

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
X•O٧•EX •K١٤ C•A:١٨ #١٨•X - X:O٤O:t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département de Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

Polycopié de cours

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Niveau : Master I

Le Séchage Thermique

Préparé par : **Dr. BENSALEM Chafik**

Maitre de conférences classe B

Expertisé par :

- 1) Pr. MAHFOUD Brahim
- 2) Pr. BENAROUS Abdallah

Année universitaire : 2022/2023

Liste des figures

Fig 1 : Carte conceptuelle sur le séchage thermique	07
Fig I.1 : constituants de l'air humide	08
Fig I.2 : Représentation d'un mélange de gaz	10
Fig I.3 : Principe de mesure de la température humide	12
Fig I.4 : Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée	12
Fig I.5 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine	14
Fig I.6 : Déterminations de la température de rosée et humide (T_r et T_h)	15
Fig I.7 : Diagramme de l'air humide	17
Fig II.1 : Principe de séchage	20
Fig II.2 : Disposition de l'eau dans un produit humide	21
Fig II.3 : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau	24
Fig II.4 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' a_w	25
Fig II.5 : Méthodes de séchages.....	25
Fig II.6 : Transfert entre l'air et la surface du produit.....	27
Fig II.7 : Séchage par convection.....	27
Fig II.8 : Séchage par rayonnement.....	29
Fig II.9 : Séchage par atomisation.....	30
Fig II.10 : Séchage par chauffage diélectrique.....	31
Fig III.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un sécheur.....	33
Fig III.2 : Parcours de l'air de séchage dans le diagramme d'air humide.....	34
Fig III.3 : Évolution de la teneur en eau en fonction du temps et la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau.....	35
Fig III.4 : Transfert entre l'air et la surface du produit.....	36
Fig III.5 : Évolution de l'air lors d'une opération de séchage convectif	37
Fig IV.1 : Principaux procédés de séchage thermique rencontrés.....	41
Fig IV.2 : Atomisation.....	42
Fig IV.3 : Cylindre chauffant.....	44
Fig IV.4 : Tambour rotatif.....	46
Fig IV.5 : Sécheur tunnel.....	48
Fig IV.6 : Sécheur à bande.....	50
Fig IV.7 : Sécheur silo.....	52
Fig IV.8 : Sécheur flash.....	54
Fig IV.9 : Lit fluidisé.....	56
Fig IV.10 : Sécheur étuve.....	58
Fig IV.11 : Lyophilisation.....	60
Fig IV.12 : Sécheur à palettes.....	62

Liste des tableaux

<i>Tab I.1 : Composition de l'air atmosphérique sec au niveau de la mer.....</i>	<i>08</i>
<i>Tab I.2 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab I.3 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange.....</i>	<i>19</i>
<i>Tab II.1 : Valeurs minimales de l'activité de l'eau permettant la croissance des principaux types de micro-organismes</i>	<i>22</i>
<i>Tab II.2 : Teneur en eau de certains aliments</i>	<i>22</i>
<i>Tab III.1 : Tableau récapitulatif des relations.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab III.2 : Ordres de grandeur des valeurs de CEM et de RCE en fonction des modes de séchage.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab IV.1 : Exemples d'applications.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab IV.2 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab IV.3 : Exemples d'applications.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab IV.4 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab IV.5 : Exemples d'applications.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab IV.6 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab IV.7: Exemples d'applications.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab IV.8 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab IV.9 : Exemples d'applications.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab IV.10 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab IV.11 : Exemples d'applications.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab IV.12 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab IV.13 : Exemples d'applications.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab IV.14 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab IV.15: Exemples d'applications.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab IV.16 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab IV.17 : Exemples d'applications.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab IV.18 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab IV.19 : Exemples d'applications.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab IV.20 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab IV.21 : Exemples d'applications.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab IV.22 : Caractéristiques du procédé.....</i>	<i>63</i>

Table des matières

Objectifs	4
Introduction	6
I - Chapitre 01 : Rappels sur l'air humide	8
1. Composition de l'air sec atmosphérique	8
2. Propriétés de l'air humide	9
2.1. Humidité	9
2.2. Température sèche T_s	11
2.3. Température humide T_h	11
2.4. Température de rosé T_r	12
2.5. Enthalpie H	13
2.6. Diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique.....	13
3. Application sur le diagramme de l'air humide	17
3.1. Exercice : Propriétés de l'air humide	17
3.2. Exercice : Comment utiliser le diagramme	17
3.3. Exercice : Comment utiliser le diagramme (Suite).....	18
3.4. Exercice : Comment utiliser le diagramme (Solution finale).....	19
II - Chapitre 02 : Théorie de séchage	20
1. Terminologie du séchage	20
1.1. Séchage thermique	20
1.2. Activité de l'eau dans un produit humide	20
1.3. L'Humidité Relative d'équilibre H_{re}	21
1.4. L'activité A_w de l'eau	22
1.5. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau	23
2. Mécanismes intervenants dans le séchage thermique.....	26
2.1. Modes de séchage	26
2.2. Séchage par convection.....	27
2.3. Séchage par conduction	28
2.4. Séchage par rayonnement.....	29
2.5. Séchage par atomisation	30
2.6. Séchage par chauffage diélectrique.....	30
3. Applications sur la théorie de séchage	31
III - Chapitre 03 : Principes de calcul des sécheurs	33
1. Principe de séchage.....	33
2. Cinétique du séchage	35
3. Bilan sur les séchoirs	36
3.1. Rendement massique	37
3.2. Rendement énergétique	37
3.3. Pouvoir évaporatoire.....	38
3.4. Tableaux récapitulatifs.....	38

4. Exercice : Calcul d'un sécheur à grains	40
IV - Chapitre 4 : Appareillages et Procédés de séchage	41
1. Séchoirs continus	42
1.1. Atomisation	42
1.2. Cylindre chauffant.....	44
1.3. Tambour rotatif	46
1.4. Sécheur tunnel	48
1.5. Sécheur à bande.....	50
1.6. Sécheur silo	52
1.7. Sécheur flash	54
1.8. Lit fluidisé	56
2. Séchoirs statiques (discontinus)	58
2.1. Sécheur étuve / Four de séchage.....	58
2.2. Lyophilisation	60
2.3. Sécheur à palettes.....	62
3. Test	63
V - Test de sortie	65
1. Test de sortie	65
Solutions des exercices	68
Abréviations	75
Références	76

Objectifs



Le cours de « séchage thermique » fait partie du programme de la spécialité énergétique en Master I. D'une part il fait appel aux modules de thermodynamique et transfert de chaleur comme une application des notions de ces modules et voir l'utilité derrière les connaissances acquises. D'autre part ce cours accompagne et rentre dans le même contexte des autres modules tel que Chauffage et Climatisation, Combustion et Machines thermiques.

Le cours est scindé en quatre unités d'apprentissages, chaque unité d'apprentissage est traitée à travers des séquences pédagogiques permettant l'assimilation des concepts prévus, cette assimilation est consolidée par des activités d'apprentissages où ces notions sont mises en œuvre. L'ensemble des unités d'apprentissage sont décrites ci-dessous :

- Chapitre 01 : Rappels sur l'air humide

Cette unité présente un rappel sur les propriétés de l'air humide et son diagramme nécessaire pour poursuivre le reste des unités d'apprentissages.

Dans cette partie les notions des rappels sur l'air humide sont présentées avec des activités d'apprentissage qui vous permettent les mémorisés.

- Chapitre 02 : Théorie de séchage

Dans cette partie il s'agit de présenter la terminologie général du séchage ainsi les mécanismes et les modes de séchage thermique.

- Chapitre 03 : Principes de calcul des sécheurs

Cette unité traite les différentes principes et méthodes de calcul des sécheurs thermique ainsi le dimensionnement de plusieurs types de sécheurs.

- Chapitre 04 : Appareillages et Procédés de séchage

Il s'agit de définir les sécheurs en termes d'appareils et suivre les procédés les plus utilisés dans le séchage. En plus, faire connaissance des dispositifs annexes nécessaires au fonctionnement d'un sécheur.

L'apprentissage visé par ce cours, dans son ensemble, est « d'être capable de concevoir, d'analyser et développer les compétences dans le domaine de séchage thermique.

C'est une performance complexe, que vous allez construire progressivement en maîtrisant des savoirs, en mettant en œuvre des savoir-faire et en le faisant avec un savoir-être de professionnel.

Le cours séchage thermique vise à :

- En termes de savoir
 1. Définir les propriétés de l'air humide.
 2. Différencier entre l'air sec et l'air humide.
 3. Utiliser le diagramme de l'air humide.
 4. Définir l'activité de l'eau dans un produit humide.
 5. Distinguer les mécanismes physiques de séchage.
- En termes de savoir-faire

1. Assembler les propriétés d'un mélange d'airs.
2. Déterminer la zone des caractéristiques de l'air sur le diagramme psychrométrique.
3. Décomposer les zones des isothermes d'adsorption et de désorption de l'eau.

- En termes de savoir-être

1. Adapter un choix technique et opérationnel d'un sécheur dans plusieurs domaines industriels.

L'évaluation finale se fait à travers un examen final sur table et qui porte sur tout ce que vous avez vu dans ce cours pendant le semestre, lors de cet examen, qui compte pour 100% de la note finale, vous aurez :

- À résoudre des problèmes similaires ou proches aux problèmes traités lors du cours.
- À répondre à des questions de synthèse (via des QCM et QCU).
- À répondre à des questions de réflexion (Via des quiz).

Introduction



Le séchage est un procédé très ancien de conservation des produits agricoles et alimentaires. Il permet de convertir des denrées périssables en produits stabilisés, par abaissement de l'activité de l'eau. La plupart du temps, ces produits sont stockés à température ordinaire, avant d'être réhydratés pour une utilisation dans un procédé industriel ou dans une préparation culinaire. L'utilisation du séchage dans les IAA* a de multiples buts :

- Accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons, ...);
- Stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, ...) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités ;
- Transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage de malt, ...);
- Stabiliser des co-produits industriels pour l'alimentation animale (pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drêches de brasserie, farines de viande et de poisson, lactosérum, ...);
- Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés Produits alimentaires intermédiaires (PAI). Ce sont par exemple des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes, colorants,

Le séchage permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui facilite leurs transport, stockage et manutention. Il sert aussi à donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (café instantané, flocons de purée de pomme de terre, ...). À ce titre, l'opération de séchage peut être considérée comme une opération de formulation ou de texturation, qui, lorsqu'elle est convenablement conduite, est capable de fournir des produits nouveaux, faciles d'emploi [1].*

[cf. Carte conceptuelle sur le séchage thermique]

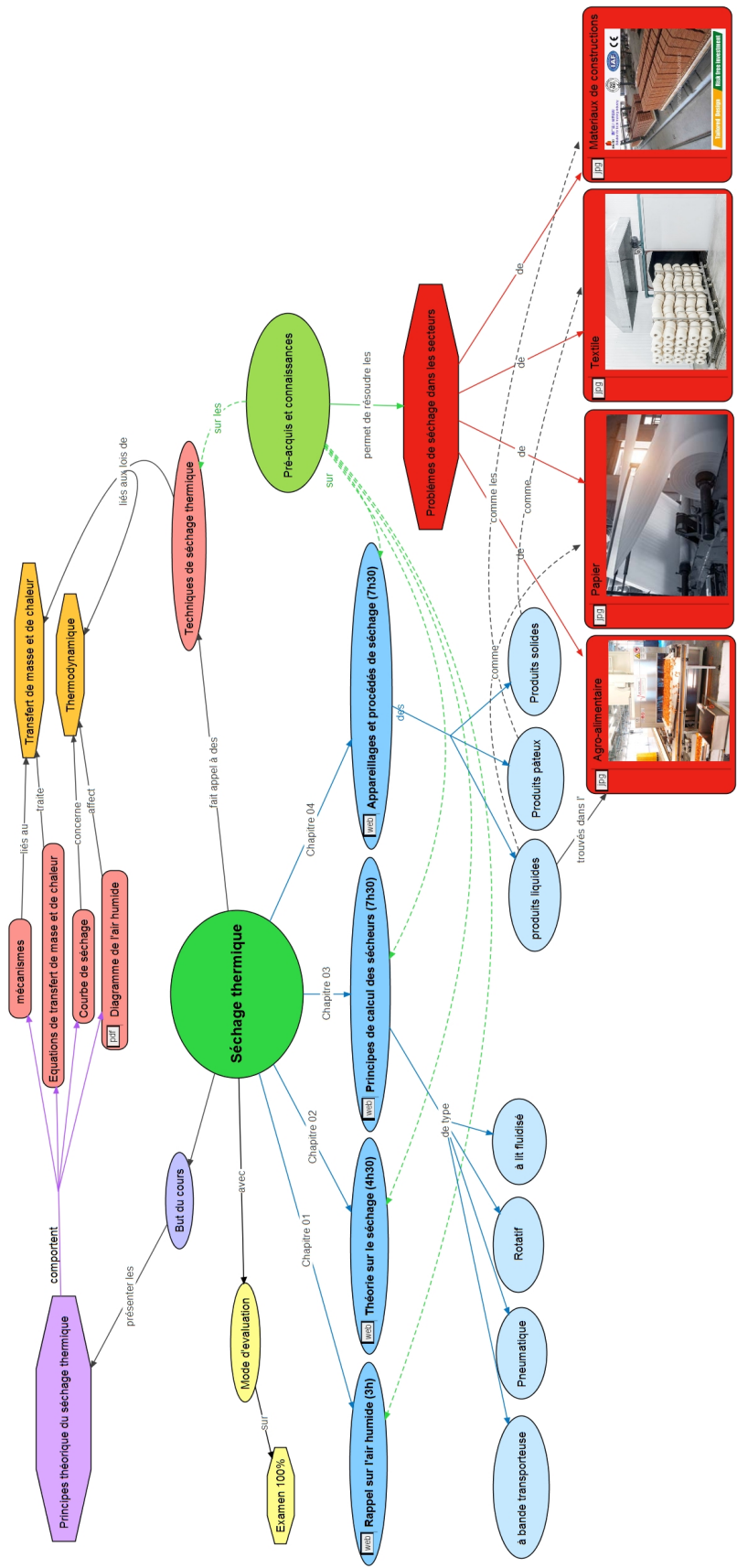


Fig 1 : Carte conceptuelle sur le séchage thermique

Chapitre 01 : Rappels sur l'air humide



L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur. Si les principaux constituants de l'air sont l'oxygène et l'azote, l'air contient également un certain nombre d'autres gaz dont bien sûr la vapeur d'eau. Dans un volume V d'air humide à la température T et à la pression totale P_{atm} , on trouve les constituants suivants* :

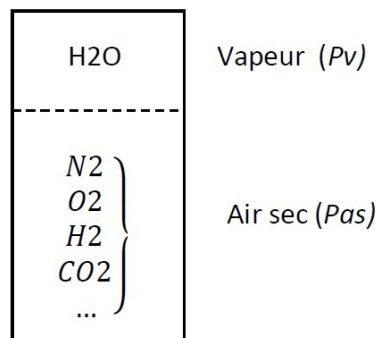


Fig I.1 : constituants de l'air humide [2]

[cf. Vidéo sur l'air humide sur YouTube]

1. Composition de l'air sec atmosphérique



Définition

L'air sec est composé principalement de trois gaz dont l'azote pour 78.09% vol (en volume), l'oxygène pour 20.9% vol, l'Argon pour 1% vol, le reste soit 0.1% vol sont des gaz (mineurs) à l'état de traces.

Composition de l'air atmosphérique sec au niveau de la mer.

Tab I.1 : Composition de l'air atmosphérique sec au niveau de la mer*. [2]

	Gaz	Symbole	Proportion (%)	Masse molaire
1	Azote	N ₂	78,084	28,0134
2	Oxygène	O ₂	20,946	31,9988
3	Argon	Ar	0,934	39,948
4	Dioxyde de carbone	CO ₂	0,037	44,0099
Autres gaz à l'état de traces		Ne, He, Xe,	< 0,003	
5	Néon	Ne	18,00 ppm	20,1797
6	Hélium	He	5,24	4,0026

7	Méthane	CH ₄	1,41	16,04
8	Krypton	Kr	1,14	83,798
9	Xénon	Xe	0,87	131,296
10	Hydrogène	H ₂	0,58	1,00784
11	Protoxyde d'azote	N ₂ O	0,330	44,0128

L'air humide est donc composé de l'air sec contenant N₂, O₂, Ar, CO₂ et autres gaz (Ne, He, H₂, Kr, Xe, CH₄ ...) à l'état de traces, et de la vapeur d'eau (H₂O vapeur).

La vapeur se trouve à la pression partielle P_v et l'air sec à la pression partielle P_{as}. Nous rassemblons ici les définitions et les relations les plus importantes de l'air humide indispensables pour le traitement des problèmes de séchage*.

2. Propriétés de l'air humide

2.1. Humidité

D'une façon générale. **L'humidité** est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, etc.). Elle peut se mesurer grâce à un **hygromètre à cheveu** ou numérique et s'exprime en pourcentage le plus souvent.

L'humidité dans l'air se présente sous forme :

- Vapeur dont la teneur dans l'air est fonction de la saison, de l'heure et du lieu
- Phase condensée : liquide (eau en gouttelettes, nuages, brume, brouillard) ou solide (neige, glace, etc.)

Il existe deux grandeurs de mesure pour quantifier l'humidité de l'air. Il convient de faire la distinction entre **l'humidité relative** et **l'humidité absolue***.

a) Humidité relative



L'hygrométrie ou l'humidité relative c'est le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé à la même température.

L'humidité relative s'exprime en ϕ [%]

$$\phi = \frac{\text{Masse d'eau/kg d'air sec}}{\text{Masse d'eau/kg d'air saturé à la même température}} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{eau}}^s} \quad (I.1)$$

En fonction des pressions :

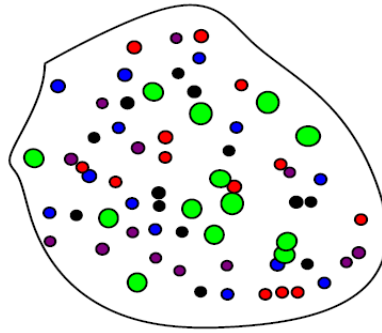
Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (relation de Dalton)

Loi de Dalton



La pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égale à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles, des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seul le volume total à la température du mélange*.

$$\text{Gaz} = \text{gaz}(1) + \text{gaz}(2) + \dots + \text{gaz}(n).$$



Mélange de gaz à (P, T)

Gaz constituants: ● ● ● ● ●

Fig 1.2 : Schématisation d'un mélange de gaz [3]

$$\text{Totale} = \sum \text{Partielles} \quad (I.2)$$

Pression : $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$

Energie interne : $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$

Enthalpie : $H = H_1 + H_2 + \dots + H_n$

Entropie : $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$

 **Définition**

Air = Air sec (N₂, O₂, A, CO₂.....)+ Vapeur d'eau (H₂O)

Le mélange, dans les conditions P ≈ 1 atm et T ≈ 300 K, a un comportement de gaz parfait. Il vérifie la loi de Dalton

$$P = P_{as} + P_{eau} \quad (I.3)$$

Où P_{as} est la pression partielle de l'air sec et P_{eau} la pression partielle de la vapeur d'eau.

On a donc :

$$PV = NRT = m r T ; P_{as} = N_{as} RT = m_{as} r_{as} T ; P_{eau} = N_{eau} RT = m_{eau} r_{eau} T \quad \text{avec}$$

$$r = R/M ; r_{as} = R/M_{as} ; r_{eau} = R/M_{eau} ; (M_i : \text{Masse molaire})$$

Et l'humidité relative $\varphi = \frac{m_{eau}}{m_{eau}^s}$

m_{eau}^s est la masse maximale d'eau que l'on peut avoir sous forme de vapeur à la même température T, la pression partielle de l'eau, P_{eau} = P_{sat}(T) est alors appelée pression de vapeur saturante et * :

$$P_{sat}(T)V = m_{eau}^s r_{eau} T \quad \text{Alors} \quad m_{eau} = \frac{P_{eau} V}{r_{eau} T} ; m_{eau}^s = \frac{P_{sat}(T) V}{r_{eau} T}$$

D'où : $\varphi = \frac{P_{eau}}{P_{sat}(T)}$ En pourcentage $\varphi[\%] = \frac{P_{eau}}{P_{sat}(T)} \cdot 100$

 **Remarque**

φ = 100% air saturé et φ = 0% air totalement sec.

b) Humidité absolue



Définition

L'humidité absolue w ou encore appelée humidité spécifique, C'est la masse de vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec. Il s'agit du rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec * :

$$w = \frac{m_{eau}}{m_{as}} \quad (I.4)$$



Remarque

m_{eau} et m_{as} sont en [kg]. L'unité de w est donc le [kg_{eau}/kg_{Air sec}] encore noté [kg_{eau}] / [kg_{as}]

Mais les quantités de vapeur contenues dans l'air humide sont faibles (en climatisation), d'où l'unité souvent utilisée : [g/kg_{as}]



Définition

On a $P_{as} V = \frac{m_{as}}{M_{as}} RT$ et $P_{eau} V = \frac{m_{eau}}{M_{eau}} RT$

$$\frac{P_{eau}}{P_{as}} = \frac{m_{eau}}{m_{as}} \frac{M_{as}}{M_{eau}}$$

On sait que : $M_{as} \approx 29.9644$ g/mol et $M_{eau} \approx 18.0153$ g/mol

donc : $\frac{M_{as}}{M_{eau}} = \frac{1}{0.62198}$; et $\frac{P_{eau}}{P_{as}} = \frac{w}{0.62198}$

$$w = 0.622 \frac{P_{eau}}{P_{as}} ; w = 0.622 \frac{P_{eau}}{P - P_{eau}} ; w = 0.622 \frac{P - P_{as}}{P_{as}}$$

2.2. Température sèche T_s



Définition

C'est la température mesurée par un thermomètre dit « sec », elle s'exprime en degré Celsius (°C). La température sèche peut être assimilée à un niveau d'énergie.

2.3. Température humide T_h



Définition

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un chiffon imbibé d'eau, ventilé par un courant d'air et protégée du rayonnement. L'unité de mesure est le °C.

Pratiquement, en entourant l'élément sensible d'un thermomètre classique d'une ouate imprégnée d'eau et en soumettant ce thermomètre à un courant d'air, on obtient la température humide de l'air. A la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise.

La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air. L'ensemble thermomètre sec plus thermomètre humide est appelé **psychromètre***.

$$T_h \leq T_s$$

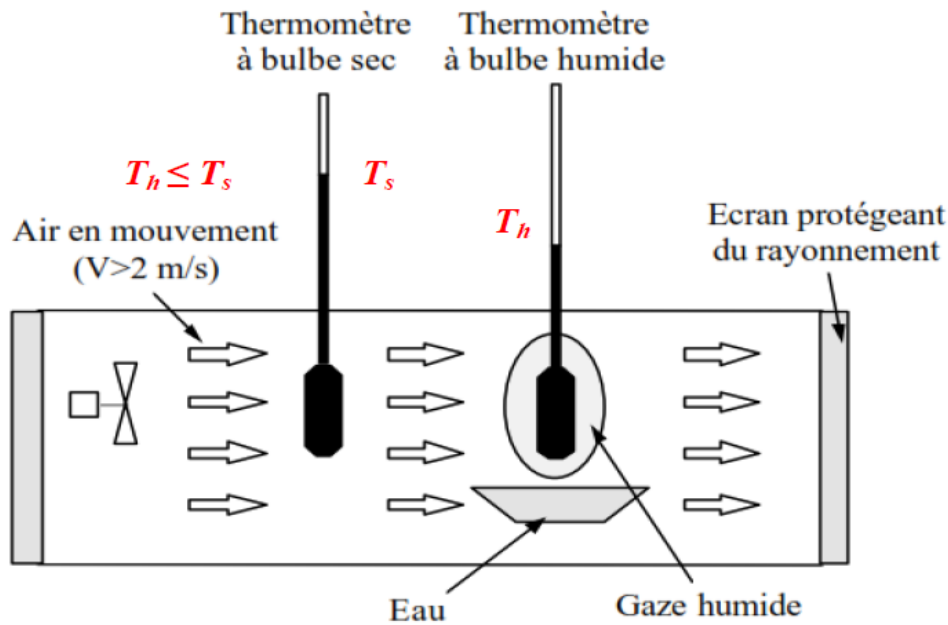


Fig 1.3 : Principe de mesure de la température humide [3]

2.4. Température de rosé T_r



C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit.

$$T_s \geq T_h \geq T_r$$

Pour l'air saturé on a

$$T_s = T_h = T_r$$

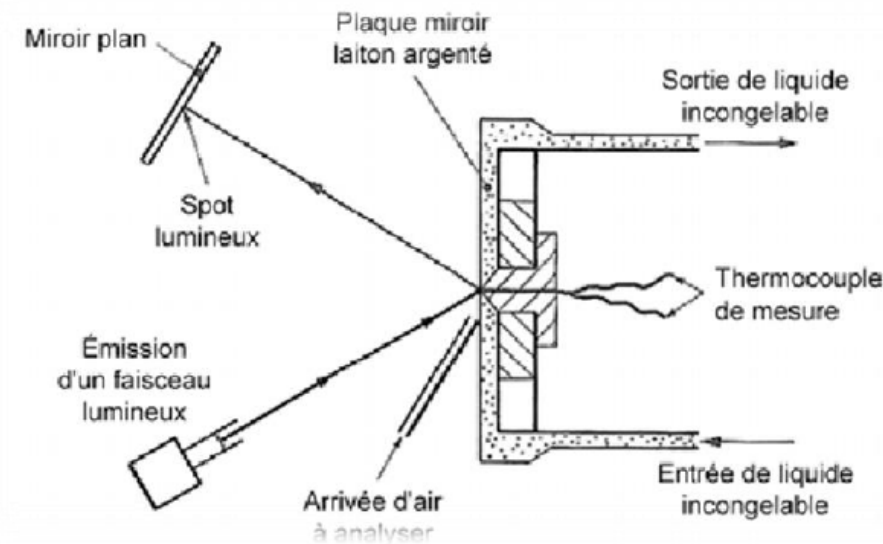


Fig 1.4 : Schéma de principe d'un thermomètre à point de rosée [3]

Un faisceau lumineux est réfléchi sur un miroir plan par une plaque en laiton argenté. La plaque de laiton est progressivement refroidie. A l'instant où se produit un début de condensation sur la plaque de laiton, le faisceau n'est plus réfléchi, la température mesurée par le thermocouple donne alors la température de rosée de l'air analysé*.

2.5. Enthalpie H



L'enthalpie caractérise l'énergie thermique par kilogramme d'air. L'unité de mesure est le **kJ/kg** d'air. Dans les diagrammes psychrométriques, l'air à 0 °C et sec a pour enthalpie 0, il s'agit donc d'une échelle relative.

- **Volume spécifique v** : C'est le volume occupé par un kilogramme d'air. Il s'exprime en m^3/kg d'air.
- **Masse volumique ρ** : C'est la masse d'un mètre cube d'air. La masse volumique est l'inverse du volume spécifique. Elle s'exprime en kg/m^3 d'air.

2.6. Diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique

Le diagramme enthalpique de l'air humide est un instrument pratique et efficace pour :

- Étudier et évaluer l'énergie nécessaire à la maîtrise des conditions du séchage.
- La mise en œuvre correcte du processus industriel.

Le diagramme permet de déterminer toutes les propriétés de l'air telles que la température de rosée (T_r), température du thermomètre humide (T_h), enthalpie (H)... etc. et ce à partir de ses deux paramètres comme, par exemple, la température et l'humidité absolue (w). Le diagramme permet aussi de suivre l'évolution de ces paramètres au cours de l'opération du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux

On générale Il existe deux types de diagramme de l'air humide *:

1. Diagramme de **Mollier** : utilisé dans le domaine de la climatisation.
2. Diagramme de **Mollier-Ramzine** : utilisé dans le domaine de séchage

[cf. Diagramme psychrométrique]

a) Construction du diagramme enthalpique de l'air humide



En séchage, la représentation la plus utilisée est le diagramme de Mollier-Ramzine (Figure ci-dessous) :

- l'enthalpie H (exprimée en kJ/kg d'air sec) est portée en ordonnées
- le taux d'humidité absolue w (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses.
- Les températures apparaissent sous la forme d'isothermes. Les axes sont obliques et l'inclinaison de l'axe des abscisses est choisie de manière à ce que l'isotherme à 0°C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées. L'humidité relative apparaît sur des courbes iso-humidité relative .

Les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide à pression atmosphérique sont établies en considérant 1 kg d'air sec contenant w kg d'eau*.

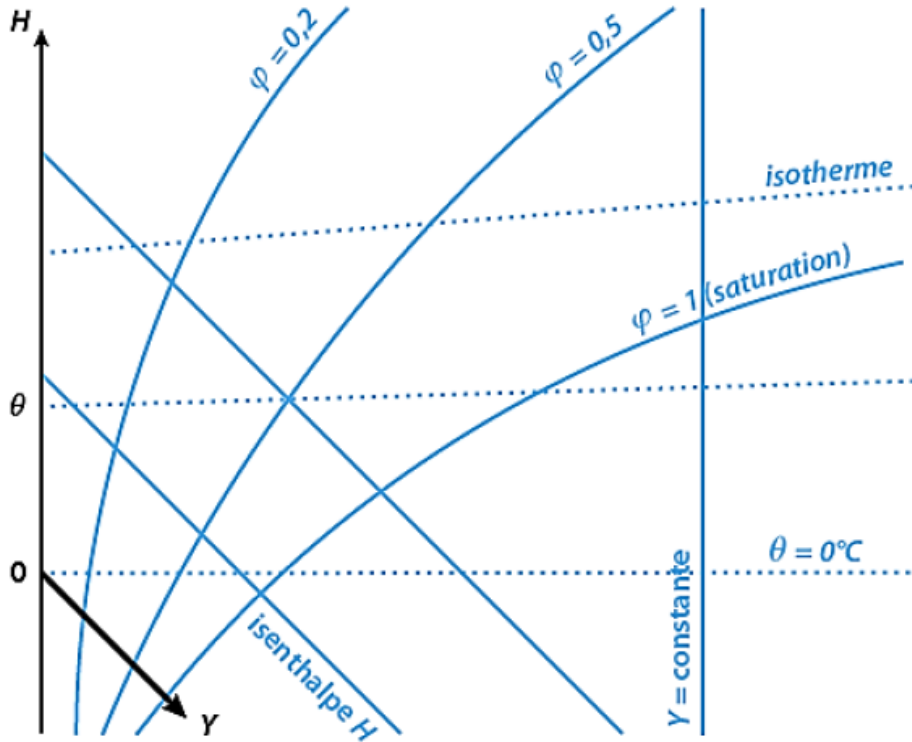


Fig 1.5 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine [4]

b) Propriété de l'air dans le diagramme de Molier-ramzine

i) Enthalpie (H)



L'enthalpie de l'air humide est la somme de l'enthalpie de l'air sec et de la vapeur d'eau.

$$H = H_{airsec} + H_{vapeur} \quad (I.5)$$

$$H = C_{pa}\theta + H_a(\Delta H_{v0} + C_{pv}\theta); \text{ avec } H_{airsec} = C_{pa}\theta; \text{ et } H_{vapeur} = H_a(\Delta H_{v0} + C_{pv}\theta)$$

Où :

$C_{pa}\theta$: Enthalpie nécessaire pour faire passer l'air sec de 0°C à θ (chaleur sensible)

$H_a C_{pv}\theta$: Enthalpie nécessaire pour faire passer la vapeur d'eau de 0°C à θ (chaleur sensible)

$H_a \Delta H_{v0}$: Enthalpie de vaporisation de l'eau (chaleur latente) à 0°C

Dans la gamme des températures et des pressions atmosphériques ordinaires, l'équation de H s'écrit *:

$$H \approx 1.01\theta + H_a(2494 + 1,92\theta)$$

$$H \approx \underbrace{2494 H_a}_{H': \text{Chaleur latente}} + \theta \underbrace{(1.01 + 1.92 H_a)}_{H'': \text{Chaleur sensible}}$$

ii) Humidité absolue (Ha ou w)



L'humidité absolue (H_a) ou teneur en vapeur d'eau s'obtient à partir de l'équation : $H_a = \frac{m_e}{m_a}$

Où m_e est la quantité d'eau, et m_a quantité d'air sec.

H_a est généralement exprimée en kg d'eau/kg d'air sec.

iii) Humidité relative (Hr ou ϕ)



Hr est une mesure relative du degré de saturation en vapeur d'eau de l'air. Les capteurs les plus utilisés pour la détermination de l'Hr sont les hygromètres à variation d'impédance. L'élément sensible est une couche mince d'un produit hygroscopique dont la résistivité ou la constante diélectrique varie beaucoup avec Hr de l'air dans lequel il est placé.

iv) Température humide (θ ou θ_h)



La température du thermomètre humide (θ_h) est définie comme la température à l'équilibre de l'air humide amené à saturation (formation des premières gouttes d'eau liquide) par augmentation de H_a (Figure ci-dessous). Elle est déterminée à l'aide d'un psychromètre. En pratique, c'est la température donnée par le thermomètre humide dont le bulbe est enveloppé dans un matériau poreux imprégné d'eau ; l'air humide est amené à une vitesse suffisante autour de celui-ci pour atteindre un équilibre définissant la θ_h .

La θ_{0h} se lit à l'intersection de la droite isenthalpe passant par (θ, H_a) de l'air avec la courbe Hr = 100%.

v) Température de rosée (θ_r ou T_r)



La température de rosée (θ_r) d'un air humide est définie comme étant la température pour laquelle la pression de vapeur P est égale à la pression de vapeur saturante (Figure ci-dessous). On la mesure comme étant la température à laquelle, il faut refroidir l'air humide (à H_a constante) pour atteindre la saturation. Elle est déterminée à l'aide d'un hygromètre à condensation*.

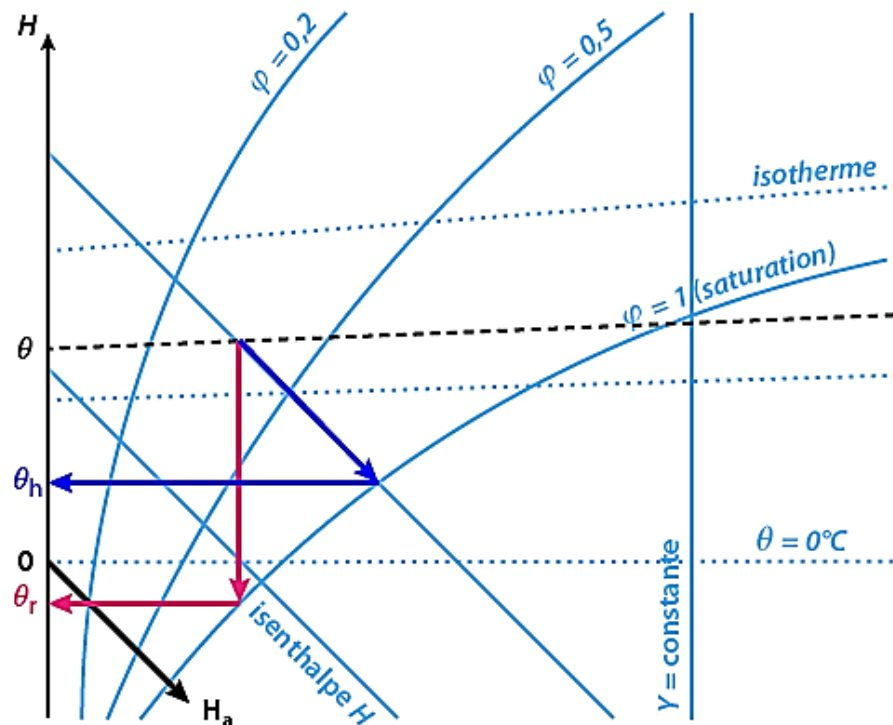


Fig I.6 : Déterminations de la température de rosée et humide (T_r et θ_h) [4]

c) Mélange d'airs



Définition

À l'aide du diagramme enthalpique de l'air humide, il est possible de déterminer les caractéristiques d'un mélange de deux airs de caractéristiques connues (Tableau ci-dessous).

L'humidité absolue H_{am} et l'enthalpie h_m du mélange M sont telles que *:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 H_{a1} + m_2 H_{a2} = (m_1 + m_2) H_{am} \\ m_1 h_1 + m_2 h_2 = (m_1 + m_2) h_m \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} m_1 (H_{am} - H_{a1}) = m_2 (H_{a2} - H_{am}) \\ m_1 (h_m - h_1) = m_2 (h_2 - h_m) \end{array} \right\} \rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{H_{a2} - H_{am}}{H_{am} - H_{a1}} = \frac{h_2 - h_m}{h_m - h_1}$$

Tab I.2 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange

	Masse (Kg d'air sec)	Enthalpie (KJ / Kg)	Humidité absolue (Kg d'eau / Kg d'air sec)
Air 1	m_1	h_1	H_{a1}
Air 2	m_2	h_2	H_{a2}
Mélange M	$m_1 + m_2$	h_m	H_{am}



Remarque

L'égalité des rapports de la dernière équation (m_1/m_2) se traduit par l'alignement des points 1, 2 et m sur le diagramme enthalpique de l'air humide.

d) Utilisation du diagramme de l'air humide en séchage



Définition

Le séchage peut être effectué à des pressions autres que la pression atmosphérique. La construction du diagramme enthalpique est sensiblement le même, à l'exception du tracé des courbes d'humidité relative qui dépend de la pression totale.

Pour pouvoir utilisé le diagramme de Mollier-Ramzine, on utilise les courbes (i / P_r) au lieu de Hr *:

$$i = \frac{\text{Pression saturante de vapeur d'eau à } \theta \text{ de l'air}}{\text{Pression totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère}} = \frac{P_s}{P_t} \quad (I.6)$$

où : P_r est égale au rapport de la pression totale à laquelle on travaille à la pression atmosphérique

ordinaire : $P_r = \frac{P_t}{P_{atm}}$

Ceci explique qu'un air saturé à pression atmosphérique :

- Comprimé de façon isotherme, devient un brouillard puisqu'il passe sous sa courbe de saturation ;
- Détendu de la même façon se dé-sature puisqu'il passe au dessus de sa courbe de saturation.

3. Application sur le diagramme de l'air humide

3.1. Exercice : Propriétés de l'air humide

[solution n°1 p. 68]

L'Humidité relative c'est :

- L'hygrométrie
- le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé
- le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air saturé à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air sec
- humidité spécifique,

3.2. Exercice : Comment utiliser le diagramme

Soit le mélange d'air de masse m constitué de deux air dont les caractéristiques suivante :

$$\text{Air 1} \left\{ \begin{array}{l} h_1 = 100 \text{ kJ/kg} \\ H_{a1} = 0.027 \text{ kg(eau)/kg(as)} \\ m_1 = 1.5 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{ et } \text{Air 2} \left\{ \begin{array}{l} h_2 = 160 \text{ kJ/kg} \\ H_{a2} = 0.04 \text{ kg(eau)/kg(as)} \\ m_2 = 2.5 \text{ kg} \end{array} \right\}$$

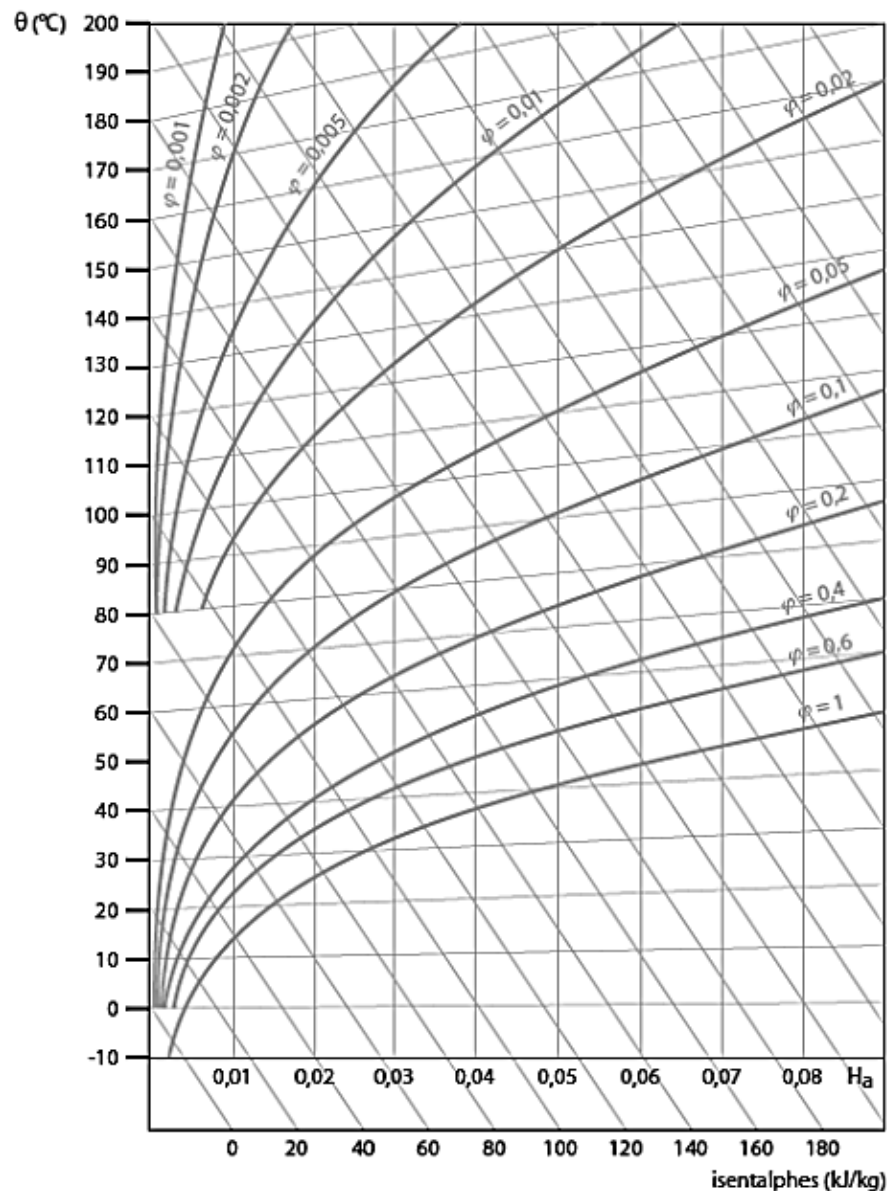


Fig I.7 : Diagramme de l'air humide [3]

Question

[solution n°2 p. 68]

Trouvez les caractéristiques de l'air avant et après le mélange.

3.3. Exercice : Comment utiliser le diagramme (Suite)

[solution n°3 p. 69]

A partir du diagramme de l'air on tir les autres paramètres (T_s et ϕ) de l'air 1, 2 et le mélange

Situer sur ce diagramme les points qui correspondent à l'air 1, 2 et le mélange ?

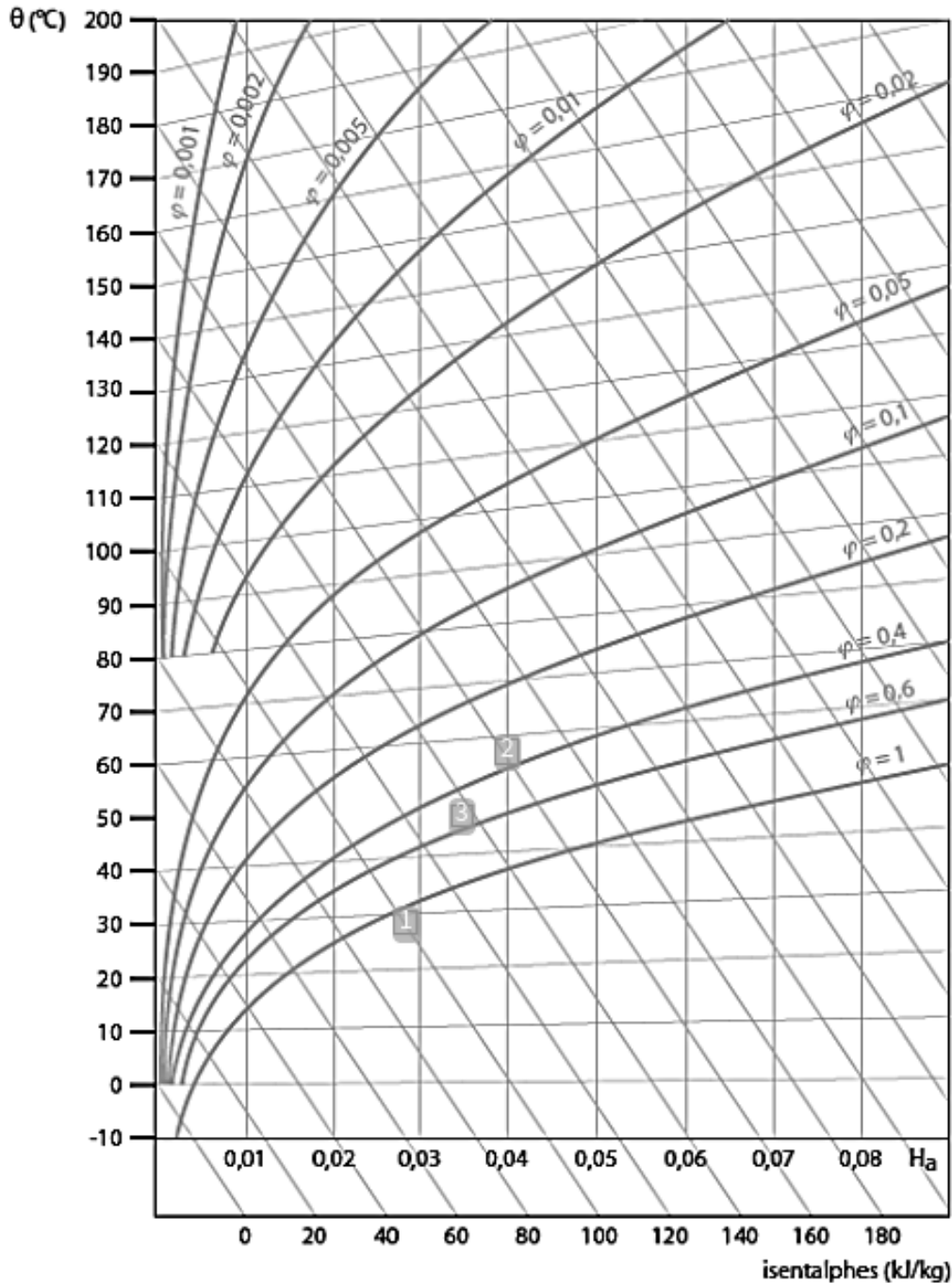


Fig I.7 : Diagramme de l'air humide [3]

Zone 1

Point (air 01) c'est l'intersection de $h = 100 \text{ kJ/kg}$ et $H_{a1} = 0.027$ qui nous donne $T_s = 29^{\circ}\text{C}$ et $\phi = 1$.

Zone 2

Point (air 02) c'est l'intersection de $h = 160 \text{ kJ/kg}$ et $H_{a1} = 0.04$ qui nous donne $T_s = 56.5^{\circ}\text{C}$ et $\phi = 0.38$.

○ **Zone 3**

Point (mélange) c'est l'intersection de $h = 137.5$ kJ/kg et $H_{a1} = 0.035$ kg(eau)/kg(as) qui nous donne $T_s = 46.5$ °C et $\phi = 0.58$.

3.4. Exercice : Comment utiliser le diagramme (Solution finale)

Solution finale sur tableau

Tab I.3 : Caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange

Paramètres	Symbole	Unité	Air1	Air2	Mélange
Masse	m	kg	1.5	2.5	4
Enthalpie	h	kJ/kg	100	160	137.5
Humidité absolue	Ha ou w	kg(eau) / kg(as)	0.027	0.04	0.035
Température sec	Ts ou θ	°C	29	56.5	46.5
Humidité relative	Hr ou ϕ	/	1	0.38	0.58

[cf. 2ème exemple]

Chapitre 02 : Théorie de séchage



1. Terminologie du séchage

1.1. Séchage thermique



Définition

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle.

Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants, organiques par exemple, mais en prenant les propriétés associées à ce solvant (chaleur latente de vaporisation, isothermes de sorption, etc.).

Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés.

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « Déshydratation ». Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant*.

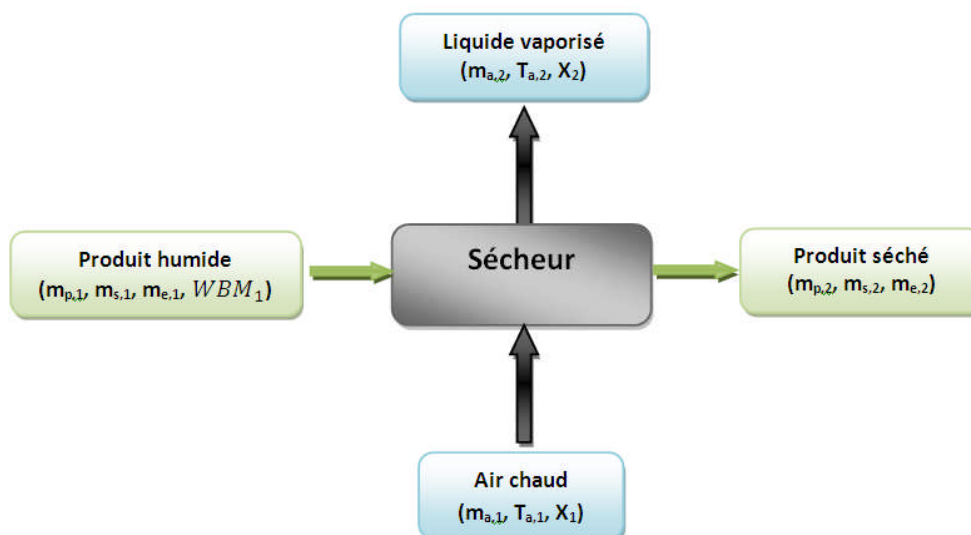


Fig II.1 : Principe de séchage [5]

[cf. Vidéo d'un exemple de séchage en Algérie]

1.2. Activité de l'eau dans un produit humide

L'eau se trouvant dans les aliments présente différentes propriétés physicochimiques selon ses états de liaison avec les macromolécules de l'aliment et avec les molécules d'eau entre elles.

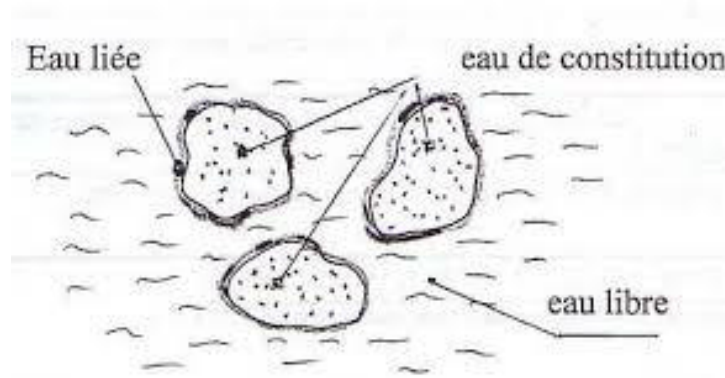


Fig II.2 : Disposition de l'eau dans un produit humide [2]

a) L'eau libre



L'eau libre est l'eau qui est retenue par effet capillaire dans les pores des aliments. C'est l'eau liée par effet osmotique, l'eau d'hydratation des macromolécules et l'eau solvant. L'eau libre est mobile et conserve toutes les propriétés de l'eau pure. Lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité proche de 1, elle s'évapore comme de l'eau pure à l'air libre*.

b) L'eau liée



C'est une eau faiblement adsorbée, retenue par capillarité dans les tissus du produit. Elle est dite capillaire ou eau absorbée en surface, et est moyennement réactive. Cette eau forme une couche mince mono-moléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. Cette eau est fixe et elle possède la particularité de s'échapper à la congélation car les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celles des molécules d'eau cristallisées entre elles. Cette eau n'est pas disponible d'où « l'eau liée »*.

c) L'eau de constitution



C'est l'eau de constitution chimique d'un produit. Elle est liée chimiquement et ne peut être récupérée sans altération du produit. C'est une eau liée ou une eau de constitution intimement liée aux composants biochimiques et ayant perdue toutes ses qualités réactives.

1.3. L'Humidité Relative d'équilibre H_{ré}



L'humidité relative à l'équilibre mesure le degré hygrométrique du produit par rapport à la saturation.

$$H_{ré} = \frac{\text{Pression partielle de vapeur d'eau de l'aliment à la température } \theta}{\text{Pression partielle de vapeur d'eau saturante à la température } \theta} \times 100 \quad (II.1)$$

$$H_{ré} = \frac{P_v(\theta)}{P_{vsat}(\theta)} \times 100 \quad (II.2)$$

1.4. L'activité A_w de l'eau



Définition

L'activité de l'eau (A_w) correspond au rapport entre la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0} à la même température (A_w signifie en anglais Water Activity).

$$A_w = \frac{P_v}{P_{v0}} = H_r (\%) / 100 ; \text{ où :}$$

P_v : Pression de la vapeur d'eau présent dans le produit.

P_{v0} : Pression de la vapeur de l'eau pure.

H_r : Humidité relative moyenne.



Remarque

L'activité A_w est un paramètre compris entre 0 et 1 ; sa valeur est d'autant plus faible quand les forces de liaisons entre l'eau et le produit sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre.

Elle permet, en outre, de prévoir et d'éviter les détériorations physicochimiques, les activités enzymatiques et la prolifération des micro-organismes. En ce qui concerne les micro-organismes, les bactéries se développent à une valeur de $A_w > 0,91$, les levures à une valeur de $A_w > 0,87$ et les moisissures à une valeur de $A_w > 0,70$.

Tab II.1 : Valeurs minimales de l'activité de l'eau permettant la croissance des principaux types de micro-organismes [2]

Micro-organismes	A_w minimale
Bactéries	0.91
Levures	0.87
Moisissures	0.70



Exemple

La teneur en eau des aliments est très variable : elle est de 10 à 20% dans les céréales, de 60 à 75% dans les viandes et chairs d'animaux, de 80 à 90% dans les fruits et légumes frais.

Tab II.2 : Teneur en eau de certains aliments [2]

Aliments	Teneur en eau (%)
Viande de bœuf	50 à 70
Viande de poulet	74
Poisson	65 à 81
Poires	80 à 85

Pommes, Pêches, Oranges	85 à 90
Tomates, Fraises	90 à 95
Avocat, Banane	74 à 80
Carotte, Pomme de terre	80 à 90
Laitue, Lentilles	90 à 95
Miel	20
Confiture	28
Farine, Riz	12
Poudre de lait	4

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



L'activité A_w dans un produit alimentaire dépend principalement de sa teneur en eau (X) et de sa température θ . La courbe représentant, pour une température θ donnée, la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité A_w ou de l'humidité relative H_{re} est appelée :

- **Isotherme d'adsorption**, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- **Isotherme de désorption**, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

On peut représenter graphiquement la courbe appelée isotherme d'adsorption-désorption, obtenue en portant :

- **En abscisse** : soit l'activité A_w , soit l'humidité relative H_{re}
- **En ordonnée** : la teneur en eau du produit exprimée en g d'eau pour 100 g de matière sèche (% MS)

Les deux courbes sont en général différentes (Figure ci-dessous) car le séchage d'un produit (le passage de $A_w=1$ à $A_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

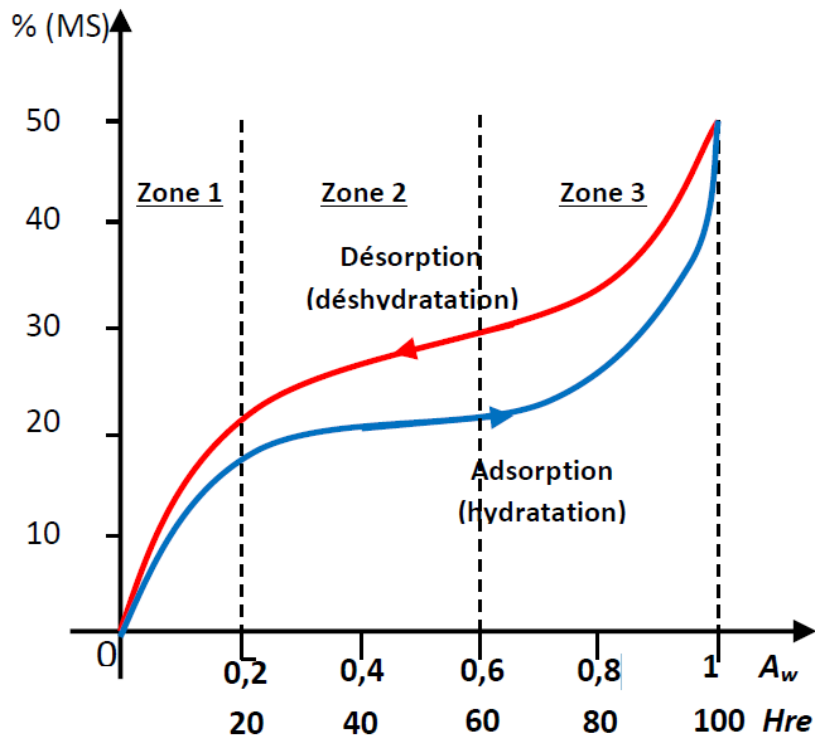


Fig II.3 : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau [2]

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

- **Zone 1** ($0 < A_w < 0,2$) : Formation d'une monocouche moléculaire d'eau à la surface du produit (liaison de type Van der Waals entre groupements hydrophiles et molécules d'eau). L'adsorption se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état lié (rigidité, fortes liaisons hydrogènes). Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- **Zone 2** ($0,2 < A_w < 0,6$) : Adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité. L'isotherme est linéaire dans cette zone. Il s'agit d'un état intermédiaire entre solide et liquide.
- **Zone 3** ($A_w > 0,6$) : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue.

L'analyse de l'isotherme d'adsorption et de désorption montre que les deux courbes ne sont pas superposées. Pour une teneur en eau donnée, l'équilibre de la désorption s'établit pour des A_w plus faibles que l'équilibre de l'adsorption. C'est le **phénomène d'hystérésis**, qui ne se manifeste que pour des valeurs de $A_w > 0,2$. L'hystérésis s'explique par deux observations :

- Les pores des aliments sont en général plus petits en surface qu'en profondeur. La pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage est plus élevée que celle à laquelle les pores se vident ;
- L'hystérésis est surtout marquée dans les fruits et les légumes car les sucres de ces aliments forment des solutions sursaturées qui ne précipitent pas lors de la déshydratation.

Intérêt des isothermes d'adsorption en technologie alimentaire



- Du point de vue **thermodynamique**, les isothermes d'adsorption fournissent des informations sur les enthalpies de "sorption" et sur le type de liaison de l'eau avec la matière sèche du produit ;
- Du point de vue **structurel**, elles permettent de mieux comprendre le rôle de la taille des particules, de l'état amorphe, et de la surface spécifique dans les phénomènes de désorption ou adsorption de la vapeur d'eau ;

- Du point de vue **technologique**, elles sont utiles à la prédiction de la durée de conservation des aliments, au contrôle du séchage et à la prévention de certains accidents comme le collage ou la prise en masse des produits alimentaires pulvérulents. C'est la composition relative en protéines, amidons, sels minéraux et saccharose qui détermine les isothermes d'adsorption. L'objectif étant d'atteindre des A_w faibles ; pour cela, on peut faire appel à divers additifs comme le sel, le saccharose pour abaisser l' A_w sans changer la teneur en eau. Ces additifs sont précieux pour les aliments à humidité moyenne $< 35\%$ et $0,6 < A_w < 0,8$. Ils sont stables plusieurs semaines en emballage étanche (saucissons secs, fruits secs, biscuits,...).

? Exemple

Par ailleurs, l'état d'un composé influence sur le taux de fixation de l'eau ; par exemple, à humidité donnée, le saccharose amorphe retient plus d'eau que le saccharose cristallisé car la transition d'un état à l'autre provoque une expulsion d'eau à mesure que le cristal s'ordonne. Cette transformation est liée à la fois à l'humidité et à la température. Lors de la cristallisation, l'eau libérée dissout les cristaux des couches externes, alors que les couches internes consolident leur cristallisation et se prennent en masse. L'eau expulsée du cristal peut aussi se relocaliser sur d'autres constituants et donne une masse collante. On peut citer les exemples suivants:

- Le café soluble déshydraté prend en masse en vieillissant (surtout lorsque l'emballage n'est plus étanche) ;
- Le lait en poudre subit la même transformation ;
- Les bonbons deviennent collants à l'extérieur (les cristaux passent à l'état amorphe) et durs à l'intérieur par cristallisation et expulsion d'eau vers l'extérieur.

Plus l' A_w dans un aliment est faible, mieux il se conserve, car la prolifération microbienne et les réactions chimiques sont limitées (Figure ci-dessous). Les courbes des isothermes sont utiles pour prévoir le comportement des aliments suite aux traitements technologiques et aux conditions de stockage.

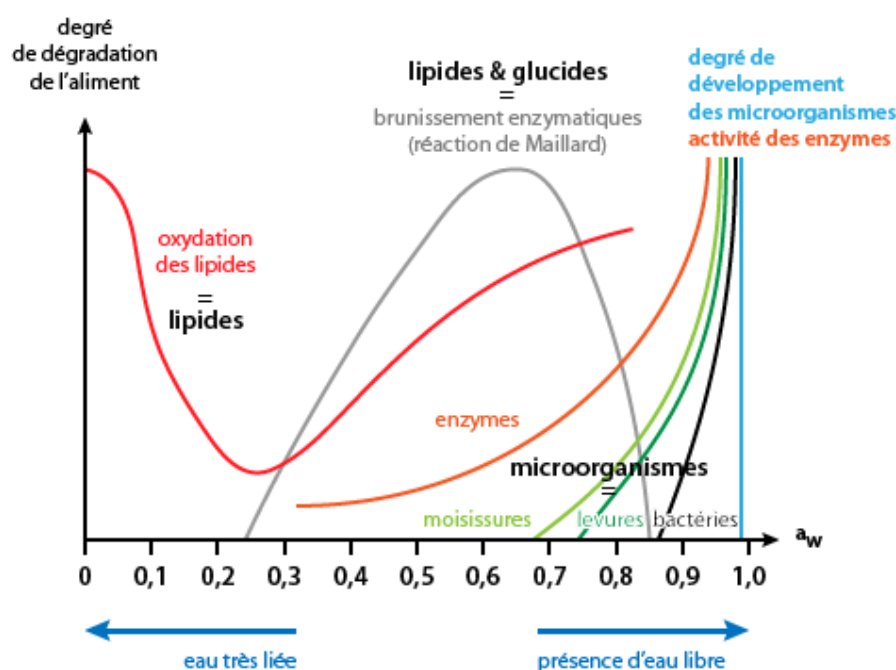


Fig II.4 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' a_w [2]

Le tableau (voir Annexe 01* (cf. Annexe 01)) représente les valeurs d'activités de quelques produits alimentaires.

2. Mécanismes intervenants dans le séchage thermique

Dans la nature et l'industrie, il existe différents mécanismes ou méthodes de séchage. La nature et la qualité du produit final impose des mécanismes de séchage différents. On rencontre une grande diversité dans les modes et méthodes de séchage.

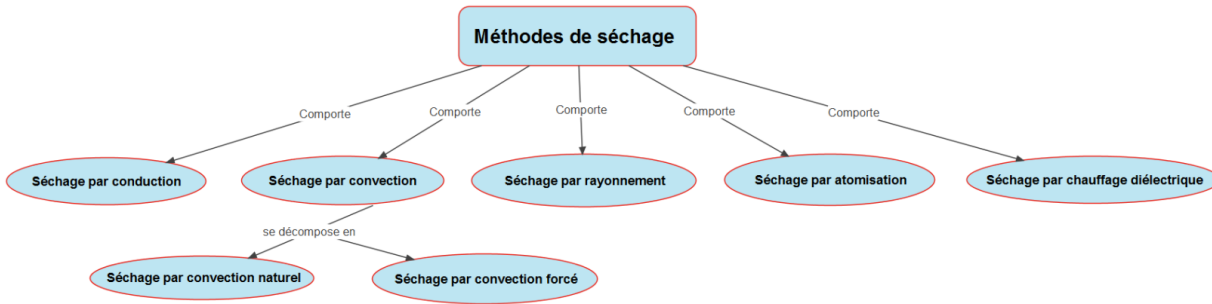


Fig II.5 : Méthodes de séchages

2.1. Modes de séchage

Pour évaporer l'eau d'un produit, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre : **l'ébullition** et **l'entraînement**.

a) Séchage par ébullition



Le séchage par ébullition consiste à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition un flux thermique au travers une surface d'échange de chaleur latente. L'évaporation de l'eau est directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation). En pratique cet apport est effectué par conduction au travers de la surface d'échange au contact du produit par de la vapeur dont la température est comprise entre 130 et 150°C.

Selon la loi de Fourier, le transfert de chaleur s'effectue de façon proportionnelle à la différence de température entre le fluide caloporteur et le liquide en ébullition à la pression considérée.



La température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité A_w du produit (elle diminue lorsque A_w augmente).

b) Séchage par entraînement



Le séchage par entraînement consiste à placer un corps humide dans un courant d'air (ou autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température.
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit (Figure ci-dessous).

Le séchage par entraînement est le moyen de séchage le plus universel, tous produits et secteurs alimentaires confondus (lait, œuf, charcuterie, céréales et produits végétaux, fruits, etc...).

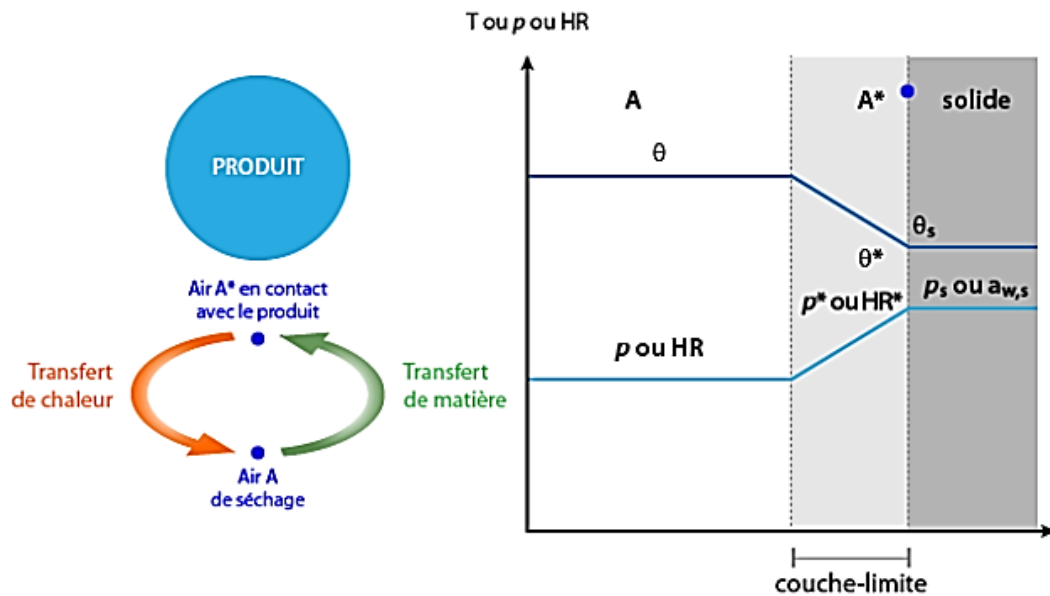


Fig II.6 : Transfert entre l'air et la surface du produit [4]

Phénomènes limitant

Remarque

La vitesse à laquelle s'effectue le séchage est liée à l'allure des transferts internes et externes de matière et de chaleur. Ces transferts correspondent à des mécanismes que l'on peut considérer comme disposés en parallèle ou en série et que l'on va voir dans les prochaines sections.

2.2. Séchage par convection

L'énergie thermique du milieu de séchage est transmise par convection aux matériaux humides qui sont en contact direct avec le flux d'air chaud. Dans le séchage par convection, l'air chaud en tant que milieu de séchage est à la fois un caloporteur et un porteur humide.

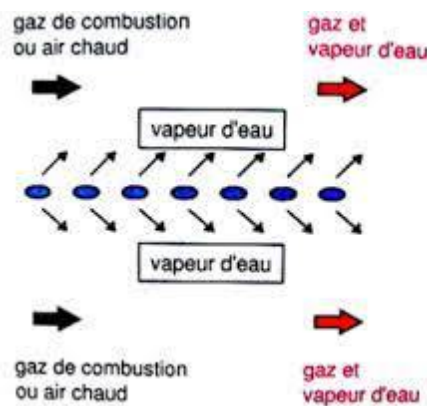


Fig II.7 : Séchage par convection

a) Convection naturelle

Définition

Le séchage naturel est l'un des processus les plus fondamentaux qui est généralement conduit en exposant des matériaux à l'air atmosphérique, au vent ou au rayonnement solaire. Certains exemples bien connus de séchage naturel sont le séchage des produits alimentaires sur des étagères ou des berceaux, le séchage de l'herbe, des récoltes et des céréales, ou le séchage de la peinture, des briques, du béton et d'autres matériaux de construction.

Les avantages de séchage naturel :

- N'implique pas de coûts élevés; c'est donc une méthode très pratique pour sécher les biomasses qui seront éventuellement utilisées comme combustibles ;
- Les gradients de température et de concentration sont faibles; cela permet un processus fluide qui ne détériore pas les produits et n'induit pas de contraintes mécaniques; par conséquent, malgré un temps de séchage plus long, dans de nombreuses applications, de meilleurs produits sont obtenus en utilisant un séchage naturel.

b) Convection forcée



Définition

La convection forcée est largement utilisée dans le système de séchage; cela nécessite l'utilisation d'un système de débit actif tel que des soufflantes et des ventilateurs. Plusieurs systèmes utilisent la convection forcée qui augmente le taux de séchage au détriment d'une grande consommation d'énergie requise par les soufflantes ou les ventilateurs.

Le séchage par transfert de chaleur suit l'équation suivante (Loi de Newton) :

$$Q = hS(T_a - T_s) \quad (II.3)$$

Avec :

Q : Quantité de chaleur transférée ; [W]

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ; [W/m²K]

T_a : Température du gaz de séchage (air) ; [K]

T_s : Température superficielle du produit à sécher; [K]

S : Surface d'échange ; [m²]



Remarque

Pour définir la surface d'échange on utilise le diamètre moyen des grains.

2.3. Séchage par conduction



Définition

L'énergie thermique est transmise aux matériaux humides par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition) soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est faible. Le flux thermique est donné par la relation suivante (Loi de Fourier):

$$Q = -\lambda S \frac{dT_s}{dx} \quad (II.4)$$

λ : Conductivité thermique ; [W/mK]

dT_s/dx : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit ; [K/m]

2.4. Séchage par rayonnement



Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (**micro-ondes**) soit par élévation de la température d'un émetteur **infrarouge**.

L'énergie thermique est produite par l'émission d'une source de **rayonnement infrarouge** sous la forme d'ondes électromagnétiques projetées sur la surface du matériau pour l'évaporation de l'eau. Cette méthode est également appelée séchage infrarouge, et l'électricité et le charbon peuvent être utilisés comme source de rayonnement infrarouge.

Pour le séchage par **micro-ondes**, le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau : l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires. Cela entraîne alors un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau.

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

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \phi \quad (II.5)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \sigma \quad (II.6)$$

T_1 : Température de la source émettrice ; [K]

T_2 : Température du produit ; [K]

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement ; m^2

A_2 : Surface de l'émetteur d'infrarouge ; m^2

ϵ_1 : Émissivité du produit à traiter ;

ϵ_2 : Émissivité de l'émetteur ;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ; ($\sigma = 5.673 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$)

ϕ : Facteur de vue tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a $\phi = 1$).

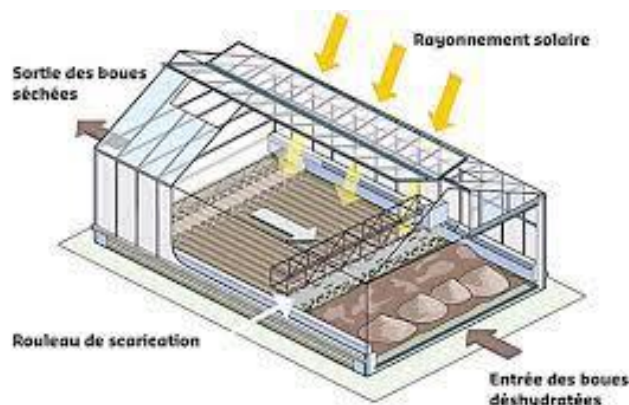


Fig II.8 : Séchage par rayonnement

2.5. Séchage par atomisation



Définition

Ce procédé est applicable directement à des **solutions** des **émulsions** ou des **suspensions fines**. L'idée de base se traduit à la production de poudres qui se propagent très fortement à partir d'un liquide par évaporation du solvant.

Cette opération est obtenue en mélangeant **un gaz chauffé** à un **liquide atomisé (vaporisé)** de gouttelettes présentant un rapport de masse / surface élevé, idéalement de taille égale, au sein d'une cuve (chambre de séchage), provoquant ainsi l'évaporation du solvant de manière uniforme et rapide par contact direct.

L'inconvénient de ce procédé est qu'il nécessite la vaporisation de très grandes quantités de solvants et consomment donc beaucoup d'énergie ce qui freine leur développement*.

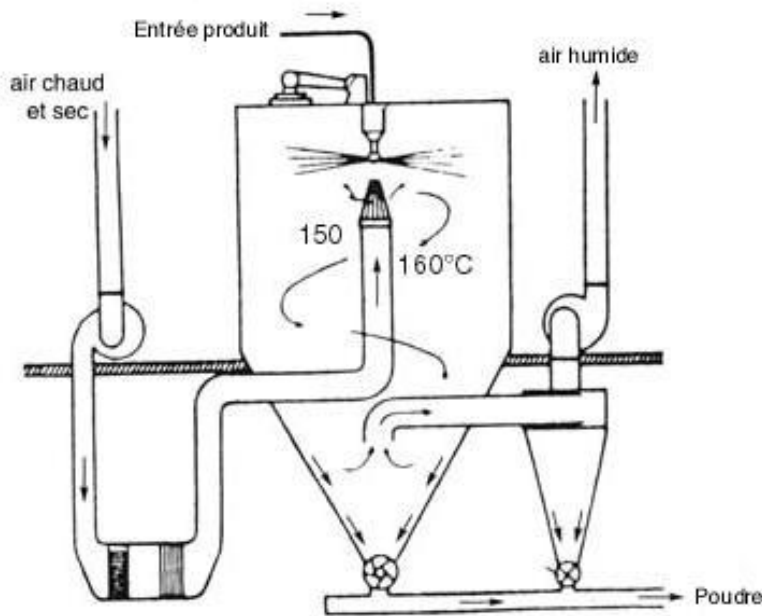


Fig II.9 : Séchage par atomisation [6]



Exemple

Applications : Produits pharmaceutiques, Boissons, Parfums, colorants et extraits de plantes, Plastiques, Polymères, résines, savons et détergents, Textiles.

2.6. Séchage par chauffage diélectrique



Définition

Cette méthode consiste à insérer **une électrode** dans le matériau. Un moteur est utilisé pour fournir un **courant alternatif** à haute fréquence, et la chaleur interne générée par la perte diélectrique est utilisée comme source de chaleur pour le séchage. Cette méthode est également appelée **séchage à haute fréquence**, qui se caractérise par l'uniformité du chauffage dans le matériau.

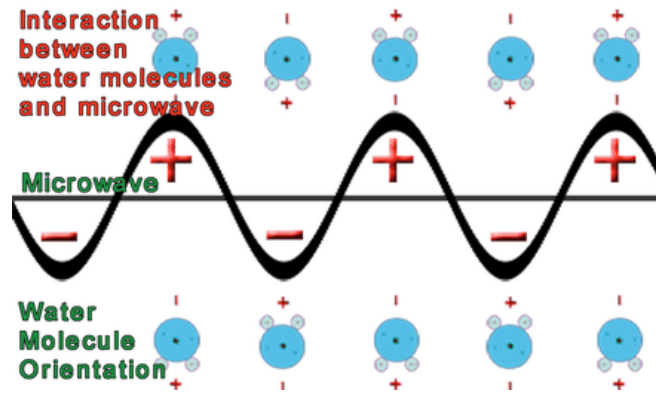


Fig II.10 : Séchage par chauffage diélectrique

3. Applications sur la théorie de séchage

Exercice 1 : États de liaison de l'eau

[solution n°4 p. 70]

Quels sont les états de liaison de l'eau avec les macromolécules de l'aliment ?

- L'eau libre
- L'eau seul
- L'eau liée
- L'eau de constitution
- L'eau mobile

Exercice 2 : Activité d'eau A_w

[solution n°5 p. 70]

L'activité d'eau dépend principalement de ?

- L'humidité relative et absolue du produit.
- La teneur en eau et sa température.

Exercice 3 : Méthode de séchage

[solution n°6 p. 70]

Quelle méthode de séchage est plus adaptée aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur ?

Exercice 4 : Intervalles des zones de l'isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

[solution n°7 p. 70]

Limiter la **zone 2** de l'isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau (A_w)

Zone 2 : Adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité.

Exercice 5 : Modes et mécanismes de séchage

[solution n°8 p. 70]

Séchage par entraînement Séchage par ébullition Séchage par convection naturelle

Séchage par chauffage diélectrique Séchage par atomisation Séchage par rayonnement

Séchage par convection naturelle Séchage par conduction

Mode de séchage	Mécanismes de séchage

Chapitre 03 : Principes de calcul des sècheurs



1. Principe de séchage



Le moyen le plus approprié pour une opération de séchage d'un produit est de ventiler un air ou un gaz sec et chaud sur le produit humide. Le gaz asséchant cède de la chaleur (sensible) au produit qui libère de la vapeur d'eau. L'énergie de vaporisation de l'eau est prise dans l'air qui se refroidit et s'humidifie en transportant la vapeur d'eau extrait du produit. Celui-ci perd une partie de son eau et devient sec. La figure ci-dessous montre le schéma de principe d'une installation de séchage convectif.

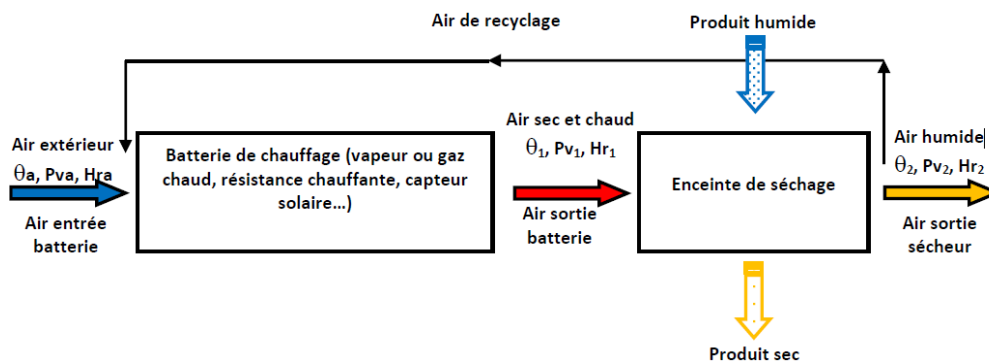


Fig III.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un sécheur [2]

L'air qui pénètre dans la batterie de chauffage subit un échauffement à pression constante avant d'être introduit dans l'enceinte de séchage où il subit une humidification quasiment adiabatique (à température humide constante). Voici les opérations subies par l'air humide :

- De (θ_a, H_{ra}) à (θ_1, H_{r1}) , l'air est chauffé (chaleur sensible) à pression constante ($Pv_a = Pv_1$)
- De (θ_1, H_{r1}) à (θ_2, H_{r2}) , l'air subit une humidification quasiment adiabatique ($\theta_{h1} = \theta_{h2}$) dans l'enceinte.

On a alors les relations suivantes : $\theta_a < \theta_1$ et $\theta_2 < \theta_1$; $Pv_1 = Pv_a$ ou $w_1 = w_a$; $\theta_{h1} = \theta_{h2}$ et $h_1 = h_2$

où w_1 , w_2 et θ_{h1} , θ_{h2} sont respectivement les humidités absolues et les températures humides à l'entrée et à la sortie du sécheur.

La différence $(w_2 - w_1)$, avec $w_1 = w_a$, correspond à la masse d'eau retirée du produit par kg d'air sec ayant traversé le séchoir. Pour réaliser une opération de séchage convectif il faut donc :

- Un apport de chaleur Q pour chauffer l'air introduit dans l'enceinte de séchage,
- Une circulation d'air qui entraîne la vapeur d'eau extraite du produit (on parle aussi de séchage par entraînement).

Sur le diagramme d'air humide (Fig ci-dessous), on reprend les opérations subies par l'air au cours de son passage dans la batterie (A---->1) de chauffage et dans le séchoir (1----->2).

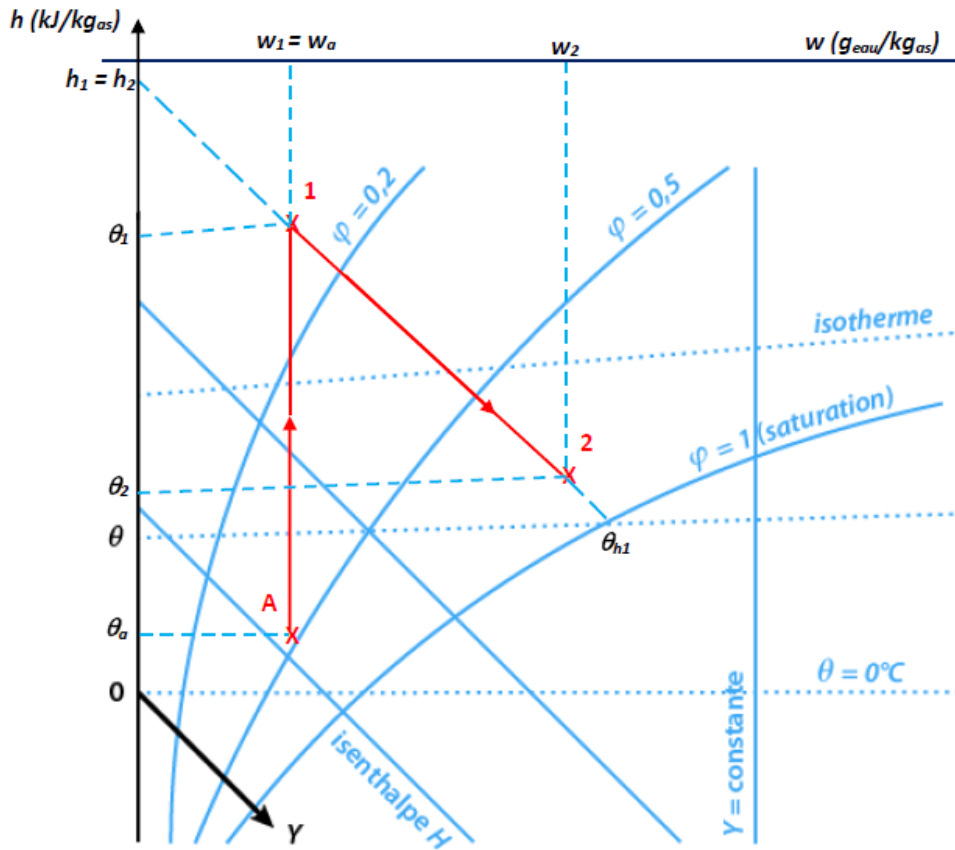


Fig III.2 : Parcours de l'air de séchage dans le diagramme d'air humide [2]

Température de séchage



Si la pression de vapeur P_v au niveau de la surface du produit est supérieure à la pression de vapeur de l'air ambiant P_{v_a} alors la différence $(P_v - P_{v_a})$ est le moteur qui provoque l'évaporation de l'eau à la surface du produit.

L'échauffement de l'air ne modifie pas la pression de vapeur d'eau P_{v_a} mais diminue son humidité relative Hr_a et augmente sa pression de vapeur saturante $(P_{vs}(\theta_a))$. Pour augmenter la masse d'eau à évaporer (vitesse de séchage plus grande) il faut donc, à P_{v_a} constante, augmenter la pression de vapeur d'eau P_v à la surface du produit. Si l'on admet que A_w varie peu avec la température, on peut écrire Pour $\theta_2 > \theta$:

$$A_w = \frac{P_{v_1}}{P_{vs}(\theta_1)} \approx \frac{P_{v_2}}{P_{vs}(\theta_2)} \quad (III.1)$$

Comme $P_{vs}(\theta_2) > P_{vs}(\theta_1)$, $P_{v_2} > P_{v_1}$ et donc $(P_{v_2} - P_{v_a}) > (P_{v_1} - P_{v_a})$

Pour obtenir une vitesse de séchage plus élevée et extraire plus d'eau, il faut donc élever la température du produit.

On a donc intérêt à avoir une température du produit la plus élevée possible pour obtenir une vitesse de séchage importante. Elle ne doit cependant pas dépasser une certaine valeur maximale θ_{max} au-delà de laquelle le produit peut-être altéré ou détruit. Pour éviter toute détérioration des éléments nutritifs, on retiendra respectivement une valeur $\theta_{max} \approx 60^\circ\text{C}$ pour les fruits, et une valeur $\theta_{max} \approx 50^\circ\text{C}$ pour les légumes.

On notera que lorsque la vitesse de séchage est trop élevée en début d'opération, la couche en surface s'assèche et conduit à un phénomène de croûtage : il y a formation d'une pellicule isolante (thermiquement) et résistante au passage de la vapeur d'eau qui ralentit ensuite le séchage. Il convient donc de limiter la température de l'air en début de séchage pour éviter ce phénomène. Il est préférable de ne pas envoyer directement de l'air très chaud sur le produit pour éviter ce phénomène.

2. Cinétique du séchage



Les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques laissent envisager que le meilleur moyen de caractériser le comportement d'un produit alimentaire au cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers.

Deux types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours du séchage :

- la teneur en eau sèche moyenne (X) du produit, en fonction du temps (t) obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit ;
- la vitesse de séchage ($-\frac{dX}{dt}$) en fonction de la teneur en eau base sèche (X).

Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme, par exemple, la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes (Figure ci-dessous) :

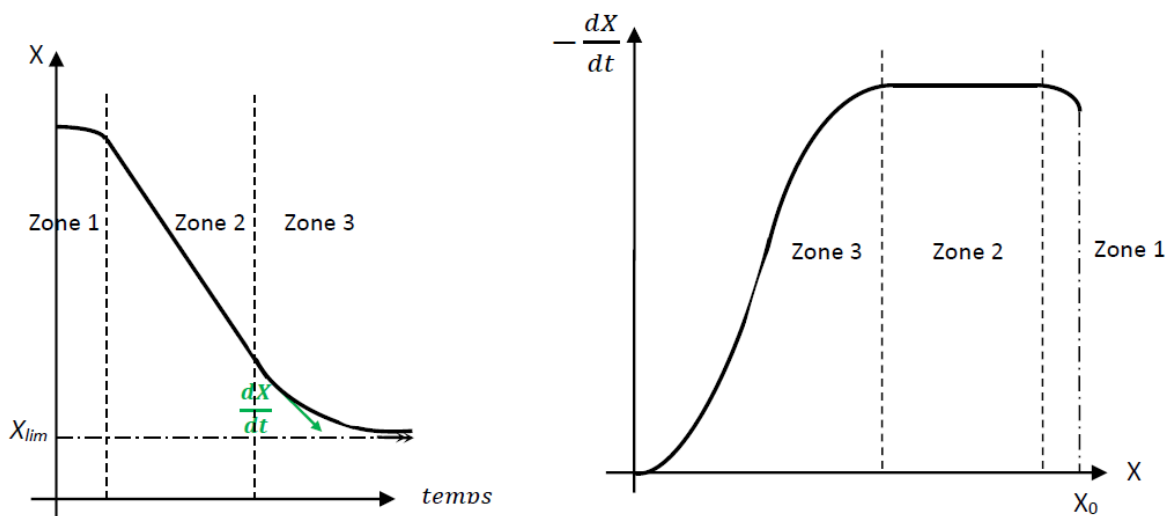


Fig III.3 : Évolution de la teneur en eau en fonction du temps et la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau [2]

- **Zone 1 : une période de mise en température du produit**, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles;
Cette phase dure le temps d'amener le produit de la température initiale θ_a à la température θ_e résultant de l'équilibre entre le transfert de chaleur convectif air/produit et l'évaporation à la surface du produit.
- **Zone 2 : période de séchage à vitesse constante**, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau A_w dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes.

Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide (θ_h) de l'air, c'est-à-dire la température de l'air de séchage. À la fin de cette période, la teneur en eau critique du produit peut être déterminée. Il est à signaler que cette phase n'existe pas pour tous les produits et en particulier pour les fruits et légumes.

- Zone 3 : période de séchage à vitesse décroissante**, Quand l'eau libre provenant de l'intérieur du produit devient rare l'eau continue à se déplacer du centre vers la surface sous forme de vapeur. Le déplacement de cette vapeur est alors beaucoup plus lent. La vitesse de séchage décroît et la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique. L'activité de l'eau A_w en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de masse d'eau deviennent limitant. Le refroidissement de l'air dû à l'évaporation devient moins important, la température du produit augmente et tend vers la température sèche de l'air alors que la teneur en eau du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (X_{lim}) qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative).

3. Bilan sur les séchoirs

Un séchoir par entraînement, avec son élément de chauffage, est représenté dans la figure ci-dessous :

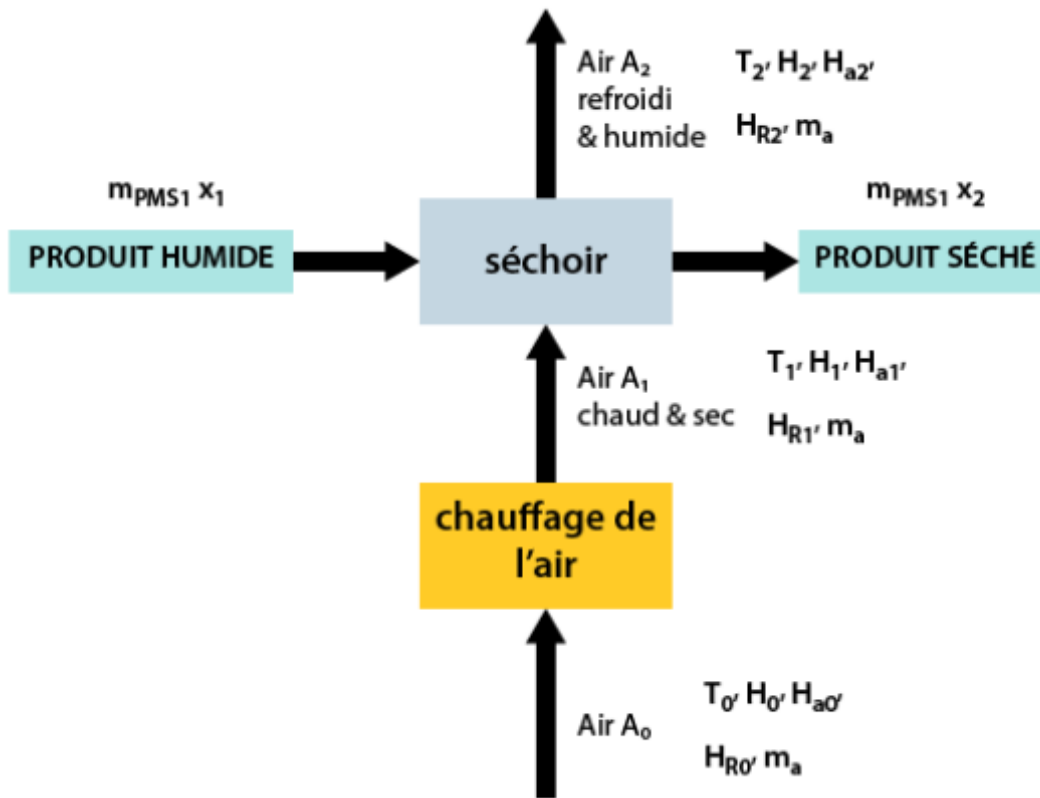


Fig III.4 : Transfert entre l'air et la surface du produit [3]

Les bilans s'écrivent sur la base des débits constants de matière sèche (m_{pMS}) et d'air sec (m_a).

Les teneurs en eau sont exprimées en kg d'eau/ kg d'air sec pour l'air et en kg d'eau/ kg de matière sèche (MS) pour l'aliment.

Tenant en compte que l'eau que perd le produit est gagnée par l'air, le débit d'eau $m_e = \dot{m}_a (H_{a2} - H_{a1}) = \dot{m}_{pMS} (X_1 - X_2)$

Et si le séchage est isenthalpique : $H_1 = H_2$

En réalité, ces bilans sont le plus souvent faussés par :

- des entraînements de particules ;
- des fuites ou des entrées d'air ;
- et surtout des pertes énergétiques par les parois du séchoir et lors de l'échauffement du produit (périodes 0 et 2). Ils constituent néanmoins une bonne base de calcul.

Pour un séchoir par ébullition, on ne conserve que le calcul du débit d'eau à partir du bilan de matière sèche.

Le bilan énergétique est calculé à partir de l'équation théorique $\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_v$, à laquelle il convient d'ajouter la puissance nécessaire à l'échauffement du produit et les diverses pertes.

3.1. Rendement massique



La figure ci-dessous représente l'évolution de l'air dans un séchage convectif tel que décrit par le schéma précédent de principe de fonctionnement d'un séchoir.

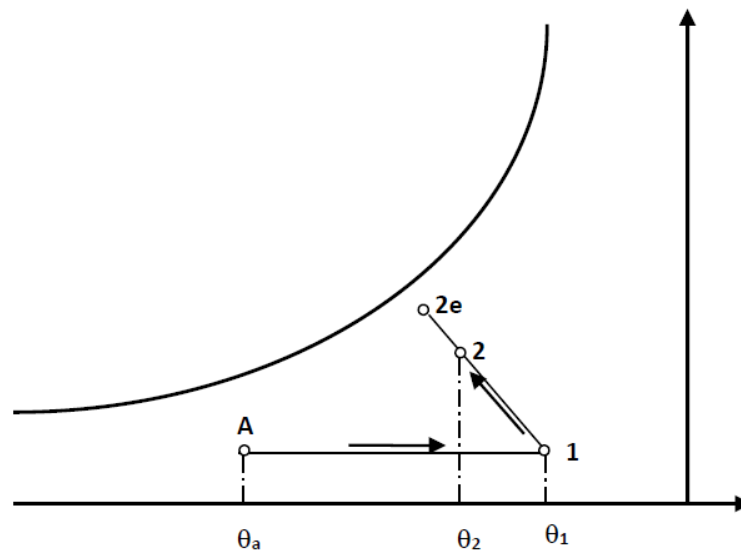


Fig III.5 : Évolution de l'air lors d'une opération de séchage convectif [2]

L'air sort de l'enceinte de séchage au point 2, il sortirait au point 2e si l'équilibre avec le produit était atteint, donc $Hr_{2e}/100 = A_w$ (A_w étant l'activité du produit). Le rendement massique est alors défini par :

$$\eta_m = \frac{w_2 - w_a}{w_{2e} - w_a} \quad (III.2)$$

Le rendement massique dépend principalement de la nature et de la taille du produit ainsi que de sa teneur en eau d'une part et de la température et de la vitesse de l'air autour du produit d'autre part.

3.2. Rendement énergétique



On définit pour une opération de séchage deux grandeurs caractérisant l'énergie consommée :

- La Consommation Énergétique Massique moyenne CEM qui est la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau du produit. Elle s'exprime par :

$$CEM = \frac{h_1 - h_a}{w_2 - w_a} \quad (III.3)$$

- Le Rapport de la Consommation Énergétique défini par :

$$RCE = \frac{CEM}{L_v} \quad (III.4)$$

L_v est la chaleur latente de vaporisation à la température de séchage θ . RCE s'exprime alors en remplaçant CEM par l'équation ci-dessus :

$$RCE = \frac{h_1 - h_a}{(w_2 - w_a)L_v} \quad (III.5)$$

L_v est donnée par la relation : $L_v(\theta) = 2501 - 2,65\theta$; valable pour θ allant de 0 à 180°C.

3.3. Pouvoir évaporatoire



Définition

Il est défini comme le débit massique qui pourrait être évaporé si le rendement massique était de 100%, c'est-à-dire que l'air sortant du séchoir serait en équilibre avec le produit, il s'écrit :

$$PE = \dot{m}_{as}(w_{2e} - w_a) \quad (III.6)$$

Où \dot{m}_{as} est le débit massique d'air sec circulant dans le séchoir.

Le pouvoir évaporatoire diminue au fur et à mesure que le produit sèche (puisque $H_{re} = A_w$ diminue au cours du séchage).

Le débit d'eau évaporé s'écrit :

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_{as}(w_2 - w_a) = \dot{m}_{as} x (w_{2e} - w_a) \frac{w_2 - w_a}{w_{2e} - w_a} = PE x \eta_m \quad (III.7)$$

Soit : $\Delta \dot{m} = \eta_m PE$

3.4. Tableaux récapitulatifs



Définition

Tab III.1 : Tableau récapitulatif des relations [2]

Grandeur	Formule
Teneur en eau base sèche	$X_s = \frac{M_e}{M_s}$
Teneur en eau base humide	$X_h = \frac{M_e}{M}$
Relation entre les deux teneurs en eau	$X_s = \frac{M_e}{M - M_e} = \frac{X_h}{1 - X_h}$ $X_h = \frac{M_e}{M_e + M_s} = \frac{X_s}{1 + X_s}$
Activité de l'eau d'un produit (Valeur comprise entre 0 et 1)	$A_w = \frac{P_v}{P_{v0}}$ $A_w = Hr / 100$

Grandeur	Formule
Rendement massique d'un séchoir	$\eta_m = \frac{w_2 - w_a}{w_{2e} - w_a} \quad (III.2)$ <p> w_a : humidité air ambiant w_2 : humidité à la sortie du séchoir w_{2e} : humidité à l'équilibre air-produit </p>
Consommation Energétique Massique Moyenne (kJ/kg'eau)	$CEM = \frac{h_1 - h_a}{w_2 - w_a} \quad (III.3)$ <p> w_a : humidité de l'air ambiant w_2 : humidité de l'air à la sortie du séchoir h_a : enthalpie de l'air ambiant h_1 : enthalpie de l'air dans le séchoir </p>
Rapport de consommation d'énergie	$RCE = \frac{h_1 - h_a}{(w_2 - w_a) L_v} \quad (III.5)$ <p>L_v : chaleur latente de vaporisation de l'air</p>
Pouvoir évaporatoire d'un séchoir (kg'eau/s)	$PE = m_{as} (w_{2e} - w_a) \quad (III.6)$
Débit d'eau évaporé (kg'eau/s)	$\Delta \dot{m}e = \eta_m PE$

Tab III.2 : Ordres de grandeur des valeurs de CEM et de RCE en fonction des modes de séchage [4]

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
Évaporateurs à multiples effets	250 à 1200	0,13 à 0,5



Pour améliorer l'efficacité énergétique des séchoirs, on peut :

- réduire les pertes par les parois ou les fuites,
- saturer l'air sortant au maximum,
- utiliser un air à température la plus élevée que possible (sans altérer profondément la qualité du produit),
- procéder par chauffages multiples de l'air,
- recycler une partie de l'air.

4. Exercice : Calcul d'un sécheur à grains

Question

[solution n°9 p. 71]

Dans un séchoir à grains, on sèche du maïs de sa teneur en eau initiale $X_i = 0,54$ à sa teneur en eau finale X_e de 0,18. On demande de calculer la quantité d'énergie maximale à fournir pour sécher 100 kg. Calculer la masse et le volume d'air minimum à faire passer dans le séchoir pour réaliser cette opération.

Indice :

Données : air ambiant ($\theta_a = 25^\circ\text{C}$; $H_{Ra} = 50\%$) air de séchage $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$

Chapitre 4 : Appareillages et Procédés de séchage



Le nombre très important de produits à sécher (forme, état initial ...) a pour conséquence l'existence dans l'industrie de nombreux procédés industriels (dispositifs, type d'énergie ...), ce qui rend difficile toute simplification lors du traitement de ce sujet.

Les fiches techniques présentées ci-après exposent, pour une gamme étendue de technologies de séchoir, outre la description du procédé et de ses caractéristiques, les différents systèmes ou dispositifs permettant d'atteindre une plus grande **efficacité énergétique** dans leur utilisation, ainsi que les modes de transfert de chaleur courants ou en développement amenant des **gains en énergie conséquents**.

Les divers types de séchoirs industriels peuvent se regrouper de différentes manières ; on a choisi ici de distinguer les séchoirs statiques ou séchoirs à feu discontinus, des séchoirs à feu continus.

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

Fig IV.1 : Principaux procédés de séchage thermique rencontrés [6]

1. Séchoirs continus

1.1. Atomisation

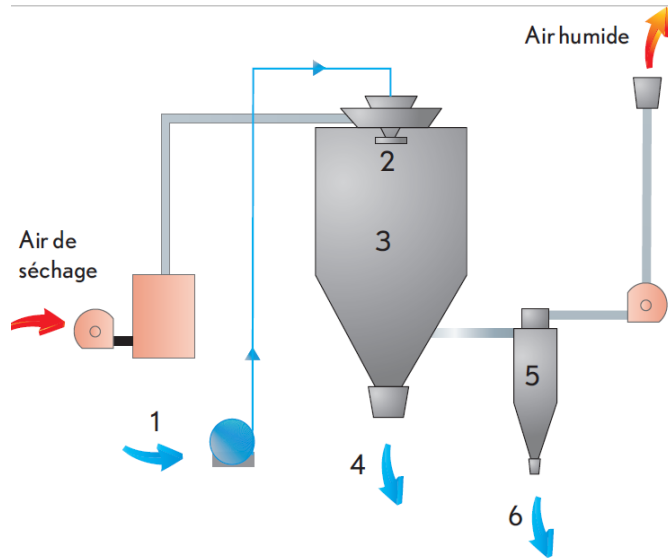


Fig IV.2 : Séchage par atomisation [8]

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

Type de produit

État initial	produits liquides (le produit doit être pompable).
État final	produits pulvérulents (poudres de qualité uniforme).

Tab IV.1 : Exemples d'applications

Teneur en eau	Lait	Café	Levures	Oxyde de titane	Poudres détergentes	Sérum
Initiale	52%	75 - 85%	75%	45%	35%	/
Finale	3%	3 - 5%	8%	0,1 %	4 - 10 %	5 %

Tab IV.2 : Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement		Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
	entrée	sortie			
1 à 30 m/s	100 à 600°C	60 à 200 °C	10 à 30 s	5 à 200 t/h	1 à 30 kg d'eau/h/m ³

Le séchage par atomisation comprend 3 étapes :

1. Pulvérisation du produit

L'atomisation consiste à pulvériser la suspension à sécher en fines gouttelettes, souvent en partie haute de l'enceinte. Le liquide peut être pulvérisé par atomisation centrifuge, par atomisation sous pression (buse à simple fluide) ou par atomisation pneumatique (buse à 2 fluides). Cette opération détermine la taille des gouttelettes produites (et leur granulométrie), leur trajectoire, leur vitesse et par conséquent la dimension finale des particules sèches.

2. Mélange air-spray et évaporation de l'eau

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

3. Séparation du produit sec de l'air rejeté

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

Des variantes au procédé générique existent également (atomisation multiple-effet, atomisation à 2 ou 3 étages).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique



- Il est intéressant de réchauffer l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant (par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non).
- L'utilisation de la VES* (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage par atomisation. Les intérêts sont multiples:
 - _ Une consommation énergétique réduite par rapport au séchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - _ Possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui même (CMV*) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières...),
 - _ Récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - _ Élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - _ Amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...)*.

1.2. Cylindre chauffant

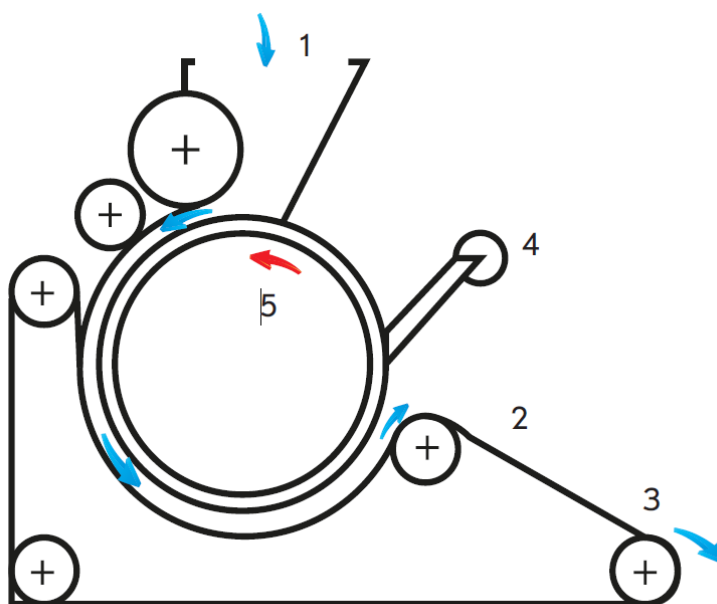


Fig IV.3 : Séchage par cylindre chauffant [8]

1. Entrée du produit humide
2. Produit mi-sec
3. Sortie du produit sec
4. Racleur produit
5. Circulation fluide chauffant*

Type de produit

État initial	Produit liquide, pâteux ou en bande.
État final	Produit pulvérulent (flocons) ou en bande

Tab IV.3 : Exemples d'applications

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

Tab IV.4 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
100 à 180 °C	3 à 30 s	5 à 200 t/h	15 à 40 kg d'eau/h/m ³

**Méthode**

Le séchage par cylindre chauffant comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation du produit

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

Le schéma d'alimentation dépend essentiellement de la texture, de la concentration, de la viscosité, du caractère mouillant du produit et de la sensibilité à la température.

On distingue les modes d'alimentation suivants en fonction du type de produit :

- pour les fluides : alimentation par trempage, par pulvérisation ou par rouleau encreur ;
- pour les produits visqueux et pâteux : alimentation par plusieurs rouleaux encolleurs en cascade (le produit est encollé sur le tambour en couches successives, chaque rouleau satellite est alimenté par raclage du précédent) ou en parallèle (l'alimentation en couches successives se fait à partir de chaque rouleau satellite qui est alimenté directement en produit frais).

2. Transport et séchage du produit

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

Des variantes au procédé générique existent également (séchateurs bi-cylindres, séchateurs multi-cylindres).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique

**Fondamental**

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage du cylindre la VES (Vapeur d'Eau Surchauffée) ou l'IR.

Les intérêts de l'IR (Infra-Rouge) sont multiples:

- densité de puissance élevée et modularité,
 - faible inertie,
 - localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
 - homogénéité de température,
 - entretien facile et réduit,
 - élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.
- Il est intéressant de récupérer de l'énergie dans les buées (pour la production d'eau chaude ou le chauffage de locaux par exemple)

- L'utilisation de Compression Mécanique de Vapeur (CMV) sous vide permet le séchage de produits thermosensibles avec une consommation énergétique faible.*

1.3. Tambour rotatif

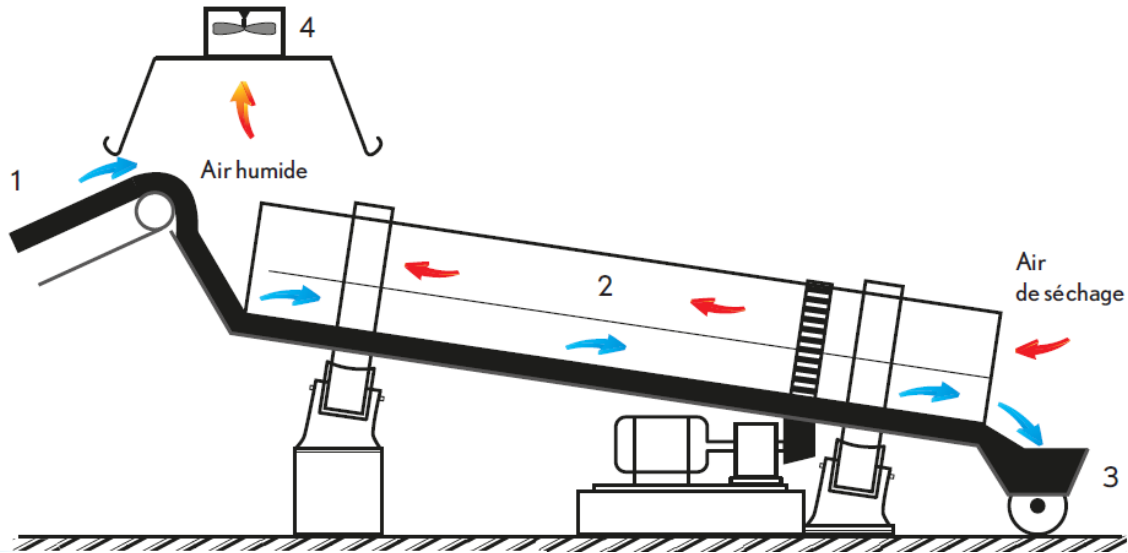


Fig IV.4 : Séchage par tambour rotatif [8]

1. Entrée du produit humide
2. Léchage air chaud
3. Sortie du produit sec
4. Extraction buées*

Type de produit

Produits fibreux.
Produits pâteux extrudables, émiettables ou granulables.
Produits pulvérulents, granulaires.

Tab IV.5 : Exemples d'applications

Teneur en eau	Sable	Pulpe de betterave	Talc	Pâtes alimentaires	Luzerne	Engrais NPK
Initiale	6 - 7%	76 - 78%	4 - 8 %	26,5 %	75%	5%
Finale	0,1 %	10 - 12 %	0,5 - 1,5 %	12,5 %	10 - 15%	1 %

Tab IV.6 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
100 à 900°C	10 à 60 s	50 à 70 t/h	1 à 20 kg d'eau/h/m ² de surface chauffante (tambour conducteur). 3 à 100 kg d'eau/h/m ³ (tambour convectif), en moyenne 60 à 80 kg d'eau/h/m ³ .

**Méthode**

Le procédé de séchage par tambour rotatif comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation et transport du produit

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

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

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

Le transfert de chaleur se fait par convection ou par conduction selon le type de tambour.

- **Séchoir tambour rotatif convectif (à léchage et brassage)** : Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est garnie d'aubes permettant de remonter le produit et de le laisser tomber en pluie au cours de la rotation. Ce système accroît considérablement la surface d'échange entre le produit et l'air et donc contribue à diminuer le temps de séchage.
- **Séchoir tambour conducteur** : La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par des gaz de combustion. La face interne du cylindre assure par conduction la transmission de la chaleur au produit humide. Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur tambour à double ou triple passages).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique

**Fondamental**

L'utilisation de la VES (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors de ce type de séchage.

Les intérêts sont multiples :

- une consommation énergétique réduite par rapport au léchage air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
- possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui même (CMV) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
- récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
- élimination des risques de feu ou d'explosions,
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme ...).*

1.4. Sécheur tunnel

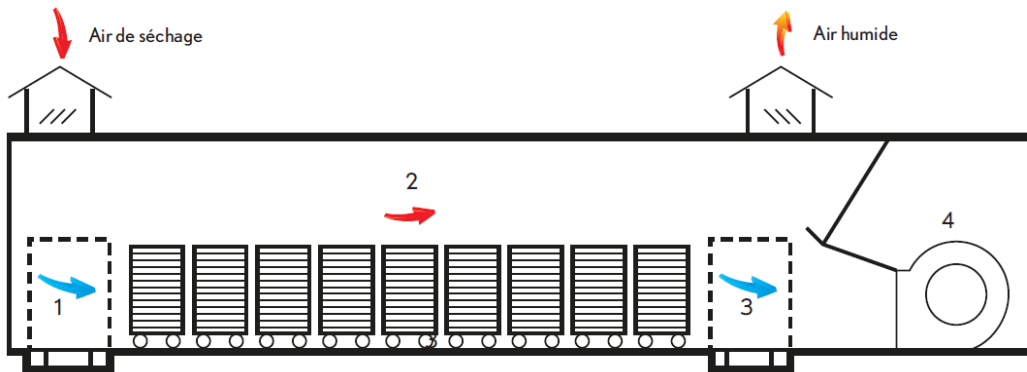


Fig IV.5 : Sécheur tunnel [8]

1. Entrée de chariots chargés en produit humide
2. Circulation d'air chaud
3. Sortie de chariots chargés en produit sec
4. Ventilateur de brassage

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

Type de produit

Produit de texture variée	produit pâteux
	produit granulaire, fibreux
	produit plan, en forme, en morceaux

Tab IV.7 : Exemples d'applications

Teneur en eau	Gélatine	Laine en bourre	Fruits et légumes	Briques et tuiles	Biscuits	Matelas en latex alvéolé
Initiale	70%	35 - 40%	80 - 90%	20%	4%	Produit en forme (épaisseur de 6 à 14 cm).
Finale	10%	0,1 - 15%	5%	3%	0,02 %	

Tab IV.8 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
30 à 250°C	Débit de matières important	1 à 50 kg d'eau/h/m ³



Le séchage tunnel comprend deux étapes :

1. Transport du produit

Le produit initial est déposé, à l'entrée du tunnel, au moyen d'un dispositif adéquat, qui peut être une bande oscillante, une vis d'étalement, un distributeur vibrant ou une boudineuse.

La matière est transportée sur un tapis unique (en tôles pleines ou perforées, en grillage, en toile tissée).

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). D'autres modes de transfert de la chaleur sont également possibles.

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur tapis à tabliers en série ; sécheur tapis à tabliers superposés ; sécheur chariot ; sécheur à balancelles).

Utilisation courante et Efficacité énergétique



Fondamental

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage la VES ou les énergies radiantes telles que IR (infra rouges) et HF (hautes fréquences).
Les intérêts de l'IR et des HF sont multiples :
 - Densité de puissance élevée et modularité,
 - Modularité importante.
 - Dissipation interne de l'énergie ;
 - Homogénéité de traitement.
- L'utilisation de la VES (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage tunnel.
Les intérêts sont multiples :
 - une consommation énergétique réduite par rapport au séchage air chaud (0.6-0.7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
 - possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui même (CMV) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
 - récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
 - élimination des risques de feu ou d'explosions,
 - amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...).
- L'utilisation de Compression Mécanique de Vapeur (CMV) permet d'obtenir une consommation énergétique faible : la vapeur utilisée est recyclée par plusieurs ventilateurs et réchauffée dans des échangeurs. C'est la vapeur extraite du produit qui est comprimée pour aller se condenser et surchauffer la vapeur de séchage.
- Utilisation possible de Pompe à Chaleur (PAC*).*

1.5. Sécheur à bande

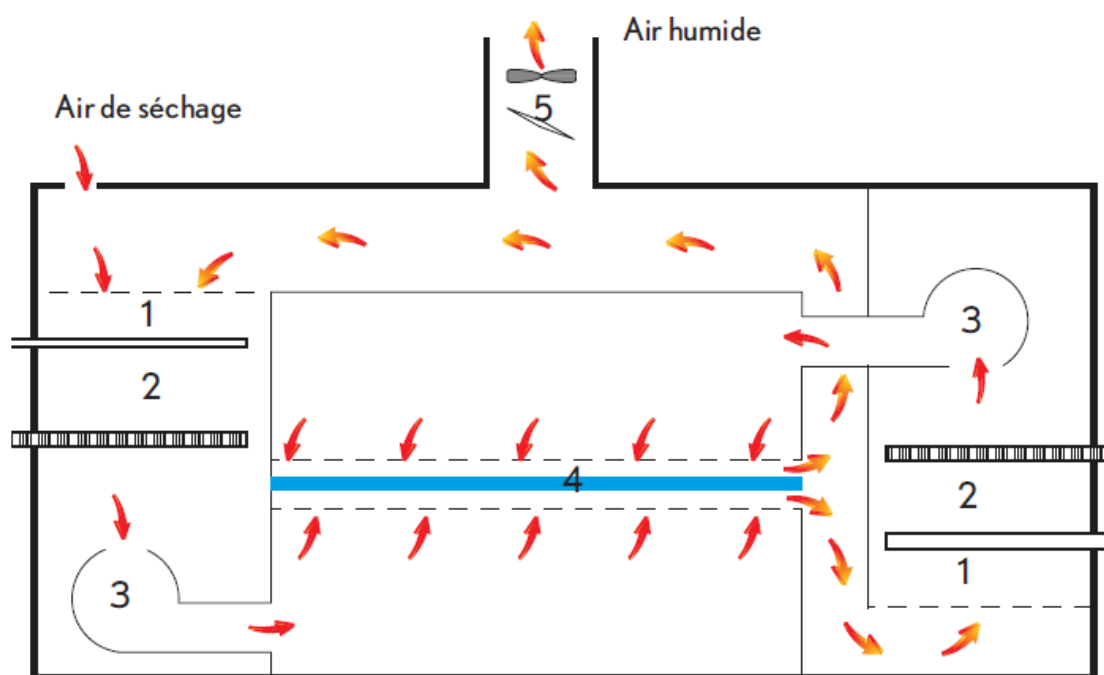


Fig IV.6 : Sécheur à bande [8]

1. Filtration de l'air
2. Chauffage de l'air
3. Ventilateurs
4. Produit en défilement
5. Registre d'extraction*

Type de produit

Produits en bande.
Solides divisés déposés sur un convoyeur.
Le produit ne doit pas se tasser naturellement pour favoriser l'écoulement de l'air

Tab IV.9 : Exemples d'applications

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

Tab IV.10 : Caractéristiques du procédé

		Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Capacité de traitement horaire
Rames		5 à 100 m/min	100 à 220°C 50 à 350 °C	1s à 2min	6 à 20 kg d'eau/h/m ² de sécheur
séchage aéroporté	Textiles	10 à 100 m/min		30 à 50 s	10 à 50 kg d'eau/h/m ² de sécheur
	Papiers	100 à 1500 m/min		0,1 à 2s	

**Méthode**

Le procédé de séchage à bande comprend 2 étapes distinctes :

1. Défilement du produit

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

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

L'apport de chaleur au produit se fait généralement par l'intermédiaire d'un fluide de séchage (circulation d'air chaud). L'utilisation des énergies radiantes est aussi possible. Le chauffage de l'air se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz ou via des tubes alimentés en vapeur.

Des variantes au procédé générique existent également (Séchage par aéroportance et séchage sur convoyeur à bande).

Utilisation et Efficacité énergétique

**Fondamental**

- On utilise fréquemment et avec intérêt pour le chauffage la VES ou les énergies radiantes telles que IR (infra rouges) et HF (hautes fréquences).

Les intérêts de l'IR et des HF sont multiples :

- densité de puissance élevée et modularité,
- faible inertie,
- localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
- homogénéité de température,
- entretien facile et réduit,
- dissipation volumique de l'énergie,
- homogénéité de traitement,
- bonne synergie avec l'air chaud.

- L'utilisation de la VES (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir lors d'un séchage à bande.

Les intérêts sont multiples :

- Économie d'énergie pour le séchage de textile domestique.*

1.6. Sécheur silo

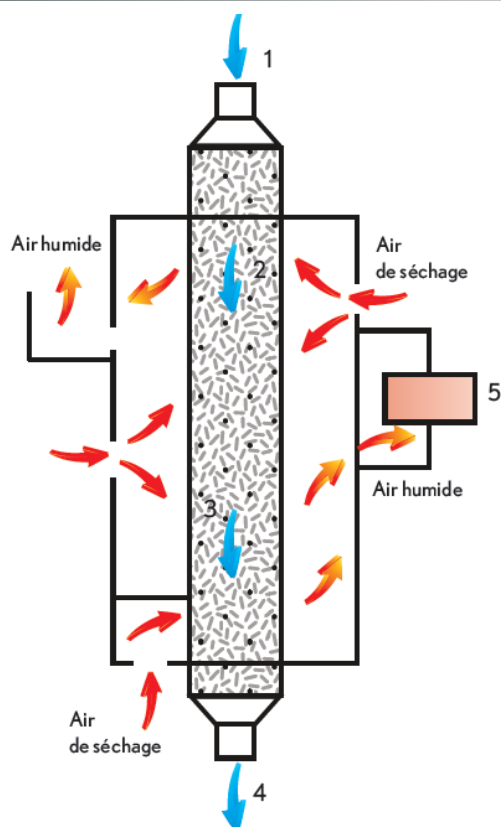


Fig IV.7 : Sécheur silo [8]

1. Entrée du produit humide
2. Zone de séchage
3. Zone de refroidissement
4. Sortie du produit sec
5. Recyclage de l'air*

Type de produit

Produits granulaires.

Tab IV.11 : Exemples d'applications

Teneur en eau	Maïs	Blé tendre	Orge	Pois protéagineux	Tournesol
Initiale	35%	19,5%	20%	17 à 20%	14%
Finale	15%	14,5%	14,5%	/	08%

Tab IV.12 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
30 à 90 °C	16-9h à 3-4 jours	2 à 60 t de grain humide/h	500 à 15 000 kg d'eau/h

**Méthode**

Le séchage par silo comprend 4 étapes :

1. Alimentation du produit

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

2. Transfert de chaleur et séchage du grain

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

3. Refroidissement et extraction du grain

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

4. Recyclage thermique de l'air usé

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

Des variantes au procédé générique existent également (dryération ou refroidissement lent différé; sécheurs fermiers).

Efficacité énergétique

**Fondamental**

- Recyclage intégral : on récupère l'air de la partie inférieure du sécheur (zone de refroidissement et de séchage). Il est réchauffé puis réinjecté dans la partie supérieure du sécheur.
- Recyclage partiel : l'air de la partie inférieure du sécheur est recyclé partiellement en sortie du générateur d'air chaud. Présence de moteurs à vitesse variable et de sondes hygrométriques permettant d'ajuster le taux de recyclage et par conséquent d'atteindre des rendements jusqu'à 80 %.*

1.7. Sécheur flash

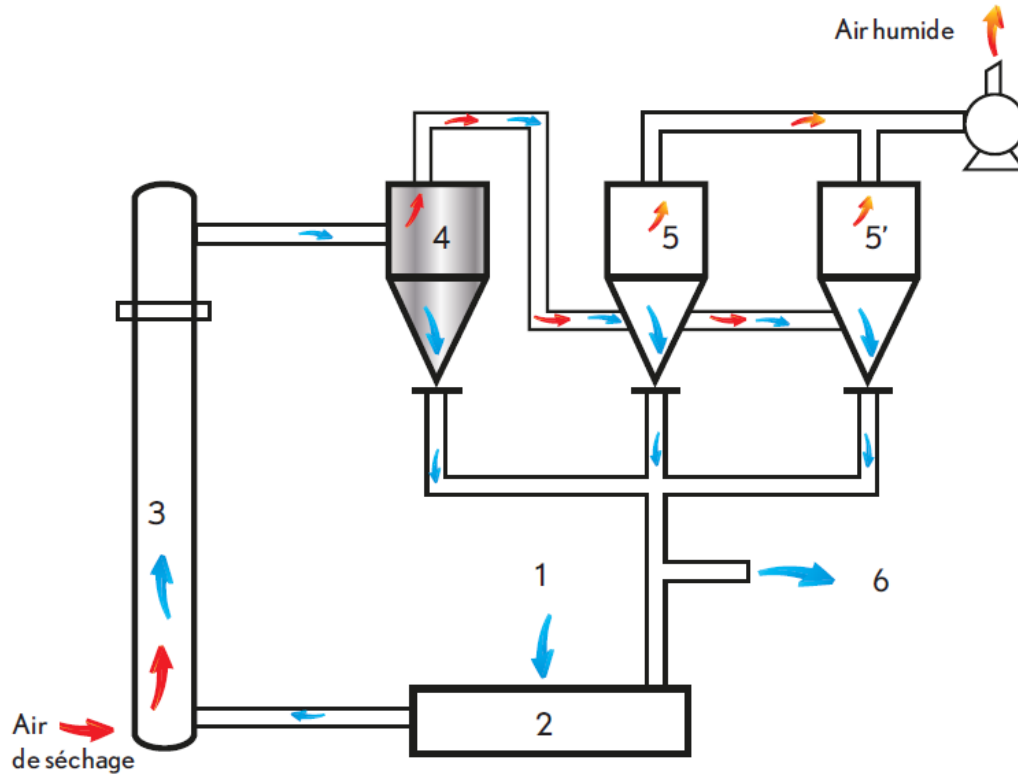


Fig IV.8 : Sécheur flash [8]

1. Entrée du produit humide
2. Mélange produit humide + produit sec
3. Entraînement du produit
4. Cyclone
5. Filtres
6. Sortie du produit sec*

Type de produit

Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation).
Produit pulvérulent, granulaire (produit fin, homogène et pouvant être transporté pneumatiquement).

Tab IV.13 : Exemples d'applications

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

Tab IV.14 : Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement		Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
	entrée	sortie			
15 à 30 m/s	100 à 350°C	70 à 120 °C	0,5 à 3,5 s	5 à 30 t/h	5 à 100 kg d'eau/h/m ²

**Méthode**

Le séchage par flash comprend 3 étapes :

1. Alimentation du produit

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

2. Entraînement du produit injecté

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

3. Séparation air/produit sec

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

Des variantes au procédé générique existent également (combinaison sécheur flash et lit fluidisé, combinaison sécheur flash et tambour rotatif).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique

**Fondamental**

- Il est intéressant de réchauffer l'air entrant au moyen de calories récupérées sur l'air sortant (par l'utilisation d'un fluide intermédiaire ou non).
- L'utilisation de la VES (Vapeur d'Eau Surchauffée) en remplacement de l'air chaud peut potentiellement convenir dans un sécheur flash.

Les intérêts sont multiples :

- une consommation énergétique réduite par rapport à l'air chaud (0,6-0,7 kWh/kg d'eau évaporée sans récupération énergétique),
- possibilité de récupération énergétique de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui même (CMV) ou en dehors du séchoir (turbo-alternateur, chaudières ...),
- récupération de solvants et/ou mauvaises odeurs,
- élimination des risques de feu ou d'explosions,
- amélioration possible de la qualité du produit (couleur, porosité, rétention d'arôme...)*

1.8. Lit fluidisé

 **Définition**

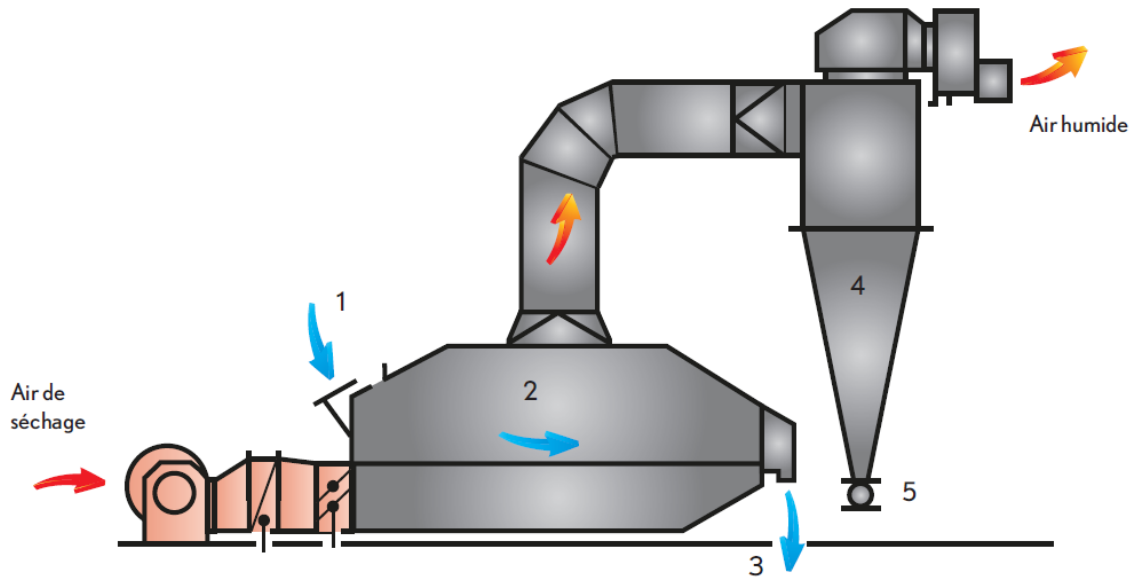


Fig IV.9 : Séchage par lit fluidisé [8]

1. Entrée du produit humide
2. Chambre de fluidisation
3. Sortie du produit
4. Cyclone de dépeussierage
5. Sortie poussières*

Type de produit

produits liquides (sur granules déjà formés),
produits pâteux (sous réserve du type d'alimentation),
produits pulvérulents, granulaires, fibreux,
produits de raffinage.

Tab IV.15 : Exemples d'applications

Teneur en eau	colorants	levures	boues	charbon broyé	sel marin	Sulfate de zinc
Initiale	31%	70%	65%	50%	2%	23%
Finale	7%	5%	40%	8 %	0,03%	Produit liquide (granulation)

Tab IV.16 : Caractéristiques du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
0,2 à 3 m/s	50 à 200 °C	2 à 60 min	5 à 50 t/h	30 à 200 kg d'eau/h/m ²

**Méthode**

Le séchage par Lit fluidisé comprend 3 étapes :

1. Traitement d'air

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

2. Fluidisation

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

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

3. Séparation du produit sec et de l'air de séchage

Le produit et l'air de séchage sont séparés dans le cyclone de dépoussiérage.

Des variantes au procédé générique existent également (Lit vibré, lit à échangeurs immergés, lit en fontaine ; Granulation ; Plug flow ; Lit fluidisé à agitateurs mécaniques).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique

**Fondamental**

- Recyclage thermique de la vapeur issue du produit :
 - réchauffage de produit, production d'eau chaude,
 - CMV lorsque le fluide de chauffage est de la vapeur d'eau surchauffée,
 - recyclage thermique des calories issues de l'air de séchage,
 - utilisation d'une PAC pour le chauffage des gaz.
- De nouveaux développements s'attachent à étudier la combinaison d'un séchage par lit fluidisé et Micro-ondes (MO).

Intérêts : Réduction du temps de séchage du poivre en lit fluidisé + MO, surtout à basse température de l'air (~ 40 °C).*

2. Séchoirs statiques (discontinus)

2.1. Sécheur étuve / Four de séchage

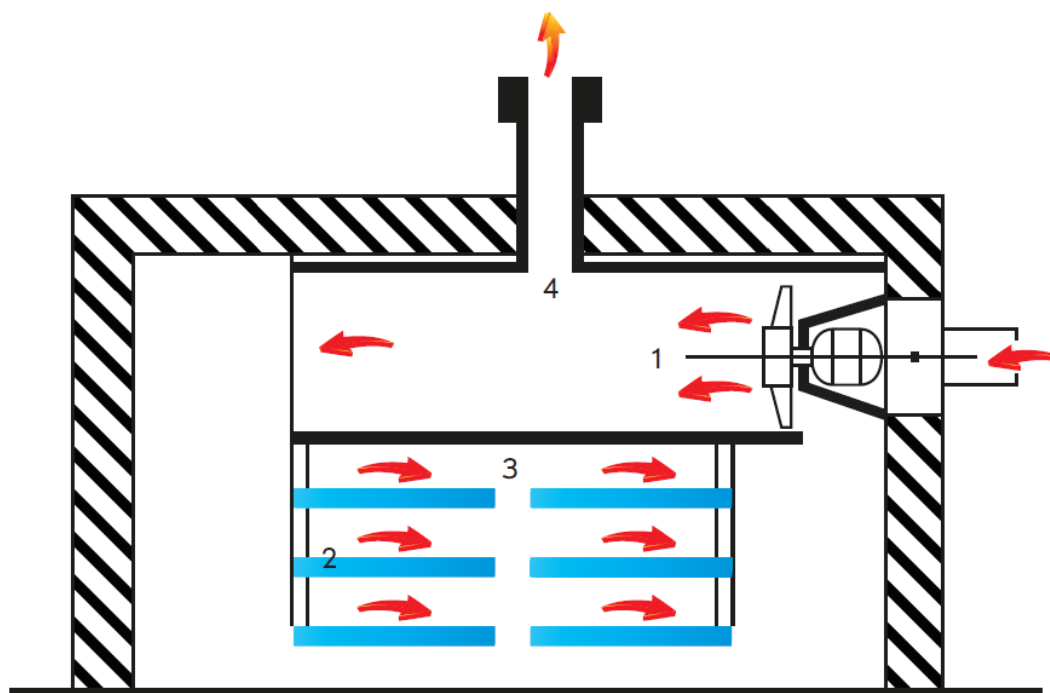


Fig IV.10 : Sécheur étuve [8]

1. Soufflage de l'air de séchage
2. Produit déposé sur des claies
3. Léchage air chaud
4. Extraction des buées*

Type de produit

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

Tab IV.17 : Exemples d'applications

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

Tab IV.18 : Caractéristiques du procédé

Cas	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Densité de chargement	Capacité de traitement horaire
Général	70 - 80°C	variable suivant le produit	Très variable suivant le produit	Très variable suivant le produit
Bois	120 - 150 °C	3,5 jours à 2-3 mois	30 à 150 m ²	250 à 400 kg d'eau évaporée/m ³ /h.

**Méthode**

Le séchage par étuve comprend 2 étapes :

1. Chargement et séchage du produit

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

2. Recyclage de l'air humide

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

Des variantes au procédé générique existent également (sècheur chariot).

Utilisation en développement et Efficacité énergétique

**Fondamental**

- Créer une circulation d'air en circuit fermé : le fluide de séchage est déshumidifié, préchauffé puis renvoyé dans la chambre de séchage.
- Utilisation d'une Pompe à Chaleur (PAC) pour récupérer la chaleur latente contenue, dans les buées issues du produit.
- De nouveaux développements s'axent sur l'utilisation des énergies radiantes telles que **MO (micro ondes)** et **HF(hautes fréquences)**.

Les intérêts des MO et des HF sont multiples :

- densité de puissance élevée et modularité ,
- faible inertie,
- localisation de la chauffe (amélioration du profil longitudinal de température),
- homogénéité de température,
- entretien facile et réduit,
- élimination des problèmes mécaniques dus à l'absence de circulation de fluides.

Séchage par Vapeur d'eau Surchauffée (VES) sous vide.*

2.2. Lyophilisation

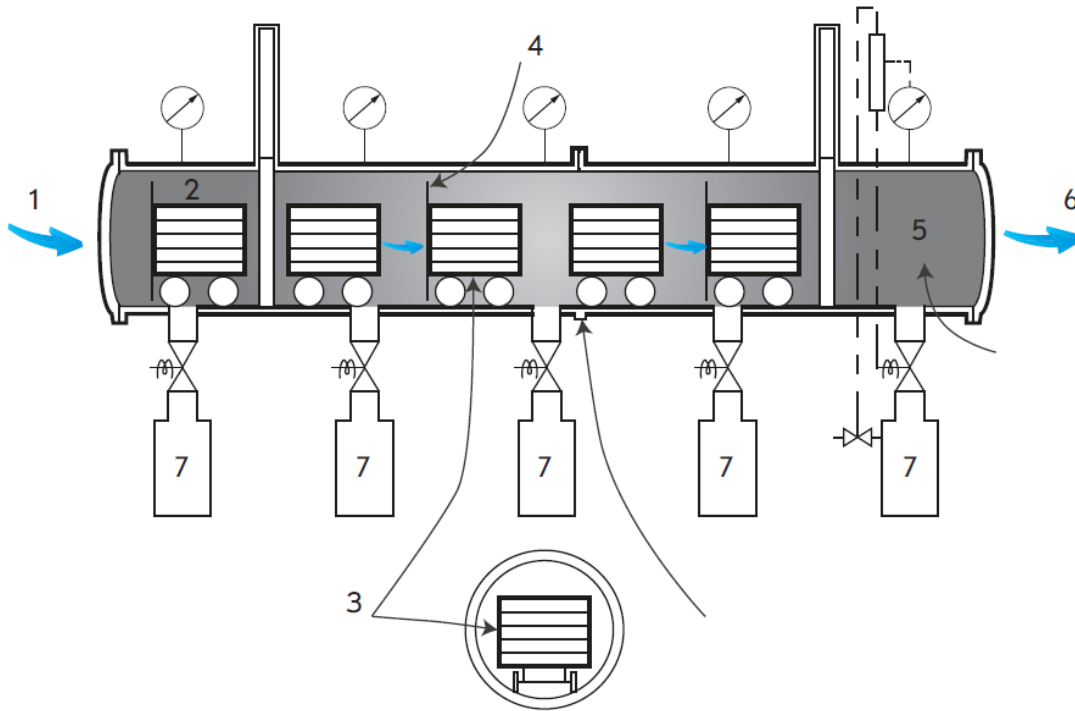


Fig IV.11 : Séchage par lyophilisation [8]

1. Entrée du produit humide
2. Mise en dépression
3. Chariot mobile (avec surface chauffante)
4. Plaque de condensation de vapeur
5. Remise en pression
6. Sortie du produit sec
7. Sortie condensats

Ce procédé combine l'action du froid et du vide en provoquant la sublimation de la glace. Ce procédé est généralement recommandé pour des produits à forte valeur ajoutée (pharmaceutiques) ou pour des produits thermosensibles (agroalimentaires) en raison des coûts fixes et des coûts de fonctionnement des installations. Le produit est le plus souvent déposé sur des claies.*

Type de produit

Produit liquide (en couche de 1,5 à 3 cm),
Produit pâteux,
Produit puvéruent, granulaire, fibreux,
Produit plan, en forme, en morceaux (les dimensions de produit varient de 1 mm à 1 cm, plusieurs cm dans certains cas particuliers).

Tab IV.19 : Exemples d'applications

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

Tab IV.20 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement		Temps de séjour	Densité de chargement	Capacité de traitement horaire
couche froide	max. de surface			
-10 à -40°C	30 à 90 °C	10 à 72h	5 à 18 kg/m ²	0,1 à 0,5 kgd'eau/h/m ³

**Méthode**

La lyophilisation est un procédé de séchage en trois temps :

1. Congélation du produit

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

2. Sublimation de la glace

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

3. Désorption finale de l'eau liée

Il s'agit d'extraire l'eau adsorbée ou emprisonnée dans les microcapillaires et qui n'a pas été congelée

Des variantes au procédé générique existent également (séchateurs à chariots ; pulvérisation + lyophilisation).

Utilisation en développement

**Fondamental**

- De nouveaux développements s'attachent à étudier l'intérêt de l'application des Microondes (MO) pour ce type de séchage.

Intérêts : Temps de séchage plus rapide.*

2.3. Sécheur à palettes

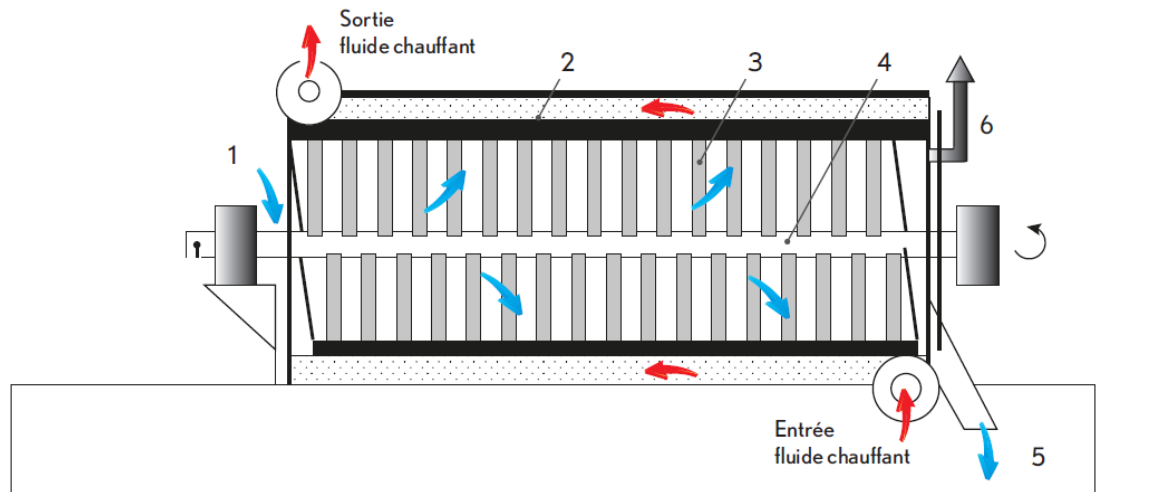


Fig IV.12 : Sécheur à palettes [8]

1. Entrée du produit humide
2. Double enveloppe
3. Palette
4. Arbre rotatif
5. Sortie du produit sec
6. Extraction buées

Mode de déplacement : Continu ou discontinu.

Dans le sécheur continu, toutes les pales ont le même profil pour diriger le produit d'une extrémité à l'autre.

La conception du sécheur discontinu (à palettes) nécessite de faire faire des allers-retours au produit en maximisant le temps de contact avec les parois chauffantes. Par conséquent, les pales n'ont pas toutes le même profil.*

Type de produit

État initial	produits pâteux
	produit pulvérulent, granulaire
État final	produits pulvérulents granulaires de qualité uniforme.

Tab IV.21 : Exemples d'applications

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

Tab IV.22 : Caractéristiques du procédé

Température de fonctionnement		Temps de séjour	Volume utile de produit entrant	Capacité de traitement horaire
Vapeur	Fluide thermique			
120 à 130 °C	280 à 350 °C.	10 min à 10 h.	0,1 à 20 m ³ .	10-15 kg d'eau/h/m ²

**Méthode**

Le procédé de séchage par palettes comprend 2 étapes distinctes :

1. Alimentation et transport du produit

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

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

2. Transfert de chaleur et séchage du produit

L'enveloppe extérieure est chauffée par l'intermédiaire de gaz chauds ou d'un fluide thermique. L'arbre et les palettes peuvent aussi être parcourus par un fluide thermique.

Le mouvement des palettes permet un brassage intensif du produit et les surfaces d'échange supplémentaires qu'elles offrent augmentent le transfert de chaleur.

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

Des variantes au procédé générique existent également (sécheur vis ; Sécheur à double arbres).*

3. Test

Exercice 1 : Séchage avec tambour rotatif

[solution n°10 p. 72]

Le procédé de séchage avec tambour rotatif est plus efficaces pour :

- Sable
- Textile
- Papier
- Pâtes alimentaires

Exercice 2 : Séchage par atomisation

[solution n°11 p. 72]

Quel type de produit est utilisé dans le séchage par atomisation

- Produit fibreux
- Produit pulvérulent
- Produit pâteux
- Produit liquide

Exercice 3 : Catégories des sécheurs

[solution n°12 p. 72]

Lyophilisation

Lit fluidisé

Four de séchage

Sécheur étuve

Sécheur silo

Atomisation

Séchoirs continus	Séchoirs discontinus

Test de sortie



1. Test de sortie

Exercice 1

[solution n°13 p. 72]

La température humide dépend de :

- La température sèche de l'air
- Psychromètre
- La surface du thermomètre à bulbe humide
- l'humidité comprise dans l'air

Exercice 2

[solution n°14 p. 73]

On appelle la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit :

Exercice 3

[solution n°15 p. 73]

A partir du diagramme de l'air on tire les autres paramètres (T_s et ϕ) de l'air avec les caractéristiques suivants :

$$h = 80 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{a1} = 0.01$$

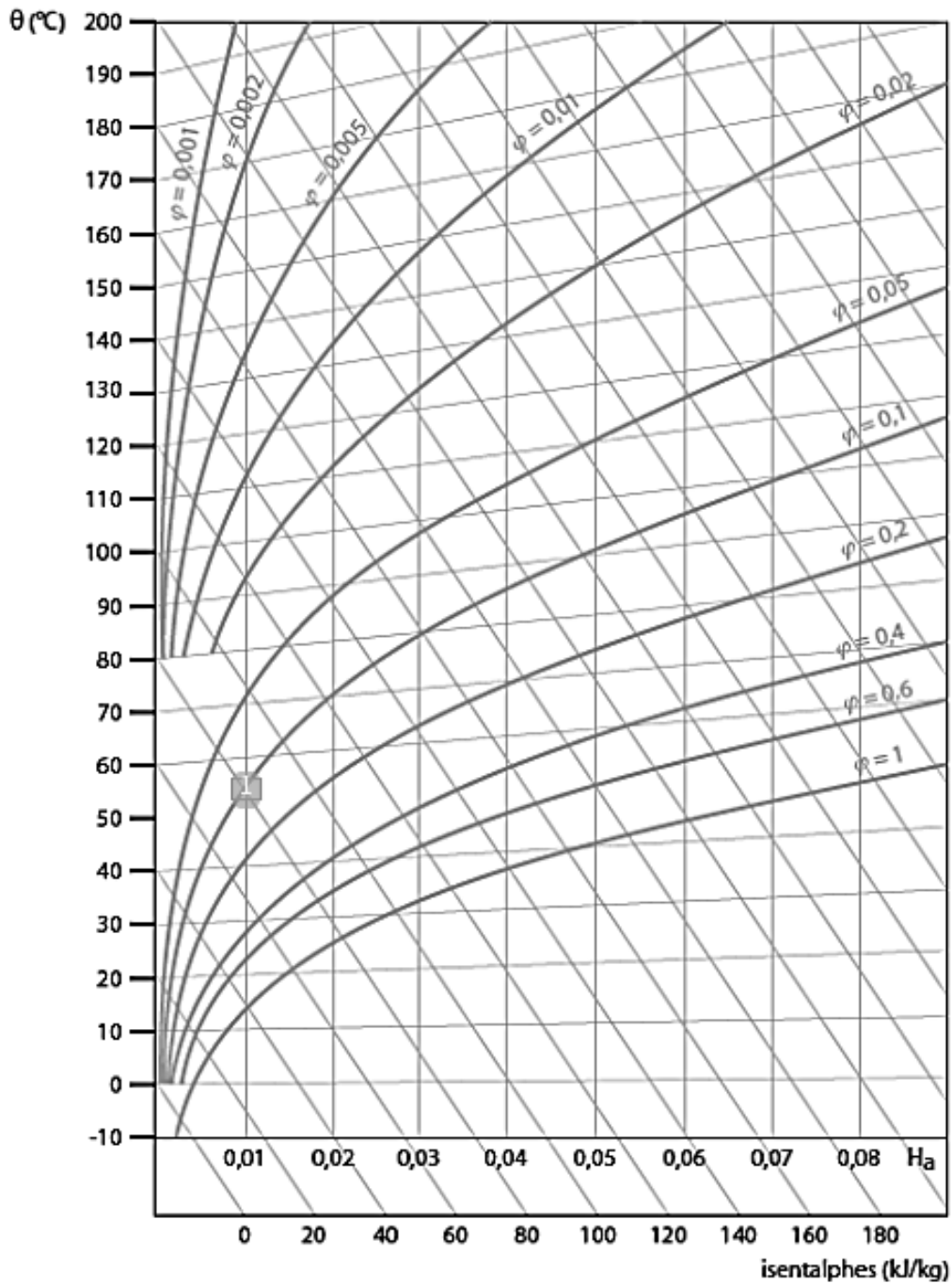


Fig I.7 : Diagramme de l'air humide [3]

○ Zone 1

C'est l'intersection de $h = 80$ kJ/kg et $H_{a1} = 0.01$ qui nous donne $T_s = 55$ °c et $\phi = 0,1$.

Exercice 4

[solution n°16 p. 74]

L'activité de l'eau (A_w) correspond au rapport entre :

- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0}
- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0} à la même température
- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0} à la même atmosphère

Exercice 5

[solution n°17 p. 74]

Séchage de la peinture, des briques et du béton

Coûts plus élevés

Séchage par soufflantes et ventilateurs

Les gradients de température et de concentration sont faibles

Séchage par convection naturelle	Séchage par convection forcée
----------------------------------	-------------------------------

Exercice 6

[solution n°18 p. 74]

Dans quelle zone (A_w) sur l'isothermes d'adsorption et de désorption nous trouvons la formation d'une monocouche moléculaire d'eau à la surface du produit

Solutions des exercices



Solution n°1

[exercice p. 17]

L'Humidité relative c'est :

- L'hygrométrie
- le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé
- le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air saturé à la masse de la vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air sec
- humidité spécifique,

Solution n°2

[exercice p. 18]



Nous commençons par le calcul de :

L'humidité absolue du mélange :

$$H_{am} = \frac{m_1 H_{a1} + m_2 H_{a2}}{m_1 + m_2} = \frac{1.5 \times 0.027 + 2.5 \times 0.04}{1.5 + 2.5} = 0.035 \text{ kg(eau)/kg(as)}$$

L'enthalpie du mélange :

$$h_m = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2} = \frac{1.5 \times 100 + 2.5 \times 160}{1.5 + 2.5} = 137.5 \text{ kJ/kg}$$

Solution n°3

A partir du diagramme de l'air on tir les autres paramètres (T_s et ϕ) de l'air 1, 2 et le mélange

Situer sur ce diagramme les points qui correspondent à l'air 1, 2 et le mélange ?

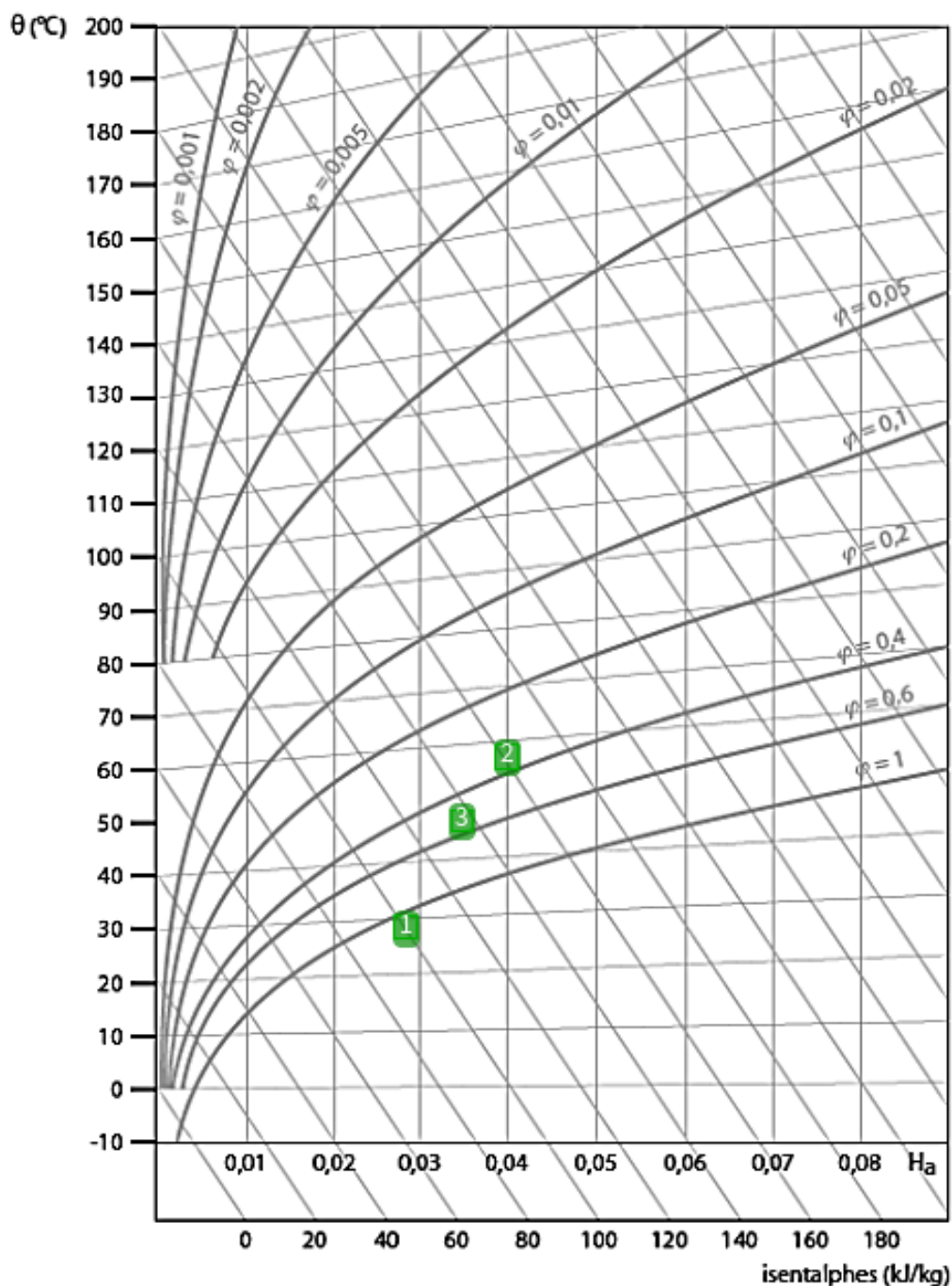


Fig I.7 : Diagramme de l'air humide [3]

⊙ **Zone 1**

Point (air 01) c'est l'intersection de $h = 100$ kJ/kg et $H_{a1} = 0.027$ qui nous donne $T_s = 29$ °c et $\phi = 1$.

⊙ **Zone 2**

Point (air 02) c'est l'intersection de $h = 160$ kJ/kg et $H_{a1} = 0.04$ qui nous donne $T_s = 56.5$ °c et $\phi = 0.38$.

⊙ **Zone 3**

Point (mélange) c'est l'intersection de $h = 137.5$ kJ/kg et $H_{a1} = 0.035$ kg(eau)/kg(as) qui nous donne $T_s = 46.5$ °c et $\phi = 0.58$.

Solution n°4

[exercice p. 31]

Quels sont les états de liaison de l'eau avec les macromolécules de l'aliment ?

- L'eau libre
- L'eau seul
- L'eau liée
- L'eau de constitution
- L'eau mobile

Solution n°5

[exercice p. 31]

L'activité d'eau dépend principalement de ?

- L'humidité relative et absolue du produit.
- La teneur en eau et sa température.

Solution n°6

[exercice p. 31]

Quelle méthode de séchage est plus adapter aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur ?

Séchage par rayonnement

Solution n°7

[exercice p. 31]

Limiter la **zone 2** de l'isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau (A_w)

Zone 2 : Adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité.

$$0.2 < A_w < 0.6$$

Solution n°8

[exercice p. 31]

Mode de séchage	Mécanismes de séchage
Séchage par ébullition	Séchage par convection naturelle
Séchage par entraînement	Séchage par convection naturelle
	Séchage par conduction
	Séchage par rayonnement
	Séchage par atomisation

Séchage par chauffage diélectrique

Solution n°9

[exercice p. 40]

Masse d'eau évaporée :

Soit M_i et M_f respectivement la masse initiale et la masse finale du maïs, M_{ei} et M_{ef} respectivement la masse initiale et la masse finale d'eau, M_{si} et M_{sf} respectivement la masse initiale et la masse finale sèche telles que :

$$M_i = M_{ei} + M_{si} \text{ et } M_f = M_{ef} + M_{sf}$$

$$\text{Avec : } X_i = M_{ei}/M_{si} = 0,54 \text{ et } X_f = M_{ef}/M_{sf} = 0,18$$

$$\text{Sachant que } M_{si} = M_{sf} = M_s$$

$$\text{Masse d'eau initiale se calcule comme suit : } M_{ei} = M_i - M_{si} = M_i - M_{ei} X_i$$

$$\text{soit : } M_{ei} (1 + 1/X_i) = M_i \text{ et } M_{ei} = X_i (1 + X_i) M_i$$

$$\text{AN : } M_{ei} = 0,54 / (1 + 0,54) \cdot 100 = 35,065 \text{ kg}$$

$$\text{La masse sèche est alors : } M_s = M_i - M_{ei} = 100 - 35 = 65 \text{ kg}$$

$$\text{La masse d'eau finale est donnée par : } M_{ef} = X_f M_s = 0,18 \times 65 = 11,7 \text{ kg}$$

$$\text{La masse d'eau évaporée est : } \Delta M_e = M_{ei} - M_{ef} = 35 - 11,7 = 23,3 \text{ kg eau}$$

La quantité minimale d'énergie à fournir a donc pour valeur :

$$L_v(\theta_h) = 2501 - 2,65 \theta_h = 2435 \text{ kJ/kg eau}$$

$$Q_{min} = \Delta M_e L_v(\theta_h) = 23,3 \times 2435 = 56,735 \cdot 10^3 \text{ kJ}$$

Sur le diagramme d'air humide on positionne le point A (θ_a , H_{ra}) pour l'air ambiant et le point 1 ($w_1 = w_a$, θ_1) entrée séchoir. Le diagramme de l'air humide nous donne :

- Pour le point A : $w_a = 9,9$ geau/kgas et $h_a = 50$ kJ/kgas
- Pour le point 1 : $w_1 = 9,9$ geau/kgas et $h_1 = 76$ kJ/kgas, $\theta_{h1} = 25,1^\circ\text{C}$

Si l'échange de chaleur et de matière air/produit était parfait, l'air sortirait alors saturé après avoir subi un refroidissement adiabatique, nous en déduisons les caractéristiques de sortie idéales :

- Pour le point 2 : $\theta_2 = \theta_{h1} = 25,1^\circ\text{C}$, $H_{R2} = 100\%$ et $w_2 = 20,1$ geau/kgas

La masse d'air à faire passer dans le séchoir pour assurer l'opération :

$$\text{La masse d'eau évaporée peut être écrite comme suit : } \Delta M_e = m_{as} (w_2 - w_1)$$

$$\text{soit : } m_{as} = \Delta M_e / (w_2 - w_1) = 23,3 / (20,1 - 9,9) = 2284 \text{ kg}_{as}$$

Or on introduit un air humide à une teneur en eau w_a ,

$$\text{soit : } m_a = m_{as} + m_v = m_{as} (1 + m_v / m_{as}) = m_{as} (1 + w_a) = 2284 (1 + 0,0099) \sim 2307 \text{ kg}_{ah}$$

Le volume spécifique de l'air de sortie étant $v_{a2} = 1 / \rho_{a2} = 0,93 \text{ m}^3/\text{kg}$ et le volume d'air humide utilisé est :

$$\text{étant } V_a = v_{a2} \times m_a = 0,93 \times 2307 = 2145,5 \text{ m}^3$$

Solution n°10

[exercice p. 63]

Le procédé de séchage avec tambour rotatif est plus efficace pour :

- Sable
- Textile
- Papier
- Pâtes alimentaires

Solution n°11

[exercice p. 63]

Quel type de produit est utilisé dans le séchage par atomisation

- Produit fibreux
- Produit pulvérulent
- Produit pâteux
- Produit liquide

Solution n°12

[exercice p. 64]

Séchoirs continus	Séchoirs discontinus
Atomisation	Lyophilisation
Sécheur silo	Sécheur étuve
Lit fluidisé	Four de séchage

Solution n°13

[exercice p. 65]

La température humide dépend de :

- La température sèche de l'air
- Psychromètre
- La surface du thermomètre à bulbe humide
- l'humidité comprise dans l'air

Solution n°14

[exercice p. 65]

On appelle la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit :

Température de rosé

Solution n°15

[exercice p. 65]

A partir du diagramme de l'air on tir les autres paramètres (T_s et ϕ) de l'air avec les caractéristiques suivants :

$h = 80 \text{ kJ/kg}$

$H_{a1} = 0.01$

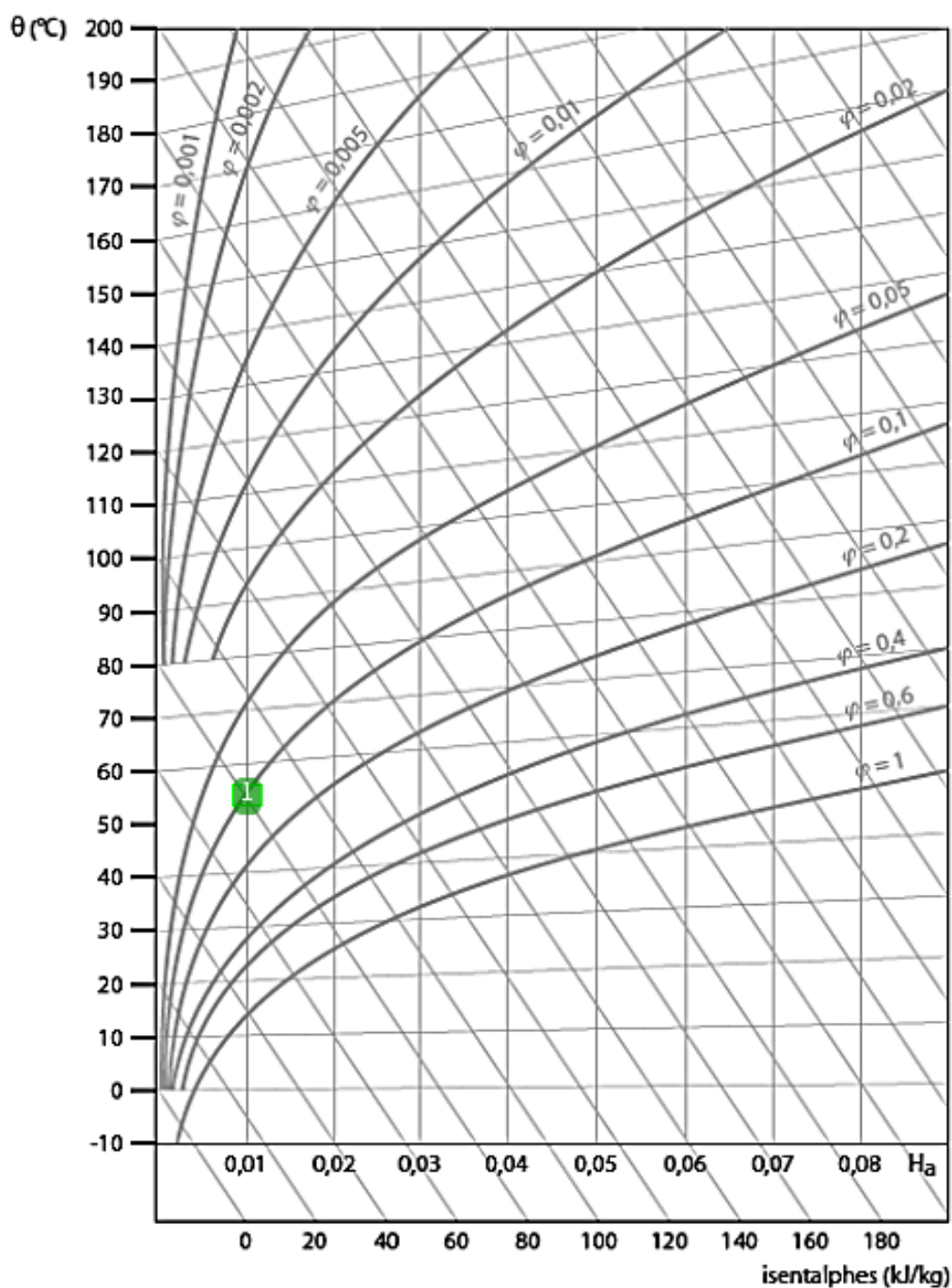


Fig I.7 : Diagramme de l'air humide [3]

⊙ Zone 1

C'est l'intersection de $h = 80 \text{ kJ/kg}$ et $H_{a1} = 0.01$ qui nous donne $T_s = 55 \text{ °C}$ et $\phi = 0,1$.

Solution n°16

[exercice p. 66]

L'activité de l'eau (A_w) correspond au rapport entre :

- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0}
- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0} à la même température
- la pression de la vapeur d'eau P_v de l'aliment et la pression de la vapeur d'eau pure P_{v0} à la même atmosphère

Solution n°17

[exercice p. 66]

Séchage par convection naturelle	Séchage par convection forcée
Les gradients de température et de concentration sont faibles	Coûts plus élevés
Séchage de la peinture, des briques et du béton	Séchage par soufflantes et ventilateurs

Solution n°18

[exercice p. 67]

Dans quelle zone (A_w) sur l'isothermes d'adsorption et de désorption nous trouvons la formation d'une monocouche moléculaire d'eau à la surface du produit

Zone 1 = 0.2

Abréviations



CMV : Compression Mécanique de Vapeur : système basé sur la recompression totale des buées produites avant d'être réutilisées sur l'échangeur de chaleur. Cette recompression est assurée par un moteur électrique.

IAA : les industries agroalimentaires

PAC : Système travaillant à très basse température utilisant l'ammoniaque ou un fréon comme fluide thermique. Celui-ci se condense dans l'échangeur; puis liquide, il est détendu et vaporisé en assurant la condensation des buées produites dans l'évaporateur. Il est ensuite re-comprimé pour être à nouveau utilisé sur l'échangeur.

VES : Vapeur d'eau surchauffée

VES : Vapeur d'Eau Surchauffée. Le fluide sécheur est la vapeur d'eau surchauffée. Au contact du produit à sécher, cette vapeur qui n'est pas saturée en eau se désurchauffe en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit.

Références



- 1 C. BONAZZI, J.J BIMBENET, Séchage des produits alimentaires, Techniques de l'Ingénieur, F3000 v1, 2003, France.
- 2 S. Makhlouf, Cours de séchage thermique, cours en ligne (<https://teleensm.ummt0.dz/course/view.php?id=3709>), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020, Algérie.
- 3 Page web d'éducation, <https://www.exoco-lmd.com/sechage-thermique/cours-sechage-thermique/>, (Consultée le 22/04/2023)
- 4 P. Dhulster, R. Karoui, Le Séchage, cours en ligne (https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/publiweb_Sechage.html), Université de Lille, France
- 5 J. VASSEUR, Séchage : principes et calcul d'appareils, Techniques de l'ingénieur, J2451 v1, 2009, France
- 6 Z. Triki, Production de froid et séchage, cours en ligne (<https://moodle.univ-medea.dz/course/view.php?id=1168>), Université Dr Yahia Farès de Médéa, 2022, Algérie.
- 7 Y.JANNOT, ISOTHERMES DE SORPTION : MODELES ET DETERMINATION, Polycopié, 2003, France
- 8 A.C. HOUDON, S. LACOMBE, Y. ROMITTI, F. TRACOU, Les procédés de séchage dans l'industrie, Brochure de ADEME • CETIAT, Réf : 8856, 2017, France.
- 9 S. KADRI, Cours LE SECHAGE THERMIQUE, Polycopié, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2022, Algérie.