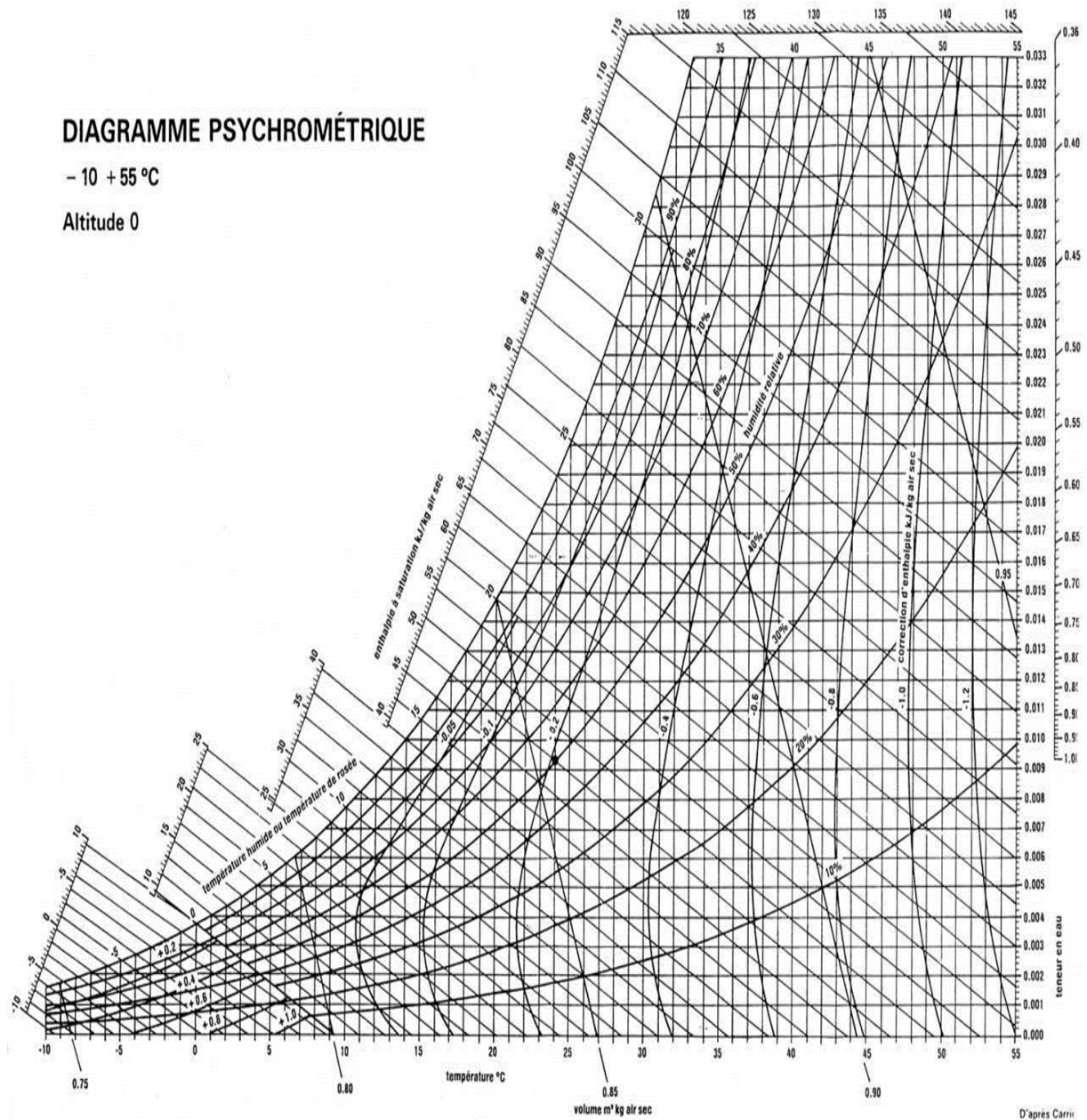


Figure 3 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine

Température sèche et température humide

La température de bulbe sec, notée t_s et exprimée en °C, correspond à la température réelle de l'air mesurée par un thermomètre à l'abri de toute influence d'humidité. Elle constitue la grandeur principale du diagramme psychrométrique et est représentée sur l'axe horizontal. Les lignes verticales, appelées isothermes, relient tous les points présentant une même température sèche.

La température de bulbe humide, notée t_h , est mesurée à l'aide d'un thermomètre dont le réservoir est entouré d'une gaze humide. Elle traduit la température atteinte par l'air lorsqu'il est refroidi par évaporation d'eau jusqu'à saturation. Sur le diagramme, pour passer d'un point représentant un état donné à la courbe de saturation, on suit une ligne d'enthalpie constante (ou isenthalpe). Le point d'intersection donne la température humide correspondante. Les températures sèche et humide sont souvent mesurées simultanément à l'aide d'un psychromètre, instrument comportant deux thermomètres : l'un à bulbe sec et l'autre à bulbe humide.

Humidité absolue et humidité relative

L'humidité absolue, notée x ou w , représente la teneur réelle en vapeur d'eau contenue dans l'air humide. Elle est exprimée en grammes d'eau par kilogramme d'air sec (g/kg). Cette grandeur est reportée sur l'axe vertical droit du diagramme. Les lignes horizontales, dites isohydes, relient tous les points ayant la même teneur en vapeur d'eau.

$$x = \frac{m_{eau}}{m_{air\ sec}}$$

où m_{eau} est la masse d'eau et $m_{air,sec}$ celle de l'air sec.

L'**humidité relative**, notée Hr , exprime le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est exprimée en pourcentage (%). Lorsque l'air est saturé de vapeur d'eau, son humidité relative est de 100 %, et il se situe sur la courbe de saturation du diagramme. Si l'on divise par deux la teneur en vapeur d'eau, on obtient un air à $Hr = 50 \%$, représentant un état où l'air est à moitié saturé. Sur le diagramme, on peut ainsi tracer tout un réseau de courbes d'humidité relative constante, permettant de visualiser les différentes zones de confort ou de saturation.

Température de rosée

La température de rosée, notée t_r , correspond à la température à laquelle il faut refroidir l'air humide à pression constante pour que la vapeur d'eau qu'il contient atteigne la saturation et

commence à se condenser. Sur le diagramme, cette température se détermine en suivant une isohydre (ligne à humidité absolue constante) vers la courbe de saturation. Le point d'intersection correspond au point de rosée du mélange considéré, et la température lue sur l'axe horizontal donne t_r . Elle se mesure à l'aide d'un hygromètre à condensation, qui détecte la température à laquelle la condensation débute sur une surface refroidie.

Enthalpie de l'air humide

L'enthalpie, notée h , représente la quantité totale de chaleur contenue dans l'air humide. Elle comprend à la fois la chaleur sensible de l'air sec et de la vapeur d'eau, ainsi que la chaleur latente liée à la vaporisation de l'eau.

Elle s'exprime en kilojoules par kilogramme d'air sec (kJ/kg). On considère que l'air dont $t_s = 0\text{ }^\circ\text{C}$ et $x = 0\text{ g/kg}$ a une enthalpie de référence égale à 0 kJ/kg.

Les lignes obliques figurant sur le diagramme sont des isenthalpes (ou lignes à enthalpie constante). Leur orientation permet de déterminer les transformations thermiques de l'air humide.

$$h = h_{\text{air sec}} + x \times (h_{\text{vapeur eau}} + r)$$

où :

- $h_{\text{air sec}}$ est l'enthalpie nécessaire pour chauffer l'air sec de $0\text{ }^\circ\text{C}$ à t_s (chaleur sensible),
- $h_{\text{vapeur eau}}$ est l'enthalpie nécessaire pour élever la vapeur d'eau de $0\text{ }^\circ\text{C}$ à t_s ,
- r est l'enthalpie de vaporisation de l'eau à $0\text{ }^\circ\text{C}$ (chaleur latente).

Dans les conditions de température et de pression atmosphérique habituelles, cette équation se simplifie et s'écrit :

$$h = 1,005 t_s + x (2500 + 1,84 t_s)$$

Masse volumique de l'air humide

Les lignes légèrement inclinées vers la gauche du diagramme représentent des droites à masse volumique constante, exprimée en kg/m^3 . La masse volumique dépend à la fois de la température, de la pression et de la teneur en vapeur d'eau. En général, plus la température augmente, plus la densité de l'air diminue, en raison de la dilatation du mélange gazeux.

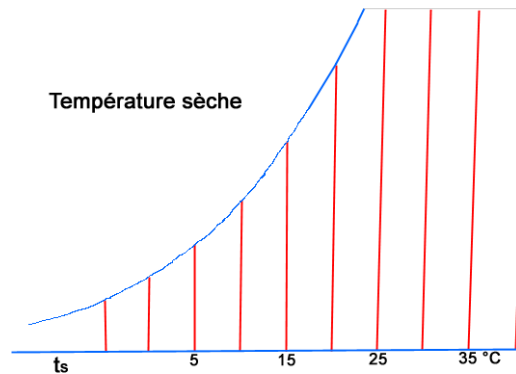
8.2. Lecture Diagramme psychométrique

Température de bulbe sec

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment :

température sèche : t_s en $^\circ\text{C}$.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante.

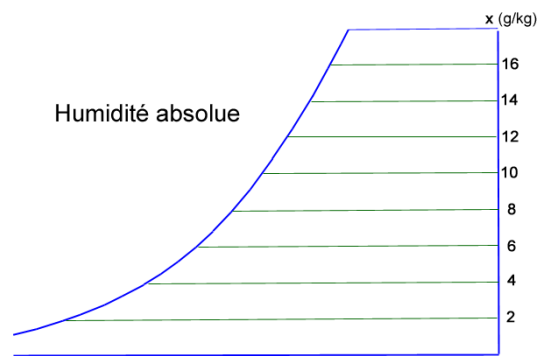


Humidité absolue

L'axe vertical de droite représente cette autre grandeur fondamentale qui indique la teneur en vapeur d'eau de l'air considéré.

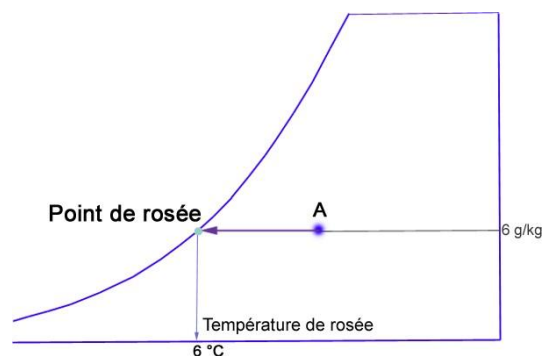
L'humidité absolue x (ou w) s'exprime en *gramme* d'eau par *kilogramme* d'air (**g/kg**).

Les lignes horizontales, appelées *isohydes*, sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.



Température de rosée

Si on se déplace à partir d'un point A du diagramme, sur une *isohydre*, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé *point de rosée*, dont la température lue sur l'axe horizontal est la température de rosée de A : t_r .

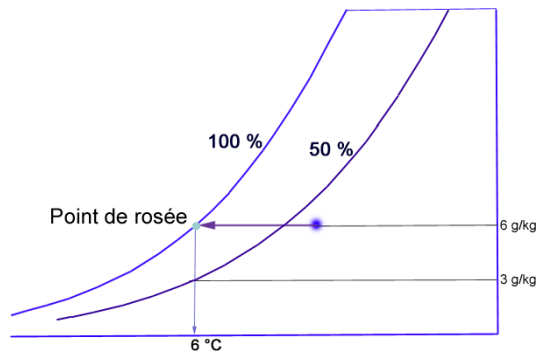


Humidité relative

L'air situé sur la ligne de saturation, citée plus haut, est saturé de vapeur d'eau. On dit que son humidité relative H_r est de 100 %. C'est une ligne à humidité relative constante.

Si l'on divise la teneur en vapeur d'eau par deux, l'air se trouve sur une ligne saturée de moitié, c'est-à-dire à $H_r = 50 \%$

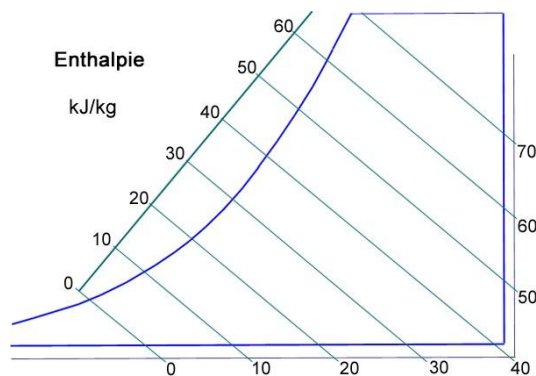
On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative constante.



Enthalpie

L'enthalpie h est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en kJ/kg (ou en kcal/kg, autrefois). On considère que, l'air dont sa température $t_s = 0 \text{ °C}$ et sa teneur en vapeur d'eau $x = 0 \text{ g/kg}$, a une enthalpie $h = 0 \text{ kJ/kg}$.

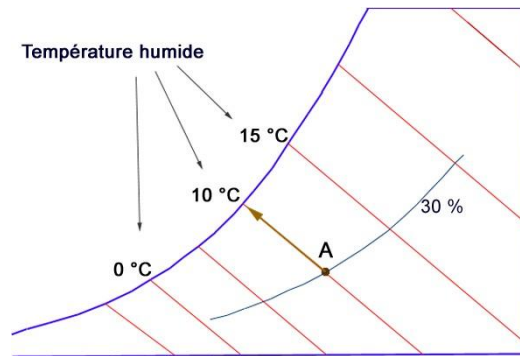
Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées *isenthalpes*.



Température de bulbe humide

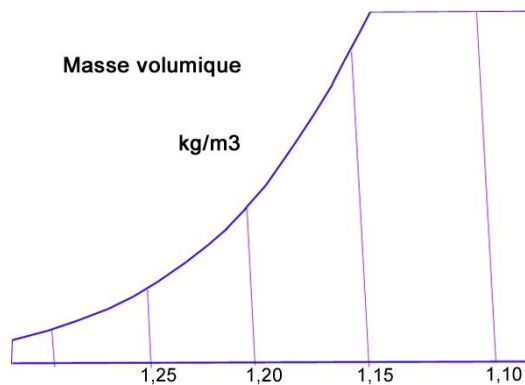
Si d'un point A du diagramme on se déplace sur une *isenthalpe*, on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide t_h du point initial considéré.

On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé *psychromètre*.



Masse volumique

Les lignes légèrement inclinées vers la gauche sont des droites à masse volumique constante. Elles s'expriment en kg/m^3 .



Pour déterminer exactement l'état dans lequel se trouve un air humide considéré pris à une pression barométrique donnée, il suffit d'en connaître deux grandeurs physiques. Les autres peuvent être déterminées à l'aide du diagramme psychrométrique.

Chapitre 2 : Différents modes de séchage

Le séchage thermique est un procédé au cours duquel de l'énergie calorifique est utilisée pour éliminer l'eau contenue dans un produit solide ou semi-solide. Cette opération repose sur la combinaison de transferts de chaleur et de matière qui permettent la vaporisation de l'eau et son évacuation vers le milieu ambiant. Le séchage thermique peut être réalisé selon deux mécanismes principaux : **le séchage par entraînement** et **le séchage par ébullition**.

1. Séchage par entraînement

Le **séchage par entraînement** (ou séchage convectif) est le mode le plus couramment utilisé dans l'industrie agroalimentaire. Dans ce procédé, le produit est exposé à un flux d'air chaud et sec, qui assure simultanément le transfert de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau et le transfert de matière correspondant à l'élimination de la vapeur d'eau formée.

Le processus repose sur trois phénomènes successifs :

- **Le transfert de chaleur** de l'air chaud vers la surface du produit sous l'effet du gradient de température ;
- **La migration interne de l'eau** depuis les couches profondes du produit vers la surface, sous l'effet du gradient de pression de vapeur d'eau ;
- **L'évacuation de l'eau évaporée**, entraînée par le flux d'air vers l'extérieur du système.

Durant cette opération, la température de surface du produit reste inférieure ou égale à celle de l'air de séchage et demeure généralement nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau, ce qui permet de préserver partiellement les qualités sensorielles et nutritionnelles du produit.

Ce type de séchage est largement utilisé pour les fruits, légumes, céréales, herbes aromatiques, produits carnés et produits laitiers, du fait de sa simplicité de mise en œuvre, de son adaptabilité à différents matériaux et de son coût énergétique modéré. Cependant, il peut entraîner certains inconvénients technologiques tels que le retrait, le durcissement superficiel (effet de croûte) ou la dégradation thermique de certains composés sensibles à la chaleur (vitamines, pigments, arômes volatils).

2. Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition correspond à un mécanisme dans lequel l'eau est éliminée après avoir atteint sa température d'ébullition, c'est-à-dire lorsque la pression de vapeur d'eau du produit

devient égale à la pression totale ambiante. Ce phénomène peut être obtenu par différents modes de chauffage :

- **Par conduction**, lorsque le produit est en contact direct avec une surface chaude (ex. : séchoirs à plateaux chauffants, tambours sécheurs) ;
- **Par rayonnement**, lorsque la chaleur est transmise par des ondes infrarouges ou micro-ondes ;
- **Par vapeur surchauffée**, qui transfère la chaleur par condensation et améliore le rendement énergétique ;
- **Par immersion**, dans un fluide chauffé (huile ou bain thermique).

La **température d'ébullition** dépend de deux paramètres essentiels :

- La **pression totale** : elle diminue lorsque la pression est réduite (séchage sous vide), permettant une évaporation à plus basse température, ce qui est favorable pour les produits thermosensibles ;
- L'**activité de l'eau (aw)** : plus elle est faible, plus la température d'ébullition augmente, car l'eau est alors plus fortement liée à la matrice solide.

Ce mode de séchage est donc particulièrement adapté aux procédés nécessitant une élimination rapide de l'eau ou une texture spécifique (ex. : séchage de purées, fabrication de poudres alimentaires, lyophilisation partielle). Cependant, il demande un contrôle rigoureux des conditions de température et de pression, car un chauffage excessif peut entraîner des modifications physico-chimiques irréversibles, telles que la caramélisation, la dénaturation des protéines ou la perte d'arômes.

3. Intérêt et inconvénients du procédé de séchage

3.1. Intérêt du procédé de séchage

Le séchage représente l'un des procédés les plus anciens et les plus utilisés pour la conservation des denrées alimentaires, notamment des fruits et légumes. Il consiste à éliminer une partie importante de l'eau contenue dans le produit, afin de réduire son activité de l'eau et ainsi limiter les réactions biologiques et chimiques responsables de la dégradation.

Sur le plan industriel, le séchage présente plusieurs avantages majeurs. Tout d'abord, il prolonge la durée de conservation des produits en inhibant la croissance des micro-organismes et l'activité enzymatique. Cette stabilisation permet de valoriser les productions saisonnières et de garantir la disponibilité des matières premières tout au long de l'année.

Ensuite, la réduction de la teneur en eau entraîne une diminution notable du poids et du volume des produits, ce qui facilite leur transport, leur conditionnement et leur stockage. Ce gain

logistique se traduit par une baisse des coûts de manutention et une amélioration de la rentabilité économique.

Le séchage peut également conférer aux produits des caractéristiques fonctionnelles ou sensorielles particulières. Selon les conditions appliquées, il permet d'obtenir des textures croustillantes ou friables, de concentrer les arômes, d'intensifier la couleur, ou encore de produire des formes spécifiques comme les poudres, les flocons ou les granulés utilisés dans de nombreuses formulations alimentaires.

Enfin, le procédé contribue à l'inactivation ou à l'inhibition des enzymes oxydatives telles que les polyphénoloxydases, responsables du brunissement enzymatique. Ce phénomène favorise le maintien de la qualité visuelle et nutritionnelle des produits déshydratés.

Ainsi, le séchage constitue une étape essentielle de la transformation agroalimentaire, permettant à la fois la stabilisation, la valorisation et la diversification des produits.

3.2. Inconvénients du procédé de séchage

Malgré ses nombreux avantages, le procédé de séchage présente plusieurs inconvénients susceptibles d'affecter la qualité finale du produit. En effet, la réduction de la teneur en eau s'accompagne souvent de modifications biochimiques, physiques et mécaniques plus ou moins marquées, selon les conditions opératoires appliquées.

Sur le plan biochimique, le séchage peut provoquer la dégradation de composés thermosensibles tels que les vitamines, les pigments et les composés volatils responsables des arômes. Ces pertes altèrent la valeur nutritionnelle et sensorielle des produits déshydratés. De plus, l'exposition prolongée à des températures élevées favorise les réactions de brunissement non enzymatique et d'oxydation des lipides, entraînant un rancissement ou un changement indésirable de couleur.

Sur le plan physique, le retrait de l'eau modifie la structure interne du matériau. Le produit peut subir un rétrécissement, une déformation ou l'apparition d'une texture rigide due au durcissement de surface. Ces phénomènes entraînent souvent une modification irréversible de la texture et une diminution de la capacité de réhydratation du produit lors de son utilisation ultérieure.

Le séchage affecte également les propriétés mécaniques, notamment la cohésion et la porosité du produit. Les protéines, lorsqu'elles sont exposées à une chaleur excessive, peuvent se dénaturer, ce qui modifie leur structure tridimensionnelle et leur fonctionnalité technologique.

Dans le cas des procédés utilisant des technologies spécifiques, comme le séchage par micro-ondes, la génération directe de chaleur au sein du produit constitue un avantage en termes de rapidité et d'efficacité énergétique. Cependant, cette méthode présente parfois une

hétérogénéité du traitement, liée à la distribution non uniforme du champ électromagnétique ou aux caractéristiques physiques du produit, ce qui peut entraîner des zones localement surchauffées ou insuffisamment séchées.

Ainsi, le choix des conditions de séchage doit résulter d'un compromis entre efficacité énergétique, rapidité du processus et préservation de la qualité nutritionnelle, sensorielle et structurale du produit final.

4. Phénomènes et mécanismes de transfert de chaleur et de matière lors du séchage

Le séchage est un processus complexe qui met en jeu des transferts simultanés de chaleur et de matière entre un fluide chaud (généralement de l'air) et un matériau humide. Ces échanges sont étroitement liés : la chaleur transférée au produit permet l'évaporation de l'eau, tandis que le transfert de matière correspond à la migration et à l'évacuation de cette eau sous forme de vapeur. La compréhension de ces mécanismes est essentielle pour optimiser les conditions de séchage et préserver la qualité physico-chimique et sensorielle du produit final.

4.1. Séchage convectif

Le **séchage convectif**, également appelé séchage par air chaud, est la méthode la plus couramment utilisée pour l'élimination de l'humidité dans les produits agroalimentaires. Il repose sur l'utilisation d'un flux d'air chaud et sec circulant autour du produit, assurant ainsi les transferts énergétiques et massiques nécessaires à la déshydratation.

Principe général :

Dans ce procédé, un corps humide est placé dans une enceinte où circule un gaz (souvent de l'air) à une température supérieure à celle du produit. Le chauffage peut être :

- **Naturel**, lorsque la convection se produit sans ventilation mécanique (le mouvement de l'air est alors dû aux différences de densité) ;
- **Forcé**, lorsque l'air est mis en mouvement à l'aide d'un ventilateur, ce qui favorise une **homogénéité thermique** et **accélère le transfert de chaleur**.

Le séchage convectif repose sur deux gradients fondamentaux (figure 1) :

- Un **gradient de température**, qui provoque le **transfert de chaleur** de l'air chaud vers le produit humide ;
- Un **gradient de pression partielle de vapeur d'eau**, qui entraîne le transfert de matière (l'eau évaporée) du produit vers l'air ambiant.

Ces deux phénomènes se produisent simultanément :

- La **chaleur sensible** de l'air est transmise à la surface du produit par **convection**, puis pénètre par **conduction** vers les couches internes ;
- L'**eau contenue dans le produit** migre des zones internes vers la surface par **diffusion liquide ou vapeur**, avant d'être évacuée dans l'air sous forme de vapeur.

La vitesse de ces transferts dépend de nombreux facteurs, notamment la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse du flux gazeux, la surface d'échange, ainsi que la porosité et la structure interne du produit.

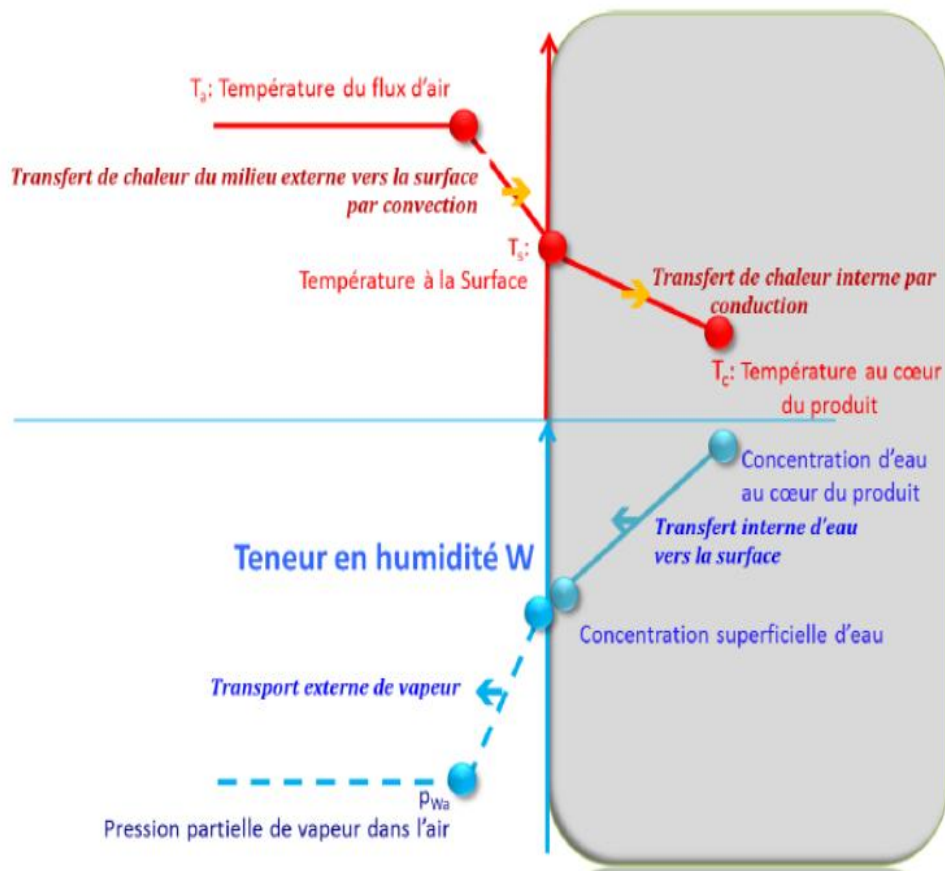


Figure 1 : Schéma traduisant les niveaux de température et d'humidité générant des flux de chaleur et de matière lors d'un séchage par convection d'air

L'un des dispositifs les plus utilisés pour ce type de séchage est l'étuve, un appareil clos permettant de maintenir des conditions climatiques contrôlées (température, humidité, circulation d'air). L'étuve est constituée d'une enceinte isolée, équipée d'un système de chauffage et, dans la plupart des cas, d'une ventilation assurant une circulation uniforme de l'air chaud.

Grâce à un réglage précis de la température et du débit d'air, il est possible de créer un environnement favorisant une évaporation progressive et homogène de l'eau contenue dans le produit. Ce mode de séchage est privilégié pour sa simplicité de mise en œuvre, sa flexibilité d'utilisation et son adaptabilité à une large gamme de produits alimentaires (fruits, légumes, céréales, produits carnés, etc.).

Cependant, le séchage convectif présente certaines limites : un temps de séchage parfois long, une consommation énergétique élevée, et des altérations de la qualité dues à une exposition prolongée à la chaleur (brunissement, perte d'arômes, rétraction du produit). C'est pourquoi de nombreuses études visent aujourd'hui à optimiser les paramètres de séchage ou à combiner cette technique avec d'autres modes de transfert (micro-ondes, infrarouge, vide, etc.) pour améliorer l'efficacité énergétique et la qualité du produit séché.

4.2. Séchage par conduction

Dans le procédé de séchage par conduction, l'énergie thermique nécessaire à l'élimination de l'eau n'est pas transmise par un gaz circulant autour du produit, comme c'est le cas dans le séchage convectif, mais par contact direct entre le produit humide et une surface chauffée. Cette paroi, généralement métallique, assure le transfert de chaleur vers le matériau à sécher, provoquant ainsi l'évaporation progressive de l'humidité qu'il contient.

Les vapeurs d'eau libérées au cours du processus sont ensuite évacuées de deux manières principales : elles peuvent être soit aspirées mécaniquement dans le cas du séchage par ébullition, soit entraînées par un faible flux de gaz de balayage. Ce dernier permet d'éliminer la vapeur formée tout en limitant les pertes thermiques, puisque le débit de ce gaz reste nettement inférieur à celui requis pour un séchage convectif classique.

Ainsi, le séchage par conduction se distingue par une transmission de chaleur directe et efficace, particulièrement adaptée aux produits solides en contact avec une surface chauffée, tout en permettant un meilleur contrôle des conditions thermiques du procédé.

4.3. Séchage par rayonnement

Le séchage par rayonnement repose sur un transfert d'énergie thermique assuré par des ondes électromagnétiques. Ce mode de séchage est principalement utilisé pour les produits présentés sous forme de plaques (comme le carton ou la viande) ou de films minces (tels que les tissus ou le papier). Il peut également convenir aux produits granulaires présentant une faible épaisseur, généralement comprise entre 1 et 2 cm, à l'image des cigarettes ou d'autres produits de structure fine.

Dans ce procédé, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par des radiations émises soit par des dispositifs électroniques produisant des ondes électromagnétiques, soit par

élévation de la température d'un corps émetteur infrarouge. En fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence des rayonnements utilisés, on distingue plusieurs catégories : les ondes électromagnétiques classiques, les infrarouges et les radiofréquences, chacune présentant des caractéristiques d'absorption différentes selon la nature du matériau à sécher.

Ainsi, le séchage par rayonnement permet un transfert d'énergie rapide et homogène, particulièrement efficace pour les produits de faible épaisseur, tout en assurant un bon contrôle du niveau de chauffage et du temps d'exposition.

4.3.1. Séchage par infrarouges

Le séchage par rayonnement infrarouge constitue le mode de transfert d'énergie radiative le plus ancien et l'un des plus simples à mettre en œuvre dans les procédés thermiques. Il repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques dans le domaine infrarouge, capables de transmettre directement leur énergie sous forme de chaleur au matériau à sécher.

L'un des avantages de cette méthode est qu'elle ne requiert pas de dispositifs électroniques complexes pour la génération du rayonnement. La production des infrarouges peut être obtenue par élévation de la température d'un corps émetteur, souvent une résistance chauffante, qui émet un flux d'énergie thermique dirigé vers le produit.

Dans le cadre du séchage industriel, les radiations utilisées possèdent une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 10 μm , plage dans laquelle l'absorption de l'énergie par la plupart des matériaux humides est particulièrement efficace. Ce mécanisme permet un échauffement rapide et uniforme des couches superficielles du produit, facilitant ainsi l'évaporation de l'eau libre tout en limitant la durée globale du procédé.

4.3.2. Séchage par radiofréquences

Le séchage par radiofréquences repose sur un principe différent, fondé sur l'interaction entre un champ électromagnétique oscillant et les molécules polaires présentes dans le matériau, en particulier les molécules d'eau. Sous l'effet du champ, ces molécules subissent une excitation dipolaire qui engendre une agitation moléculaire intense. Les chocs intermoléculaires qui en résultent se traduisent par une élévation rapide de la température interne du produit, provoquant ainsi l'évaporation de l'humidité.

Les radiofréquences employées dans les procédés de séchage industriel se divisent généralement en deux grandes catégories :

- Les hautes fréquences, dont la fréquence varie entre 3 et 300 MHz, correspondant à des longueurs d'onde comprises entre 1 et 100 mètres.

- Les micro-ondes, caractérisées par des fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, soit des longueurs d'onde allant de 1 millimètre à 1 mètre.

Cette distinction repose sur la gamme de fréquences utilisées, qui influence directement la profondeur de pénétration du rayonnement et la vitesse de chauffage du produit. Ainsi, le séchage par radiofréquences offre une chauffe volumique plutôt que superficielle, permettant une déshydratation plus homogène, en particulier dans les matériaux d'épaisseur moyenne.

Chapitre 3 : Calculs sur les séchoirs

1. Différentes étapes de la cinétique de séchage

La cinétique de séchage constitue un outil fondamental pour la compréhension et la modélisation des phénomènes de transfert intervenant lors du séchage. Elle permet de caractériser expérimentalement le comportement d'un produit soumis à une opération de déshydratation, en décrivant l'évolution de sa teneur en eau au cours du temps. La courbe de cinétique de séchage est généralement obtenue par des pesées successives du produit en cours de traitement, jusqu'à stabilisation de sa masse, ce qui indique que l'humidité résiduelle ne varie plus de manière significative.

Selon les paramètres considérés, la cinétique de séchage peut être représentée sous différentes formes (Fig. II.2) :

- **La variation de la teneur en eau en fonction du temps $X = f(t)$;**
- **La variation de la vitesse de séchage en fonction du temps : $-dX/dt = f(t)$;**
- **La variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau : $-dX/dt = f(X)$**

Ces différentes représentations permettent d'analyser le comportement global du produit au cours du séchage et de mettre en évidence les différentes phases du processus. Les formes exactes de ces courbes dépendent fortement de la nature du matériau, de sa structure interne (porosité, taille des particules, hygroscopicité) et des conditions opératoires (température, humidité relative, vitesse du flux d'air).

Ces trois types de représentation permettent de mettre en évidence la présence de plusieurs phases successives au cours du processus de séchage. Ces phases traduisent les différentes étapes de transfert de chaleur et de matière entre le produit et le milieu environnant. Toutefois, toutes les phases ne sont pas nécessairement observables pour chaque produit ou condition opératoire, car leur apparition dépend de la nature du matériau, de sa structure interne et du mode de séchage appliqué.

De manière générale, on distingue **trois phases caractéristiques** :

- **La phase transitoire de mise en température (AB)**

- La phase à vitesse de séchage constante (BC)
- La phase à vitesse de séchage décroissante (CD)

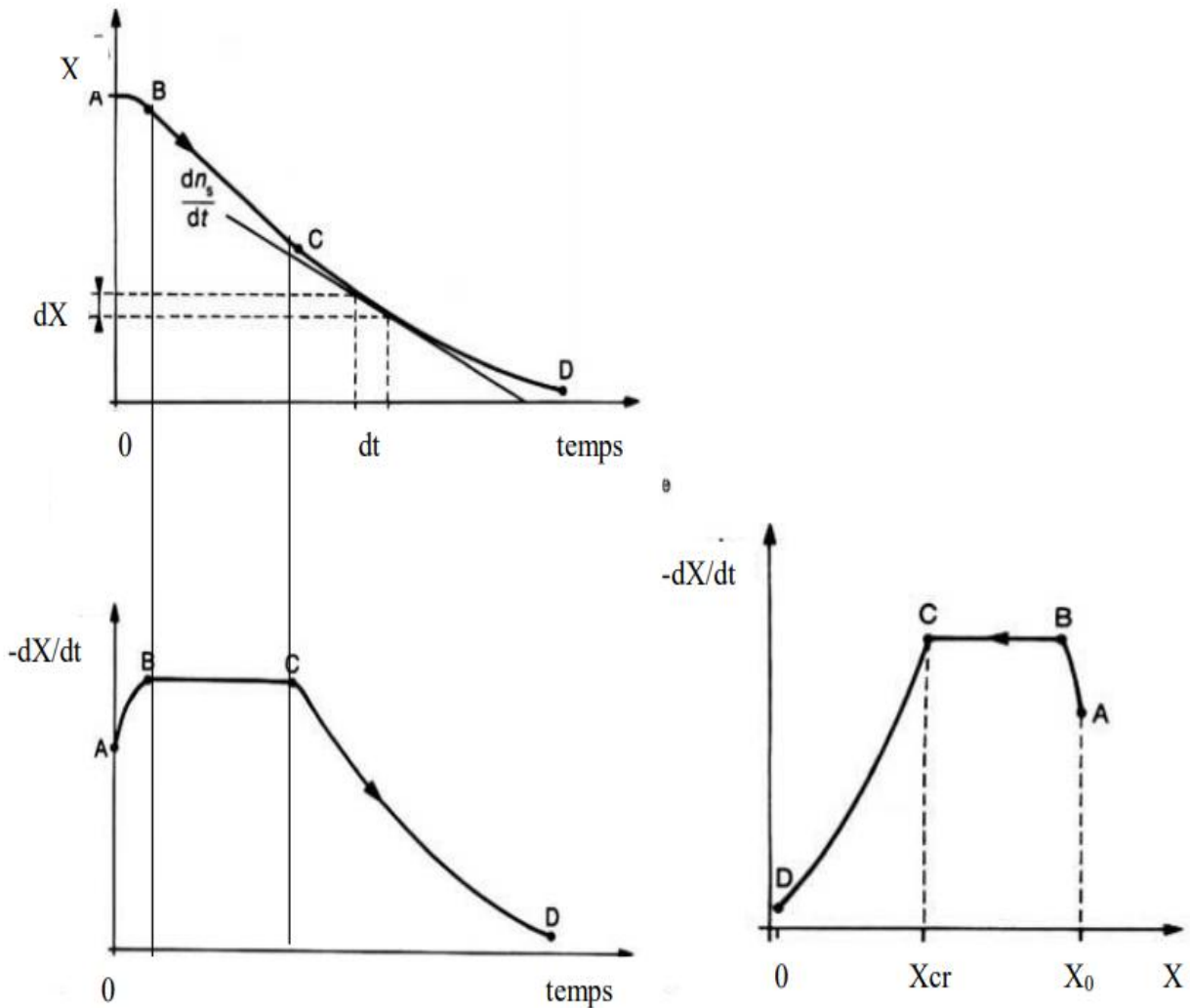


Figure 1 : Différentes représentations des courbes de cinétique de séchage

1.1.Phase de mise en température (AB)

Lorsque le produit est placé dans un milieu clos dont la température est supérieure à celle de sa surface, il s'établit un échange thermique et massique entre le produit et l'air asséchant. Ce transfert d'énergie provoque une élévation progressive de la température du matériau, tandis que l'humidité commence à migrer vers la surface.

Au début du processus, l'écart de température entre l'air chaud et le produit constitue le moteur principal du transfert thermique. Plus cet écart est important, plus l'énergie transmise par convection ou conduction est rapide, entraînant une augmentation sensible de la température du produit. Cette élévation thermique se traduit par une hausse de la pression de vapeur d'eau en surface, jusqu'à atteindre un état d'équilibre entre la température du produit et celle du milieu

ambient. À ce stade, la surface du matériau adopte la même température que l'air de séchage, marquant la fin de cette première phase.

La phase de mise en température demeure généralement brève par rapport à la durée totale du séchage. Elle n'est véritablement perceptible que dans certains cas particuliers, notamment lorsque le produit présente un volume important, une faible conductivité thermique, ou encore lorsque la différence de température entre l'air et le produit est suffisamment élevée pour ralentir l'homogénéisation thermique.

1.2.Phase à vitesse constante ou période à allure constante (BC)

La phase de séchage à vitesse constante correspond à l'étape durant laquelle se produit essentiellement l'évaporation de l'eau libre présente à la surface du produit. Tout au long de cette période, qui se prolonge jusqu'au point critique, la surface demeure saturée en humidité, c'est-à-dire que l'activité de l'eau y est proche de l'unité ($a_w = 1$). Une couche limite gazeuse se forme alors autour du produit, dans laquelle la pression de vapeur d'eau est pratiquement égale à celle de l'eau pure aux mêmes conditions de température et de pression .

Le liquide contenu à l'intérieur du matériau migre vers la surface sous l'effet des forces capillaires, qui assurent une remontée continue de l'eau. Ce renouvellement constant de l'humidité permet de maintenir une fine pellicule liquide à la surface, laquelle compense les pertes dues à l'évaporation. Ainsi, tant que cette alimentation en eau reste suffisante, la vitesse de séchage demeure constante, car l'évaporation se déroule dans des conditions d'équilibre dynamique entre l'apport d'eau interne et son élimination en surface.

Cette situation résulte soit de la présence d'une quantité importante d'eau libre en surface, soit d'une diffusion interne de l'humidité vers la périphérie du produit à une vitesse suffisante pour entretenir le film liquide. Toutefois, lorsque cette migration devient insuffisante pour compenser les pertes, la pellicule d'eau discontinue se rompt, entraînant une diminution progressive de la vitesse de séchage.

Cette phase n'est pas toujours observable, notamment dans le cas des produits d'origine végétale présentant une teneur en eau initiale élevée. En effet, la structure cellulaire complexe de ces matériaux, caractérisée par des parois rigides et semi-perméables, freine la migration de l'eau libre vers la surface, empêchant la formation d'un film continu. Dans ces conditions, le séchage passe directement à une phase de vitesse décroissante.

1.3.Phase à vitesse décroissante ou période de ralentissement (CD)

La phase à vitesse décroissante, encore appelée période de ralentissement, succède directement à la phase à vitesse constante, lorsque celle-ci est identifiable. À ce stade, la surface du produit n'est plus saturée en eau, et la vitesse de séchage commence à diminuer

progressivement. Le transfert de masse n'est plus gouverné par les seules conditions extérieures (température et vitesse de l'air), mais par les mécanismes internes de déplacement de l'humidité à l'intérieur du matériau.

Durant cette période, la migration de l'eau depuis le cœur du produit vers sa surface devient de plus en plus lente. Le flux d'humidité n'est plus suffisant pour maintenir une pellicule continue d'eau libre en surface, de sorte que l'évaporation se déplace à l'intérieur de la matière. Il se forme alors, dans les produits poreux, un front d'évaporation qui progresse graduellement vers le centre du produit. Ce déplacement rend le parcours de la vapeur d'eau plus long et plus complexe, entraînant une diminution de la pression de vapeur à la surface et, par conséquent, une réduction du potentiel d'échange entre le produit et l'air ambiant. La vitesse de séchage décroît donc continuellement au fur et à mesure que le séchage avance.

Cette diminution progressive s'explique également par l'augmentation de la teneur en matière sèche, qui conduit à une élévation de la résistance thermique de la couche de produit au transfert de chaleur. Plusieurs phénomènes conjugués contribuent à ce ralentissement :

- **La disparition de l'eau libre en surface** : la zone d'évaporation, initialement située à la surface, se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, on observe la migration de l'eau libre, tandis qu'en aval, ce sont essentiellement l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacuées.
- **L'épaisseur du produit** : plus la couche du matériau est importante, plus la vapeur d'eau doit parcourir une distance longue avant d'être libérée, ce qui réduit l'efficacité du transfert et accentue le ralentissement du séchage.
- **La diffusivité de l'eau dans le produit** : elle diminue avec la réduction de la teneur en eau. Ainsi, à mesure que le produit s'assèche, sa perméabilité à l'eau devient plus faible, limitant la migration de l'humidité interne.
- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : dans le cas des produits biologiques, la rigidité des structures cellulaires entrave la migration de la vapeur d'eau vers l'extérieur, ralentissant davantage le processus.
- **Le phénomène de croûtage** : certains composés solubles, tels que les sucres et les sels, sont entraînés avec l'eau évaporée pendant la phase à vitesse constante et se cristallisent à la surface du produit. Cette croûte superficielle agit comme une barrière au transfert de masse et contribue à réduire la vitesse d'évaporation.

Ainsi, cette phase traduit un ralentissement global du processus de séchage, caractérisé par la transition entre l'élimination rapide de l'eau libre et la diffusion lente de l'eau liée à travers la matrice du produit.

2. Analyse de la cinétique de séchage de différents produits

Le séchage met en jeu des mécanismes complexes faisant intervenir à la fois le chauffage du produit, la vaporisation de l'eau à la surface d'échange, et le transport de la vapeur d'eau vers le milieu environnant. Ces phénomènes impliquent un transfert simultané de chaleur et de matière, où la chaleur se propage principalement par conduction au sein du matériau, tandis que l'eau se déplace sous l'effet de forces capillaires et par diffusion interne sous forme liquide et gazeuse.

La nature et l'intensité de ces phénomènes dépendent fortement des propriétés physiques, chimiques et structurales du produit à sécher. De nombreux travaux expérimentaux ont montré que la forme des courbes de séchage varie considérablement d'un produit à un autre, traduisant des comportements de transfert distincts.

2.1. Produits non hygroscopiques et peu déformables

Pour certains matériaux comme la **cellulose, le bois, l'argile ou le plâtre**, la cinétique de séchage présente généralement **les trois phases caractéristiques** :

- une **phase de mise en température** correspondant à l'échauffement du produit,
- une **phase à vitesse de séchage constante**, pendant laquelle la surface reste saturée en eau libre,
- et une **phase à vitesse décroissante**, lorsque la migration de l'eau devient le facteur limitant.

Dans ces matériaux, la structure interne reste relativement stable pendant le séchage, et les forces capillaires permettent un apport continu d'eau vers la surface, maintenant temporairement une vitesse d'évaporation constante.

2.2. Produits alimentaires et agricoles

Dans le cas des produits alimentaires, le comportement au séchage est beaucoup plus complexe. Ces produits sont souvent hétérogènes, poreux, compressibles et riches en constituants organiques (sucres, protéines, lipides), ce qui influence la migration de l'eau et la dissipation de la chaleur.

De manière générale, les courbes de séchage des produits agricoles et alimentaires ne présentent pas de phase à vitesse constante bien définie. Dès les premières minutes du séchage, la vitesse d'évaporation tend à décroître progressivement, traduisant une limitation par la diffusion interne de l'eau.

Cette absence de phase constante s'explique par plusieurs facteurs :

- La **déformation structurale** du produit au cours du séchage (rétrécissement, durcissement de surface, formation de croûte) qui modifie la perméabilité à l'eau ;
- La **présence de parois cellulaires** qui entravent le déplacement du liquide, empêchant la compensation rapide de l'eau évaporée à la surface ;
- Le **mode de liaison de l'eau** dans la matrice alimentaire (eau capillaire, adsorbée ou liée) qui évolue avec le degré de dessiccation ;
- Les **différences de température interne**, qui influencent la diffusion et la tension de vapeur locale.

Ainsi, dans les produits alimentaires **structurés ou riches en matières sèches**, le déplacement de l'eau est principalement **contrôlé par diffusion**, et la migration capillaire joue un rôle secondaire. Cela conduit à une **cinétique de séchage entièrement décroissante**, où la vitesse diminue continuellement à mesure que le produit se déshydrate.

3. Variabilité du comportement et classification des produits

Les observations expérimentales ont mis en évidence que le comportement des produits durant le séchage n'est pas universel. Selon leur composition, leur structure et leur comportement viscoélastique, les produits peuvent manifester des cinétiques très différentes, certaines présentant les trois phases classiques, d'autres seulement une ou deux.

Cette diversité a conduit à la proposition de classifications des produits selon leur comportement cinétique. Ainsi, les matériaux peuvent être répartis en plusieurs classes distinctes en fonction de la présence ou non de la phase à vitesse constante, de la rapidité de la transition vers la phase décroissante et du type de transfert dominant (capillarité, diffusion liquide ou gazeuse).

Il a notamment été observé que de nombreux matériaux tels que le papier, la pomme de terre ou le bois, ne présentent aucune phase à vitesse constante, la vitesse de séchage diminuant dès le début du processus. Cette absence traduit un déséquilibre rapide entre l'évaporation de surface et la migration interne de l'eau, souvent amplifié par la formation de gradients thermiques et hydriques au sein du matériau.

En conclusion, l'analyse de la cinétique de séchage met en évidence que chaque produit possède un comportement spécifique résultant de ses caractéristiques internes et des conditions opératoires appliquées. La connaissance précise de ces mécanismes est essentielle pour adapter

les paramètres de séchage (température, vitesse d'air, humidité relative) et garantir un compromis optimal entre rendement énergétique et qualité du produit final.

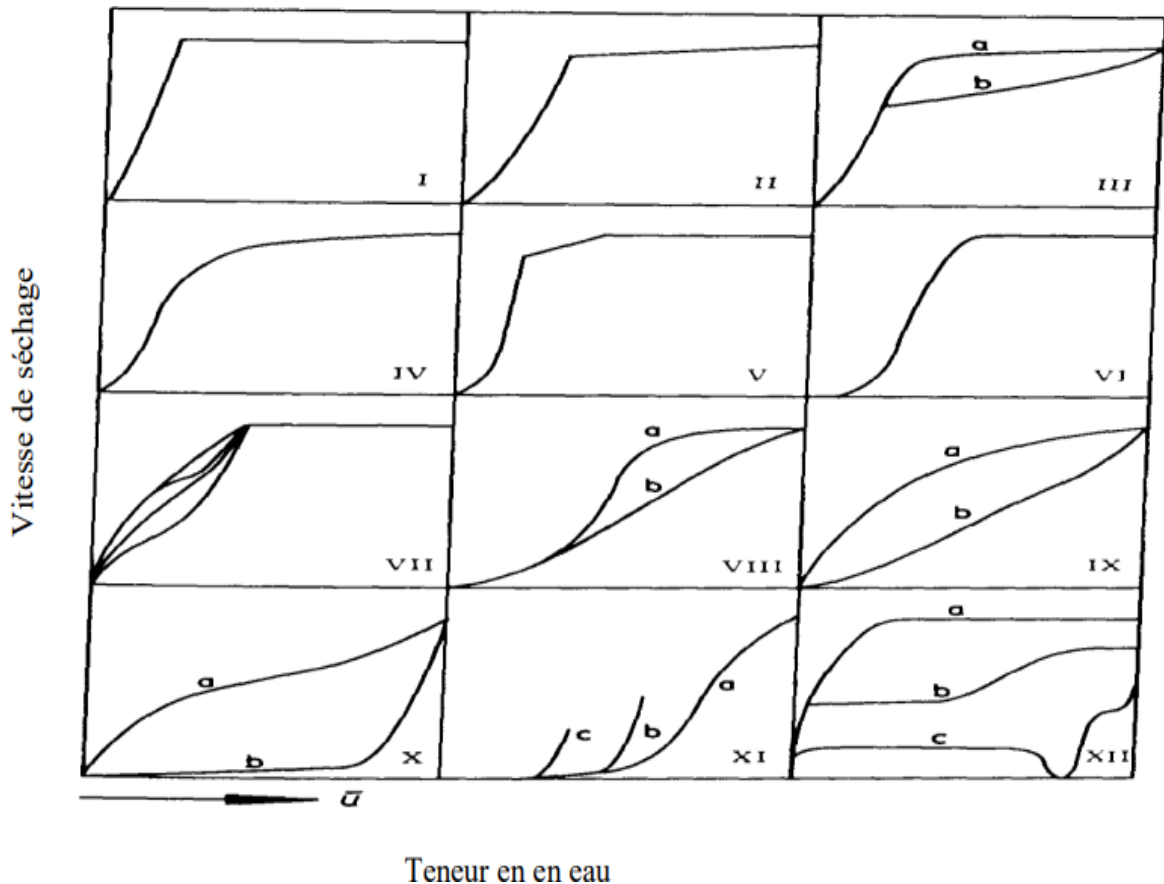


Figure 2 : Exemples de courbe de séchage pour différents produits. I : argile et cuir; II ; tuiles; III : lits de billes imprégnée de liquides organiques ; IV : polystyrène; V : sable; VI : Produit spécifique de classe 1 ; VII : particules de silicate de sodium; VIII : bois; IX-a): papier et laine IX-b): pomme de terre et tapioca; X-a) : pain de seigle et levure X-b) : beurre, margarine; XI : grains de blé; XII-a) : castine saturée d'eau XII-b) et XII-c) castine saturée avec différentes solutions de sel

4. Paramètres influençant le séchage

4.1. Influence de la température

La température de l'air asséchant est l'un des paramètres les plus importants influençant la cinétique de séchage. Son augmentation entraîne une élévation du gradient thermique entre l'air et le produit, ce qui favorise le transfert de chaleur vers le matériau et accélère l'évaporation de l'eau. Cette intensification du transfert d'énergie se traduit par une diminution significative du temps nécessaire pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre.

Lorsque la température de séchage augmente, la pression de vapeur de l'eau à la surface du produit devient plus élevée, ce qui amplifie le flux de vapeur vers le milieu extérieur. Par

conséquent, la vitesse de séchage s'accroît dans les premières phases du processus, où l'eau est principalement libre et plus facilement évacuée.

Cependant, une température excessive peut altérer la qualité du produit final. Elle peut provoquer une dénaturation des protéines, une dégradation des pigments et des vitamines, ainsi qu'un brunissement non enzymatique susceptible de modifier la couleur, la saveur et la valeur nutritionnelle. Il est donc essentiel de choisir une température optimale permettant de maintenir un équilibre entre rapidité du séchage et préservation des propriétés physicochimiques et organoleptiques du produit.

La température de séchage doit ainsi être adaptée à la nature du produit, à sa teneur initiale en eau, à sa sensibilité thermique et aux caractéristiques recherchées du produit fini.

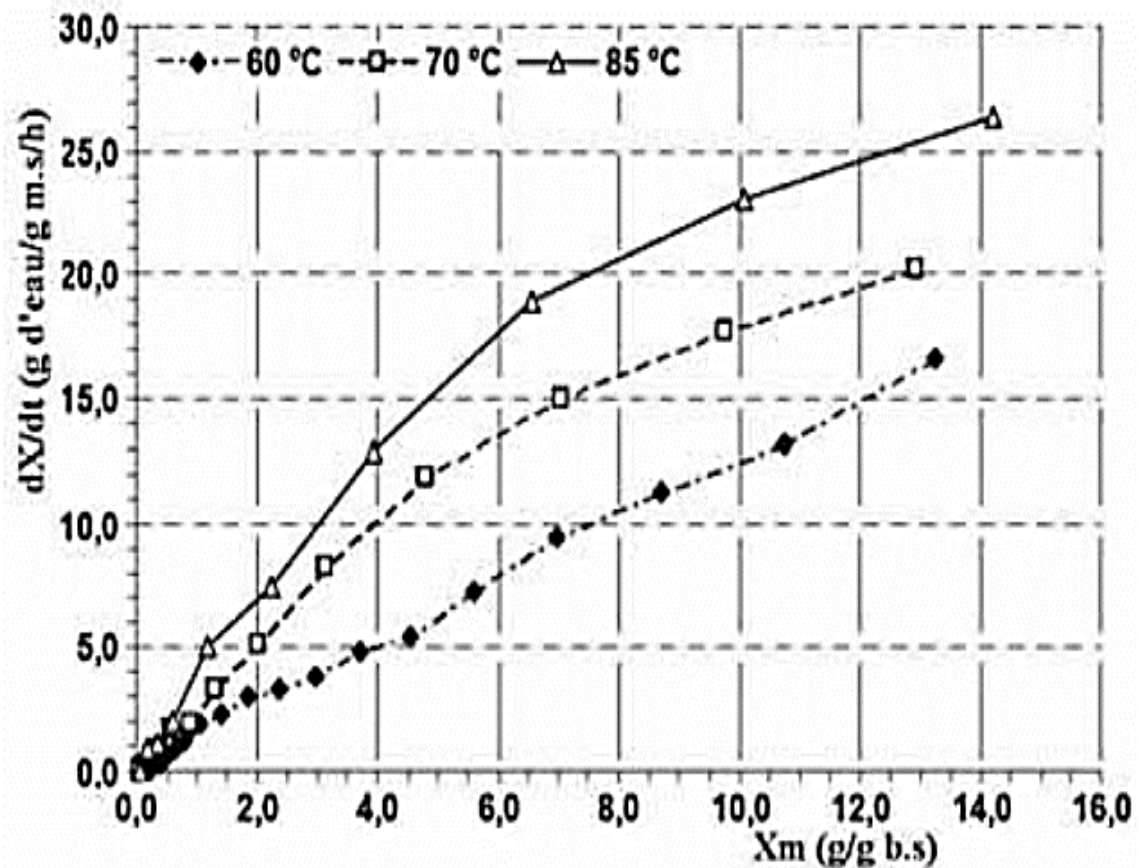


Figure 3 : Vitesse de séchage cardon en fonction de la température

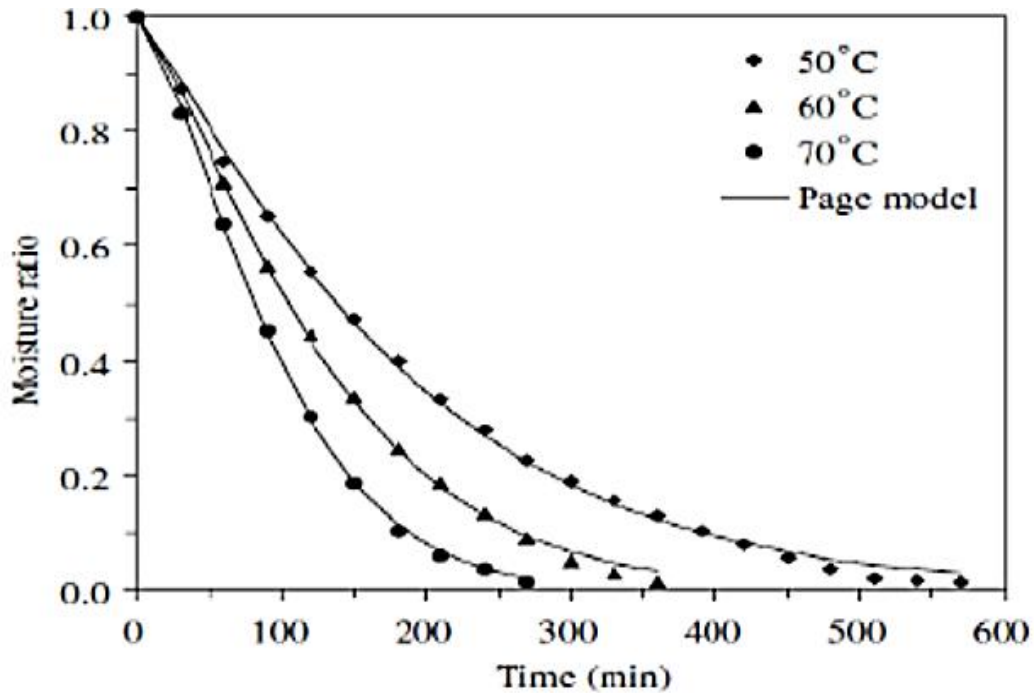


Figure 4 : Influence de la température sur la cinétique de séchage du pois

4.2. Influence de l'épaisseur ou du diamètre de la découpe

L'épaisseur ou le diamètre des échantillons constitue un paramètre déterminant dans la cinétique de séchage. La taille des morceaux conditionne la surface d'échange entre le produit et l'air asséchant, influençant ainsi la vitesse d'évaporation de l'eau.

En général, plus la découpe est fine, plus la surface exposée à l'air chaud est importante par rapport au volume total du produit, ce qui favorise un transfert de chaleur et de masse plus rapide. Par conséquent, les produits découpés en tranches minces atteignent plus rapidement leur teneur en humidité d'équilibre, réduisant de manière significative la durée totale du séchage.

À l'inverse, une épaisseur plus importante entraîne une résistance interne accrue à la diffusion de l'humidité. L'eau située au cœur du produit met alors plus de temps à migrer vers la surface, ce qui ralentit la vitesse de séchage. Ce phénomène peut également provoquer des gradients d'humidité et de température à l'intérieur du matériau, susceptibles d'engendrer des défauts de texture tels que le durcissement de surface ou le retrait non uniforme.

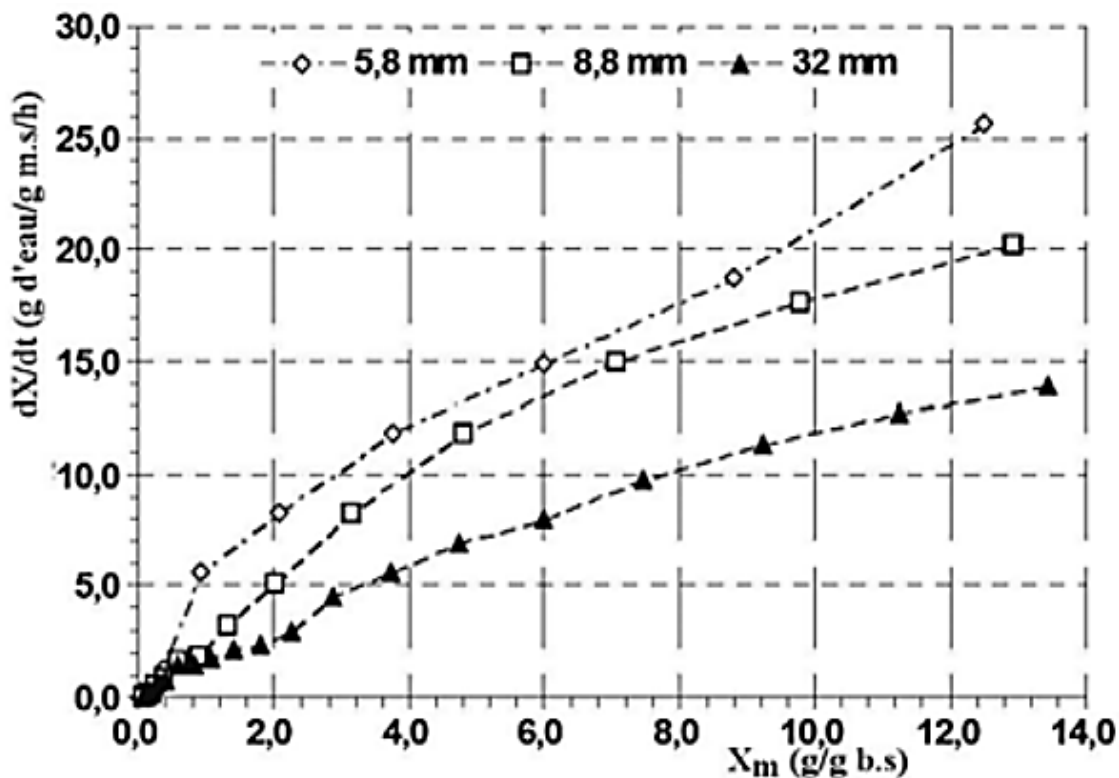


Figure 5 : . Effet l'épaisseur de la découpe sur la vitesse de séchage du carbon

4.3. Influence de l'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air constitue un facteur essentiel dans le processus de séchage, car elle détermine le gradient de pression de vapeur entre la surface du produit et l'air ambiant. Ce gradient est le moteur principal du transfert de masse de l'eau sous forme de vapeur.

Lorsque l'humidité relative de l'air diminue, la capacité de l'air à absorber la vapeur d'eau augmente, ce qui intensifie le flux de vapeur quittant la surface du produit. Dans ces conditions, la vitesse de séchage s'accroît et la durée nécessaire pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre est réduite.

À l'inverse, un air présentant une humidité relative élevée est déjà partiellement saturé en vapeur d'eau. Le gradient de pression de vapeur entre le produit et l'air devient alors plus faible, ce qui ralentit les transferts d'humidité et prolonge le temps de séchage.

Un contrôle rigoureux de l'humidité relative est donc indispensable pour optimiser l'efficacité du séchage. Une humidité trop faible peut toutefois entraîner un séchage trop rapide en surface, provoquant la formation d'une croûte rigide qui limite la diffusion interne de l'eau. Ainsi, le choix des conditions de séchage doit maintenir un équilibre entre la rapidité du processus et la préservation de la qualité structurale et sensorielle du produit.

Chapitre 4: Bilans sur les séchoirs

1. Généralités

Le séchage est un procédé très énergivore, représentant 10 à 20 % de la consommation énergétique industrielle totale dans la plupart des pays développés. La principale raison est la nécessité de fournir la chaleur latente d'évaporation pour éliminer l'eau ou autre solvant. Il existe donc des motivations claires pour réduire la consommation d'énergie lors du séchage : préserver les ressources limitées en combustibles fossiles, réduire l'empreinte carbone et lutter contre le changement climatique, et améliorer l'économie du procédé, mais c'est une tâche difficile confrontée à de réelles barrières thermodynamiques.

Une analyse efficace de la consommation énergétique actuelle est une première étape vitale pour identifier les opportunités d'économies. Une limite inférieure initiale des besoins énergétiques du séchoir est fournie par le calcul de la charge d'évaporation pour la quantité d'eau à éliminer. Cela montre la quantité d'énergie intrinsèquement requise et, en comparant avec la consommation énergétique mesurée actuelle, quelles opportunités existent pour réduire la consommation d'énergie. Celles-ci se répartissent en trois catégories principales :

- **Réduire la charge d'évaporation** – par exemple, par déshydratation en amont pour réduire la teneur en humidité initiale, ou en évitant le surséchage.
- **Augmenter l'efficacité du séchoir** – par exemple, en améliorant l'isolation et en réduisant les pertes de chaleur, en installant une récupération de chaleur ou en modifiant les paramètres opératoires.
- **Améliorer le système d'alimentation en énergie (utilités)** – par exemple, en augmentant le rendement de la chaudière, ou en utilisant la cogénération (CHP), les pompes à chaleur, l'incinération des déchets, ou d'autres combustibles alternatifs à faible coût.

Fréquemment, la charge d'évaporation sera inférieure à 50 % de la consommation énergétique réelle du procédé en termes de combustible fourni. Les nombreuses causes de cette différence incluent :

- Énergie supplémentaire requise pour rompre les liaisons et libérer l'humidité liée
- Pertes de chaleur dans les gaz d'échappement (particulièrement pour les séchoirs convectifs) ou à travers la paroi du séchoir

- Chauffage des solides et de la vapeur jusqu'à leur température de décharge
- Pertes de génération et de distribution de vapeur et pertes de condensats

2. Principes fondamentaux de l'utilisation de l'énergie dans les séchoirs

2.1. Charge d'évaporation

Nous utiliserons la définition commune d'un procédé de séchage comme étant celui où le liquide est éliminé d'un solide spécifiquement par évaporation. Ceci exclut les procédés de déshydratation mécanique tels que la filtration et la centrifugation. Par conséquent, pour réaliser le séchage, la chaleur latente d'évaporation doit être fournie pour transformer chaque kilogramme d'humidité en vapeur. Ainsi la quantité absolue minimale de chaleur ou autre énergie, $E_{v,\min}$ (J), qui doit être fournie pour un procédé de séchage est :

$$E_{v,\min} = M_v \Delta H_v$$

Il est souvent plus pratique d'utiliser le débit de chaleur correspondant, $Q_{v,\min}$ ($J s^{-1}$ ou W), qui est donné par :

$$Q_{v,\min} = W_v \Delta H_v$$

Pour un procédé continu, c'est

$$Q_{v,\min} = W_s (X_{in} - X_{out}) \Delta H_v$$

et pour un procédé discontinu (à tout instant)

$$Q_{v,\min} = M_s \left(\frac{-dX}{dt} \right) \Delta H_v$$

La chaleur latente varie avec la température. Pour le solvant le plus courant, l'eau, la chaleur latente d'évaporation est de 2501 kJ kg⁻¹ à 0°C et 2256 kJ kg⁻¹ à 100°C. Aux températures ambiantes, autour de 20°C, un chiffre de 2400 kJ kg⁻¹ est une bonne approximation de travail. Ainsi, pour un procédé de séchage nécessitant l'évaporation de 1 kg s⁻¹ d'eau du solide, un minimum absolu de 2400 kJ s⁻¹ (2400 kW) doit être fourni au procédé d'une manière ou d'une autre. Notez, cependant, que si le liquide entre avec le solide à une température, et émerge comme vapeur à une température plus élevée, une chaleur sensible supplémentaire sera nécessaire pour cela, en plus de la chaleur latente à température fixe.

2.2. Alimentation en énergie du séchoir

La charge d'évaporation est la demande d'énergie minimale pour le séchage, mais cette énergie doit être transférée aux solides de manière pratique, par exemple, à partir d'air chaud

(séchage convectif), d'une paroi ou surface chaude (séchage par contact ou conduction), ou en absorbant un rayonnement électromagnétique (séchage infrarouge, par radiofréquence ou micro-ondes). Le processus de fourniture de chaleur consomme généralement nettement plus d'énergie que la chaleur latente d'évaporation.

Pour un séchoir convectif continu (à air chaud), le devoir du réchauffeur pour l'échangeur de chaleur d'air entrant (excluant les pertes du réchauffeur) est donné par :

$$Q_{\text{heater}} = W_g c_{Pg} (T_{g,\text{in}} - T_{g,a})$$

Ici $T_{g,\text{in}}$ est la température d'entrée dans le séchoir et $T_{g,a}$ est la température à laquelle l'air est fourni. Inversement, lorsque l'air chaud est fourni au séchoir, les gaz d'échappement émergent à une température moyenne de $T_{g,\text{out}}$. Un simple bilan thermique sur un séchoir continu donne :

$$W_g c_{Pg} (T_{g,\text{in}} - T_{g,\text{out}}) \approx W_s (X_{\text{in}} - X_{\text{out}}) \Delta H_v + W_s c_{Ps} (T_{g,\text{out}} - T_{g,\text{in}}) + Q_{\text{loss}}$$

c'est-à-dire, chaleur cédée par l'air chaud = charge d'évaporation + chauffage sensible des solides + pertes de chaleur.

En combinant les équations, nous trouvons que, en première approximation :

$$Q_{\text{heater}} = \frac{(T_{g,\text{in}} - T_{g,a})}{(T_{g,\text{in}} - T_{g,\text{out}})} [W_s (X_{\text{in}} - X_{\text{out}}) \Delta H_v + Q_{s,\text{sens}} + Q_{\text{loss}}]$$

Ce serait l'énergie thermique requise pour faire fonctionner un séchoir adiabatique parfait, et aussi la quantité de combustible nécessaire si la chaleur était fournie par un système de conversion d'énergie parfait avec zéro perte. Nous voyons que, comparé à la charge évaporative de base, il y a des termes supplémentaires pour les pertes de chaleur dans les gaz d'échappement, le chauffage sensible des solides et les pertes de chaleur de la paroi du séchoir. Dans certains cas, les gâteaux de filtration peuvent être déshydratés en soufflant de l'air ambiant à travers eux, de sorte qu'un refroidissement par évaporation se produit et que l'air d'échappement humide émerge en dessous de l'ambiante. Aucune chaleur n'est alors requise, mais il y a une chute de pression significative à travers le gâteau, donc de l'énergie est nécessaire pour faire fonctionner les ventilateurs. De plus, le procédé est très lent – prenant typiquement plusieurs heures ou jours – parce que les forces motrices sont si faibles. De même, si la chaleur est fournie par conduction, il n'y a pas besoin d'un grand débit d'air pour transmettre la chaleur, et le besoin de chaleur sans gaz porteur tomberait à :

$$Q_{\text{heater}} = [W_s(X_{in} - X_{out})\Delta H_v + Q_{s,\text{sens}} + Q_{\text{loss}}]$$

Cependant, une force motrice de pression partielle ou d'humidité est nécessaire pour évacuer la vapeur des solides, sinon l'air local devient saturé de vapeur et les taux de séchage tombent vers zéro. Un flux de gaz porteur est requis, ou un vide doit être fait. Cela nécessite une puissance électrique supplémentaire pour les ventilateurs ou les pompes, ou de la vapeur pour les éjecteurs.

Enfin, si un système intègre l'adsorption d'eau par des zéolites, cela réduit la charge d'évaporation. Cependant, de l'énergie sera alors nécessaire pour régénérer la zéolite à son état sec pour réutilisation (ou pour fabriquer de nouvelle zéolite si elle ne peut pas être recyclée). Par conséquent, en pratique, l'énergie réelle qui doit être fournie est normalement considérablement plus grande que la charge d'évaporation. Les diverses pénalités énergétiques supplémentaires peuvent être décomposées dans les catégories suivantes :

- **Inefficacités thermiques dans le séchoir** : contenu calorifique des gaz d'échappement dans les séchoirs convectifs, chauffage sensible des solides, pertes de chaleur de la paroi du séchoir.
- **Inefficacités thermiques dans le système d'utilités (alimentation en chaleur)** : rendement de génération de vapeur, fuites de vapeur et pertes dans le réseau.
- **Demandes d'énergie supplémentaires** : énergie pour le transport des solides, les pompes à vide et les ventilateurs d'air.

2.3.Évaluation des inefficacités et pertes d'énergie : Exemple

Supposons un procédé continu avec un débit 1 kg s^{-1} de solide sec, étant séché de 12 à 2% d'humidité (base sèche) de sorte que $\Delta X=0,1 \text{ Kg kg}^{-1}$ et le taux d'évaporation $W_v=0,1 \text{ kg s}^{-1}$. Par conséquent, à partir de l'équation 1.2, $Q_{v,\text{min}}=240 \text{ kW}$

Un diagramme psychrométrique fournit un moyen pratique et rapide d'estimer les enthalpies et les conditions de sortie. Un diagramme de Grosvenor (température-humidité) ou de Mollier (enthalpie-humidité) peut être utilisé. Il prend en compte des facteurs supplémentaires, tels que la chaleur supplémentaire requise pour chauffer la vapeur d'eau de 20°C à la température des gaz d'échappement. En lisant l'humidité des gaz d'échappement, le débit d'air requis peut être calculé en utilisant un bilan matière sur le solvant ; alternativement, si le débit d'air du séchoir est connu, le taux d'évaporation maximum peut être trouvé. En supposant des fuites négligeables, le bilan matière est :

$$W_g(Y_{\text{out}} - Y_{in}) = W_v = W_s(X_{in} - X_{out})$$

Pour les séchoirs convectifs, la chaleur est fournie par de l'air chaud. Supposons que l'air entrant est à 150°C, qui est chauffé par de la vapeur à partir de l'ambiante (20°C), et que l'humidité ambiante est 7,5 g kg⁻¹ (0,0075 kg kg⁻¹), correspondant à un point de rosée de 10°C). Soit par calcul ou en lisant sur un diagramme psychrométrique (Figure 1), l'enthalpie est d'environ 40 kJ kg⁻¹ pour l'air ambiant (point 1 sur le graphique) et 170 kJ kg⁻¹ pour l'air entrant (point 2), de sorte que 130 kJ kg⁻¹ doit être fourni dans le réchauffeur d'air. À des fins d'illustration, ces chiffres d'enthalpie et d'autres seront arrondis tout au long des calculs suivants.

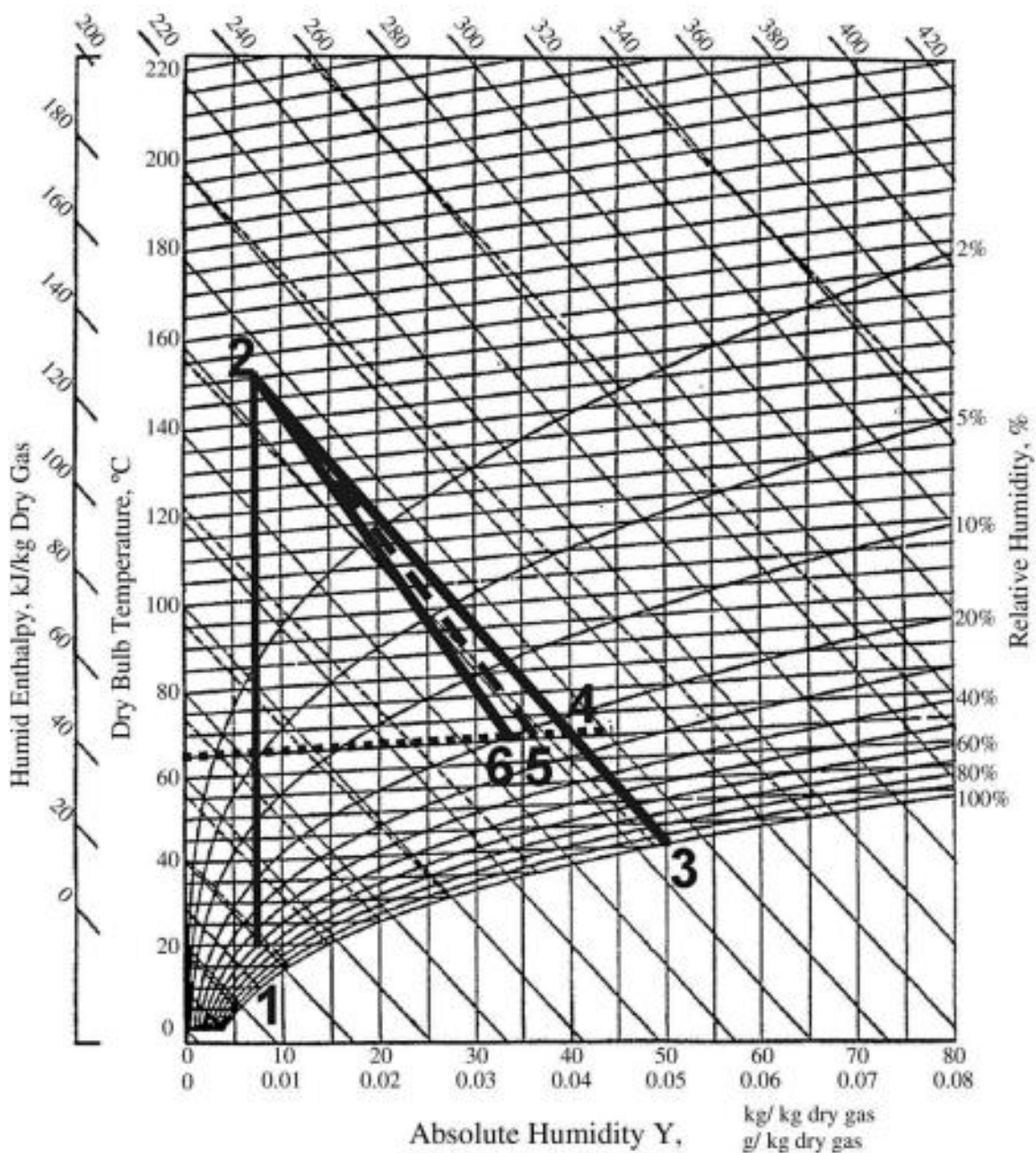


Figure 1 : Diagramme psychrométrique de Mollier avec les lignes de fonctionnement pour un séchoir convectif à chauffage indirect.

Aussi, en substituant les nombres appropriés dans l'équation, nous obtenons la relation utile

$$W_g = 0,1 / (Y_{out} - 0,0075)$$

3. Analyse énergétique des systèmes de séchage

3.1. Bilan massique et énergétique

Dans la majorité des procédés industriels de séchage, la chaleur est fournie extérieurement aux produits par de l'air chaud ou de la vapeur surchauffée, afin d'apporter l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. Les mécanismes d'apport de chaleur, dans ce cas, comprennent le transfert de chaleur par convection entre le milieu ambiant et le corps séché, ainsi que la conduction et la convection de la chaleur à l'intérieur du corps par la masse. Dans ce type d'apport thermique, le flux de chaleur se produit dans une direction opposée à celle du flux d'humidité, ce qui entraîne une interférence entre le transport thermodiffusionnel de l'humidité et le transport diffusif ou capillaire. Dans ce cas, la surface du produit se dessèche très rapidement, provoquant un retrait et générant des contraintes de tension. De plus, ce retrait entraîne un durcissement de la couche superficielle, ce qui augmente considérablement la résistance au transfert de masse à la surface. La couche déshydratée agit également comme un isolant, augmentant ainsi la résistance au transfert de chaleur. Par conséquent, la chaleur fournie au produit par la surface doit être constamment contrôlée afin d'éviter toute détérioration du produit séché.

La chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau peut également être générée de manière volumétrique, comme dans le cas du séchage diélectrique ou micro-ondes. Ce type d'apport de chaleur élimine la nécessité de transférer la chaleur de la surface sèche vers le cœur humide, et supprime ainsi la plupart des défauts liés à l'apport externe de chaleur. Malgré ses nombreux avantages, la génération volumétrique de chaleur est rarement utilisée dans le séchage industriel, principalement en raison des difficultés techniques liées à la mise en œuvre du séchage diélectrique ou micro-ondes, ainsi que de son coût élevé. Elle est donc réservée aux produits très coûteux et sensibles.

Le transfert d'humidité dans les matériaux séchés peut s'effectuer à la fois sous forme liquide et gazeuse. Les mécanismes suivants de déplacement de l'humidité dans les matériaux séchés sont couramment décrits :

- **Mouvement du liquide dû aux forces capillaires** : concerne l'eau contenue dans les capillaires, en particulier pendant la première période de séchage. Le mouvement de l'humidité est causé par le gradient de potentiel capillaire.

- **Diffusion liquide due aux gradients de concentration** : suppose que le flux d'humidité sous forme liquide est proportionnel à la concentration d'humidité à l'intérieur du matériau.
- **Écoulement liquide et vapeur dû aux différences de pression totale** : similaire au modèle de Darcy. La pression externe, le retrait, les hautes températures et la capillarité peuvent provoquer ce type de mouvement, observé principalement pendant la première période de séchage.
- **Diffusion de vapeur due à la différence de concentration en vapeur** : c'est le principal modèle de transfert de vapeur dans les pores capillaires, basé sur la loi de Fick. Il concerne principalement la deuxième période de séchage.
- **Diffusion de vapeur due aux gradients de pression partielle de vapeur (flux de Stefan)** : se produit lorsque la zone d'évaporation se déplace à l'intérieur du matériau. La production de vapeur à l'intérieur du matériau devient si intense qu'un gradient significatif de pression de vapeur apparaît.
- **Mouvement d'humidité dû à la pression osmotique** : concerne les corps colloïdaux contenant des fractions solubles et insolubles. Les fractions insolubles forment des cellules semi-perméables : perméables à l'eau mais non aux fractions insolubles. Une concentration plus faible de la fraction soluble à l'extérieur qu'à l'intérieur des cellules, après saturation en eau, provoque une augmentation de la pression interne. L'excès de pression à l'intérieur des cellules par rapport à l'extérieur est appelé pression osmotique. L'eau située à l'extérieur des cellules est éliminée pendant le séchage, ce qui entraîne une différence de pression provoquant le déplacement de l'eau depuis les cellules.
- **Effusion de vapeur** : se produit lorsque le libre parcours moyen des molécules de vapeur est de l'ordre du diamètre des pores. La vapeur s'écoule alors selon le modèle de Knudsen.
- La **thermodiffusion** se produit dans des conditions non isothermes. Le gradient de température entraîne un flux supplémentaire d'humidité, orienté dans la même direction que le flux de chaleur.
- Le **mécanisme d'évaporation-condensation** concerne la deuxième période de séchage (après le point critique de séchage), lorsque l'humidité présente à l'intérieur des capillaires adopte les formes *funiculaire* (liquide continu le long des parois des pores) et *pendulaire* (poches de liquide isolées).

Durant cette période, la température du produit augmente, de sorte que le gradient de température est orienté vers l'intérieur du corps. Les particules de liquide s'évaporent plus

rapidement à partir du ménisque situé dans la zone la plus chaude que depuis celui situé dans la zone plus froide. De plus, une partie de la vapeur présente dans la zone plus froide peut se condenser de nouveau à la surface du ménisque.

Ainsi, la courbure du ménisque dans la zone la plus chaude devient plus prononcée que celle du ménisque dans la zone plus froide. Comme la tension superficielle est plus élevée sur un ménisque à forte courbure que sur un ménisque à faible courbure, il en résulte une ascension capillaire de la poche de liquide vers la zone la plus chaude. De cette manière, les poches de liquide migrent progressivement vers la surface externe du matériau.

Dans les corps poreux présentant des pores relativement larges, la zone d'évaporation peut s'étendre à l'intérieur du matériau au cours du séchage. Le produit séché peut alors être divisé en trois zones distinctes :

- une zone non saturée, où l'humidité se déplace principalement sous forme de vapeur ;
- une zone d'évaporation, où la transformation de l'eau liquide en vapeur est active ;
- et une zone saturée, où le transport de l'humidité s'effectue essentiellement sous forme liquide.

La première étape de toute analyse énergétique est d'établir un bilan massique et énergétique détaillé pour le système de séchage. Cela devrait inclure tous les flux entrants et sortants, y compris l'air, les solides, la vapeur, l'eau de refroidissement, et l'énergie électrique. Le bilan doit être basé sur des mesures réelles si possible, ou sur des données de conception si les mesures ne sont pas disponibles. Les pertes et les inefficacités doivent être identifiées et quantifiées. Le bilan énergétique doit inclure à la fois l'énergie thermique et l'énergie électrique, et devrait idéalement être exprimé en termes d'énergie primaire pour permettre des comparaisons significatives.

Un séchoir par entraînement, avec son élément de chauffage, est représenté **Figure 2**.

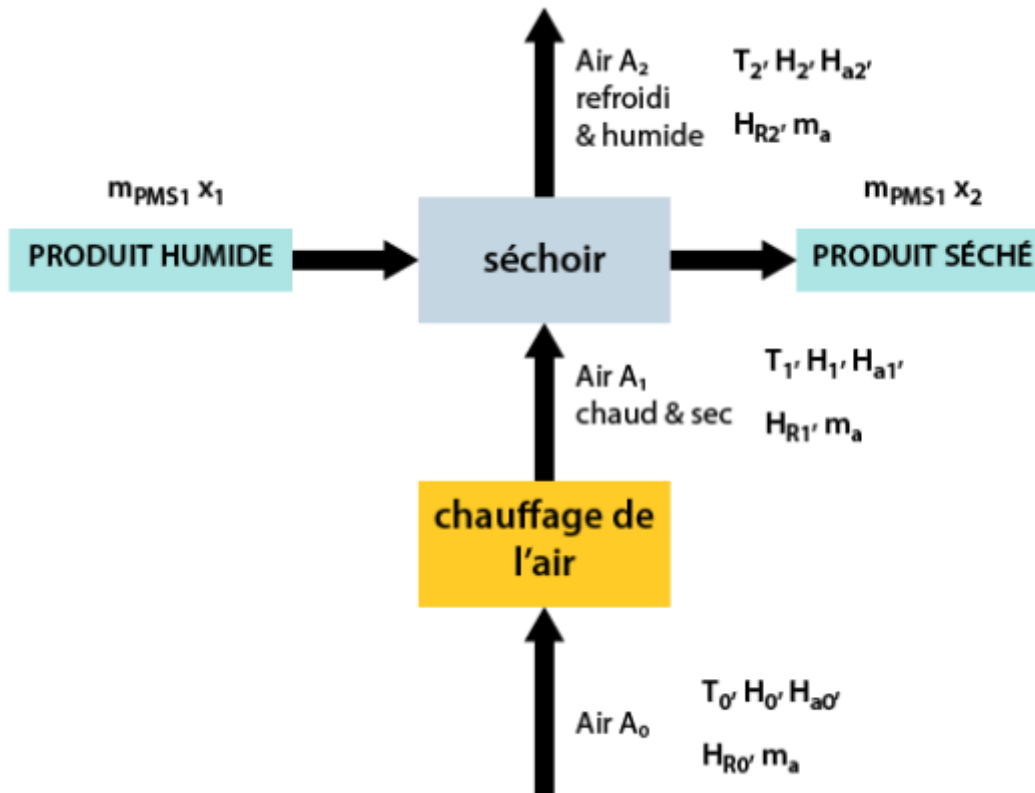


Figure 2 : Transfert entre l'air et la surface du produit

3.1.1. Bilan de matière

Principe :

La quantité d'eau évaporée pendant le séchage est égale à la différence entre :

- la quantité d'eau contenue dans le produit à l'entrée et à la sortie ;
- ou bien entre les teneurs en eau de l'air humide à l'entrée et à la sortie.

Équation du bilan d'eau :

Eau évaporée = Variation d'eau du produit = Variation d'humidité de l'air

$$\dot{m}_{sw} = \dot{m}_{ds} (W_{in} - W_{out}) = \dot{m}_{da} (x_{out} - x_{in})$$

avec :

- \dot{m}_{sw} : débit massique d'eau évaporée (kg/s) → quantité d'eau extraite du produit par unité de temps.
- \dot{m}_{ds} : débit massique de matière sèche du produit (kg MS/s) → débit du produit sec (sans eau), constant durant le séchage.
- \dot{m}_{da} : débit massique d'air sec (kg air sec/s) → quantité d'air sec traversant le séchoir, supposée constante.
- W_{in} : teneur en eau du produit à l'entrée (kg H₂O / kg MS) → rapport entre la masse d'eau et la masse de matière sèche du produit humide avant séchage.

- W_{out} : teneur en eau du produit à la sortie (kg H₂O / kg MS) → rapport entre la masse d'eau et la masse de matière sèche du produit humide après séchage.
- x_{in} : humidité absolue de l'air à l'entrée (kg H₂O / kg air sec) → quantité de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air sec avant le séchoir.
- x_{out} : humidité absolue de l'air à la sortie (kg H₂O / kg air sec) → quantité de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air sec après le séchoir.

$$\underbrace{\dot{m}_{ds}(W_{in} - W_{out})}_{\text{eau perdue par le produit}} = \underbrace{\dot{m}_{da}(x_{out} - x_{in})}_{\text{eau gagnée par l'air}}$$

3.1.2. Bilan énergétique pratique

Lors du séchage, l'énergie fournie ne sert pas uniquement à évaporer l'eau du produit. Elle est également utilisée pour :

- **chauffer le produit** (mise en température),
- **compenser les pertes thermiques** (fuites, rayonnement, conduction, etc.).

Ainsi, le bilan énergétique pratique s'écrit :

$$\dot{m}_{sw} \bar{\lambda} + \dot{m}_{ds} c_{p,p}(T_{p,out} - T_{p,in}) = \dot{m}_{da}(h_{a,in} - h_{a,out}) + Q_{ext} - Q_{loss}$$

- \dot{m}_{sw} : débit massique d'eau évaporée (kg/s) → quantité d'eau transformée en vapeur par unité de temps.
- $\bar{\lambda}$: chaleur latente moyenne de vaporisation (J/kg) → énergie nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau à la température moyenne du séchage.
- \dot{m}_{ds} : débit massique de matière sèche (kg/s) → masse de produit sec traversant le séchoir (constante).
- $c_{p,p}$: capacité calorifique du produit sec (J/kg·K) → quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 K la température du produit sec.
- $T_{p,in}, T_{p,out}$: températures du produit à l'entrée et à la sortie (°C) → traduisent le réchauffement du produit pendant le séchage.
- \dot{m}_{da} : débit massique d'air sec (kg/s) → masse d'air sec circulant dans le séchoir (constante).
- $h_{a,in}$ et $h_{a,out}$: enthalpie de l'air humide à l'entrée et à la sortie (J/kg air sec) → représentent l'énergie totale (sensible + latente) contenue dans l'air humide.
- Q_{ext} : chaleur apportée de l'extérieur (J/s ou W) → énergie fournie par la source de chauffage (vapeur, gaz chaud, résistance, etc.).

- **Q_{loss}** : pertes thermiques globales (J/s ou W) → énergie dissipée par les parois, les fuites d'air ou le rayonnement.

Dans cette relation, le premier membre représente l'énergie absorbée par le produit. $\dot{m}_{sw} \bar{\lambda}$ correspond à l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau, où $\bar{\lambda}$ désigne la chaleur latente moyenne de vaporisation, dont la valeur diminue légèrement avec l'augmentation de la température et se situe autour de $2,3 \times 10^6$ J/kg à 100 °C.

Le second terme, $\dot{m}_{ds} c_{p,p}(T_{p,out} - T_{p,in})$ représente la chaleur utilisée pour élever la température du produit. Ici, $c_{p,p}$ est la capacité calorifique du produit sec (en général comprise entre 1000 et 2000 J/kg·K), et $(T_{p,out} - T_{p,in})$ traduit le réchauffement subi par le produit au cours du séchage.

Le second membre de l'équation exprime l'énergie fournie au système. Le terme $\dot{m} da(ha, in - ha, out)$ représente l'énergie transférée par l'air humide au produit. L'enthalpie spécifique de l'air humide, ha , s'exprime par la relation :

$$ha = c_{p,air}T + x(2501 + 1,84T),$$

où T : est la température de l'air (en °C),

x : l'humidité absolue (en kg d'eau par kg d'air sec), et

$c_{p,air}$: la capacité calorifique de l'air sec (environ 1005 J/kg·K).

Le terme Q_{ext} désigne les apports externes de chaleur (vapeur, gaz chaud, résistance électrique, rayonnement, etc.), tandis que Q_{loss} correspond aux pertes thermiques globales par les parois, les fuites d'air ou le rayonnement. Ces pertes peuvent atteindre 10 à 30 % de l'énergie totale consommée selon le type et l'isolation du séchoir.

- Ainsi, le premier membre de l'équation traduit l'énergie effectivement utilisée par le produit (évaporation + chauffage), alors que le second membre représente l'énergie totale apportée par le fluide de séchage et les dispositifs de chauffage, diminuée des pertes. Le bilan énergétique permet donc de relier l'énergie fournie par l'air et les sources de chaleur à l'énergie réellement consommée par le produit et aux pertes du système.
- Dans le cas d'un séchage idéal dit **isenthalpique**, on suppose que l'enthalpie de l'air humide reste constante ($ha, in = ha, out$) que les pertes thermiques sont nulles ($Q_{loss} = 0$). Dans ces conditions théoriques, le bilan se simplifie et correspond à une situation où toute l'énergie transférée par l'air sert exclusivement à évaporer l'eau du produit. Cependant, en pratique, ces hypothèses ne sont jamais totalement vérifiées : les pertes thermiques, les fuites d'air et l'échauffement du produit influencent fortement

l'efficacité énergétique du procédé. Le bilan énergétique pratique constitue donc une base de calcul plus réaliste pour estimer la consommation énergétique d'un séchoir et évaluer son rendement thermique.

3.1.3. Consommation énergétique massique (CEM) et rapport de consommation énergétique (RCE)

L'évaluation de la performance énergétique d'un séchoir ne se limite pas à l'établissement du bilan énergétique. Elle nécessite également le calcul de deux indicateurs essentiels : la consommation énergétique massique (CEM) et le rapport de consommation énergétique (RCE). Ces paramètres permettent d'apprécier l'efficacité globale du procédé et d'optimiser les conditions de fonctionnement en minimisant les pertes d'énergie.

La consommation énergétique massique (CEM) représente la quantité totale d'énergie consommée pour éliminer une unité de masse d'eau du produit. Elle s'exprime par la relation :

$$\text{CEM} = \frac{Q_{tot}}{m_{\text{eau, évaporée}}}$$

où Q_{tot} est l'énergie totale fournie au séchoir (en kJ ou MJ) et $m_{\text{eau, évaporée}}$ la masse d'eau éliminée (en kg). En pratique, la CEM dépend fortement du type de séchoir, des conditions opératoires (température, débit d'air, humidité relative, vitesse de circulation), ainsi que des caractéristiques du produit (teneur initiale en eau, structure, surface spécifique, etc.). Plus la CEM est faible, plus le procédé de séchage est considéré comme énergétiquement efficace. Pour les séchoirs à air chaud utilisés dans l'industrie agroalimentaire, la CEM varie généralement entre 3000 et 8000 kJ/kg d'eau évaporée.

Le rapport de consommation énergétique (RCE), quant à lui, compare la consommation énergétique réelle du séchoir à celle théoriquement nécessaire pour évaporer la même quantité d'eau. Il s'exprime sous la forme :

$$\text{RCE} = \frac{\text{CEM réelle}}{\text{CEM théorique}}$$

La **CEM théorique** correspond à la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure, notée λ , qui est d'environ **2257 kJ/kg à 100 °C**. Ainsi, si le RCE est égal à 1, cela signifie que le séchage se déroule dans des conditions idéales, sans perte d'énergie — ce qui est pratiquement impossible. En réalité, les valeurs du RCE sont souvent **comprises entre 2 et 5**, traduisant la présence de pertes thermiques et d'inefficacités liées à la conception du séchoir ou aux conditions opératoires.

Ces deux indicateurs — CEM et RCE (tableau 3) — sont donc essentiels pour le diagnostic énergétique des séchoirs. Ils permettent non seulement de **quantifier la performance thermique** du procédé, mais aussi d'orienter les actions d'**optimisation énergétique**, telles que la récupération de chaleur sur l'air humide sortant, l'isolation des parois, ou l'ajustement des débits d'air et de température. L'objectif final est d'atteindre un compromis optimal entre **économie d'énergie, qualité du produit séché et temps de traitement**

Tableau 1 : CEM et de RCE en fonction des modes de séchage

Types d'installation	CEM (KJ / Kg d'eau)	RCE (Kg de vapeur / Kg d'eau)
Séchoirs par entraînement (sans récupération)	3300 à 6500	1,5 à 3
Séchoirs par ébullition (ou entraînement avec récupération)	2400 à 3300	1,1 à 1,5
VES* + compression	160 à 200	0,07 à 0,09
Evaporateurs à multiples effets	250 à 1200	0,13 à 0,5

*VES : Vapeur d'eau surchauffée

3.2. Analyse Pinch

L'analyse Pinch est une méthode systématique pour optimiser l'utilisation de l'énergie dans les procédés, en particulier pour la récupération de chaleur. Elle identifie les contraintes thermodynamiques qui limitent la récupération de chaleur et définit des objectifs pour la consommation minimale d'énergie. L'analyse Pinch est bien établie dans l'industrie des procédés et est décrite en détail dans de nombreux manuels. Pour les systèmes de séchage, l'analyse Pinch peut être utilisée pour identifier les opportunités de récupération de chaleur à partir des gaz d'échappement du séchoir, et pour intégrer le séchoir avec le reste du procédé.

Les étapes de base de l'analyse Pinch sont :

- Collecter les données des flux de procédé qui nécessitent un refroidissement (flux chauds) et ceux qui nécessitent un chauffage (flux froids).
 - Définir les températures cibles pour le chauffage et le refroidissement.
 - Construire les courbes composites, qui montrent la demande cumulative de chauffage et de refroidissement en fonction de la température.
1. Déterminer le point de pincement (Pinch Point), qui est l'endroit où l'écart de température entre les courbes composites est minimal, typiquement choisi comme ΔT_{min} l'approche de température minimale pour l'échange de chaleur (figure 3).

2. Définir les objectifs pour la consommation minimale de services publics (chauffage et refroidissement) et la récupération de chaleur maximale.
3. Concevoir un réseau d'échangeurs de chaleur pour atteindre ces objectifs.

Pour un séchoir convectif, les gaz d'échappement sont un flux chaud qui peut être utilisé pour préchauffer l'air d'entrée du séchoir ou pour d'autres besoins de chauffage dans le procédé. L'analyse Pinch montrera si cela est réalisable et quelle sera la réduction de la consommation d'énergie.

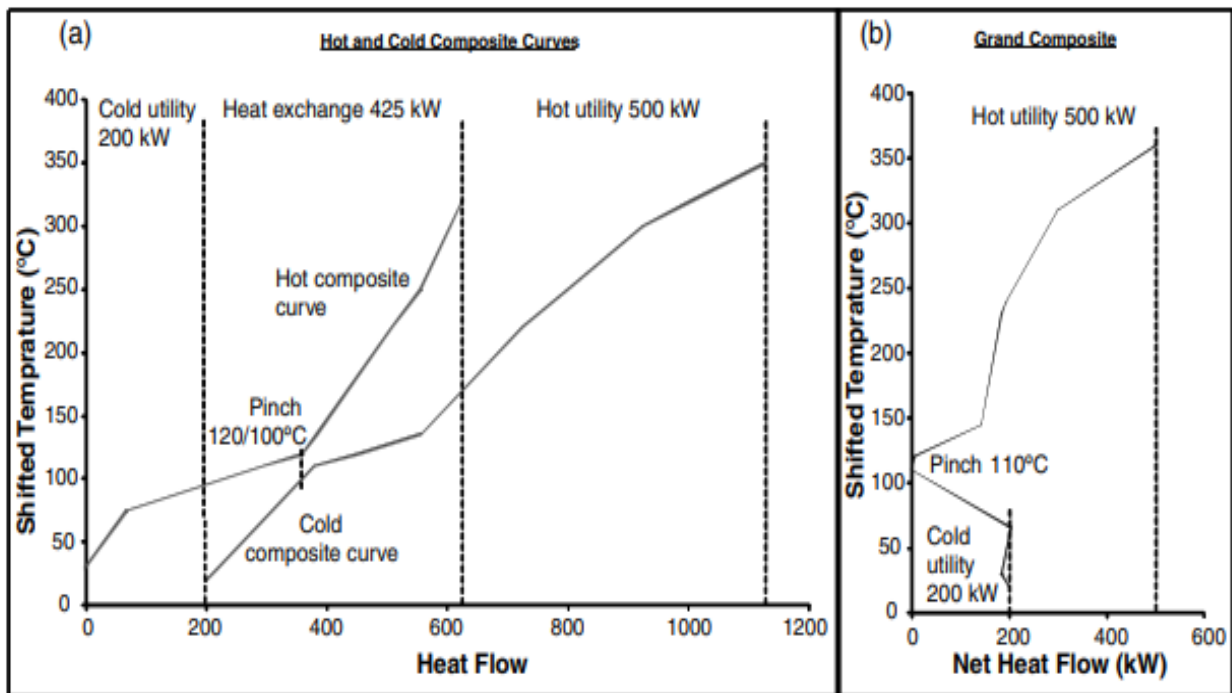


Figure 3 : Courbes composites et (b) courbes composites globales pour un procédé typique en phase liquide

Intégration du procédé

L'intégration du procédé va au-delà de l'analyse Pinch pour considérer l'ensemble du procédé, y compris les réacteurs, les séparateurs, et les utilités. L'objectif est d'optimiser l'ensemble du procédé pour une consommation d'énergie minimale, plutôt que d'optimiser chaque unité individuellement. Pour les systèmes de séchage, cela peut impliquer de modifier les conditions opératoires du séchoir, comme la température et l'humidité de l'air, pour mieux correspondre aux flux de chaleur disponibles dans le procédé. Cela peut également impliquer de changer la séquence des opérations, par exemple, en déshydratant mécaniquement les solides avant le séchage pour réduire la charge d'évaporation.

4. Stratégies pour réduire la consommation d'énergie

Réduire la charge d'évaporation

La charge d'évaporation peut être réduite en diminuant la teneur en humidité des solides entrants, par exemple, en utilisant une déshydratation mécanique telle que la filtration ou la centrifugation. Cela peut réduire considérablement la consommation d'énergie, car l'énergie requise pour l'évaporation est beaucoup plus élevée que pour la déshydratation mécanique. Une autre méthode est d'éviter le surséchage, c'est-à-dire, de sécher les solides seulement à la teneur en humidité requise, et pas plus. Le surséchage gaspille de l'énergie et peut endommager le produit.

4.1. Augmenter l'efficacité du séchoir

L'efficacité du séchoir peut être augmentée en réduisant les pertes de chaleur, en améliorant l'isolation, et en récupérant la chaleur des gaz d'échappement. La récupération de chaleur peut être réalisée en utilisant un échangeur de chaleur air-air pour préchauffer l'air d'entrée avec les gaz d'échappement, ou en utilisant les gaz d'échappement pour chauffer de l'eau ou d'autres fluides. L'efficacité peut également être améliorée en optimisant les paramètres opératoires, tels que la température et le débit d'air, pour minimiser les pertes.

4.2. Améliorer le système d'utilités

Le système d'utilités peut être amélioré en augmentant le rendement de la chaudière, en utilisant la cogénération (CHP), ou en utilisant des pompes à chaleur. La cogénération produit à la fois de l'électricité et de la chaleur, et peut être très efficace si la chaleur est utilisée pour le séchage. Les pompes à chaleur peuvent améliorer l'efficacité en upgradant la chaleur des gaz d'échappement à une température plus élevée pour réutilisation.

4.3. Autres stratégies

D'autres stratégies incluent l'utilisation de séchoirs à conduction plutôt que convectifs, car ils ont généralement une efficacité plus élevée, et l'utilisation de séchoirs à multiple étages avec récupération de chaleur entre les étages. L'utilisation de combustibles alternatifs à faible coût, tels que la biomasse ou les déchets, peut également réduire les coûts énergétiques.

Étude de cas : Séchoir à bande pour produits alimentaires

Pour illustrer la méthodologie, considérons un séchoir à bande utilisé pour sécher des produits alimentaires. Le séchoir a un débit de solides de 500 kg h^{-1} ($0,139 \text{ kg s}^{-1}$) et sèche le produit de 80% à 10% d'humidité (base humide). La charge d'évaporation est de $0,097 \text{ kg s}^{-1}$. L'air est chauffé de 20°C à 120°C par de la vapeur, et les gaz d'échappement sortent à 70°C avec une humidité de $0,03 \text{ kg kg}^{-1}$. Le débit d'air est de $2,5 \text{ kg s}^{-1}$. Les pertes de chaleur sont estimées à 10 kW.

À partir de l'équation 1.5, le devoir du réchauffeur est de $2,5 \times 1,0 \times (120-20) = 250$ kW. L'efficacité du séchoir est de $(0,097 \times 2400) / 250 = 93,1\%$, ce qui est élevé pour un séchoir convectif, en raison de la température d'échappement relativement basse.

Cependant, en regardant le système d'utilités, la vapeur est produite à 10 bar avec un rendement de chaudière de 80%, et le condensat est renvoyé à 90°C. La chaleur pour l'eau d'alimentation est de $(0,124 \text{ kg s}^{-1} \times (763-377) \text{ kJ kg}^{-1}) = 48$ kW. Les pertes de distribution sont de 5 kW. Ainsi, la chaleur totale à fournir par la chaudière est de $250 + 48 + 5 = 303$ kW, et la consommation de combustible est de $303 / 0,8 = 379$ kW. L'énergie électrique pour les ventilateurs est de 5 kW.

La consommation d'énergie primaire est de 379 kW (combustible) + $5/0,35 = 14,3$ kW (électricité, en supposant un rendement de production d'électricité de 35%) = 393,3 kW. Cela représente une efficacité globale de $(0,097 \times 2400) / 393,3 = 59,2\%$.

Pour améliorer l'efficacité, un échangeur de chaleur air-air pourrait être installé pour préchauffer l'air d'entrée à 50°C en utilisant les gaz d'échappement. Cela réduirait le devoir du réchauffeur à $2,5 \times 1,0 \times (120-50) = 175$ kW, une économie de 75 kW. Le coût de l'échangeur de chaleur devrait être évalué par rapport aux économies de combustible.

Une autre option est d'augmenter la température de l'air entrant, ce qui réduirait le débit d'air requis pour la même charge d'évaporation, mais pourrait endommager le produit. Une analyse soigneuse est nécessaire.

L'analyse énergétique des séchoirs est une étape essentielle pour identifier les opportunités d'économies d'énergie. La charge d'évaporation fournit une limite inférieure absolue, mais la consommation d'énergie réelle est généralement deux à trois fois plus élevée en raison des diverses inefficacités et pertes. Une approche systématique, incluant des bilans massiques et énergétiques détaillés, l'analyse Pinch, et l'intégration du procédé, peut aider à identifier les améliorations les plus rentables. Les stratégies clés incluent la réduction de la charge d'évaporation, l'augmentation de l'efficacité du séchoir, et l'amélioration du système d'utilités. Avec une analyse soigneuse, des économies d'énergie significatives peuvent être réalisées, réduisant les coûts opérationnels et l'impact environnemental.

5. Évaluation des durées de séchage

L'évaluation de la durée de séchage constitue une étape essentielle dans la conception, l'optimisation et le contrôle des procédés de déshydratation. Elle permet de déterminer le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau finale souhaitée, en garantissant à la fois la qualité du produit et l'efficacité énergétique du procédé.

Définition et importance

La durée de séchage correspond au temps pendant lequel un produit est soumis à un flux de chaleur et de masse jusqu'à ce que sa teneur en eau résiduelle atteigne un niveau d'équilibre avec l'air ambiant (ou le fluide de séchage).

Elle dépend à la fois :

- des **propriétés thermophysiques du produit** (porosité, conductivité thermique, diffusivité, hygroscopicité) ;
- des **conditions opératoires** (température, vitesse et humidité relative de l'air, pression) ;
- de la **géométrie du matériau** (épaisseur, surface spécifique).

Une évaluation correcte de la durée de séchage est cruciale pour :

- éviter un séchage insuffisant, qui favorise la croissance microbienne ou la reprise d'humidité ;
- prévenir un séchage excessif, entraînant une dégradation de la qualité (texture, couleur, composés volatils) et une surconsommation d'énergie ;
- optimiser la productivité du séchoir et la planification industrielle.

Méthodes d'évaluation

a. Approche expérimentale

Elle repose sur le suivi de la perte de masse du produit au cours du temps, à des conditions de séchage contrôlées.

Les données obtenues permettent de tracer les courbes de séchage, représentant la teneur en eau X ou le taux de séchage dX/dt en fonction du temps t .

Ces courbes comportent généralement :

- une période à taux de séchage constant, où l'évaporation se fait à la surface libre saturée ;
- une ou plusieurs périodes à taux de séchage décroissant, où la diffusion interne devient le facteur limitant.

L'analyse de ces courbes permet de déterminer la vitesse moyenne de séchage et le temps total requis pour atteindre la teneur en eau finale souhaitée.

b. Approche théorique et modélisation

Les modèles mathématiques permettent de prédire la durée de séchage sans recourir systématiquement à des essais expérimentaux longs et coûteux. Ces modèles peuvent être :

- **Empiriques**, basés sur des corrélations expérimentales simples reliant le taux de séchage aux paramètres opératoires (température, vitesse de l'air, humidité relative) ;
- **Semi-théoriques**, tels que les modèles de **Page**, **Henderson & Pabis**, **Lewis** ou **Thompson**, qui décrivent la cinétique de séchage à l'aide d'équations exponentielles ajustées aux données expérimentales ;
- **Théoriques (ou diffusifs)**, fondés sur les équations de transfert de chaleur et de masse (loi de Fick, équations de Fourier et de Darcy), permettant de modéliser la distribution spatiale de l'humidité et de la température à l'intérieur du produit.

Ces modèles permettent d'estimer la **durée optimale de séchage** en fonction des conditions opératoires et des caractéristiques du matériau, tout en réduisant les coûts d'expérimentation.

c. Méthodes numériques et simulation

Les logiciels de simulation (**COMSOL Multiphysics**, **ANSYS Fluent**, **MATLAB**, etc.) permettent de résoudre les équations couplées de transfert de chaleur et de masse en conditions transitoires.

Ces approches fournissent une estimation très précise de la durée de séchage, en tenant compte de la **géométrie du produit** et des **conditions aux limites**.

d. Calcul de la durée de séchage

Le calcul de la durée de séchage repose sur l'intégration du taux de séchage en fonction de la teneur en eau.

1. Formule générale :

$$t = \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{N}$$

où :

- t : durée totale de séchage (s ou h)
- Xi: teneur en eau initiale (kg d'eau/kg matière sèche)
- Xf: teneur en eau finale
- N : taux de séchage (kg d'eau évaporée/m²·s)

Pendant la période à taux constant :

$$t_c = \frac{(X_c - X_i) \rho_s L}{N_c}$$

où :

- Xc : teneur en eau critique

- ρ_s : densité du solide sec
- L : épaisseur du produit
- N_c : taux de séchage constant

Pendant la période à taux décroissant : Lorsque la diffusion interne devient limitante, la durée peut être estimée par la loi de Fick:

$$t_d = \frac{L^2}{\pi^2 D_{eff}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{X_i - X_{eq}}{X_f - X_{eq}} \right)$$

où :

- D_{eff} : coefficient de diffusion effective (m²/s)
- X_{eq} : teneur en eau d'équilibre

La **durée totale de séchage** est donc la somme :

$$t_{total} = t_c + t_d$$

Ces équations permettent une estimation quantitative du temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau finale souhaitée, en fonction des propriétés du matériau et des conditions de séchage.

3. Facteurs influençant la durée de séchage

Plusieurs paramètres exercent une influence déterminante :

- **Température du fluide de séchage** : plus elle est élevée, plus le séchage est rapide, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la qualité du produit peut être altérée.
- **Vitesse de l'air** : elle améliore le transfert convectif, réduit la résistance externe et accélère le séchage.
- **Humidité relative de l'air** : un air plus sec favorise l'évaporation.
- **Épaisseur du produit** : plus le matériau est épais, plus la diffusion interne est lente, ce qui allonge la durée du séchage.
- **Nature du produit** : la structure cellulaire, la teneur en sucre ou en lipides, et la capillarité interne influencent la mobilité de l'eau.

4. Optimisation et contrôle du temps de séchage

L'optimisation de la durée de séchage repose sur un compromis entre **rendement énergétique, qualité du produit et productivité**.

Des techniques avancées permettent d'y parvenir :

- **Séchage en plusieurs étapes** (pré-séchage rapide puis séchage doux de finition) ;
- **Recyclage partiel de l'air humide** pour maintenir un gradient d'humidité optimal ;
- **Systèmes de contrôle en temps réel** basés sur des capteurs d'humidité, de température ou de masse, permettant d'ajuster automatiquement les paramètres opératoires.

L'évaluation rigoureuse de la durée de séchage constitue un paramètre clé dans la conception et l'exploitation des procédés de déshydratation.

En combinant approches expérimentales, analytiques, numériques et calculatoires, elle permet non seulement d'atteindre les objectifs de qualité et de sécurité du produit, mais aussi de réduire la consommation énergétique et d'améliorer la rentabilité globale du procédé.

Références Bibliographiques

- Bhattacharjee, S., Mohanty, P., Sahu, J. K., & Sahu, J. N. (2024). A critical review on drying of food materials: recent progress and key challenges. *International communications in heat and mass transfer*, 158, 107863.
- Adeyeye, S. A. O., Ashaolu, T. J., & Babu, A. S. (2022). Food drying: A review. *Agricultural reviews*, 1(8), 1-8.
- Xu, B., Tiliwa, E. S., Yan, W., Azam, S. R., Wei, B., Zhou, C., ... & Bhandari, B. (2022). Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. *Food Research International*, 152, 110744.
- An, N. N., Sun, W. H., Li, B. Z., Wang, Y., Shang, N., Lv, W. Q., ... & Wang, L. J. (2022). Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame. *Food Chemistry*, 373, 131412.
- Delfiya, D. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6), e13810.
- Amri, A., Saâdi, Z., & Ababou, R. (2024). Modeling two-phase flow with hysteresis: comparative study of hysteresis models and application. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(6), 4333-4354.
- Mujumdar, A. S., & Devahastin, S. (2000). Fundamental principles of drying. *Exergex, Brossard, Canada*, 1(1), 1-22.
- Scherer, G. W. (1990). Theory of drying. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(1), 3-14.
- Solchansanj, S., & Jayas, D. S. (2020). Drying of foodstuffs. In *Handbook of industrial drying* (pp. 589-625). CRC press.
- Mujumdar, A. S. (1997). Drying fundamentals. *Industrial drying of foods*, 1, 7-30.
- Madhankumar, S., Aduru, V. R., Lenin, V. R., Kannan, V. S., Singh, A. K., & Chinamilli, N. S. (2025). Analysis of thermal performance and drying kinetics of indirect solar drying under natural and forced convection. *Solar Energy*, 299, 113767.
- Guo, W., Jiang, X., Liu, R., Zhao, X., Liu, C., Liu, C., ... & Shen, L. (2025). Microwave versus hot air drying of germinated red adzuki beans: from the perspective of drying kinetics, bioactive compounds and starch structural changes. *LWT*, 118241.

Li, G., Cheng, W., Chen, J., Jiang, H., Zhang, S., Song, H., & Chen, H. (2025). Drying kinetic and upgraded grindability of biomass with torrefaction-assisted deep drying. *Industrial Crops and Products*, 226, 120659.