

Modélisation, simulation et dimensionnement d'un séchoir

Yves Jannot

Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

1. INTRODUCTION	2
2. CHOIX D'UN MODELE	2
3. CARACTERISATION DE LA SORPTION	5
3.1 Définition	5
3.2 Formes et modèles des isothermes de sorption	5
3.3 Détermination par la méthode gravimétrique	9
4. CARACTERISATION DU RETRAIT VOLUMIQUE	10
5. MODELISATION DU SECHAGE	11
5.1 Conditions expérimentales	11
5.2 Identification de CCS à température de séchage constante	12
5.3 Modélisation d'un séchoir	14
6. CONCLUSION	17
7. REFERENCES	18
ANNEXE A1 : ACTIVITE DE L'EAU DE SOLUTIONS SALINES SATUREES	19

1. INTRODUCTION

L'objectif de la méthode proposée est d'apporter des réponses aux questions concrètes suivantes : de quel séchoir (type, dimensions, puissance) doit-on disposer pour sécher M kg d'un produit à forte teneur en eau (fruit ou légume par exemple) ? Quelles sont les conditions optimales de son exploitation ? Quels seront la durée et le coût du séchage ? La réponse à toutes ces questions est la base d'un éventuel développement d'une activité commerciale de vente de produits séchés.

2. CHOIX D'UN MODELE

Compte tenu de leur forte teneur en eau qui rend leur surface « collante », les produits considérés sont séchés en couche mince : une seule épaisseur de produit est disposée sur une ou plusieurs claies grillagées avec un écoulement d'air soit longitudinal soit transversal. Dans ce qui suit, nous avons plutôt considéré un écoulement longitudinal (air « léchant ») mais les résultats obtenus sont également applicables pour un écoulement transversal. Le séchoir considéré est du type de celui représenté sur la figure 1.

Nous supposons que la vitesse de l'air est la même au niveau de tous les produits ce qui peut être obtenu en ajustant le nombre d'orifices entre la zone « produit » et les canaux latéraux de recirculation d'air. La teneur en eau moyenne \bar{W} d'un morceau ne dépend alors que de sa position par rapport à l'entrée d'air repérée par x et du temps t écoulé depuis le début du séchage : $\bar{W} = \bar{W}(x, t)$. Rappelons que la teneur en eau est le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit sur sa masse sèche.

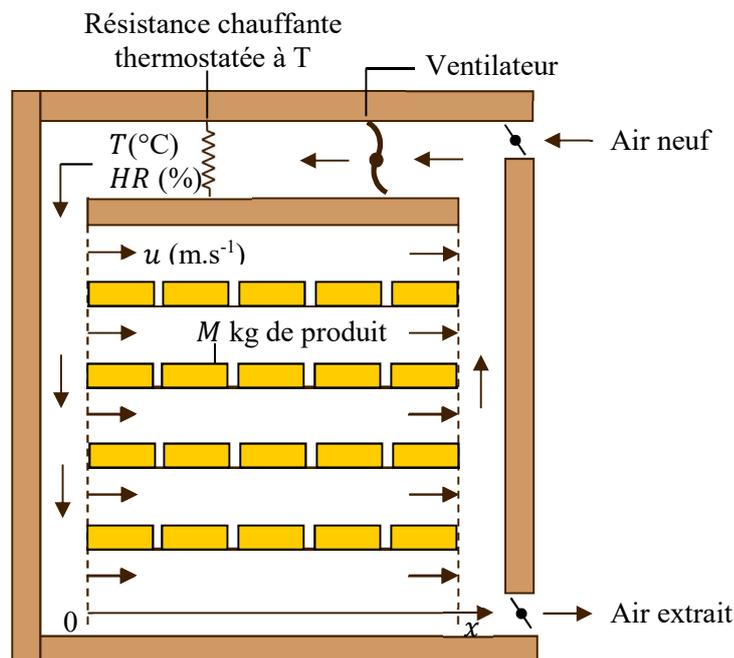


Figure 1 : Schéma du séchoir type étudié

La longueur des morceaux de produits étudiés étant faible (quelques cm au plus) par rapport à la longueur de la claie (>1 m), on a retenu l'hypothèse de l'absence de gradient longitudinal de température et de teneur en eau sur un morceau de produit, le profil des teneurs en eau suivant le sens de l'écoulement du fluide est représenté sur la figure 2.

Pour déterminer la vitesse de séchage à conditions d'air constantes certains auteurs utilisent un modèle diffusif avec prise en compte du phénomène de retrait (Simal et al, 1998), (Lima et al, 2002), (Karim et

Hawllader, 2005) en écrivant l'équation de la diffusion massique sous la forme :

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{1}{D_w} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{u_r}{D_w} \frac{\partial W}{\partial z} \quad (1)$$

où u_r est la vitesse de rétrécissement et D_w la diffusivité massique supposée constante.

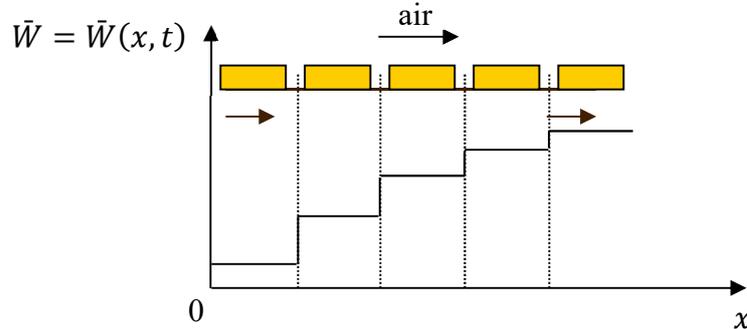


Figure 2 : Schématisation du profil de teneur en eau considéré

Cette vitesse est calculée en supposant que le produit conserve sa forme initiale (plaque ou cylindre) et que le phénomène de retrait est idéal : la variation de volume est égale au volume d'eau liquide évaporée (Desmorieux et Moyne, 1992).

La diffusivité massique D_w est déterminée expérimentalement. On considère pour cela la solution de l'équation de la diffusion massique obtenue en négligeant la résistance au transfert de masse à l'interface produit / air de séchage. On obtient ainsi par exemple pour une plaque d'épaisseur $2e$ (Crank, 1975) :

$$W^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_w}{4e^2} t\right] \quad (2)$$

Où W^* représente la teneur en eau réduite moyenne définie par :

$$W^* = \frac{\bar{W} - W_{eq}}{W_{cr} - W_{eq}} \quad (3)$$

où : W_{eq} : teneur en eau d'équilibre du produit avec de l'air à T, HR

W_{cr} : teneur en eau critique correspondant la fin de la phase isenthalpe de séchage.

On montre que cette solution converge assez rapidement vers le premier terme de la série. On trace donc la courbe expérimentale $\ln[W^*(t)]$ en fonction de t dont on doit vérifier la linéarité et dont la pente permet d'estimer la diffusivité massique D_w (Toğrul et Pehlivan, 2003), (Karim et Hawllader, 2005).

Ce type de modélisation repose sur la connaissance de l'évolution du volume et de la forme du produit au cours du séchage. On néglige par ailleurs le plus souvent les effets de bord en assimilant le produit soit à une plaque infinie soit à un cylindre infini. Les produits alimentaires tropicaux présentent souvent de très fortes teneurs en eau initiales (de l'ordre de $4 \text{ kg kg}_{\text{ms}}^{-1}$ par exemple pour la banane) et subissent au cours de leur séchage une contraction et une déformation très importantes. L'évolution de leur forme serait par ailleurs très difficilement modélisable. L'utilisation d'un modèle diffusif prenant en compte les gradients internes dans le produit et calculant l'évolution de la teneur en eau moyenne par intégration d'équations locales sur le volume d'un morceau s'avère donc inapplicable dans ce cas. Il semble donc préférable de chercher à caractériser la vitesse de séchage non pas en fonction d'un champ de teneur en eau mais en fonction de la teneur en eau moyenne d'un morceau et d'écrire :

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = f(\bar{W}, T_a, HR_a, u_a) \quad (4)$$

Où T_a, HR_a et u_a sont respectivement la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air de séchage.

Un certain nombre de modèles ont été proposés pour représenter l'évolution de la teneur en eau d'un produit à teneur en eau supposée uniforme soumis à des conditions d'air de séchage constantes, on peut citer parmi les plus couramment utilisés (Dandamrongrak et al, 2002), (Toğrul et Pehlivan, 2003) :

- Modèle exponentiel $W^*(t) = \exp(-k_1 t)$ (5)

- Modèle deux termes $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$ (6)

- Modèle de Page $W^*(t) = \exp(-k_1 t^n)$ (7)

- Modèle de Henderson $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t)$ (8)

- Modèle logarithmique $W^*(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2$ (9)

Ces modèles sont en fait des modèles semi-empiriques. Les deux premiers utilisent la forme des deux premiers termes de la série infinie de la relation (1.2), les modèles suivants en sont des formes modifiées empiriquement.

L'inconvénient de ces modèles est que les coefficients A_i , k_i et n qui y figurent varient a priori avec les conditions de l'air de séchage. Pour les utiliser dans un programme dédié au calcul de la vitesse de séchage dans des conditions d'air très variables en particulier pour les morceaux de produits placés en sortie de séchoir, il faut connaître la valeur de ces paramètres sur une plage de conditions assez large. Le nombre de paramètres nécessaire pour décrire les valeurs de A_i , k_i et n peut alors devenir important. Le choix d'un modèle a priori pour décrire l'intégralité d'une courbe de séchage peut également s'avérer un handicap dans le cas d'un produit présentant différentes phases de séchage au comportement très différent.

Ce sont les raisons pour lesquelles il semble préférable d'utiliser la méthode de la courbe caractéristique de séchage (CCS) qui caractérise les cinétiques de séchage par un modèle de comportement (Van Meel, 1958) sans faire d'hypothèse préalable sur sa forme. Cette méthode a par ailleurs été utilisée par de nombreux auteurs pour différents produits (Desmorieux, 1992), (Belghit et al, 2000), (Timoumi et Zagrouba, 2005).

Le principe de cette méthode est de représenter sur un même graphe les courbes de séchage réduites représentant la vitesse réduite V^* en fonction de la teneur en eau réduite moyenne W^* . La vitesse de séchage réduite V^* est définie par :

$$V^* = \frac{\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_t}{\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0} \text{ où } \left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0 \text{ est la vitesse de séchage de la phase initiale}$$

isenthalpe, qui reste constante pour $\bar{W} > W_{cr}$ avant de décroître.

Pour un certain nombre de produits, les courbes de séchage réduites obtenues sous différentes conditions d'air se superposent et peuvent être représentées par une courbe unique $V^* = f(W^*)$ que l'on appelle la CCS (Courbe Caractéristique de Séchage) du produit.

Dans ce cas, la vitesse de séchage d'un produit de teneur en eau W soumis à un air de conditions T , HR et u se calcule de la façon suivante :

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = \left(\frac{d\bar{W}}{dt}\right)_0 f(W^*) \quad (10)$$

Pour rendre le modèle utilisable il faut donc identifier :

- la teneur en eau W_{eq} pour différentes conditions d'air ce qui revient à déterminer puis à modéliser les isothermes de sorption pour différentes températures,
- une forme mathématique de la fonction f après avoir vérifié que les courbes de séchage réduites correspondant à différentes conditions de séchage se superposent,
- une relation permettant d'estimer la vitesse $\left(\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ en fonction des conditions de l'air T , HR et u pour une taille et une géométrie de produit données,

- une courbe des points caractéristiques W_{cr} en fonction des conditions de séchage (HR et T). Signalons que faute de données expérimentales, W_{cr} est souvent pris comme indépendant de T et HR .

3. CARACTERISATION DE LA SORPTION

3.1 Définition

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau W et de sa température T . La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau W d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR 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.

Les deux courbes sont en général différentes (cf. figure 3) car le séchage d'un produit (passage de $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

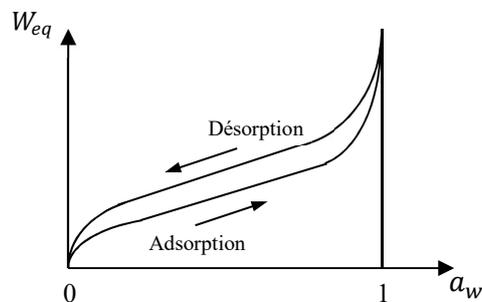


Figure 3 : Allure générale des isothermes de sorption

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec à T_a, HR_a . La connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre W_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau W du produit en fin de séchage. La valeur de W_{eq} est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage.

Remarques :

- Il a été montré que certains produits présentent des isothermes d'adsorption différentes selon la méthode utilisée pour dégazer le produit avant de démarrer l'adsorption, on ne peut donc plus parler dans ce cas de l'isotherme (unique) d'adsorption mais il faut spécifier en plus le mode de déshydratation utilisé.
- Les isothermes de désorption peuvent également présenter une variabilité selon le mode de préparation ou de fabrication du produit s'il n'est pas naturel ou selon le degré de maturité ou l'espèce du produit s'il s'agit d'un produit végétal. Dans ce dernier cas, les variations sont toutefois peu importantes.

3.2 Formes et modèles des isothermes de sorption

3.2.1 Définition

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à

un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit (cf. figure 4).

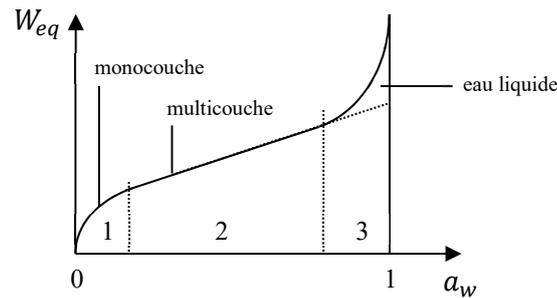


Figure 4 : Différentes zones des isothermes de sorption

- **Zone 1** : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- **Zone 2** : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- **Zone 3** : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue.

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau W et de sa température T . La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau W d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR est appelée l'isotherme de sorption.

3.2.2 Modélisation des isothermes de sorption

De nombreux modèles ont été proposés pour représenter les isothermes de sorption par des fonctions mathématiques, on en trouvera un récapitulatif dans le tableau 1.

Certains paramètres de ces modèles ont une signification physique :

- Dans les modèles de BET et de GAB, W_{12} représente la teneur en eau du solide à la saturation de la monocouche,
- Dans le modèle de GAB, les paramètres C et K ont les expressions suivantes :

$$C = A \exp\left(\frac{H_w - H_m}{RT}\right) \quad (11)$$

$$K = B \exp\left(\frac{H_w - H_q}{RT}\right) \quad (12)$$

Où : H_w Chaleur de condensation de l'eau pure
 H_m Chaleur de sorption totale de la première couche
 H_q Chaleur de sorption totale des multicouches.

Parmi ces modèles, les plus couramment utilisés pour représenter les isothermes de sorption des produits alimentaires sont ceux de BET (Czepirski et al, 2002), de GAB (Akanbi et al, 2006) et d'Henderson et de Hasley (Pagano et Mascheroni, 2005). A titre d'exemple, la figure 5 présente les isothermes expérimentales et simulées par le modèle de GAB pour la banane et l'ananas à 40 °C, 50 °C et 60 °C.

Tableau 1 : Modèles pour les isothermes de sorption

Auteurs	Modèle	Paramètres	Domaine
Langmuir	$W = W_{12} \frac{C HR}{1+C HR}$ (13)		Zone 1
Brunauer Emmet Teller (BET)	$W = W_{12} \frac{C HR}{1-HR} \frac{1-(n+1) HR^n + n HR^{n+1}}{1+(C-1)HR-C HR^{n+1}}$ (14)	C W_{12} n nombre de couches	Zone 2
	$\frac{HR}{(1-HR)W} = \frac{1}{C W_{12}} + \frac{C-1}{C W_{12}} HR$ (15)	C W_{12} $n = 1$, HR^2 négligé	Zone 1
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$W = \frac{W_{12} HR C K}{(1-HR K) (1+HR C K - HR K)}$ (16)	$C = C_0 \exp\left(\frac{H_1-H_m}{RT}\right)$ $K = K_0 \exp\left(\frac{H_1-H_q}{RT}\right)$ W_{12}	Courbe complète
Harkings	$HR = \exp\left(k - \frac{n}{W^2}\right)$ (17)	k n	Courbe complète
Smith	$HR = 1 - \exp\left(\frac{k-W}{n}\right)$ (18)	k n	Courbe complète
Henderson	$HR = 1 - \exp[-A (T + B) W^C]$ (19)	A, B, C	Courbe complète
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A+BT}{W}\right)^C\right]^{-1}$ (20)	A B C	Courbe complète
Chung	$HR = \exp\left[\left(\frac{k}{RT}\right) \exp(-nW)\right]$ (21)	k n	Courbe complète

Signification physique des paramètres :

- W_{12} Teneur en eau à la transition entre les zones 1 et 2 (saturation de la monocouche)
- n Nombre de couches
- H_1 Chaleur de condensation de l'eau pure
- H_m Chaleur de sorption totale de la première couche
- H_q Chaleur de sorption totale des multicouches

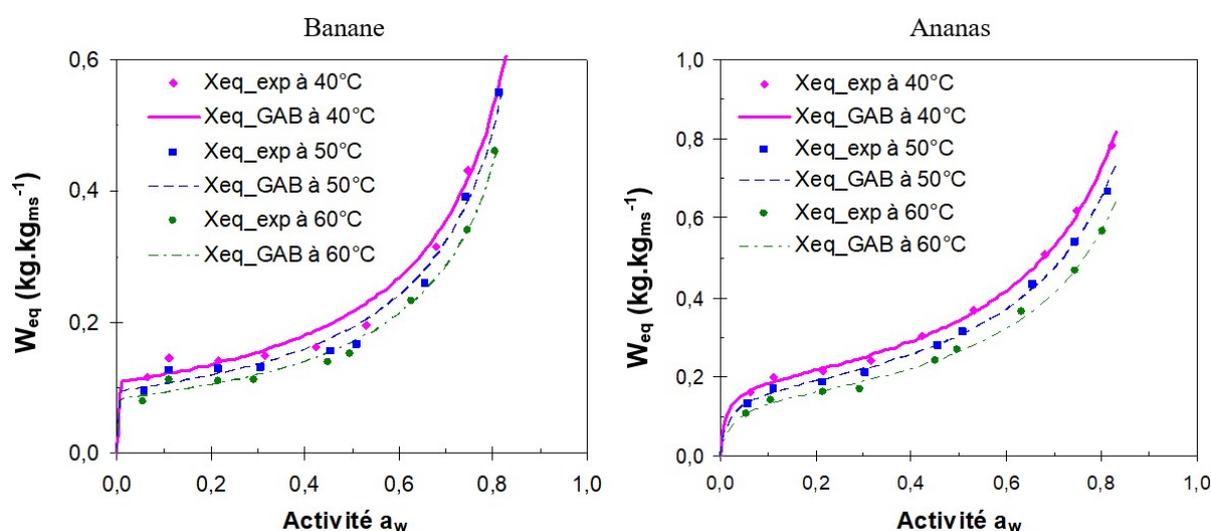


Figure 5 : Isothermes de désorption expérimentales et modèle de GAB pour l'ananas et la banane.

3.2.3 Caractéristiques physiques déductibles des isothermes

Teneur en eau de transition W_{12}

Elle se déduit par application d'une méthode d'estimation de paramètres à partir une courbe expérimentale pour trouver les paramètres (dont W_{12}) de la formule de BET qui est la mieux adaptée entre $HR = 0,1$ et $HR = 0,35$, voir exemple en annexe A2.

Surface spécifique SS

La détermination de la teneur en eau de transition W_{12} permet de calculer la surface de la monocouche en supposant que celle-ci est recouverte de molécules d'eau alignées. On considérera également que les molécules sont sphériques et empilées dans les couches suivantes de la manière la plus compacte possible, soit un empilement cubique à faces centrées selon la « conjecture de Kepler » (1611!).

Calcul du diamètre d_m d'une molécule

Soit ρ la masse volumique de l'adsorbat, $\rho = \frac{m}{V_0} = \frac{\text{masse de la molécule d'adsorbat}}{\text{volume occupé par la molécule}}$

$V_0 = \frac{m}{\rho} = \frac{M}{\rho N_{avo}}$ Volume de la molécule + Volume du vide intermoléculaire

et V_m le volume de la molécule donné par : $V_m = \frac{\pi d_m^3}{6}$

La valeur du rapport $f = \frac{V_m}{V_0}$ pour l'empilement empilement cubique à faces centrées a été établie par Kepler (1611) et vaut $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$

$$\text{On en déduit : } d_m = \left(\frac{6 V_m}{\pi}\right)^{1/3} = \left(\frac{6 f M}{\rho N_{avo}}\right)^{1/3} = \left(\frac{\sqrt{2} M}{\rho N_{avo}}\right)^{1/3} \quad (c)$$

Calcul de la surface projetée S_m occupée par chaque molécule

La surface qu'occupe une molécule correspond à la surface d'un cercle S_c de diamètre d_m (diamètre de la molécule) ajoutée à la surface intermoléculaire S_i (cf. figure 6).

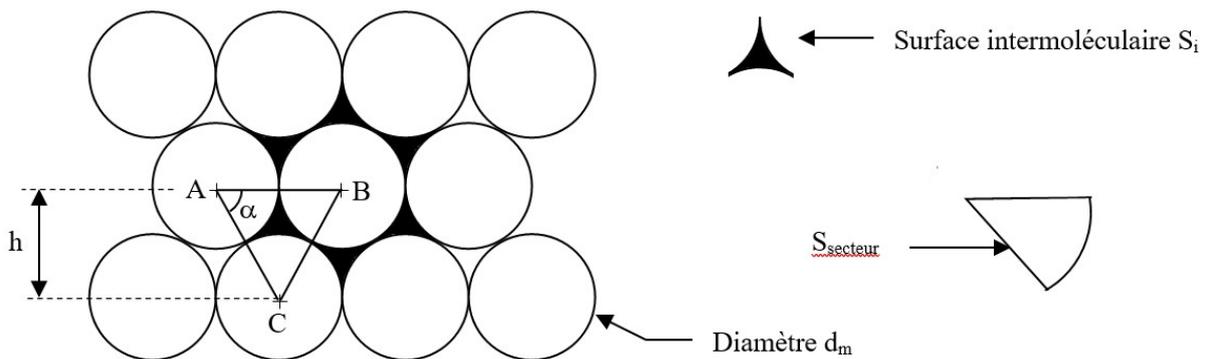


Figure 6 : Agencement des molécules sur la surface du solide

On cherche à déterminer l'aire de la partie hachurée S_i et pour cela il suffit de connaître l'aire $S_{triangle}$ du triangle ABC ainsi que l'aire du secteur d'un cercle $S_{secteur}$:

$$S_{triangle} = \frac{d_m h}{2} = \frac{d_m^2 \sqrt{3}}{4}$$

$$S_{secteur} = \frac{\pi d_m^2}{4} \times \frac{\alpha}{2\pi} \text{ avec } \alpha = \pi/3 \text{ d'où : } S_{secteur} = \frac{\pi d_m^2}{24}$$

Compte-tenu de la disposition des molécules, S_m s'écrit : $S_m = S_c + 6 S_i/3$

Avec $S_i = S_{triangle} - 3 S_{secteur}$ soit : $S_i = \frac{\sqrt{3}}{4} d_m^2 - \frac{\pi}{8} d_m^2$
d'où : $S_m = \frac{\pi}{4} d_m^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} d_m^2 - \frac{\pi}{4} d_m^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} d_m^2$ (a)

Calcul de la surface spécifique SS : surface de la monocouche par gramme de matière sèche

Soit W_m la masse d'adsorbat par gramme de matière sèche et N_m le nombre de molécules d'adsorbat par gramme de matière sèche, N_m s'écrit :

$$N_m = W_m \frac{N_{avo}}{M}$$

Où N_{avo} Nombre d'Avogadro ($6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
 M Masse molaire de l'adsorbat (kg mol^{-1})

d'où : $SS = S_m N_m = \frac{\sqrt{3}}{2} d_m^2 W_{12} \frac{N_{avo}}{M}$ (b)

Et en reportant dans (b) : $SS = \frac{\sqrt{3} \sqrt[3]{2}}{2} \left(\frac{N_{avo}}{M \rho^2} \right)^{\frac{1}{3}} W_{12}$ (22)

Dans le cas de l'eau elle s'écrit : $SS = 3516 W_{12}$ (23)

Avec : SS Aire de la monocouche ou surface spécifique ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)
 W_{12} Teneur en eau à la transition entre les zones 1 et 2 (kg kg^{-1})

3.3 Détermination par la méthode gravimétrique

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative HR de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, HR). Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau W , le couple (HR, W) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Le produit est placé dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante (cf. figure 7).

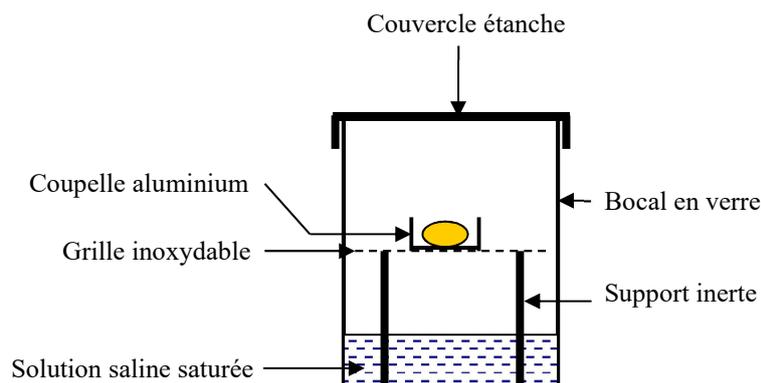


Figure 7 : Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines.

Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. Le tableau 2 indique les humidités relatives de l'air au-dessus des solutions salines saturées (à 25 °C) préconisées pour la mise en œuvre de la méthode des sels, un tableau

plus complet en donnant les valeurs pour diverses températures est présenté en annexe A3. Le choix des concentrations en acide sulfurique s'effectue en fonction des données fournies dans le tableau 3.

Cette méthode est très longue : l'équilibre air/produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines, elle ne convient donc pas à la détermination des points de l'isotherme correspondants aux valeurs élevées de HR pour des produits biologiques qui subiraient des dégradations dues aux moisissures avant que l'équilibre ne soit atteint. La cinétique peut toutefois être accélérée de manière importante en créant un vide dans les récipients, ce qui peut alors étendre le champ d'application de la méthode en réduisant la durée de la mesure.

3.3.1 Méthode des solutions salines concentrées

$$p_v = HR p_{sat}(T) \quad (24)$$

Tableau 2 : Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel à 25°C.

LiBr	LiCl	KCH ₃ O	KF	MgCl ₂	KCO ₃
6,4	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
NaBr	CuCl ₂	CoCl ₂	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
57,6	68,5	64,9	75,3	84,3	97,3

On trouvera en annexe A.1 les valeurs de HR pour des températures variant entre 0 °C et 100 °C.

3.3.2 Méthode des solutions d'acide sulfurique

$$\log \left[\frac{p_v}{p_{sat}(T)} \right] = \left(a_1 - \frac{a_2}{T} \right) + \frac{1}{\log[p_{sat}(T)]} \quad (25)$$

où : T en K
 p_v, p_{sat} en Pa

Tableau 3: Valeurs des coefficients a_1 et a_2 pour le calcul de HR avec des solutions d'acide sulfurique.

T (°C)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
a_1	8,925	8,922	8,864	8,84	8,832	8,841	9,032	9,293	9,265	9,79
a_2	2,259	2,268	2,271	2,299	2,357	2,457	2,688	3,040	3,390	9,880

Et :

$$\log_{10} [p_{sat}(T)] = 20,3182 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log_{10}(T) \quad (26)$$

Avec p_{sat} en mmHg avec $223 \text{ K} < T < 473 \text{ K}$

4. CARACTERISATION DU RETRAIT VOLUMIQUE

Au cours d'une opération de séchage, l'air et le produit échangent de la chaleur par convection. Pour quantifier ces échanges qui vont influencer sur la température de l'air et donc sur la vitesse de séchage, il faut être capable d'estimer l'évolution de la surface de produit au cours du séchage. La mesure de la surface d'un objet de forme quelconque n'étant pas réalisable aisément, une étude expérimentale a été

menée sur la banane pour déterminer l'évolution de la masse volumique de la banane en fonction de sa teneur en eau moyenne. Une hypothèse sur le retrait permettra ensuite d'estimer l'évolution de la surface.

L'étude expérimentale a consisté à mesurer simultanément la masse et le volume d'échantillons de banane placés dans une étuve thermostatée successivement aux valeurs suivantes : 40 °C, 50 °C puis 60 °C. Les échantillons sont sortis de l'étuve à des instants différents, un morceau de l'échantillon est réservé à la détermination de la teneur en eau par étuvage, le reste est pesé puis passé au volumétre à mercure pour déterminer son volume. L'objectif était de tester la validité des hypothèses suivantes :

- la variation du volume correspondant au rétrécissement est égale au volume d'eau liquide évaporée,
- le produit est constitué d'une structure solide de masse volumique ρ_{ms} dont les pores sont occupés par de l'eau de masse volumique ρ_w .

Avec ces hypothèses, on peut calculer le volume V d'un produit de teneur en eau \bar{W} par :

$$V = V_0 [1 - \beta_c (\bar{W}_0 - \bar{W})] \quad (27)$$

Où : β_c Coefficient de contraction $\beta_c = \frac{\frac{\rho_{ms}}{\rho_w}}{1 + \frac{\rho_{ms}}{\rho_w} \bar{W}_0}$ (28)

V_0 Volume initial du produit (m³)

\bar{W}_0 Teneur en eau initiale du produit

Il a été montré qu'en prenant $\rho_w = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ et $\rho_{ms} = 1400 \text{ kg m}^{-3}$ pour la banane, les valeurs calculées par la relation (1.21) présentent un écart inférieur à 3,5 % par rapport aux valeurs obtenues dans les 3 séries de 15 mesures réalisées à des températures différentes (Talla et al, 2004).

Le calcul de l'évolution de la surface en a été déduit en retenant l'hypothèse que la contraction est isotrope ce qui permet d'écrire (Talla, 2003) :

$$S(\bar{W}) = S_0 [1 - \beta_c (\bar{W}_0 - \bar{W})]^{2/3} \quad (29)$$

5. MODELISATION DU SECHAGE

5.1 Conditions expérimentales

La phase suivante du travail d'identification concerne les cinétiques de séchage pour lesquelles le modèle de la CCS a été retenu.

L'objectif de l'étude expérimentale est double :

- Vérifier que les courbes réduites de séchage obtenues pour différentes conditions d'air de séchage représentatives des conditions en divers points d'un séchoir présentent une faible dispersion,
- Trouver une représentation mathématique satisfaisante de la CCS.

Plusieurs essais doivent être pour des conditions d'air représentatives de celles que l'on retrouvera dans une enceinte de séchage, typiquement : température entre la température ambiante et la température de séchage maximale, humidité relative entre 15 et 90 %, vitesse entre 0,5 et 3 m s⁻¹.

La teneur en eau moyenne \bar{W}_f du produit en fin de séchage est mesurée par étuvage à 102 °C pendant 48 h. La connaissance de cette teneur en eau et de la masse $m(t)$ du produit permet de calculer $\bar{W}(t)$.

La vitesse de séchage $-\frac{d\bar{W}}{dt}(t)$ est calculée par :

$$-\frac{d\bar{W}}{dt}(t_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{W}(t_{i-1}) - \bar{W}(t_i)}{t_i - t_{i-1}} + \frac{\bar{W}(t_i) - \bar{W}(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} \right] \quad (30)$$

Un faible pas de temps peut générer un bruit important sur les valeurs estimées que l'on pourra remplacer par une moyenne mobile centrée calculée sur n points. Ce nombre n de points doit être le plus élevé possible ne produisant aucun biais sur la courbe des vitesses de séchage.

5.2 Identification de CCS à température de séchage constante

Une analyse des courbes de séchage $\bar{W}(t)$ obtenues expérimentalement laisse généralement apparaître :

- la forte influence de la température de l'air de séchage,
- la faible influence de la teneur en eau de l'air,
- la faible influence de la vitesse de l'air sur la fin du séchage.

A titre d'exemple, les courbes de la figure 8 illustrent l'influence de la température et de la teneur en eau de l'air sur la courbe de séchage de la banane.

La figure 9 représente les courbes de la vitesse de séchage $V_s(t) = -\frac{d\bar{W}}{dt}(t)$ en fonction de la teneur en eau réduite moyenne $W^* = \frac{\bar{W} - W_{eq}}{W_{cr} - W_{eq}}$ pour différentes températures d'air en coordonnées semi-logarithmiques. Les courbes de la figure 9.a) font apparaître clairement trois phases distinctes :

- Une phase 1 pouvant correspondre à une phase isenthalpe ou de mise en température du produit,
- Une phase 2 où la vitesse diminue lentement correspondant à l'évacuation de l'eau libre,
- Une phase 3 où la vitesse diminue plus rapidement correspondant à l'évacuation de l'eau liée.

Les courbes de la figure 9.b) correspondant aux très faibles teneurs en eau permettent d'identifier une phase 4 de ralentissement marquée par la convexité de la courbe des vitesses. Cette phase débute toutefois pour des valeurs de W^* proches de 0,04 correspondant à des valeurs de \bar{W} que l'on n'atteint pas au cours du séchage de la banane.

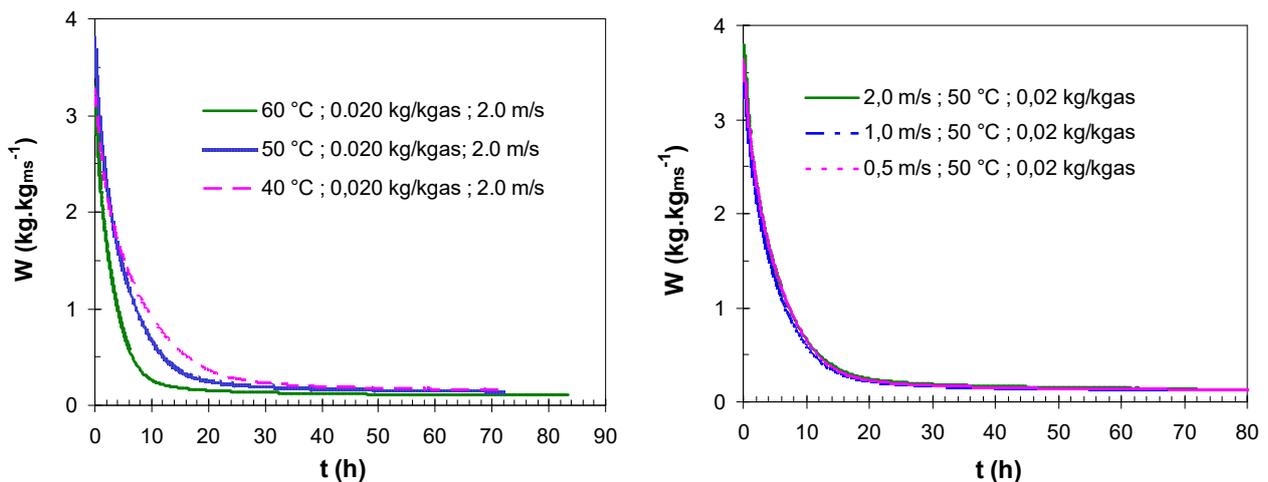


Figure 8 : Courbes expérimentales de séchage obtenues pour différentes températures et pour différentes vitesses d'air

La phase 1 correspond généralement à une phase de mise en température et les produits à forte teneur en eau ne présentent pas de phase de séchage à vitesse constante, il en résulte que :

- La teneur en eau critique W_{cr} est prise égale à la teneur en eau initiale W_0 ,
- La détermination de la vitesse notée précédemment $\left(-\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ utilisée pour calculer la vitesse réduite V^* n'est plus évidente. Elle ne peut pas être prise égale à la vitesse de séchage à $t = 0$ à cause du phénomène de mise en température qui abaisse sa valeur. Par conséquent, la vitesse de séchage en 1^{ère} phase $\left(-\frac{dW^*}{dt}\right)_0$ figurant dans la relation (1.10) a été remplacée par une vitesse de référence V_{ref} qui a été considérée comme un paramètre du modèle à déterminer.

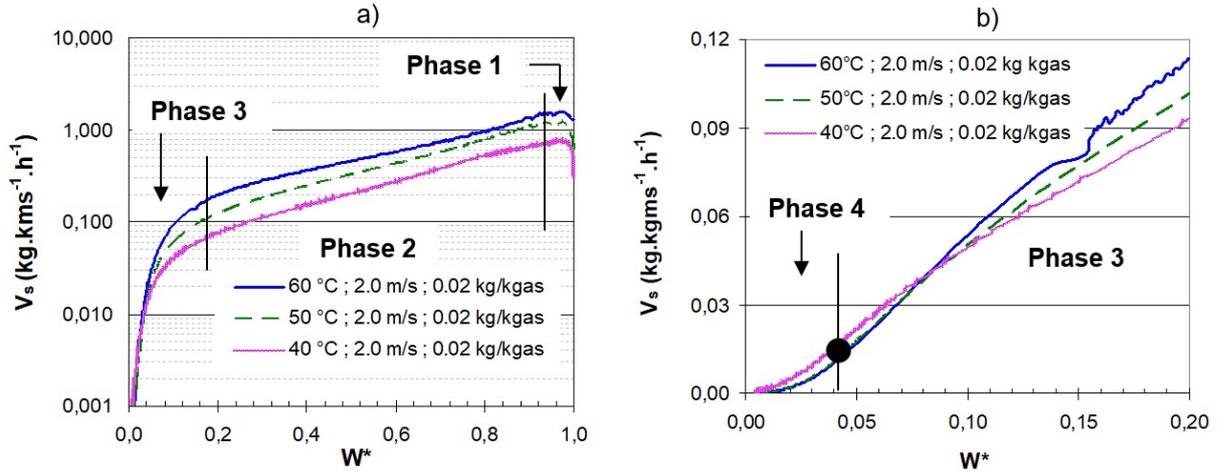


Figure 9 : Vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite pour trois températures différentes

Les observations précédentes conduisent à la recherche d'une représentation mathématique de CCS de la forme suivante (sachant que l'on n'atteint pas la phase 4 au cours du séchage) :

Si $W^* < W_{23}^*$:

$$f(W^*) = c W^* + d \quad (31)$$

Si $W^* > W_{23}^*$:

$$f(W^*) = \frac{\exp(bW^*)}{\exp(b)} \quad (32)$$

La valeur de la teneur en eau réduite W_{23}^* , correspondant à la transition entre les phases 2 et 3, peut être déterminée graphiquement.

L'intégration de la relation (10) en tenant compte des relations (31) et (32) conduit à :

$$\text{Pour } t < t_{23} : \bar{W}(t) = \bar{W}_{eq} + (\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}) \left[\left(\bar{W}_{23} + \frac{d}{c} \right) \exp\left(-\frac{c V_{ref}}{\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}} (t - t_{23})\right) - \frac{d}{c} \right] \quad (33)$$

$$\text{Pour } t > t_{23} : \bar{W}(t) = \bar{W}_{eq} + \frac{1}{b} (\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}) \ln \left[\exp(-b) - \exp(-b) \frac{b V_{ref}}{\bar{W}_0 - \bar{W}_{eq}} t \right] \quad (34)$$

Pour chacun des essais, les valeurs des paramètres V_{ref} , b , c , et d sont identifiées en minimisant la somme des écarts quadratiques entre les courbes expérimentales et les courbes théoriques. Les couples (V_{ref}, b) ont été déterminés pour les valeurs de W^* supérieures à W_{tp}^* et les couples (c, d) ont été déterminés pour les valeurs inférieures à W_{tp}^* .

Les valeurs estimées de V_{ref} permettent de tracer les courbes de séchage des essais 1 à 3 en coordonnées réduites, on en trouvera un exemple pour la banane sur la figure 10. On note pour cet exemple une très faible dispersion des courbes validant sur la banane l'approche de la courbe caractéristique de séchage. Les valeurs des paramètres b , c et d obtenues pour chaque essai sont ensuite remplacées par les valeurs moyennes uniques et optimales b_{opt} , c_{opt} et d_{opt} .

En utilisant ces valeurs optimales, la vitesse de séchage de référence V_{ref} doit être ré-estimée pour l'ensemble des essais. Cette vitesse de référence dépend des conditions d'air, elle peut être par exemple recherchée sous la forme simple suivante :

$$V_{ref} = A T^\alpha u^\beta w^\gamma \quad (35)$$

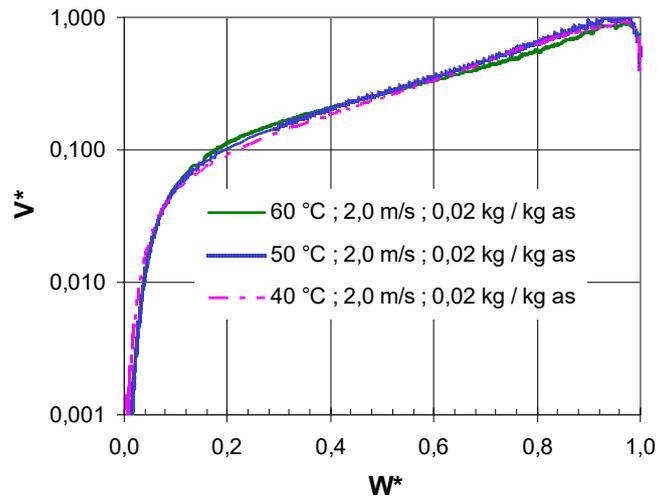


Figure 10 : Courbes de séchage en coordonnées réduites pour trois températures différentes

La figure 11 représente pour la banane les courbes expérimentales et les courbes simulées utilisant les valeurs b_{opt} , c_{opt} et d_{opt} pour toutes les courbes avec une vitesse de référence V_{ref} calculée par la relation (1.30). Pour l'ensemble des essais, le modèle proposé décrit de manière très satisfaisante les courbes expérimentales avec une erreur maximale de $0,09 \text{ kg kg}_{ms}^{-1}$ sur la teneur en eau.

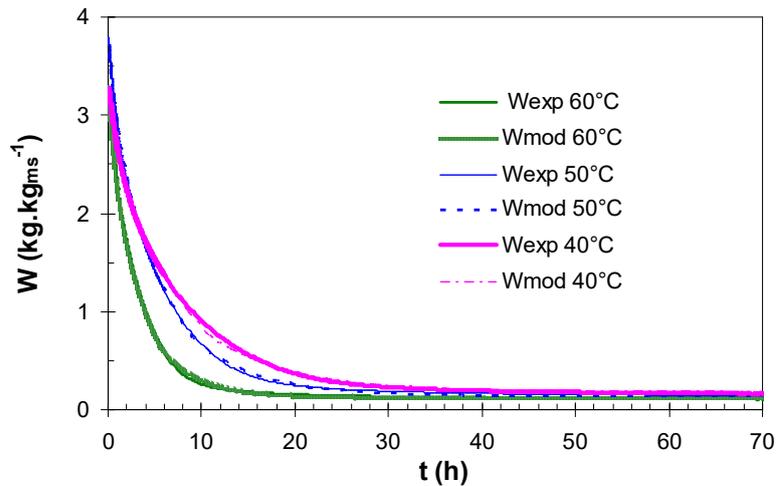


Figure 11: Courbes expérimentales et modélisées pour trois températures d'air

5.3 Modélisation d'un séchoir

Compte tenu des hypothèses retenues et de la configuration de séchoir considérée, pour connaître l'évolution des conditions du produit et de l'air en chaque point du séchoir il faut être capable de calculer par des relations de récurrence (cf. figure 12) :

- la masse $m_j(t_i)$ du $j^{ème}$ morceau de produit à l'instant t_i ,
- la température $T_p(t_i)$ du $j^{ème}$ morceau de produit à l'instant t_i ,
- les conditions de l'air $T_{a_{j+1}}(t_i)$ et $w_{j+1}(t_i)$ à l'instant t_i après contact avec le $j^{ème}$ morceau, connaissant :

- la masse $m_j(t_{i-1})$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_{i-1} ,
- la température $T_{p_j}(t_{i-1})$ du $j^{\text{ème}}$ morceau de produit à l'instant t_{i-1} ,
- les conditions de l'air $T_{a_j}(t_i)$ et $w_j(t_i)$ à l'instant t_i avant contact avec le $j^{\text{ème}}$ morceau,

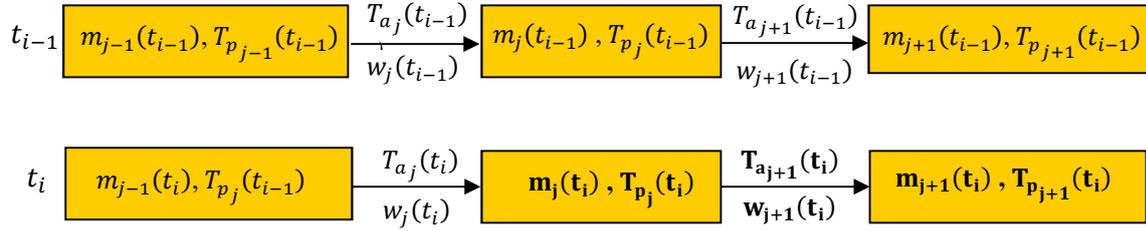


Figure 12 : Schéma de principe du calcul itératif : paramètres connus en italique et paramètres à déterminer en gras

Ce calcul s'effectue en plusieurs étapes. Un bilan massique sur le $j^{\text{ème}}$ morceau de produit entre les instants t_{i-1} et t_i permet d'écrire de calculer $m_j(t_i)$ par :

$$m_j(t_i) = m_j(t_{i-1}) - dm_j(t_i) \quad (36)$$

Avec :

$$dm_j(t_i) = m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] (t_i - t_{i-1}) \quad (37)$$

où m_{js} est la masse sèche du $j^{\text{ème}}$ morceau invariante avec le temps

$$\text{et : } -\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} = V_{ref} [u, T_{a_j}(t_i), HR_j(t_i)] f\{W(t_{i-1}), W_{eq}[T_{a_j}(t_i), HR_j(t_i)]\} \quad (38)$$

où u est la vitesse de l'air (constante) au niveau du produit, la fonction f par les relations (1.25) ou (1.26), et V_{ref} par la relation (1.30).

Le calcul de W_{eq} nécessite de connaître cette teneur en eau d'équilibre pour des valeurs continues de T alors que les isothermes de désorption n'ont été établies que pour les valeurs 25 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C. En fait, le tracé des valeurs des coefficients W_m , C et K en fonction de T montre une évolution quasi-linéaire de ces coefficients ($r^2 > 0,95$) qui a permis de retenir les expressions suivantes pour la banane :

$$W_m = 0,1585 - 0,00126 T \quad (39)$$

$$C = 14931 - 220,85 T \quad (40)$$

$$K = 0,955 - 0,000979 T \quad (41)$$

Où T est la température du produit en °C.

Un bilan massique sur l'air permet de calculer $w_{j+1}(t_i)$ par :

$$\dot{m}_{as}[w_{j+1}(t_i) - w_j(t_i)] = m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] \quad (42)$$

Un bilan thermique sur le $j^{\text{ème}}$ morceau de produit permet de calculer $T_{p_j}(t_i)$:

$$hS_j(t_i) [T_{a_j}(t_i) - T_{p_j}(t_i)] = m_j(t_i)c_p [T_{p_j}(t_i) - T_{p_j}(t_{i-1})] + m_{js} \left[-\frac{d\bar{W}_j(t_i)}{dt} \right] H_w \quad (43)$$

où H_w est la chaleur latente d'évaporation de l'eau.

Un bilan thermique sur l'air avant et après échange de chaleur et de masse avec le $j^{\text{ème}}$ morceau permet enfin de calculer $T_{a_{j+1}}(t_i)$:

$$hS_j(t_i) [T_{a_j}(t_i) - T_{p_j}(t_i)] = \dot{m}_{as}(t_i) c_a [T_{a_{j+1}}(t_i) - T_{a_j}(t_i)] \quad (44)$$

Dans ces équations, la chaleur massique de la banane a été calculée à l'aide de la relation suivante (Moras et Chapon, 1983) dans laquelle la capacité calorifique du produit c_p est exprimée en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$:

$$c_p = 3600 \frac{\bar{W}+0,2}{\bar{W}+1} \quad (45)$$

$S_j(t_i)$ est la surface en contact avec l'air du $j^{\text{ème}}$ morceau calculée par la relation (1.23) qui peut également s'écrire sous la forme :

$$S_j(t_i) = S_0 \left[\frac{1+1,4\bar{W}(t_i)}{1+1,4\bar{W}_0} \right]^{2/3} \quad (46)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h a été calculé par la relation suivante valable pour un écoulement perpendiculaire à un cylindre (Holman, 1990) :

$$Nu = B Re^n Pr^{1/3} \quad (47)$$

Dans cette relation, le diamètre caractéristique a été pris égal à la moitié du diamètre de la banane pour tenir compte de la forme de $1/4$ de cylindre des morceaux. Les valeurs des coefficients B et n dépendent de la valeur du nombre de Reynolds (Holman, 1990).

Ces différentes relations de récurrence ont été intégrées dans un programme qui permet de calculer l'évolution des conditions du produit et de l'air en fonction du temps et de la distance parcourue par l'air dans le séchoir. Ce programme permet également de simuler :

- un saut de température : $T(x=0) = T_{a01}$ si $t < t_{saut}$ et $T(x=0) = T_{a02}$ si $t > t_{saut}$
- un changement du taux de renouvellement t_r de l'air de séchage : $t_r = t_{r1}$ si $t < t_{sr}$ et $t_r = t_{r2}$ si $t > t_{sr}$.

La consommation énergétique spécifique définie comme la consommation d'énergie par kg de produit frais est également calculée par le programme.

On trouvera sur les figures 13 et 14 un exemple des résultats de la simulation obtenue pour les conditions suivantes :

- teneur en eau initiale du produit : $\bar{W} = 4 \text{ kg kg}_{\text{ms}}^{-1}$,
- conditions d'air en entrée de séchoir : $T_{a0} = 40 \text{ °C}$ pendant 8 h puis $T_{a1} = 60 \text{ °C}$,
- conditions d'air extérieur : $T_{am} = 25 \text{ °C}$ et $w_{am} = 0,15 \text{ kg kg}_{\text{as}}^{-1}$,
- taux de renouvellement égal à 20 % pendant 12 h puis égal à 5 % ensuite,
- claie : densité de chargement de 5 kg m^{-2} , longueur 1 m,
- vitesse d'air de 2 m s^{-1} .

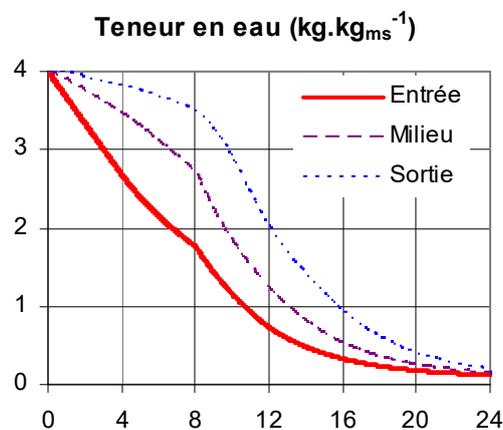


Figure 13 : Evolution simulée de la teneur en eau de la banane dans un séchoir

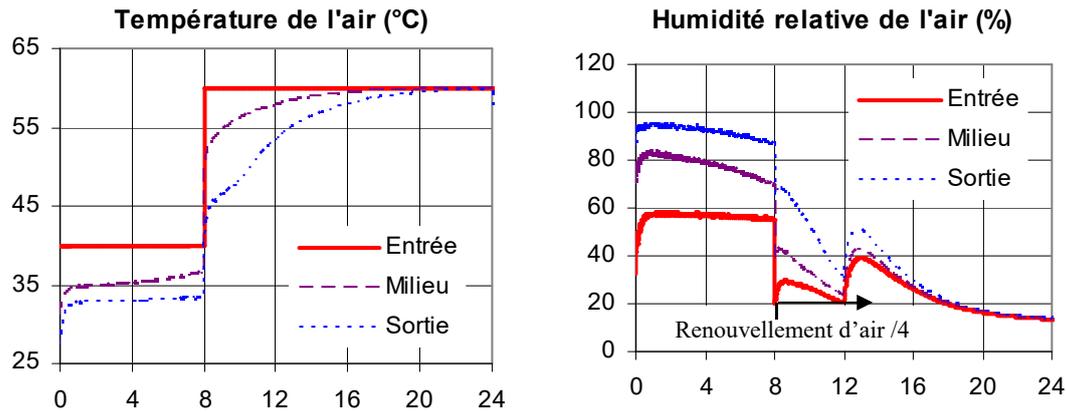


Figure 14 : Evolution simulée de la température et de l'humidité relative de l'air dans un séchoir

Dans le cas de figure traité on trouve une consommation énergétique de $1,26 \times 10^7 \text{ J kg}_{\text{produit}}^{-1}$ correspondant à $3,31 \times 10^6 \text{ J}$ par kg d'eau évaporée. Il faut toutefois noter que l'énergie consommée par le ventilateur pour assurer la vitesse choisie au niveau des produits n'est pas intégrée dans ce calcul. Le séchage dans les mêmes conditions de température mais en adoptant un taux de renouvellement d'air constant et égal à 100 % conduit à une durée de séchage de 21,7 h et à une consommation énergétique de $3,08 \times 10^7 \text{ J kg}_{\text{produit}}^{-1}$ nettement plus élevée que celle obtenue avec recirculation partielle de l'air.

La durée du séchage calculée est de 23,7 h avec un coefficient de convection $h = 30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Elle est égale à 24,5 h avec $h = 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ et 26,5 h avec $h = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. La consommation énergétique passe quant à elle de 1,34 à 1,25 $\text{J kg}_{\text{produit}}^{-1}$ quand h varie de 10 à $30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, ce qui montre l'influence faible de ce paramètre qui apparaît toujours sous forme d'un produit hS , où S est la surface d'échange air/produit. Le fait que ces deux paramètres ne puissent pas être évalués de manière très précise n'est donc pas préjudiciable à la précision de la simulation.

Cet outil peut donc apporter des réponses aux questions évoquées en introduction. Il peut en particulier permettre de dimensionner un séchoir devant répondre à un cahier des charges donné : séchage de M kg de produit en un temps t_f en intégrant des contraintes de température imposées par le produit. Il peut également être utilisé pour optimiser les conditions de fonctionnement d'un séchoir existant.

6. CONCLUSION

En ayant choisi comme support privilégié les travaux réalisés sur la banane parce que les plus récents et ayant bénéficié des meilleures conditions d'essais, il a été proposé une méthodologie permettant d'atteindre l'objectif de simuler l'évolution dans un séchoir d'un produit à très forte teneur en eau. Cette méthodologie dont l'application a conduit à des résultats satisfaisants dans le cas de la banane peut être décomposée en plusieurs étapes successives :

1. Détermination expérimentale des isothermes de désorption pour plusieurs valeurs de températures correspondant à celles rencontrées dans un séchoir (typiquement entre 30 °C et 60 °C), cette détermination peut être réalisée par la méthode des solutions salines saturées.
2. Représentation mathématique de ces isothermes, le modèle de GAB ayant semblé bien adapté dans plusieurs cas,
3. Caractérisation du retrait par une étude expérimentale, à défaut choisir le modèle de retrait idéal qui s'est avéré vérifié pour la banane,
4. Réalisation de cinétiques de séchage pour plusieurs valeurs de températures correspondant à celles rencontrées dans un séchoir (typiquement entre 30 °C et 60 °C), puis pour une température donnée pour plusieurs vitesses d'air et plusieurs humidités relatives,

5. Recherche de deux fonctions V_{ref} et f permettant de représenter au mieux pour l'ensemble des essais la vitesse de séchage sous la forme : $\left(-\frac{dW^*}{dt}\right) = V_{ref}(T, HR, u) f(W^*)$.

7. Références

1. Akanbi C.T., Adeyemi R.S., Ojo A., Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices, *Journal of Food Engineering*, Vol.73, n°2, pp.157-163, 2006.
2. Belghit A., Kouhila M., Boutaleb B.C., Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, *Energy Conversion & Management*, vol.41, pp.1303-1321, 2000.
3. Crank J., *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, UK, 1975.
4. Czepirski L., Komorowska-Czepirska E., Szymonska J., Fitting of different models for water vapour sorption on potato starch granules *Applied Surface Science*, Vol.196, pp.150-153, 2002.
5. Dandamrongrak R., Young G., Mason R., Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models, *Journal of Food Engineering*, vol.55, pp.139-146, 2002.
6. Desmorieux H., Moyne C., Analysis of dryer performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept, *Drying 92*, Elsevier, Amsterdam, pp.834-843, 1992.
7. Jannot, Y., Talla, A., Nghanou, J. & Puiggali, J.R. (2004). Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. *Drying Technology*, vol. 22(8), 1949-1968.
8. Karim M.A., Hawlader M.N.A., Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.48, pp.4914-4925, 2005.
9. Özisik M. N., « Heat conduction », John Wiley & Sons, Inc., 1993.
10. Pagano A.M., Mascheroni R.H., Sorption isotherms for amaranth grains, *Journal of Food Engineering*, Vol. 67, n° 4, pp. 441-450, 2005.
11. Simal S., Rossello C., Berna A., Mulet A., Drying of shrinking cylinder-shapes bodies, *Journal of Food Engineering*, vol.37, pp.423-435, 1998.
12. Talla A., Séchage de fruits tropicaux par l'air chaud et étude du coût énergétique dans un séchoir électrique prototype, Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, 2003.
13. Talla A., Jannot Y., Nkeng G., Puiggali J.-R., Desorption isotherms of tropical foodstuff. Application to banana, mango and pineapple, *Drying technology*, vol.23, n° 7, pp. 1477-1498, 2005.
14. Timoumi S., Zagrouba F., Water sorption and dehydration kinetics of Tunisian rosemary leaves, *Desalination*, vol.185, n°1-3, pp.517-521, 2005.
15. Toğrul I.T., Pehlivan D., Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, vol.58, pp.23-32, 2002.
16. Van Meel D.A., Adiabatic conversion batch drying with recirculation of a chemical, *Eng. Sci.*, vol.9, pp.36-44, 1958.

ANNEXE A1 : Activité de l'eau de solutions salines saturées

T (°C)	CeF	LiBr	KOH	LiCl	KCH ₃ CO	KF	MgCl ₂	K ₂ CO ₃
0		7,8		11,2			33,7	43,1
5	5,5	7,4	14,3	11,3			33,6	43,1
10	4,9	7,1	12,3	11,3	23,4		33,5	43,1
15	4,3	6,9	10,7	11,3	23,4		33,3	43,2
20	3,8	6,6	9,3	11,3	23,1		33,1	43,2
25	3,4	6,4	8,2	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
30	3,0	6,2	7,4	11,3	21,6	27,3	32,4	43,2
35	2,7	6,0	6,7	11,3		24,6	32,1	
40	2,4	5,8	6,3	11,2		22,7	31,6	42,3
45	2,2	5,7	5,9	11,2		21,5	31,1	
50	2,1	5,5	5,7	11,1		20,8	30,5	45,6
55	2,0	5,4	5,6	11,0		20,6	29,9	
60	2,0	5,3	5,5	11,0		20,8	29,3	45,0
65	2,1	5,3	5,4	10,9		21,2	28,5	
70	2,2	5,2	5,3	10,8		21,7	27,8	
75	2,4	5,2		10,6		22,3	26,9	
80	2,6	5,2		10,5		22,9	26,1	
85		5,2		10,4		23,2	25,1	
90		5,3		10,2		23,3	24,1	
95		5,3					23,1	
100		5,4					21,1	

T (°C)	Mg(NO ₃) ₂	NaBr	CuCl ₂	CoCl ₂	KI	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
0	60,3					75,5	88,6	98,8
5	58,9	63,5			73,3	75,7	87,7	98,5
10	57,4	62,2			72,11	75,7	86,8	98,2
15	55,9	60,7			70,98	75,6	85,9	97,9
20	54,4	59,1	68,4		69,9	75,5	85,1	97,6
25	52,9	57,6		64,9	68,86	75,3	84,3	97,3
30	51,4	56,0	68,6	61,8	67,89	75,1	83,6	97,0
35	49,9	54,6		58,6	66,96	74,9	83,0	96,7
40	48,4	53,2	68,0	55,5	66,09	74,7	82,3	96,4
45	46,9	52,0		52,6	65,26	74,5	81,7	96,1
50	45,4	50,9	65,5	50,0	64,49	74,4	81,2	95,8
55		50,2		48,0	63,78	74,4	80,7	
60		49,7	63,3	46,7	63,11	74,5	80,3	95,7
65		49,5		46,3	62,5	74,7	79,9	
70		49,7		47,0	61,93	75,1	79,5	
75		50,3		48,8	61,43	75,6	79,2	
80		51,4		52,0	60,97	76,3	78,9	
85					60,56		78,7	
90					60,21		78,5	