

UNIVERSITE ABDEMALEK ESSAADI
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
UFR de Thermique, Energétique et Mécanique
UFR d'Energétique, Mécanique des fluides et Matériaux

INITIATION DE TECHNIQUES DE SECHAGE

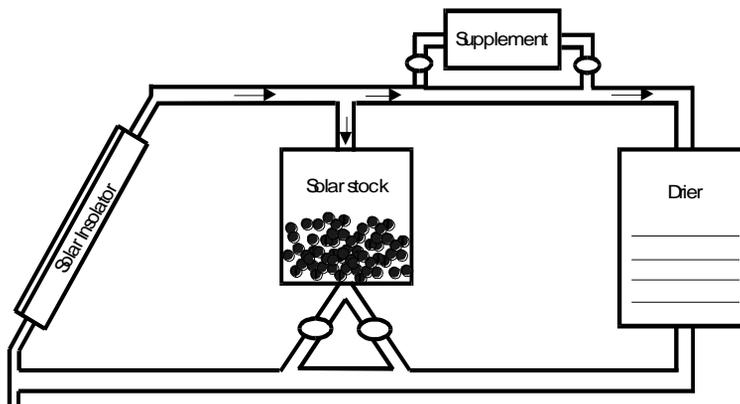


Figure : Solar draing installation

A. EL BOUARDI

Avant propos

La conservation des produits alimentaires constitue un enjeu primordial dans les pays où la production agricole est concentrée sur quelques périodes de récoltes. Il faut prévoir « répartir » cette offre alimentaire dans le temps.

Le séchage des produits alimentaires est la plus ancienne et la plus répandue des méthodes employées pour les conserver. Ce procédé demeure pour certains pays un moyen de développement de première nécessité, une forme de second souffle pour ceux en développement.

Le séchage traditionnel (exposition au soleil sans équipement pour améliorer le séchage) peut maintenant être rendu plus efficace, au moyen de quelque amélioration relativement simple et peu coûteuse.

De nombreux efforts ont été fournis pour développer des techniques de séchage plus performantes que le séchage traditionnel, et toujours à coût modéré, surtout ces deux dernières décennies. On peut maintenant, avec des séchoirs de type artisanal ou semi-artisanal, offrir des produits séchés de meilleure qualité.

Ce polycopié traite essentiellement du séchage par arrivée d'air sur le produit, car c'est la technique la plus simple et la plus efficace pour les gammes de production de fruits et légumes envisagés. Par ailleurs et sans pour autant négliger les autres formes d'énergie, l'accent est mis sur le séchage solaire. C'est la source d'énergie la moins coûteuse et la plus facile à mettre en place.

Ce polycopié, destiné au paravent aux étudiants de licence appliquée, s'adresse aujourd'hui aux étudiants des DESA en Energétique. Il peut aussi intéresser les techniciens ou ingénieurs qui sont confrontés à des choix techniques et opérationnels dans le domaine du séchage des produits alimentaires. On ne peut oublier aussi le public disposant d'un bagage scientifique de base et lecteur non scientifique désireux de disposer des informations essentielles sur le séchage des produits alimentaire.

Ce cours regroupe les principaux éléments de base nécessaires à une bonne compréhension des mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui interviennent au cours du séchage mais aussi à l'amont et à l'aval de celui-ci. Il regroupe trois principaux chapitres :

- *Chapitre 1, qui a été réservé aux propriétés et caractéristiques de l'air humide considéré comme agent de séchage.*
- *Chapitre 2 dans lequel on a soulevé :*
 - *les éléments théoriques intervenant dans le phénomène du séchage*
 - *la migration interne de l'humidité*
 - *les différents types de séchoirs domestiques et industriels*

- *Chapitre 3, qui a été consacré aux équations de transferts de chaleur et de masse dans une cellule de séchage en utilisant :*
 - *Les méthodes classiques (équations du bilan)*
 - *Les schémas des réseaux (analogie électrique)*

L'information contenue dans ce document est forcément incomplète. Il est en effet difficile de rassembler toute l'information disponible sur le sujet. Nous sommes cependant convaincus de l'importance d'en faciliter une meilleure circulation, ne serait-ce que pour limiter les trop nombreux éléments recensés en ce domaine.

Nous serons très reconnaissant des lecteurs qui souhaitent participer à cet effort en nous communicant leurs suggestions, critiques et compléments sous forme de pages notes (ci-jointes), permettant d'apporter plus de réponses plus une version ultérieure.

Prof. Abdelmajid El Bouardi

Chapitre 1

PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DE L'AIR HUMIDE

Nous avons rassemblé ici les principales définitions et relations générales relatives à l'air humide et dont la connaissance est indispensable pour traiter un problème de séchage

1.1. DEFINITIONS

1.1.1 Généralités

L'air humide est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau et se comporte sensiblement comme un gaz parfait, ainsi que chacun de ses constituants. Ceux-ci sont caractérisés par leur pression partielle dans le mélange. Si p est la pression totale de l'air humide, on a :

$$p = p_a + p_v \quad (\text{loi de DALTON})$$

p_a : pression partielle de l'air sec

p_v : pression partielle de la vapeur d'eau

A une température et à une pression donnée, il correspond une infinité de variétés d'air humide situées entre deux variétés extrêmes : l'air sec, totalement exempt de vapeur d'eau et l'air saturé qui contient la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il lui est possible de renfermer dans les conditions de température et de pression où il se trouve. Pour caractériser une de ces variétés, le troisième paramètre introduit sera choisi parmi l'un des suivants.

1.1.2. Degré hygrométrique

Par définition, le degré hygrométrique ou humidité relative est le rapport :

$$h_r = \frac{m_v}{m'_v}$$

m_v : masse de vapeur contenue dans un volume V d'air humide.

m'_v : masse de vapeur contenue dans le même volume, lorsque l'air est saturé à la même température.

Ou encore, puisque la vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait :

$$h_r = \frac{p_v}{p_s}$$

p_s : pression de vapeur saturante à la température de l'air.

La valeur de h_r est comprise entre 0 (air totalement sec) et 1 (air saturé).

1.1.3. Teneur en vapeur d'eau

On appelle humidité absolue ou teneur en vapeur d'eau le rapport entre la masse de vapeur d'eau m_v et la masse d'air sec m_a contenues dans un même volume quelconque d'air humide :

$$x = \frac{m_v}{m_a} \text{ en Kg/Kg air sec}$$

On peut alors définir l'unité d'air humide qui est la masse d'air humide renfermant 1 Kg d'air sec.

$$1 + x = 1 + \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_a + m_v}{m_a} \quad \text{Représente cette masse}$$

1.1.4. Taux de saturation

C'est le rapport entre l'humidité absolue de l'air humide et l'humidité absolue de l'air saturé à la même température.

$$\psi = \frac{x}{x'} \quad (\text{ne pas confondre } \psi \text{ et } h_r)$$

.

I.2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION

Si l'on fait varier, à température constante, la pression totale p , les pressions partielles p_a et p_v des deux constituants varient dans la même proportion que p , mais, alors que la pression p_a peut atteindre toutes les valeurs possibles, p_v ne peut dépasser la pression de vapeur saturante p_s .

Si l'on augmente p , l'humidité relative croît et l'air humide tend vers son état saturé, alors qu'une diminution de p provoque l'effet contraire.

De la même façon, un refroidissement à pression constante augmente l'humidité relative, alors qu'un échauffement la diminue (figure 1).

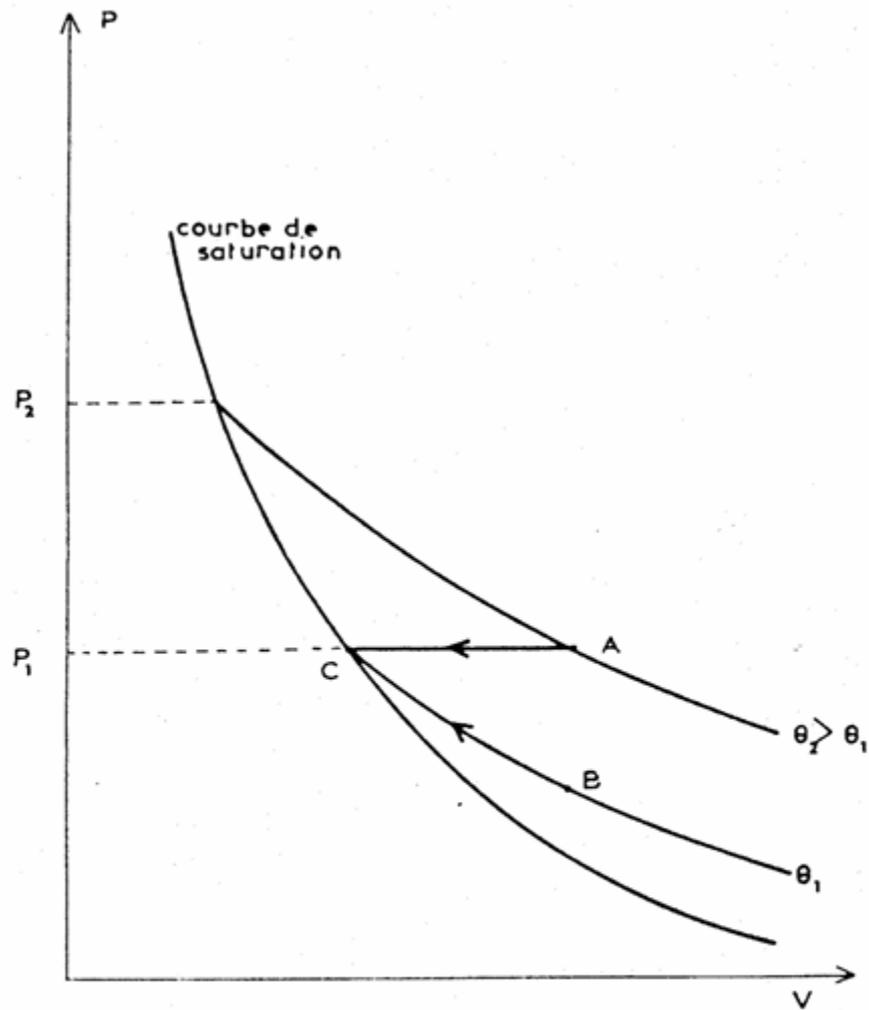


Figure 1 : Evolution d'air humide

$A \rightarrow C$: refroidissement à pression constante

$B \rightarrow C$: compression à température constante

En revanche, les masses respectives d'air et de vapeur présentes dans un volume donné ne peuvent être modifiées par ces variations tant qu'il n'y a pas condensation. L'humidité absolue reste donc constante, lors de ces transformations, tant que la vapeur demeure dans la zone sèche.

La température à laquelle un air humide arrive à saturation porte le nom de point de rosée.

Chacun des constituants étant considéré comme un gaz parfait, on peut écrire, pour un volume V et une température T :

$$p_v V = n_v RT$$

$$p_a V = n_a RT$$

n_v, n_a : nombres de moles de vapeur d'eau et d'air sec contenu dans le volume V .

R est la constante des gaz parfaits ; $R = 8,315 \text{ J/mole. degré.}$

Soient M_v et M_a les masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec. En posant :

$$r_v = \frac{R}{M_v} \quad \text{et} \quad r_a = \frac{R}{M_a}$$

On obtient :

$$p_v V = m_v r_v T \qquad p_a V = m_a r_a T$$

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{r_a}{r_v} \frac{p_v}{p - p_v} = \frac{0,622 p_v}{p - p_v} \quad (1)$$

Puisque $\frac{r_a}{r_v} = 0,622$ (densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air).

$$\text{Si l'air est saturé : } x' = \frac{0,622 p_s}{p - p_s} \quad (2)$$

Nous pouvons aussi introduire la notion de fraction massique de vapeur d'eau C_v :

$$C_v = \frac{m_v}{m_a + m_v} = \frac{m_v}{m_a} \frac{m_a}{m_a + m_v} = \frac{x}{1 + x}$$

ou encore :

$$C_v = \frac{0,622 p_v}{p - 0,378 p_v}$$

I.3. CARACTERISTIQUES DE L'AIR HUMIDE

La détermination de l'état hygrométrique d'un air humide passe par la mesure de sa température sèche ou réelle T et de sa température humide T_h . La connaissance de ces deux grandeurs permet le calcul de l'humidité absolue, et par suite, des autres caractéristiques de l'air

1.3.1. Le psychromètre à deux thermomètres

C'est le procédé de mesure le plus représentatif. Il se compose de deux thermomètres dont l'un a son réservoir maintenu sec et l'autre, son réservoir maintenu humide grâce à une mèche de mousseline imbibée d'eau par capillarité. Le thermomètre sec indique la température réelle T de l'air humide. On fait circuler au contact du thermomètre humide l'air étudié. Ce thermomètre reçoit du courant d'air la chaleur sensible nécessaire à l'évaporation d'une certaine quantité d'eau. Un équilibre s'établit. La température du liquide atteint une valeur appelée température humide de l'air considéré : T_h .

A la surface du bulbe, l'air est saturé. La formule (2) permet donc de calculer x' . On peut alors calculer x en écrivant le bilan thermique. Pour 1kg d'air sec, on obtient :

$$\frac{m}{x'-x} (Cp_a + Cp_v) (T - T_h) = \frac{dm}{dt} L$$

$\frac{dm}{dt}$: masse totale d'eau évaporée

L : chaleur latente de vaporisation

Soit :

$$x = \frac{Lx' - Cp_a(T - T_h)}{L + Cp_v(T - T_h)}$$

C_{pa} et C_{pv} sont les chaleurs spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau :

$$C_{pa} = 0,24 \text{ Kcal Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$C_{pv} = 0,46 \text{ Kcal Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

1.3.2. Masse volumique de l'air humide

Si m_a et m_v sont les masses d'air sec et de vapeur d'eau contenues dans 1 m^3 d'air humide à la température T , la masse volumique vaut :

$$\rho = m_a + m_v = \frac{p_a}{r_a T} + \frac{p_v}{r_v T} = \frac{1}{r_a T} (p_a + 0,622 p_v)$$

soit :

$$\rho = \frac{1}{r_a T} (p - 0,378 p_v)$$

1.3.3. Enthalpie de l'air humide

Considérons une masse m d'air humide contenant 1kg d'air sec ($m_a=1$). Si H_a et H_v sont les enthalpies massiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, l'enthalpie de l'unité d'air humide s'écrit :

$$H = h_a + x H_v$$

Soit :

$$H = H_{a0} + \int_{T_0}^T C_{p_a} dT + H_{v0} + \int_{T_0}^T C_{p_v} dT$$

À 0°C ; $H_{a0} = 0$; $H_{v0} = L$ et donc : $H = C_{p_a}T + L + C_{p_v}T$

$$H = 0,24 T + (597 + 0,46 T) x \quad .$$

1.3.4. Conductivité thermique

On l'exprime sous la forme :

$$\lambda = \lambda_0 + 0,00476 \frac{c_v}{1 - c_v}$$

(5)

λ_0 est la conductibilité thermique de l'air sec, approchée numériquement par un polynôme de degré 3 en T, d'après les valeurs fournies par DASCALESCU

1.3.5. Viscosité dynamique

$$\mu = \frac{g}{\frac{p_v}{\mu_v} + \frac{p_a}{\mu_a}} \quad (6)$$

avec :

μ_v : Viscosité dynamique de la vapeur

μ_a : Viscosité dynamique de l'air sec

$$\mu_a = k_a \sqrt{\frac{T}{273}} \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \quad \mu_v = k_v \sqrt{\frac{T}{273}} \left(1 + \frac{673}{T}\right)^{-1}$$

Où :

$$K_a = 25,393 \cdot 10^{-7} ; \quad K_v = 30,147 \cdot 10^{-7}$$

g : accélération de la pesanteur.

1.3.6. Pression de vapeur saturante

Nous avons utilisé la formule de J.BERTRAND, valable entre 0 et 200°C.

$$p_s = 10^{17,443 - \frac{2795}{T} - 3,868 \text{Log}_{10} T)} \quad (7)$$

T étant exprimée en K et p_s en atmosphère.

1.3.7. Chaleur spécifique

$$C_p = C_{p_a} (1 - C_v) + C_{p_v} C_v$$

(8)

avec :

$$C_{p_a} = 1004,4 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad \text{et} \quad C_{p_v} = 1862,3 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

1.4. MELANGE D'AIRS HUMIDES

Considérons le mélange d'une masse m_1 d'air humide à la température T_1 , d'humidité absolue x_1 et d'une masse m_2 d'air humide à la température T_2 , d'humidité absolue x_2 .

1.4.1. Humidité absolue du mélange

La conservation des masses d'air sec et de vapeur d'eau se traduit par :

$$m_{am} = m_{a1} + m_{a2}; \quad x \cdot m_{am} = x_1 \cdot m_{a1} + x_2 \cdot m_{a2}$$

m_{a1} : masse d'air sec dans le constituant 1

m_{a2} : masse d'air sec dans le constituant 2

$$m_{a1} = \frac{m_1}{x_1 + 1} \quad \text{et} \quad m_{a2} = \frac{m_2}{x_2 + 1}$$

On obtient:

$$x = \frac{m_{a1}x_1 + m_{a2}x_2}{m_{a1} + m_{a2}}$$

soit :

$$x = \frac{m_1 x_1 (1 + x_2) + m_2 x_2 (1 + x_1)}{m_1 (1 + x_2) + m_2 (1 + x_1)}$$

1.4.2 Enthalpie du mélange

Si le mélange se fait de façon adiabatique, on a :

$$H = \frac{m_{a1}H_1 + m_{a2}H_2}{m_{am}}$$

(10)

avec : $H_1 = 0,24 T_1 + (0,46 T_1 + 597)x_1$

$$H_2 = 0,24 T_2 + (0,46 T_2 + 597)x_2$$

1.4.3. Température du mélange

On a : $H = 0,24 T + (597+0,46T)x$ où T est la température d'équilibre du mélange.

$$T = \frac{H - 597x}{0,24 + 0,46x}$$

En remplaçant H par sa valeur obtenue dans (10), on obtient :

$$T = \frac{m_{a1}(0,24 + 0,46x_1)T_1 + m_{a2}(0,24 + 0,46x_2)T_2}{m_{a1}(0,24 + 0,46x_1) + m_{a2}(0,24 + 0,46x_2)}$$

Fin du Chapitre

Chapitre 2

ELEMENTS THEORIQUES SUR LE SECHAGE:

2.1. GENERALITES - DEFINITIONS

2.1.1. Aspect technologique: les denrées agro-alimentaires, et plus particulièrement les fruits et légumes peuvent être considérés, d'un point de vue purement technologique, comme un système très complexe de vides ou pores interconnectés à l'intérieur même de la matière. Cet aspect, ajouté au fait que les forces de capillarité jouent un grand rôle dans le mode de liaison de l'eau (nous le verrons par la suite) explique qu'on les rassemble sous le nom générique de corps capillo-poreux.

2.1.2. Taux de matière sèche:

Pour un produit frais donné de masse M , on définit le taux de matière sèche par le rapport :

$$T_s = \frac{M - M_{eau}}{M} = \frac{M_s}{M}$$

où M_{eau} est la masse d'eau contenue dans le produit.

Les fruits et légumes les plus communs ont un taux de matière sèche relativement faible (de l'ordre de 10 à 20 %).

2.1.3. Teneur en eau absolue:

On définit la teneur en eau absolue d'un produit ou teneur en eau base sèche par le rapport :

$$M_a = \frac{M_{eau}}{M_s} \quad \text{en Kg/Kg}$$

2.1.4. Teneur en eau relative:

On définit la teneur en eau relative ou teneur en eau base humide par le rapport :

$$M_r = \frac{M_{eau}}{M_{eau} + M_s} \quad \text{en Kg/Kg}$$

On a :

$$M_r = \frac{M_a}{1 + M_a}$$

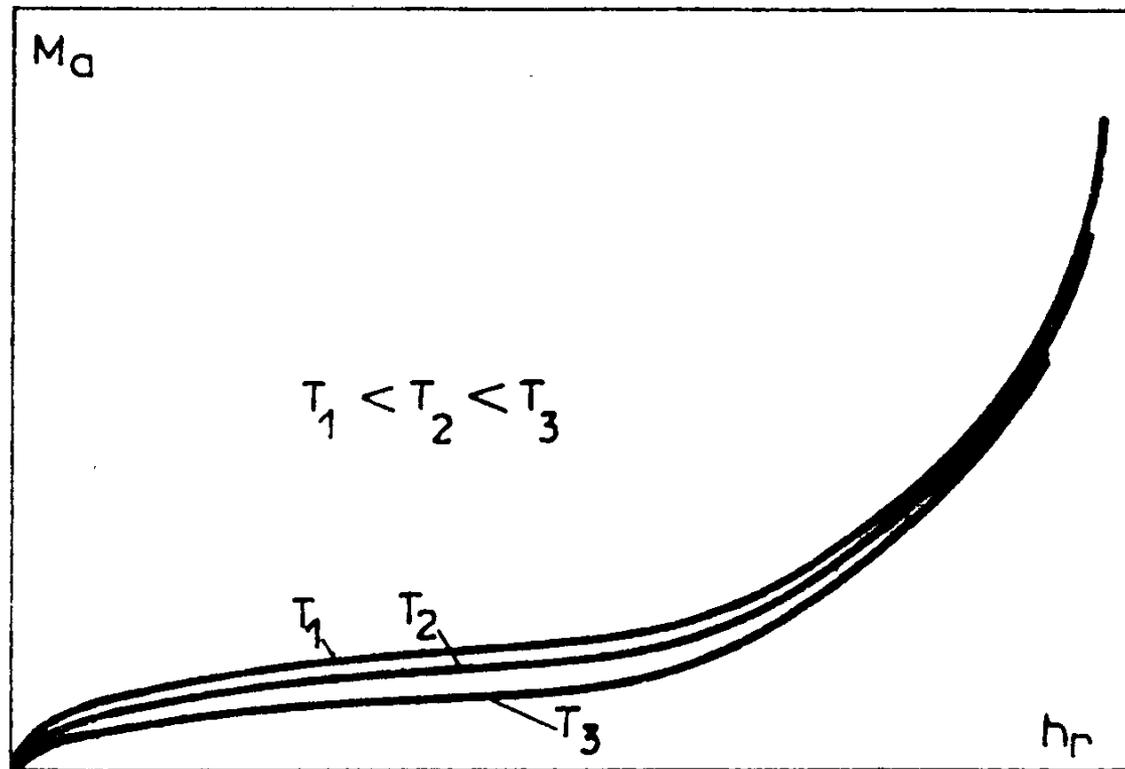
L'une de ces deux grandeurs suffit pour caractériser l'état d'humidité d'un produit. Les opérations de séchage doivent, en général, ramener le produit d'une grande teneur en eau ($M_r = 80-90\%$) à une teneur en eau comprise entre 10 et 20% suivant la durée de conservation souhaitée et le mode de consommation.

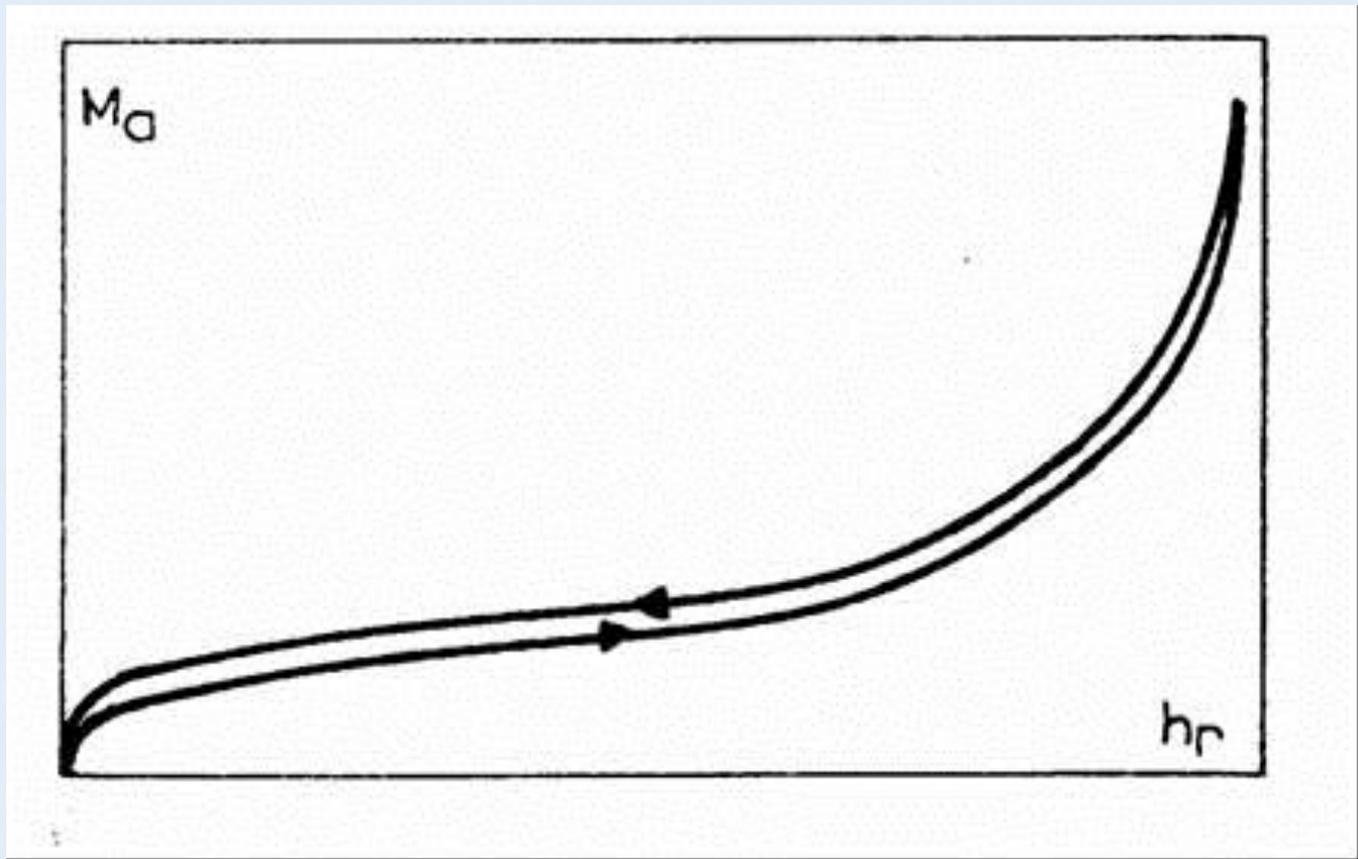
A ce propos, il est indispensable de définir la notion d'isothermes de sorption-désorption.

2.1.5. Isothermes de sorption-désorption:

Le principal but du séchage est de garantir la conservation d'un produit en éliminant les bactéries qui se reproduisent dès que la teneur en eau dépasse une certaine valeur. Une fois séché et stocké, le produit va se mettre en équilibre avec l'air ambiant. Il est donc nécessaire de savoir pour un produit et une ambiance donnée, qu'elle va être la teneur en eau à l'équilibre. Pour cela, il suffit de se reporter au réseau de courbes d'équilibre (figure 2) où h_r est l'humidité relative de l'air ambiant.

Remarque: Ces courbes ne se superposent pas exactement suivant qu'il s'agit de sorption (gain d'eau par le produit) ou désorption (perte d'eau) On observe un phénomène d'hystérésis (figure 3)





2.1.6. Modèle numérique des courbes d'équilibre

Les courbes précédentes peuvent être obtenues expérimentalement pour chaque produit. Néanmoins, ce sont des opérations très longues et délicates.

Ainsi beaucoup d'auteurs ont essayé de mettre au point des relations empiriques à partir de calculs théoriques simplifiés et de recalages expérimentaux. Nous rapportons ici deux des modèles les plus utilisés et les plus simples.

- **HENDERSON** propose:

$$1 - h_r = e^{-kTM_a^n} \text{ où } T \text{ est en } ^\circ\text{F} \text{ et } M_a \text{ en } \%$$

k et n sont des constantes caractéristiques du produit.

Ce modèle a le mérite de décrire l'ensemble du réseau de courbes.

- **LUIKOV** indique, pour certaines valeurs de la température :

$$M_a = \frac{ah_r}{b - h_r} \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des constantes}$$

caractéristiques du produit.

2.2. LA MIGRATION DE L'HUMIDITE

2.2.1. Modes de liaison de l'eau:

Dans les corps capillo-poreux, l'eau se rencontre sous diverses formes :

- **L'eau libre:** Le produit frais, gorgé d'eau contient une certaine quantité d'humidité uniquement retenue par des forces mécaniques (traction, compression, capillarité) c'est l'eau libre.

L'eau osmotique: Dans le cas où le liquide contient des particules diluées

- **L'eau adsorbée physiquement:** Lorsque l'humidité du matériau est faible, les forces d'interaction entre les molécules de liquide et de matière jouent un rôle important (forces de VAN DER WAALS)

L'eau adsorbée chimiquement: Suivant le produit séché, il peut se former des hydrates pour une certaine teneur en eau

2.2.2. *Hygroscopicité:*

On dit que le comportement d'un produit est :

- Non hygroscopique si l'eau s'évapore tant que l'air n'est pas saturé.
- Hygroscopique si, pour une humidité relative h_r et une température T de l'air de séchage, il existe une teneur en eau limite du produit. C'est le cas de tous les produits agro-alimentaires (voir les courbes d'équilibre).

2.2.3. Courbes de séchage:

Considérons un matériau humide quelconque dans un écoulement d'air asséchant aux caractéristiques constantes. De façon la plus générale, les courbes donnant la vitesse de séchage en fonction du temps sont de la forme représentée sur la figure 4.

La portion AB correspond à l'évaporation de surface. Le point B apparaît au moment où en surface règne la teneur en eau d'équilibre M_e correspondant aux propriétés de l'air asséchant. Dans la deuxième phase de séchage ou portion BC , le front de séchage recule au cœur du produit. Le point C apparaît au moment où l'ensemble du produit possède un comportement hygroscopique. La vitesse de séchage ne cesse de diminuer

jusqu'à s'annuler au point D où le produit tout entier possède l'humidité M_e .

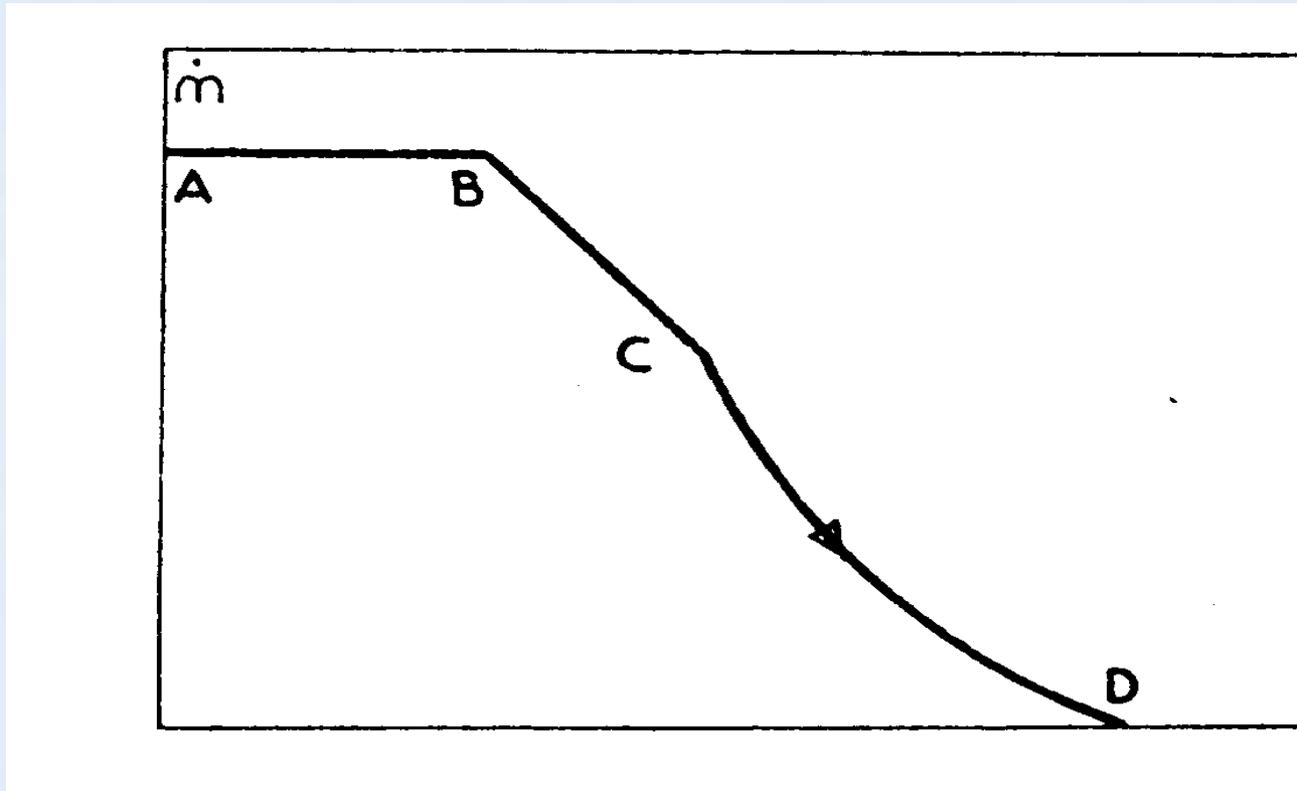


Figure 4

Dans la pratique, en ce qui concerne les fruits et légumes, la portion AB n'existe pas et le séchage est régi par des phénomènes complexes de migration interne de l'humidité

2.2.4. Migration interne de l'humidité:

GORLING [8] propose la classification suivante :

A- Migration d'eau liquide due aux forces capillaires.

$$W_w = -Ak_x \frac{dM_a}{dS}$$

W_w : masse d'eau soumise aux forces

capillaires

A : section du matériau

k_x : conductivité du liquide (dépend de

M_a)

S : épaisseur du produit

B- Diffusion en phase liquide due aux gradients de concentration :

$$W_w = A \delta_c \frac{dC}{dS}$$

δ_b : coefficient de diffusion (dépend de C)

C: concentration

C- Diffusion de surface dans les courbes liquides retenues sur les parois des pores.

$$W_w = U \delta_b \frac{dC_b}{dS}$$

U: circonférence des pores

δ_c et C_b désignent respectivement le coefficient de diffusion et la concentration de surface.

D-Diffusion de la vapeur d'eau dans les pores:

$$W_w = - \frac{A}{\mu} \frac{\delta}{R_v T} \frac{p}{p - p_v} \frac{dp_v}{dS}$$

δ : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air

μ : facteur de résistance à la diffusion

Comme on peut le constater, trop de coefficients

restent inconnus pour espérer traiter et résoudre ce modèle de façon théorique.

2.3. CLASSIFICATION DES SECHOIRS

Il existe un ensemble de séchoirs, industriels, agricoles, individuels...

Les répertorier est une entreprise difficile d'autant plus que la classification peut se faire selon la nature du produit séché (fruits, légumes, céréales, fourrages, liquides, produits chimiques, matériaux en feuilles, céramiques, etc...). La technologie du séchoir (tour, tunnel, caisson, cylindres, rotatifs....), la capacité.

Nous avons choisi un type de classement suivant le mode de transfert de la chaleur apportée au produit. Cette classification (tableau ci-contre) laisse une grande part aux séchoirs industriels où l'énergie solaire est encore absente. Elle est néanmoins satisfaisante parce que plus physique que celles citées ci-dessus, étant bien entendu que beaucoup de séchoirs combinent 2 ou 3 des modes de chauffage annoncés.

Fin du chapitre

Chapitre 3

TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS UNE CELLULE DE SECHAGE: APPLICATION AUX PRODUITS AGRO- ALIMENTAIRES

3.1. Transfert de chaleur :

Voir transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement (cours de LPE 1^{ère} année)

3.2. Transfert massique

Les théories du transfert de masse et plus particulièrement de la migration de l'humidité à l'intérieur de produits biologiques et son évacuation en surface sont extrêmement complexe. On établira par la suite un modèle global d'équations discrétisées permettant d'évaluer avec une bonne précision la vitesse de séchage d'un produit agro-alimentaire. On se contente donc ici de rappeler seulement quelques notions et relations permettant de traiter le problème de l'évaporation de surface.

3.2.1. Evaporation de l'eau dans un écoulement forcé

Soit une surface plane d'eau à la température T_e au-dessus de laquelle circule un écoulement d'air de vitesse V , de température T_0 , de pression de vapeur p_v et de concentration de vapeur C_v . La concentration de vapeur au contact de la surface de l'eau est égale à la concentration de vapeur saturante à la température T_e . (Figure 3.1)

Le gradient de concentration $C_e - C_v$ provoque un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur latente. En même temps, le gradient de température $T_0 - T_e$ provoque un transfert de chaleur sensible. Tout ceci, pour une surface S , peut s'écrire :

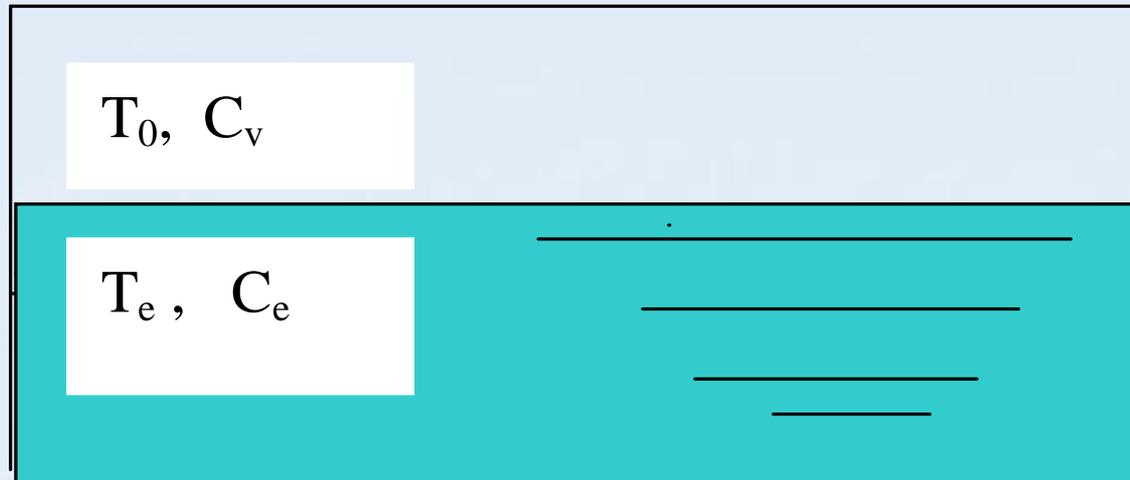


Figure 3.1

$$P_c = h_c(T_0 - T_e)S$$

h_c : coefficient d'échange thermique par convection ($W m^{-2}K^{-1}$)

P_e : puissance sensible échangée (W)

$P_l = L(T_e) \dot{m}$; $L(T_e)$: chaleur latente de vaporisation à la température (J kg^{-1})

P_l : puissance liée au transfert de masse W .

$\dot{m} = h_e(C_e - C_v)S$; \dot{m} est débit d'eau évaporée (kg s^{-1})

h_e : coefficient de transfert de masse relatif à la concentration (m s^{-1})

3.2.2. Groupement dimensionnel

- Groupement adimensionnel de SHERWOOD

$$Sh = \frac{h_e D}{D_c} \quad D: \text{ dimension caractéristique du}$$

problème

D_c : coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

A ce sujet, J.F. SACADURA rapporte la relation de SCHIRMER, utilisable entre 20°C et 90°C :

$$D_c = 2,26 \cdot 10^{-5} \frac{1}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad T: \text{ température de l'air en } ^\circ\text{K}$$

P : pression totale en bars.

- Groupement adimensionnel de SHMIDT : $S_c = \frac{\nu}{D_c}$

3.2.3. Coefficients d'échanges

$$h_c = Nu \lambda / D \quad (\text{Voir Transferts thermiques})$$

$$h_e = Sh D_c / D$$

Le nombre de SHERWOOD étant l'analogie du nombre de NUSSELT pour les transferts de masse, nous disposons ici aussi de nombreuses corrélations permettant de le chiffrer pour diverses géométries.

Il existe cependant, dans le cas de l'air, une hypothèse qui permet de s'affranchir de l'une des deux relations empiriques donnant Nu et Sh : C'est l'hypothèse de LEWIS

La fonction de LEWIS caractérise le rapport du transfert de chaleur à celui de masse.

$$F(Le) = \frac{h_c}{h_e \rho C_p} ; \rho : \text{masse volumique de l'air } \text{kgm}^{-3}$$

Dans le cas où les pressions de vapeur $p_{sat}(T_e)$ et p_v sont négligeables devant la pression totale p , l'expérience montre que $F(Le) \neq 1$ et alors :

$$h_e = \frac{h_c}{\rho C_p}$$

Il existe par ailleurs toute une série de corrélations donnant le nombre adimensionnel de SHERWOOD pour des sphères isolées.

LUIKOV [7] rapporte les résultats de CHERVYAKOV qui introduit un nombre adimensionnel de NUSSELT massique, équivalent au nombre de SHERWOOD et défini par :

$$N_{u_m} = 0,132 \text{Re}^{0,63} \text{ pour } 2,510^4 < \text{Re} < 7,2 \cdot 10^4$$

BONET [6] rappelle de son côté les expressions suivantes :

$$Sh = 0,54 Re^{1/2} \quad \text{pour } 200 < Re < 3000 \quad (\text{VYROUBOV})$$

$$Sh = 0,692 Re^{0,514} \quad \text{pour } 1000 < Re < 4000 \quad (\text{PASTERNAK et GAUVIN})$$

$$Sh = 0,33 Re^{0,6} Sc^{1/3} \quad \text{pour } 1500 < Re < 12000 \quad (\text{EVNOCHIDES et THODOS})$$

$$Sh = 0,358 Re^{0,58} Sc^{1,3} \quad \text{pour } 1847 < Re < 8625 \quad (\text{YEN et THODOS})$$

Le Tableau 3.1 compare ces diverses corrélations pour $S_c = 0,6$

Re	1000	3000	5000	10000	25000	50000
<i>Sh (Chervyakov)</i>	-	-	-	-	77,9	120,5
<i>Sh (Vyroubov)</i>	17,1	29,6	-	-	-	-
<i>Sh (Pasternak-Gauvin)</i>	20,3	35,7	-	-	-	-
<i>Sh (Evnochides Thodos)</i>	-	33,9	46,1	69,9	-	-
<i>Sh(Yes-Thodos)</i>	-	31,4	42,2	-	-	-

Tableau 3.1

Deux possibilités se présentent pour évaluer le coefficient de transfert de masse externe h_e :

- Déterminer directement h_e à partir des corrélations ci-dessus

Déterminer h_e à partir du coefficient de transfert de chaleur et applications de l'hypothèse de Lewis

Le Tableau 3.2 compare les résultats obtenus. Pour ce calcul, on a retenu comme valeurs de propriétés thermophysiques:

$$\rho = 1,2 \text{ kg m}^{-3} ; C_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1} ; \lambda = 0,026 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$D_c = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. La dispersion des résultats est faible et rassurante quant au choix de la démarche : Nous avons choisi d'évaluer le coefficient de transfert de masse externe à partir du coefficient de transfert de chaleur.

Re	1500	2000	3000	5000	10000
h_e (Charm+hyp. De Lewis)	0,013	0,015	0,020	0,027	0,040
h_e (Vyroubov)	0,011	0,013	0,016	-	-
h_e (Pasternak)	0,014	0,016	0,019	-	-
h_e (Evnochides Thodos)	0,012	0,014	0,018	0,025	0,038
h_e (Yen-Thodos)	-	0,013	0,017	0,023	-

Tableau 3.2

3.3. Modélisation d'une cellule de séchage

3 3.1. Hypothèses particulières

Ce sont les hypothèses générales pour l'ensemble du système.

On suppose que :

- La chaleur est accumulée ou cédée d'un bout à l'autre du système par quantités finies (c'est une réalité physique plus qu'une hypothèse).
- Dans chaque partie du système, l'écoulement est unidimensionnel.
- Les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal à l'écoulement.

- L'écoulement est identique à lui-même tout au long des unités de stockage et de génération d'air chaud. C'est-à-dire qu'il reste laminaire, transitoire ou turbulent et ne change pas de régime. Pour le séchoir, les perturbations dues aux traversées successives des claies sont prises en compte.
- Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés.
- Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés.
- La température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit.

Les produits ne se déforment pas en cours de séchage.

3.3.2. Echanges thermiques

Les échanges thermiques décrits sur la figure 3.3 font intervenir les quatre modes fondamentaux de transfert. Ces échanges se font:

- *par convection:*

- *entre l'air et le produit*

$$h_{caf} = \frac{Nu\lambda}{D_f} ; D_f \text{ est le diamètre du produit à sécher}$$

(Pour la détermination de Nu le entre l'air et la paroi interne du séchoir).

$$h_{cap} = \frac{Nu\lambda}{H_s} ; \quad H_s: \text{ hauteur du séchoir entre la paroi}$$

externe du séchoir et l'extérieur

$$h_v = 5,67 + 3,86 V_v$$

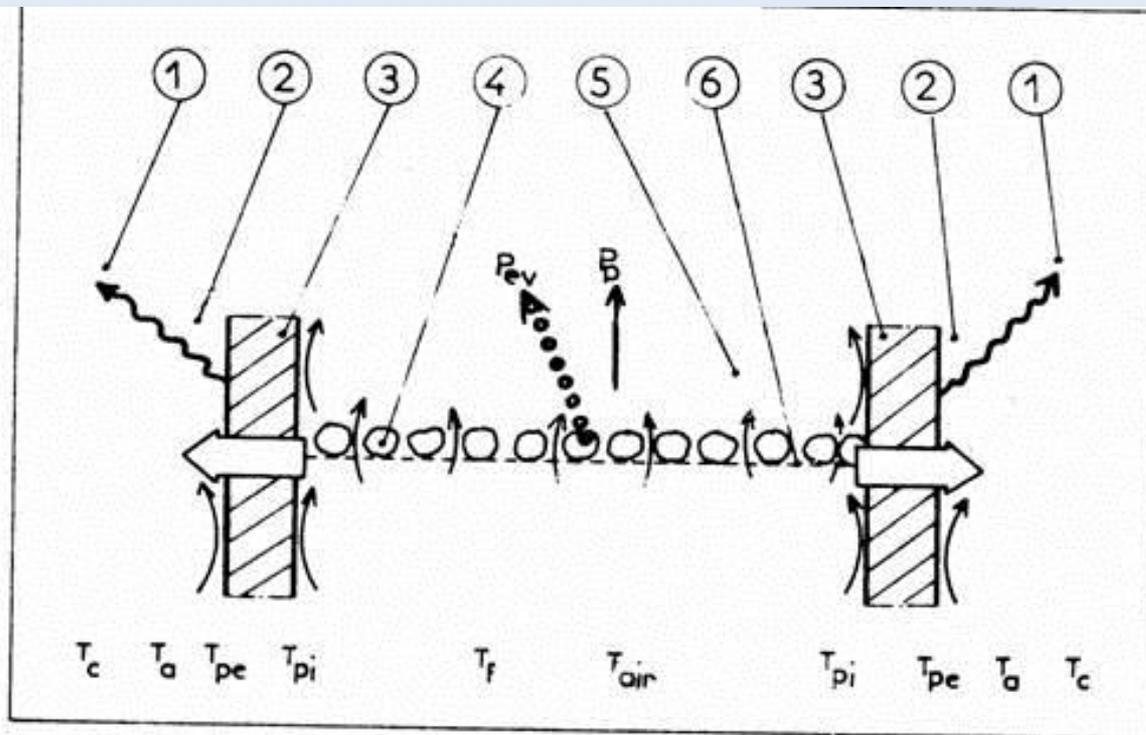
- par conduction:

- A travers les parois du séchoir.

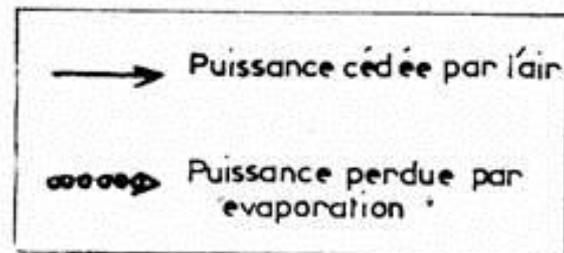
$$h_{cp} = \frac{\lambda_p}{e_p} ; \quad \lambda_p : \text{ conductibilité thermique de la}$$

paroi

e_p : épaisseur de la paroi



- ① Voute céleste
- ② Milieu ambiant
- ③ Paroi
- ④ Produit
- ⑤ Milieu asséchant
- ⑥ Claie



- *par rayonnement* :

- Entre la paroi externe du séchoir et la voûte céleste.

$$h_{rc} = \sigma \varepsilon_p (T_{ep} + T_c)(T_{pe}^2 + T_c^2)$$

ε_p : émissivité de la paroi

T_{pe} : température de la paroi sur sa face externe

- *Transfert de chaleur lié à l'évaporation:*

Cette puissance perdue par le fruit est égale au produit du taux de masse d'eau évaporée par la chaleur latente de vaporisation de l'eau :

$p_{ev} = L \dot{m}$; \dot{m} est la masse d'eau évaporée par unité de temps

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est une fonction de la température de la forme:

$$L = 4186,8 (597 - 0,56 T_f) \text{ en J. Kg}^{-1}$$

T_f est la température de vaporisation, prise égale à la température du produit.

Pour un matériau peu humide (c'est le cas en fin de séchage), on doit, en fait, fournir une énergie supplémentaire correspondant à l'énergie de liaison des molécules liquides à la surface ou à l'intérieur du corps (adsorption physique) Dans le cas des produits agro-alimentaires, on ne dispose pas de corrélations empiriques reliant la chaleur de vaporisation à celle de l'eau libre. On se contente de celle-ci

3.3.3. Evaluation de la vitesse de l'air au niveau du produit:

Dans notre démarche théorique, nous avons considéré le produit à sécher comme une sphère isolée dans un écoulement de vitesse V connue et nous avons choisi les corrélations correspondantes. En pratique, chaque claie est recouverte d'un nombre N_s de sphère (Figure 3.4) L'écoulement au niveau de chaque sphère est influencée par les N_{s-1} autres. D'où il faut se rendre compte de ces perturbations en modifiant la vitesse v définissant le nombre de Reynolds. Pour cela, il faut définir une vitesse moyenne de l'écoulement au niveau des produits: V_f .

Soit une claie de dimensions $L_1 \times L_2$ sur laquelle sont réparties N_s sphères. N_s peut être évalué à partir de la masse de produit frais disposé sur chaque claie : M_{f0} et en supposant que chaque sphère est rigoureusement identique.

$$N_s = E\left(\frac{M_{f0}}{m_f}\right) \quad E : \text{partie entière;} \quad m_f : \text{masse d'une}$$

sphère

On peut alors déduire le volume occupé par les produits sur une claie, en fonction du volume de chaque sphère v_{fi} .

$$V_f = N_s v_{fi}$$

Considérons maintenant le volume parallélépipédique de dimensions $L_1 \times L_2 \times D_f$ (figure ci-contre) où D_f est le diamètre de chaque sphère.

Nous pouvons définir un taux d'occupation de ce volume par:

$$O_c = \frac{v_f}{L_1 \times L_2 \times D_f} = \frac{N_s \pi D_f^2}{6L_1 L_2}$$

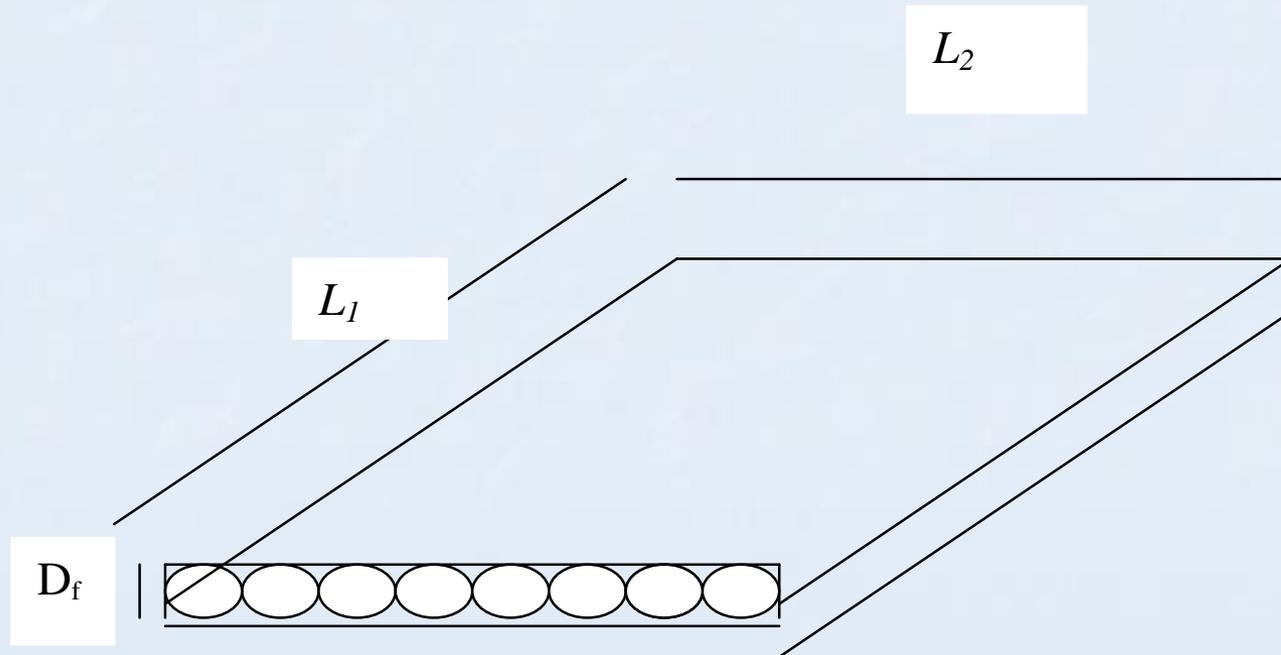


Figure 3.4: Schéma d'une claie

et réciproquement, un taux de vide par :

$$p_0 = 1 - O_c = \frac{6L_1L_2 - \pi D_f^2 N_1}{6L_1L_2}$$

Nous choisissons alors de la considérer comme la porosité équivalente de la couche de produit. La vitesse de l'écoulement au niveau des sphères s'écrit :

$$V_f = \frac{V}{p_0} \text{ où } V \text{ est la vitesse à vide.}$$

La vitesse V_f ainsi déterminée peut être qualifiée de vitesse moyenne au niveau du produit. Son introduction dépend du nombre de Reynolds.

Il resterait à confirmer la validité de ce modèle de calcul par une série d'expérimentations. Mais les comparaisons s'avèrent difficiles. Mesurer des vitesses dans la couche de produit n'est pas chose simple, et moyenner l'ensemble des résultats de façon correcte l'est encore moins. Pour l'instant, on retient ce modèle qui peut permettre la prise en compte ultérieure du retrait du produit

3.3.4. Approche en régime permanent

Il s'agit de simuler le comportement du séchoir seul au cours de la première phase de séchage ou phase de séchage à vitesse constante. Il est bien évident que cette phase qui suppose le produit recouvert d'une mince pellicule d'eau libre s'observe très peu dans la réalité. Néanmoins, son étude, outre un aspect pédagogique non négligeable permet d'apprécier l'influence de divers paramètres (température, humidité d'entrée de l'air dans le séchoir, débit...) sur le début du séchage et constitue une première approche du système.

Pour cela, on suppose des conditions d'air constantes à l'entrée du séchoir. Le processus de séchage peut être décrit en régime permanent.

3.3.4.1. Echanges massiques

Traiter le séchage à vitesse constante revient, nous l'avons dit, à considérer que le produit est recouvert d'une mince pellicule d'eau libre et que la pression de vapeur à la surface de ce produit est égale à la pression de vapeur saturante.

Ceci admis, la loi quantitative de transfert de masse s'écrit :

$$\dot{m}(i) = h_e (C_{sat}(T_f(i)) - C_v(i-1)) S$$

où $\dot{m}(i)$ désigne la masse d'eau évaporée en 1 seconde sur la claie numéro (i). (les numéros sont pris de 1 à I_{MAX} dans le sens de l'écoulement).

- h_e est un coefficient de transfert de masse défini par :

$$h_e = \frac{Sh.D_c}{D}$$

ou encore: $h_e = \frac{h_{caf}}{C_{Pa}}$, expression reliant les coefficients

de transferts thermiques et massiques. C'est cette dernière relation que nous allons retenir.

- $C_{sat}(T_f(i))$: concentration de vapeur saturante à la température $T_f(i)$ a été approchée par la formule suivante, déduite de la formule de BERTRAND pour les pressions [13] :

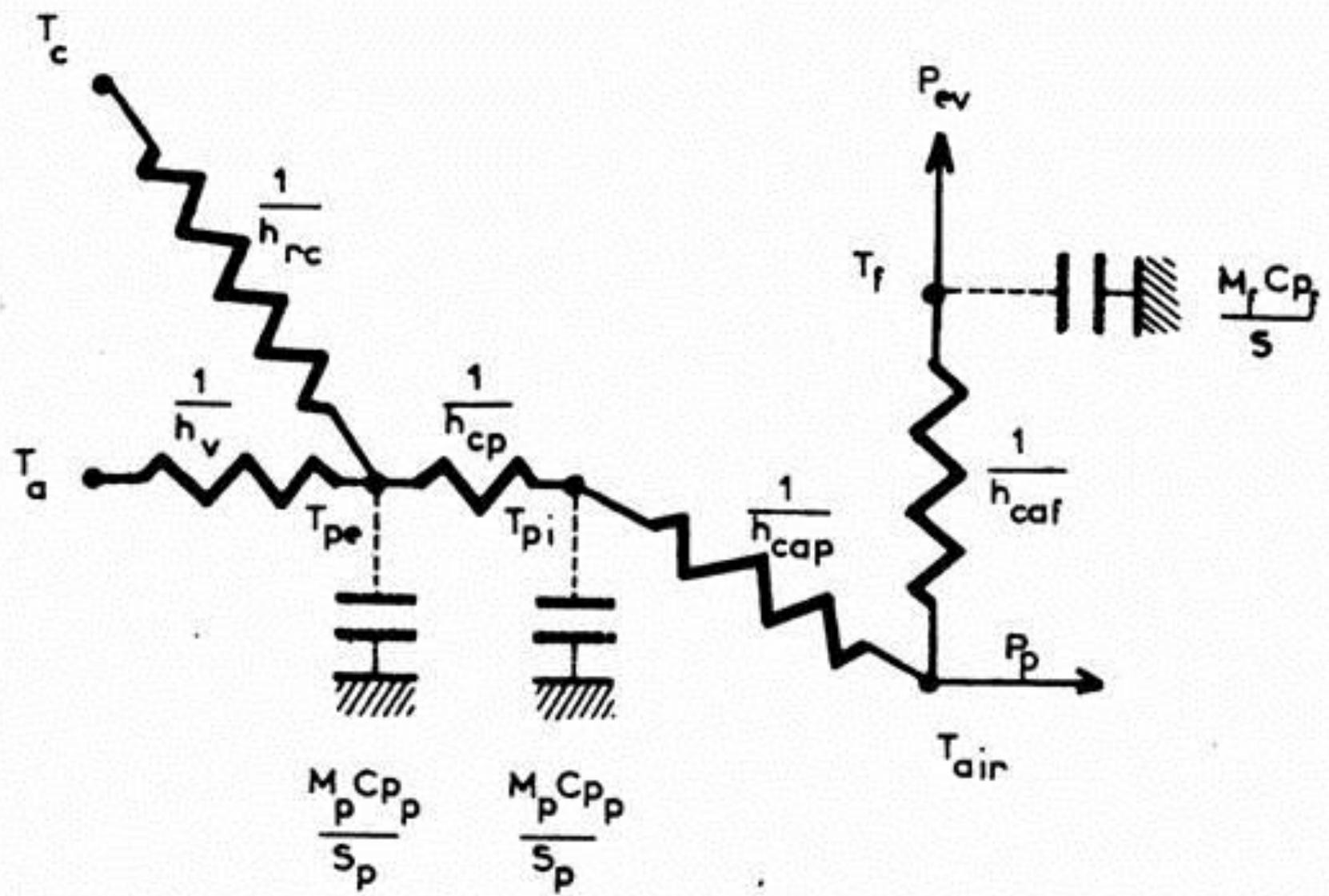
$$\begin{aligned}
C_{sat}(T_f(i)) &= 9110^{-10} T_F^4 - 4,182 \cdot 10^{-7} T_f^3(i) \\
&- 27,2583 \cdot 10^{-6} T_f^2(i) - 50,7325 \cdot 10^{-6} T_f(i) \\
&- 45,400845 \cdot 10^{-4}
\end{aligned}$$

valable pour $5^\circ\text{C} < T_{f(i)} < 65^\circ\text{C}$

- $C_v(i-1)$ est la concentration de vapeur dans l'air (rang $i-1$)

3.3.4.2. Equations du bilan de transfert de chaleur et de masse

Elles traduisent directement le schéma électrique (figure 3.5) relative à une cellule de séchage (figure 3.3)



$$S h_{caf} (T_{air}(i-1) - T_f(i)) = P_{ev}(i) \quad (1)$$

$$S_{pa} h_{cap} (T_{air}(i-1) - T_{pi}(i)) + S_{pa} h_{cp} (T_{pe}(i) - T_{pi}(i)) = 0 \quad (2)$$

$$S_{pa} h_{cp} (T_{pi}(i) - T_{pe}(i)) + h_v S_{pa} (T_a - T_{pe}(i)) + \\ h_{rc} S_{pa} (T_c - T_{pe}(i)) = 0 \quad (3)$$

$$P_p(i) = S h_{caf}(T_{air}(i-1) - T_f(i)) + S_{pa} h_{cap}(T_{air}(i-1) - T_{pi}(i)) \quad (4)$$

$$Deb C_{pa}(T_{air}(i-1) - T_{air}(i)) = P_p(i) \quad (5)$$

$$P_{ev}(i) = L S h_e(C_{sat}(T_f(i)) - C_v(i-1)) \quad (6)$$

En régime variable on replace Q par $\frac{M_m C_{pm}}{S_e} \cdot \frac{T_m(i) - T_m^*(i)}{\Delta T}$,

$$m = Pi, Pe, F,$$

3.3.4.3. Résultats et étude des influences: (voir TP)

C'est un programme qui permet d'effectuer de multiples simulations sur des séchoirs solaires. Il permet de suivre le phénomène de séchage sur divers produits et à géométrie différente. On peut étudier, par exemple, l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que:

- la température d'entrée de l'air $T_{\text{air}}(0)$
- L'humidité absolue de l'air à l'entrée $X_{\text{ab}}(0)$

La vitesse de l'écoulement V .

Fin du Chapitre

