
Étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux

Application à la banane et à la mangue

André TALLA¹, Yves JANNOT¹, César KAPSEU², Jean NGANHOU¹

SUMMARY **Experimental study and modelling of the kinetics of drying of tropical fruits. Application to banana and to mango.**

Up till now, there is very little information on the drying of tropical fruits, in particular of bananas and mangoes. Yet this method of conservation whereby only 60% loss of foodstuff is recorded after harvest, is the most economical to undeveloped and developing nations. Using the dynamic gravimetric method, the sorption and desorption isotherms at 40 and 50°C for bananas and 50°C for mangoes were experimentally determined. These curves were modelled following a semi-empirical correlation proposed by HENDERSON. The advantage of this correlation method is that it takes into account the influence of temperature. The insensitive effect of temperature ranges of about 10°C, as is the case with bananas, was highlighted. Hysteresis between the sorption and desorption, with a maximum amplitude of 4% for bananas and 5% for mangoes, was observed. Consequently, experimental results of drying by forced convection of products tested in thin slices (10 mm thickness for mangoes and thickness of less than 15 mm for bananas) were obtained, using well controlled aeraulic and thermal conditions of air duct (40, 50 and 60°C for the temperatures; 0.5, 1.0 and 2.0 m⁻¹ for flow rates). A characteristic curve of drying is built for each product, independently of the different aérothermic conditions. This simplified method makes it possible to simulate the experimental kinetics satisfactorily. One of the peculiarities of our work is to identify a critical moisture which is different from the initial moisture content.

Key-words: *banana, mango, sorption isotherms, kinetic of drying, modelling.*

RÉSUMÉ

Le séchage des fruits tropicaux, en l'occurrence la banane et la mangue, reste pour les pays africains en développement le seul moyen économique de conservation de ces denrées pour lesquelles les pertes après récoltes attei-

1. Laboratoire d'énergétique, École nationale supérieure polytechnique, BP 8390, Yaoundé, Cameroun.

2. École nationale supérieure des sciences agro-industrielles, BP 455, Ngaoundéré, Cameroun.

* Correspondance
andre_talla@yahoo.fr

gnent parfois 60 %. Par la méthode gravimétrique dynamique, les isothermes d'adsorption/désorption à 40 et 50 °C pour la banane et à 50 °C pour la mangue ont été déterminées expérimentalement et modélisées à l'aide d'une corrélation semi-empirique proposée par HENDERSON. Cette corrélation prend en compte l'influence de la température dont l'effet peu sensible sur ces isothermes, pour des écarts de l'ordre de 10 °C (banane), est démontré. Le phénomène d'hystérésis entre l'adsorption et la désorption avec des écarts maximums de 4 % (banane) et 5 % (mangue) est observé. Au moyen d'une soufflerie à conditions aérodynamiques et thermiques bien contrôlées (40, 50, 60 °C pour les températures ; 0,5, 1,0, 2,0 ms⁻¹ pour les vitesses d'écoulement), les résultats expérimentaux de séchage par convection forcée des produits testés sont obtenus. Les corrélations semi-empiriques établies, par la méthode de courbe caractéristique de séchage, permettent de simuler au mieux les cinétiques expérimentales. L'une des particularités de nos travaux est l'identification d'une teneur en eau critique différente de la teneur en eau initiale.

Mots clés : *banane, mangue, isothermes de sorption, cinétique de séchage, modélisation.*

1 - INTRODUCTION

Le séchage des produits agroalimentaires est une technique vitale pour les pays en voie de développement dont l'autosuffisance alimentaire repose essentiellement sur l'agriculture. Il consiste à diminuer l'activité de l'eau de ces produits jusqu'à une valeur assurant leur conservation ; ceci en respectant certains critères de qualité qui leur sont liés et en garantissant, pour la chaîne de production, une cadence et un coût raisonnable (BIMBENET, 1978).

Les fruits tropicaux, en l'occurrence la banane et la mangue, ont une grande importance pour l'économie de plusieurs pays d'Afrique subsaharienne. Au Cameroun par exemple, la banane est produite industriellement et traditionnellement toute l'année dans la zone équatoriale ; 14 % de cette production sont directement destinés à l'exportation. La mangue en revanche est récoltée pendant les mois de mai à juin, avec 60 % de pertes après récolte (ministère de l'Agriculture, 1986). Ces deux produits stabilisés par une opération de séchage, auront des débouchés à l'exportation et se trouveraient ainsi revalorisés.

Les produits agroalimentaires possèdent, pour la plupart des cas, une structure variable aussi bien dans l'espace que dans le temps. On note, au cours du séchage, la diminution de leur surface du fait de la contraction des tissus qui compense en partie le départ de l'eau. Il en résulte que tous les paramètres qui dépendent des dimensions internes et externes changent, rendant difficile l'utilisation du modèle complet pour la représentation de ces produits. Le concept de ***courbe caractéristique de séchage*** apparaît donc comme la méthode la mieux adaptée et utilisée par de nombreux auteurs (BELAHMIDI *et al.*, 1993 ; DESMORIEUX et MOYNE, 1992 ; FORNELL, 1979) pour décrire le comportement de ces produits.

Il est nécessaire pour tout matériau de faire des prévisions sur le comportement lors du traitement (séchage ou stockage) dans des conditions autres que

celles étudiées expérimentalement. Pour ce faire, l'étape importante dans tout procédé de séchage d'un matériau consiste à évaluer son caractère hygroscopique qui se matérialise par sa courbe de sorption. La connaissance de cette courbe permet de tirer des informations utiles, notamment au cours du séchage et pendant le stockage du produit.

Le premier objectif visé dans cette étude porte sur la détermination expérimentale des isothermes d'adsorption/désorption des produits concernés. Pour déterminer ces isothermes, nous nous appuyons sur la méthode de micro-climat régulé en température et en humidité relative à l'aide d'un courant gazeux conditionné par un dispositif humidificateur : c'est la méthode dite « gravimétrique dynamique ».

Le deuxième objectif est consacré à l'établissement de la cinétique de séchage des deux produits, à savoir la banane et la mangue. Partant de l'approche expérimentale, nous cherchons des corrélations pouvant servir dans la pratique au dimensionnement d'un système de séchage approprié pour ces produits.

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Détermination des isothermes d'adsorption/désorption

2.1.1 Appareillage

Le dispositif utilisé, comme le montre la *figure 1*, est une enceinte climatique de dimensions extérieures 0,80 m de largeur, 1,00 m de profondeur et 1,80 m de hauteur. Elle est régulée en température et en humidité relative par l'intermédiaire d'un microprocesseur de contrôle incorporé au dispositif. Une sonde Pt100 et un capteur d'humidité transmettent les informations vers les systèmes de régulation en température et en humidité relative. Les précisions sur les mesures sont respectivement de $\pm 0,1$ °C et ± 1 %. Le dispositif est également équipé d'un réservoir de 30 L qui reçoit de l'eau distillée destinée à l'alimentation du système d'humidification du conditionneur d'air. Les mesures des masses des échantillons sont faites sur balance électronique de précision de charge maximale 3 g. La précision de lecture sur les mesures est de $\pm 0,01$ g.

2.1.2 Mode opératoire

La teneur en eau d'un produit humide placé dans une ambiance atmosphérique à humidité relative maintenue constante, évolue vers l'équilibre hygroscopique. On estime que cet équilibre hygroscopique est atteint lorsqu'il n'y a plus d'évolution de masse du produit, l'humidité relative de l'air est alors identique à l'activité de l'eau du produit. La relation d'équilibre traduite par l'isotherme de sorption (ou de désorption), est habituellement décrite par une courbe rapportant la teneur en eau moyenne \bar{X}_{eq} du produit étudié en fonction de l'humidité relative e de l'atmosphère qui l'entoure :

$$\bar{X}_{eq} = f\left(\frac{P_v}{P_{v_{sat}}}\right)_{\theta_a} = f(e)_{\theta_a} \quad (1)$$

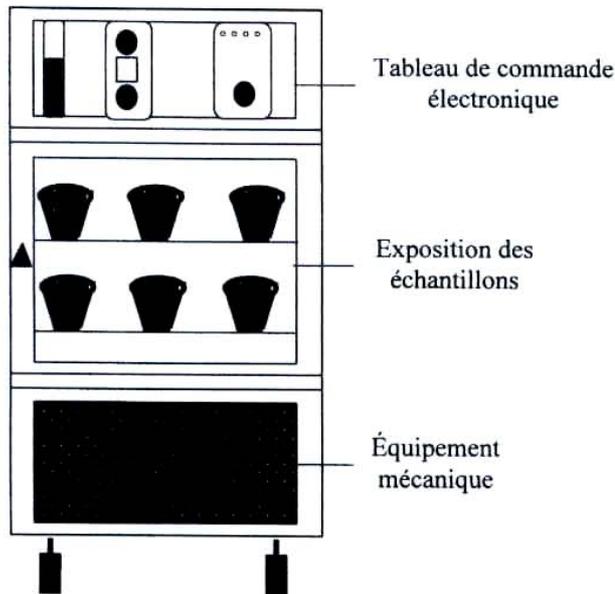


Figure 1a

Enceinte régulée
Regulated chamber

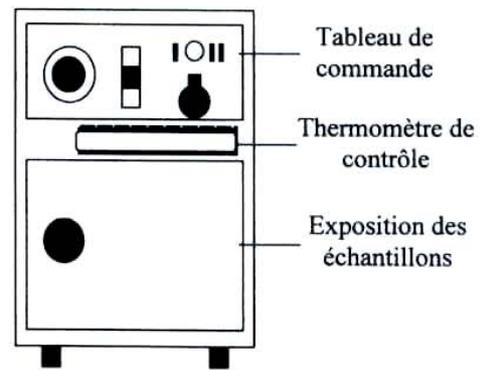


Figure 1b

Four électrique thermostaté
Electric drying oven

Lors de nos expérimentations, les échantillons de la banane et de la mangue, nettoyés, découpés en petits morceaux puis placés dans des coupelles préalablement tarées sont déposés à l'intérieur de l'enceinte climatique. L'ensemble coupelle-échantillon est pesé régulièrement. Au bout de quelques jours, l'équilibre s'établit entre la teneur en eau de l'échantillon et l'ambiance de l'enceinte : la masse de l'échantillon ne varie plus. On obtient ainsi un point de la courbe de sorption. La courbe d'isotherme de sorption d'un produit est déterminée avec plusieurs points d'équilibre. La température étant fixée, nous faisons varier l'humidité relative de 10 à 90 % avec un pas de 10 %.

La masse anhydre du produit est déterminée en plaçant l'échantillon testé dans une enceinte de dessiccation (four électrique thermostaté) à $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 72 h ; on déduit ainsi les différentes teneurs en eau à l'équilibre en base sèche :

$$\bar{X}_i = 100 \left(\frac{m_i}{m_s} - 1 \right) \quad \text{et} \quad \bar{X} = \frac{m_t}{m_i} (\bar{X}_i + 100) - 100 \quad (2)$$

avec m_i : masse du produit à l'instant initial ;
 m_t : masse du produit à l'instant t ;
 m_s : masse anhydre du produit ;
 \bar{X}_i : teneur en eau moyenne du produit en base sèche à l'instant initial ;
 \bar{X} : teneur en eau moyenne du produit en base sèche à l'instant t.

2.2 Cinétique de séchage

2.2.1 Description du dispositif

Les courbes de séchage sont déterminées expérimentalement dans des conditions constantes de température et d'humidité initiales et de vitesse d'écoulement de l'air. Un dispositif expérimental de soufflerie à air humide représentée à la *figure 2*, permet d'avoir un écoulement d'air à caractéristiques aérothermiques bien contrôlées et que l'on peut faire varier au cours de notre étude expérimentale. L'ensemble du dispositif comporte :

- une veine d'essai de section 125 mm × 125 mm et de longueur 200 mm ;
- un ventilateur centrifuge, un convergent à l'entrée de la veine et des déflecteurs installés à l'amont et à l'aval de la veine et destinés à homogénéiser les vitesses du flux d'air, de débit réglable grâce à un anémomètre à fil chaud de type « Testo 425 » et de précision $\pm 0,01 \text{ ms}^{-1}$;
- une grille support de surface 110 mm × 105 mm introduite dans la veine et reliée par un système vis-écrou à une balance électronique de précision $\pm 0,01 \text{ g}$, munie d'une sortie analogique ;
- quatre sondes de mesures thermo-hygrométriques de type K dont une première fixée à l'amont de l'échantillon, une seconde au cœur d'un morceau de produit testé ; les deux dernières servent à la mesure des températures sèche et humide de l'air ambiant ;
- une centrale d'acquisition des données connectée à un micro-ordinateur doté d'un programme de stockage et de traitement des données.

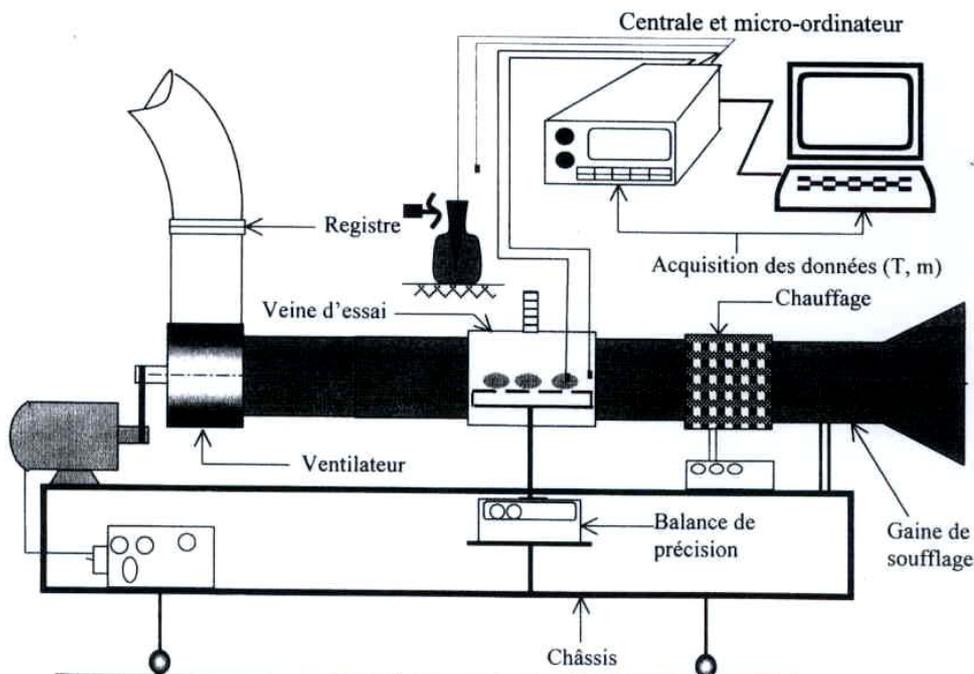


Figure 2

Dispositif expérimental de séchage

Drying apparatus

2.2.2 Procédures

2.2.2.1 Mesures des différents paramètres

Les mesures de température effectuées au moyen des couples thermoélectriques de type K, et de masse au moyen d'une balance électronique, sont acquises en continu au niveau d'un micro-ordinateur via la centrale d'acquisition des données. L'humidité relative de l'air ambiant est mesurée directement au moyen d'un thermo-hygromètre à touche sensible et à affichage numérique. La vitesse d'écoulement de l'air dans la gaine, quant à elle, est mesurée en plaçant la sonde de l'anémomètre à fil chaud au sein de la veine d'essai. Nous faisons varier cette vitesse en créant des cartes de charge au moyen d'un registre à air gradué monté au refoulement du ventilateur.

2.2.2.2 Procédure expérimentale

a) Conditions expérimentales

Le débit d'air fixé, nous mettons en marche le chauffage du système jusqu'à une température de consigne. Les produits à sécher sont disposés sur la grille support en une couche mince placée dans la veine d'essai, parallèlement à l'écoulement de l'air chaud. En raison d'une quantité faible du produit, nous considérons que les caractéristiques de l'air sont constantes le long de la grille. On obtient, à partir des mesures, la variation de masse des échantillons au cours du temps.

Un ensemble de neuf essais a été réalisé sur la banane pour trois valeurs de température (40, 50 et 60 °C) et trois valeurs de vitesse (0,5, 1,0 et 2,0 ms⁻¹). Les températures humides moyennes de l'air séchant valent 30,5, 28,8 et 25,7 °C respectivement à 60, 50 et 40 °C. La densité moyenne de chargement est de 7,96 kgm⁻².

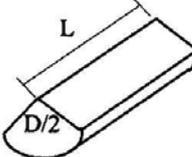
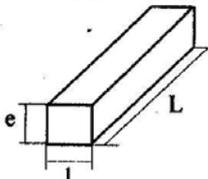
Pour ce qui concerne la mangue, treize essais ont été réalisés avec les mêmes valeurs de température et de vitesse de l'air. Les quatre essais supplémentaires ont permis, en fixant la température et la vitesse d'écoulement de l'air, d'évaluer l'influence des dimensions (largeur) de ce produit sur la vitesse de séchage. Les températures humides moyennes de l'air séchant varient également dans la même proportion que dans le cas des essais sur la banane. La densité moyenne de chargement vaut cependant 8,79 kgm⁻².

b) Présentation des échantillons

Les produits subissent un lavage à eau, avant d'être épluchés et découpés selon la taille et la forme souhaitées. Les bananes utilisées dans tous les essais ont un diamètre variant de 28 à 32 mm ; soit une moyenne de 30 mm. Elles sont découpées transversalement en morceaux de 50 mm puis chaque morceau est fendu longitudinalement en quatre secteurs cylindriques égaux.

Les mangues, en provenance des villages périphériques de Yaoundé, sont découpées en frites (forme de parallélogramme rectangle) de section 10 mm x 10 mm et de longueur 50 mm dans les joues récupérées de chaque côté du trou respectivement plat. Le tableau 1 résume les dimensions et les masses des échantillons.

Tableau 1
 Caractéristiques des produits testés
 Characteristics of the tested products

Produits	Forme	Dimensions moyennes (mm)	Surface initiale (cm ²)	Masse moyenne d'un morceau (g)	Masse anhydre moyenne d'un morceau (g)
Banane		D = 30 L = 50	30,3	13,32	2,67
Mangue		L = 50 l = 10 e = 10	22,0	10,89	1,63

e : épaisseur ; L : longueur ; l : largeur ; D : diamètre.

c) Mesure de la quantité d'eau évaporée

La mesure en continu de la masse d'un produit dispersé sur le plateau d'une balance est affectée par l'action sur le plateau d'une certaine poussée d'air dont la valeur, fonction de la configuration géométrique du support, varie le plus souvent au cours du séchage des produits fortement déformables.

Pour contourner cette difficulté, la solution adoptée par plusieurs expérimentateurs consiste à réaliser les mesures de la masse en discontinu, effectuées lors de l'arrêt du ventilateur. Ces interruptions apportent inévitablement des perturbations et des incertitudes au processus de séchage.

Dans notre étude, les deux techniques de mesure de la masse ont été utilisées. Pour ce qui concerne la méthode de mesure en continu, nous avons vérifié expérimentalement par plusieurs essais que la poussée de l'air est relativement faible et reste approximativement constante ; elle n'induit qu'une translation des courbes de séchage d'une quantité que l'on peut retrancher des masses mesurées. Dans le cas de notre dispositif expérimental (grille support laissant le passage d'air en dessous et au dessus de cette dernière), la surface frontale opposée au flux d'air est, en effet, faible et invariable au cours d'un processus de séchage. L'impact moyen du flux d'air est de 0,2 g. Pour ce qui est de la méthode de mesure en discontinu, les incertitudes liées aux perturbations du processus de séchage par les interruptions de flux ne sont pas de nature à influencer de manière sensible les résultats globaux.

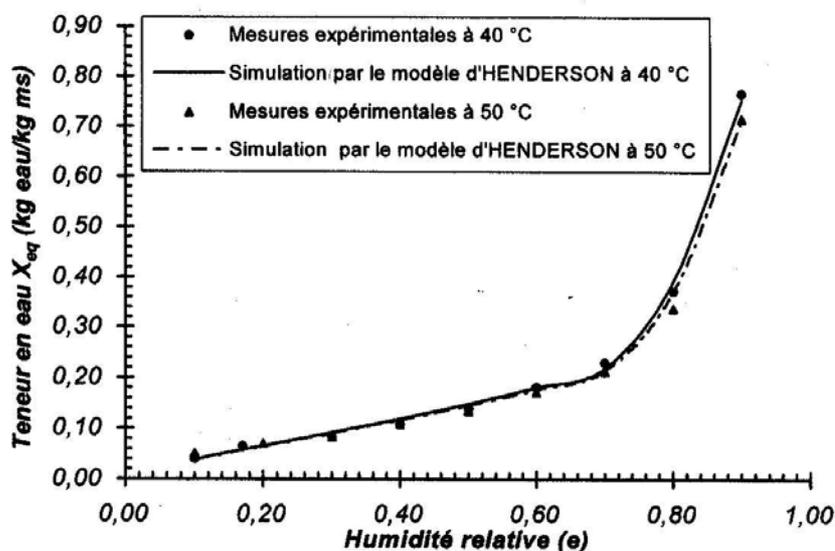


Figure 3

Isothermes de désorption de la banane à 40 °C et 50 °C

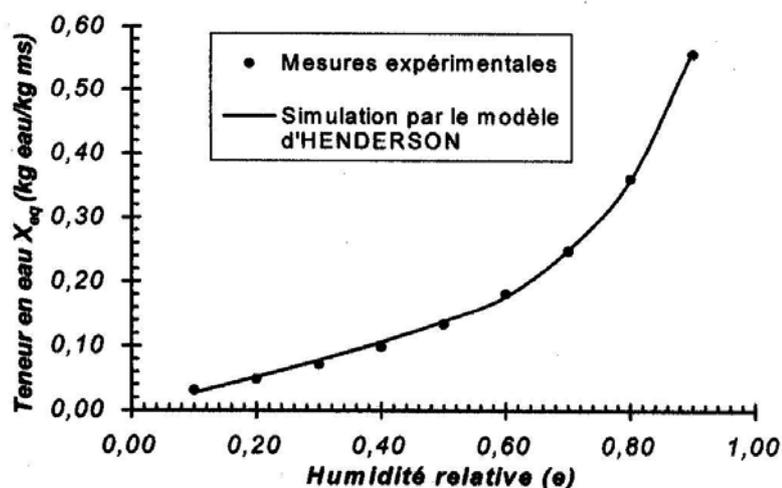
Desorption isotherms for banana at 40°C and 50°C

Figure 4

Isothermes de désorption de la mangue à 50 °C

Desorption isotherm for mango at 50°C

3 - RÉSULTATS

3.1 Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption et de désorption des deux produits étudiés (banane et mangue) sont représentés sur les figures 3 et 4. Les allures de sigmoïde qu'ont ces courbes sont habituelles, particulièrement pour les produits biologiques (BELAHMIDI *et al.*, 1993 ; DESMORIEUX, 1992). Nous avons déterminé

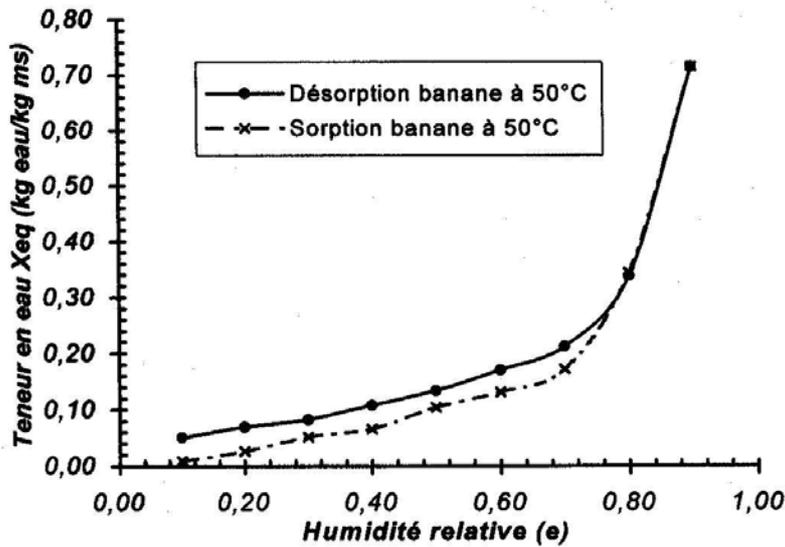


Figure 5

Mise en évidence de l'effet d'hystérésis sur les isothermes de sorption et de désorption de la banane à 50 °C

Absorption-desorption hysteresis for banana at 50°C

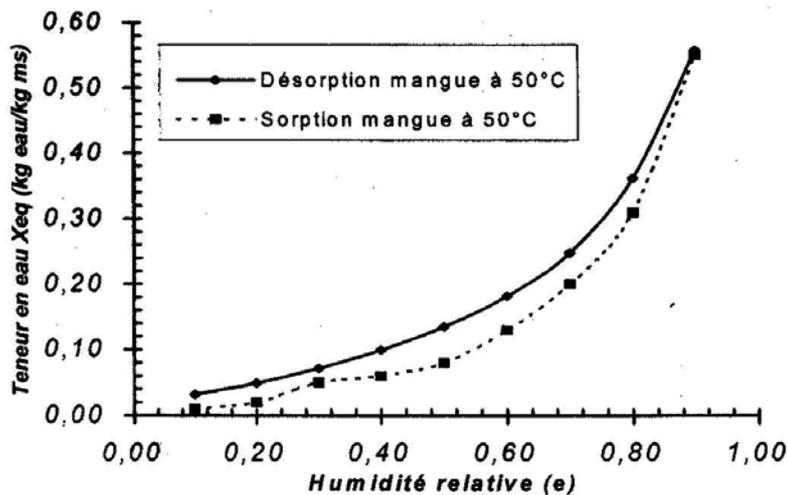


Figure 6

Mise en évidence de l'effet d'hystérésis sur les isothermes de sorption et de désorption de la mangue à 50 °C

Absorption-desorption hysteresis for mango at 50°C

l'influence de la température sur les courbes d'équilibre de la banane, confirmant ainsi les résultats des travaux de AJIBOLA et ADAMS (1986) et BELAHMIDI *et al.* (1993). Toutefois, en dehors de fortes humidités relatives, cette influence reste faible voire négligeable pour un écart de température voisin de 10 °C. De même, comme le montrent la *figure 5* pour la banane et la *figure 6* pour la mangue, nous avons pu mettre en évidence l'effet d'hystérésis avec une valeur de taux d'humidité plus grande en désorption qu'en adsorption pour une même

valeur d'activité de l'eau. Les écarts maximums de 4 % pour la banane et 5 % pour la mangue restent inférieurs à la valeur de 6 % atteinte dans certains cas extrêmes observés dans les travaux de TRICHAİYAPORN (1991) où l'on relève en général une différence maximale de l'ordre de 1 %.

On trouve dans la littérature, à l'exemple des travaux de BIZOT *et al.* (1987), ROSTEIN et CORNISH (1978), NELSON (1983), de nombreuses corrélations pour décrire les isothermes de sorption. Nous avons retenu pour nos travaux, le modèle de HENDERSON (1952) qui présente l'avantage de décrire l'ensemble des isothermes en fonction de la température :

$$1 - e = \exp(-k \cdot T \cdot \bar{X}_{eq}^n) \quad \text{ou} \quad \bar{X}_{eq} = \left[\frac{-\ln(1,00 - e)}{k(\theta + 273,15)} \right]^{1/n} \quad (3)$$

avec k et n , coefficients caractéristiques du produit.

Nous avons déterminé les coefficients k et n par identification de la relation aux courbes expérimentales de désorption, par la méthode de Newton-Raphson. Ces coefficients sont consignés dans le *tableau 2*. À l'aide de ces paramètres, nous obtenons une bonne simulation théorique des isothermes de désorption des deux produits étudiés. Le modèle ne permet cependant pas de couvrir, en une équation, toute la plage des humidités relatives, résultat qui concorde avec les recommandations d'IGLESIAS et CHIRIFE (1982) par rapport à la plage d'humidité relative de $10\% \leq e \leq 80\%$ lors de l'application des modèles de HENDERSON et de HARKINGS et JURA sur les produits agricoles.

Tableau 2

Paramètres de validation du modèle semi-théorique d'HENDERSON

Table 2

Parameters of validation of HENDERSON's semi-theoretical model

Produit	Paramètre k	Paramètre n	Domaine de validité	Écart moyen (kg eau/kg ms)
Mangue	0,0209	1,1545	$0,10 \leq e \leq 0,70$	0,002
	0,0113	0,8010	$0,70 \leq e \leq 0,90$	
Banane	0,0324	1,4030	$0,10 \leq e \leq 0,70$	0,009
	0,0086	0,5497	$0,70 \leq e \leq 0,90$	

3.2 Cinétiques de séchage

3.2.1 Établissement des courbes de séchage

Le terme « courbes de séchage » désigne soit les courbes représentant les variations de la teneur en eau moyenne \bar{X} en fonction du temps t , soit celles donnant la vitesse de séchage $-\frac{d\bar{X}}{dt}$ en fonction de \bar{X} , soit enfin une forme réduite de ces premières et visant à donner une représentation unique pour différentes conditions de séchage. La courbe $\bar{X} = f(t)$ (*figures 7 et 8*) obtenue

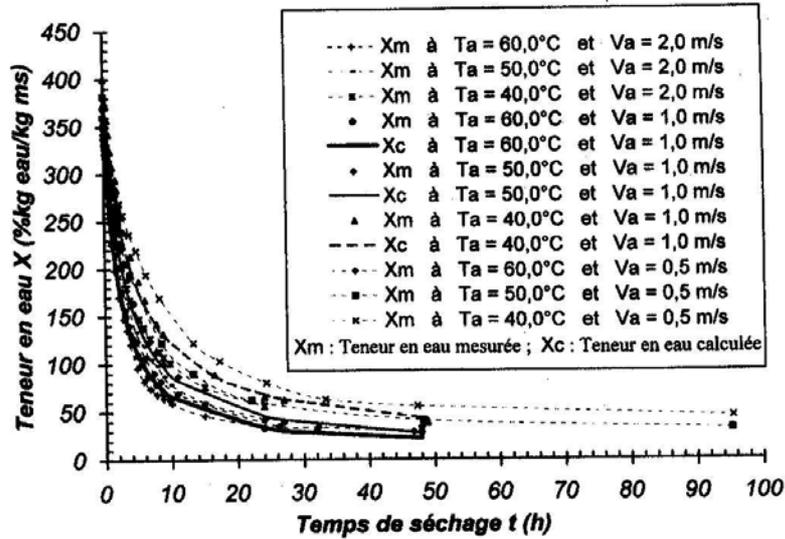


Figure 7

Évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour diverses conditions de l'air pour la banane

Moisture content for different conditions of the air for banana

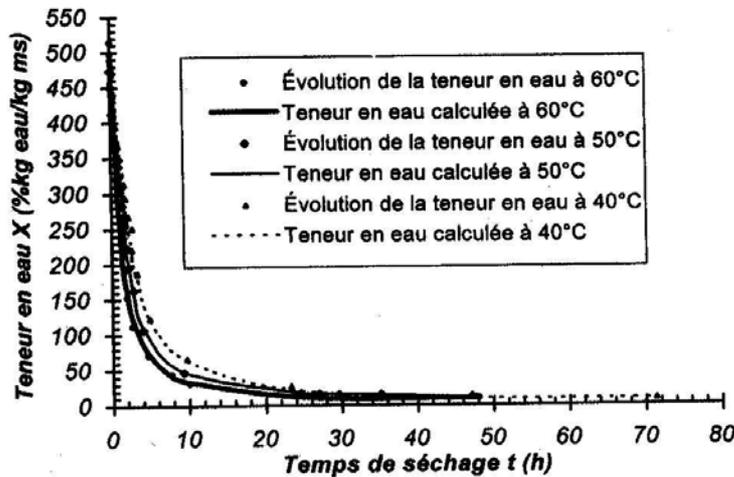


Figure 8

Évolution de la teneur en eau de la mangue en fonction du temps pour diverses températures de l'air à $V_a = 0,5 \text{ ms}^{-1}$

Moisture content of mango for different air temperature in $V_a = 0.5 \text{ ms}^{-1}$

expérimentalement est celle qui contient le plus d'informations. L'obtention de la courbe $-\frac{d\bar{X}}{dt} = f(\bar{X})$ (figures 9 à 12) peut se faire en calculant cette dérivée après lissage de la courbe $\bar{X} = f(t)$ ou directement à partir des points expérimentaux.

Dans la présente étude, nous avons procédé à un calcul numérique point par point par ajustement d'un polynôme d'ordre 2 par la méthode des moindres

carrés sur cinq points de la courbe $\bar{X} = f(t)$. La vitesse de séchage au point médian est ensuite obtenue par dérivation de ce polynôme.

3.2.2 Identification d'une courbe caractéristique de séchage

La méthode de la courbe caractéristique de séchage consiste, pour l'ensemble des conditions expérimentales maintenues constantes pendant toute la durée de l'expérience, à représenter les cinétiques de séchage sous la forme :

$$\left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_r = -\frac{d\bar{X}}{dt} / \left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_i = f(X_r) \quad (4)$$

X_r représente la teneur en eau réduite définie par :

$$X_r = \frac{\bar{X} - \bar{X}_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (5)$$

\bar{X}_{cr} représente la teneur en eau à la transition de la phase à vitesse de séchage constante à la phase à vitesse décroissante ; c'est la teneur en eau critique.

$\left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_i$ est la vitesse de séchage en phase à vitesse constante intervenant

pour $\bar{X}_i \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{cr}$.

$f(X_r)$ est la vitesse de séchage normée.

3.2.2.1 Détermination de la teneur en eau critique

La teneur en eau critique \bar{X}_{cr} est généralement fonction des conditions de séchage. Dans le cas des produits biologiques, plusieurs auteurs (BELAHMIDI *et al.*, 1993 ; DESMORIEUX et MOYNE, 1992 ; FORNELL, 1979), relèvent qu'il est difficile de localiser une première phase de séchage et identifient la teneur en eau critique \bar{X}_{cr} à la teneur en eau initiale \bar{X}_i .

Dans les divers cas étudiés, nous avons pu identifier la phase à vitesse constante et localiser ainsi la teneur en eau critique. En effet dès la première série d'essais (*figures 9 et 10*), nous observons que le premier point expérimental est excentré par rapport aux autres (TALLA, 1999). Les mesures étaient alors prises toutes les 15 min pendant la première heure de séchage. Ce résultat a été confirmé lors de la deuxième série des essais ; la réduction du temps de mesure à 5 min pendant la première heure de séchage (*figures 11 et 12*), permet de montrer clairement une phase à vitesse constante et de ce fait la localisation de la teneur en eau critique. Sa valeur est déterminée graphiquement au point de rupture entre les vitesses de séchage constante et décroissante.

3.2.2.2 Détermination de la vitesse en première phase

Cette vitesse peut être déterminée en utilisant une corrélation qui inclut les conditions aérodynamiques externes et en prenant en compte le caractère déformable des produits biologiques ou en utilisant l'analogie des transferts de chaleur et de masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée. Nous avons dans le cadre de ce travail, identifié graphiquement la vitesse en première phase sur la base du traitement des données expérimentales.

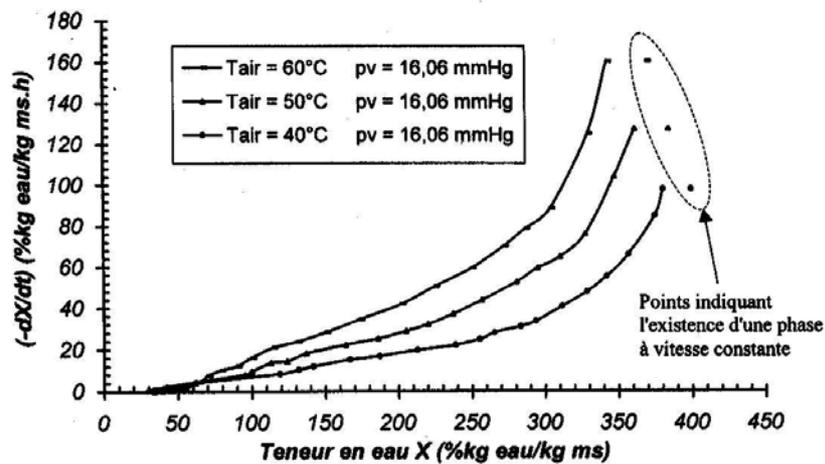


Figure 9

Vitesse de séchage de la banane en fonction de la teneur en eau à différentes températures pour $V_a = 1,0 \text{ ms}^{-1}$ (mesures en discontinu)

Drying rate curve of banana for different air temperatures in $V_a = 1.0 \text{ ms}^{-1}$ (intermittent measures)

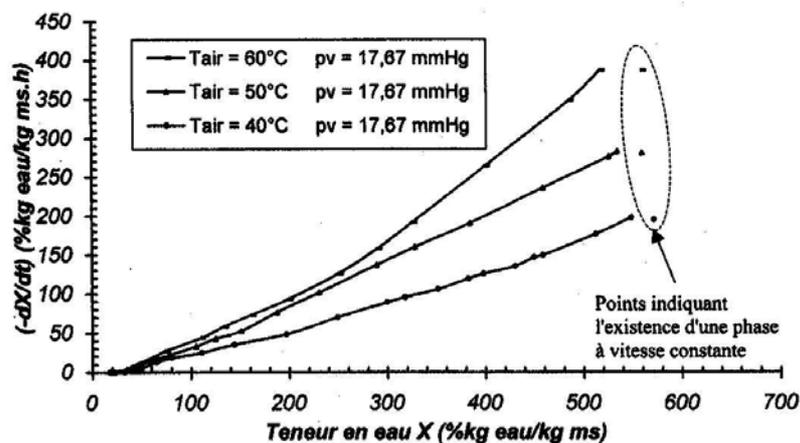


Figure 10

Vitesse de séchage de la mangue en fonction de la teneur en eau à différentes températures pour $V_a = 2,0 \text{ ms}^{-1}$ (mesures en discontinu)

Drying rate curve of mango for different air temperatures in $V_a = 2.0 \text{ ms}^{-1}$ (intermittent measures)

4 - DISCUSSION

4.1 Expression de la courbe caractéristique de séchage

On impose arbitrairement une expression mathématique à la fonction $f(X_r)$; cette fonction doit vérifier les propriétés suivantes :

$$f(X_r) = 0 \text{ pour } X_r = 0 \quad (6)$$

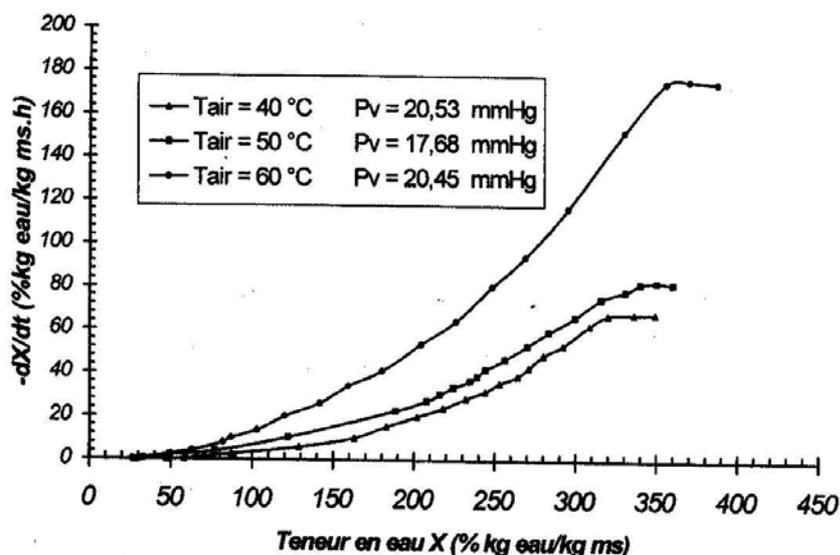


Figure 11

Influence de la température sur les vitesses de séchage de la banane
à $V_a = 0,5 \text{ ms}^{-1}$ (mesures en continu)

*Influence of temperature on drying rate curves for banana at $V_a = 0.5 \text{ ms}^{-1}$
(continuous measures)*

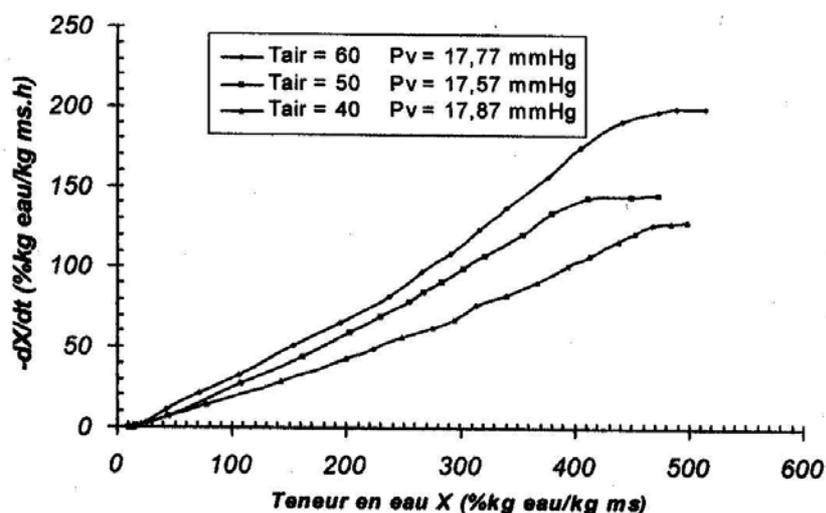


Figure 12

Influence de la température sur les vitesses de séchage de la mangue
à $V_a = 0,5 \text{ ms}^{-1}$ (mesures en continu)

*Influence of temperature on drying rate curves for mango at $V_a = 0.5 \text{ ms}^{-1}$
(continuous measures)*

En général, il est envisagé les fonctions de type polynomial ou de type puissance pour représenter les courbes caractéristiques. Nous avons exploité dans le cadre de cette étude les fonctions puissances présentées sous la forme simple :

$$f(X_r) = X_r^\alpha \quad (7)$$

La vitesse de séchage est alors simulée par la relation :

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = \left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_i X_r^\alpha \quad (8)$$

En intégrant l'équation (8), nous obtenons les expressions de simulation théorique des variations des teneurs en eau moyennes pendant le processus de séchage :

- pour $\alpha = 1$ $\bar{X}(t) = \bar{X}_{eq} + (\bar{X}_{cr} - \bar{X}_{eq}) \exp \left[- \left(\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_i \frac{t}{\bar{X}_{cr} - \bar{X}_{eq}} \right]$ (9)

- pour $\alpha \neq 1$ $\bar{X}(t) = \bar{X}_{eq} + (\bar{X}_{cr} - \bar{X}_{eq}) \left[1 - (1 - \alpha) \left(\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_i \frac{t}{\bar{X}_{cr} - \bar{X}_{eq}} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$ (10)

Le lissage numérique des résultats expérimentaux a permis d'identifier la constante α .

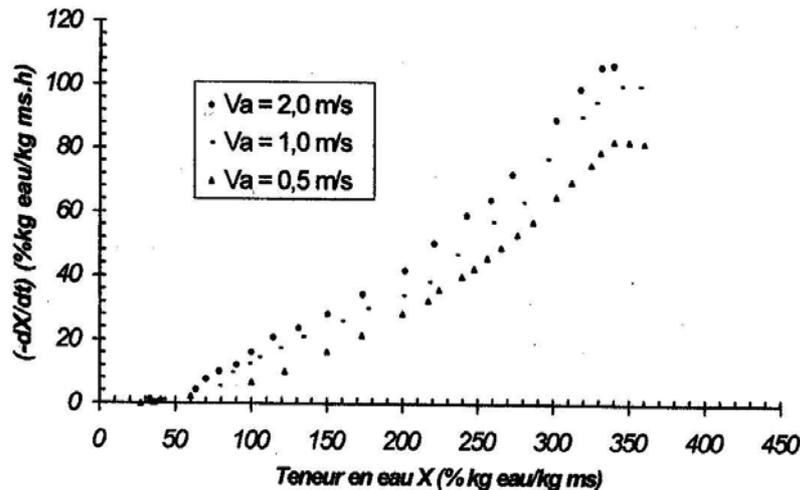


Figure 13

Influence de la vitesse de l'air sur les vitesses de séchage de la banane à $\theta_a = 50^\circ\text{C}$
Influence of air speed on drying rate curves for banana at $\theta_a = 50^\circ\text{C}$

4.2 Cas de la banane

Les figures 11 et 13 représentent les profils des cinétiques pour diverses valeurs de température et de vitesse. Les paramètres α et \bar{X}_{cr} sont identifiés à partir des résultats expérimentaux. Le tableau 3 résume l'ensemble des valeurs moyennes des résultats et des écarts types de cette identification. À partir des courbes de la figure 7, nous avons essayé de trouver une seule courbe caractéristique du séchage, ce qui aurait un grand intérêt pratique. Pour ce faire, nous avons représenté sur la figure 16 les cinétiques de séchage obtenues, en coordonnées réduites, pour différentes conditions de l'air. Ces cinétiques de séchage présentent une phase I à vitesse de séchage constante. Cette figure

montre une faible dispersion autour d'une courbe moyenne déterminée par la relation suivante :

$$\left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_m = X_r^{\alpha_m} \quad \text{et} \quad \alpha_m = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \alpha_j \quad (11)$$

Quelques courbes de séchage recalculées à partir des paramètres identifiés sont, à titre d'exemple, représentées sur la *figure 7*. Pour l'ensemble des essais, le modèle retenu décrit de manière satisfaisante les cinétiques expérimentales.

Les allures de séchage sont sensibles à la vitesse de soufflage avec une importance plus marquée pour des teneurs en eau élevées. En particulier, c'est dans la phase I que son effet est plus marqué. En revanche, une augmentation de la température entraîne une évolution dans le même sens de la vitesse de séchage avec une diminution de la durée de séchage. Ces figures montrent que l'effet de l'augmentation de la température l'emporte sur l'influence exercée par l'évolution de la vitesse de l'écoulement.

Bien que notre dispositif expérimental ne permette pas de fixer les valeurs exactes pour l'humidité relative de l'air, la littérature indique que son action n'est sensible que si la phase de séchage à allure constante existe (LAGUERRE, 1986).

Tableau 3

Identification des paramètres des équations de la cinétique de séchage du modèle retenu

Table 3

Identification of the kinetics of drying parameters of the model used

Produit		X_{im} (% kg eau/kg ms)	X_{crm} (% kg eau/kg ms)	X_{eqm} (% kg eau/kg ms)	α
Banane	Valeur	374,0	355,0	7,5	2,269
	Écart type	16,2	15,5	2,3	0,17
Mangue	Valeur	518,0	469,3	5,7	1,304
	Écart type	51,9	44,2	2,9	0,11

4.3 Cas de la mangue

Ce produit a des teneurs en eau relativement plus élevées que celles de la banane et se déforme fortement au cours du séchage. Les *figures 8, 12 et 14* montrent quelques allures de séchage obtenues pour différentes conditions de l'air. Comme pour le cas de la banane, la première phase de séchage où la vitesse d'évaporation est constante est bien mise en évidence.

Nous notons également d'après ces cinétiques, que l'influence des caractéristiques de l'air est importante, notamment au début du séchage lorsque la surface du produit est bien mouillée. L'influence de la vitesse d'écoulement ainsi que la température de l'air sont remarquables comme le montrent les *figures 12 et 14*.

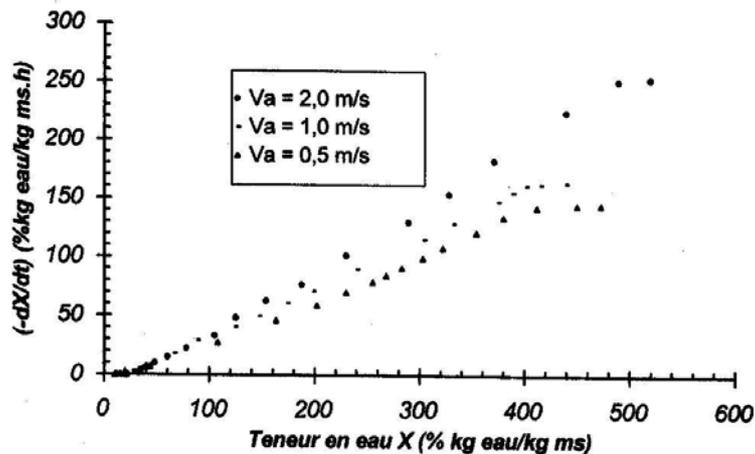


Figure 14

Influence de la vitesse de l'air sur les vitesses de séchage de la mangue à $\theta_a = 50^\circ\text{C}$
Influence of air speed on drying rate curves for mango at $\theta_a = 50^\circ\text{C}$

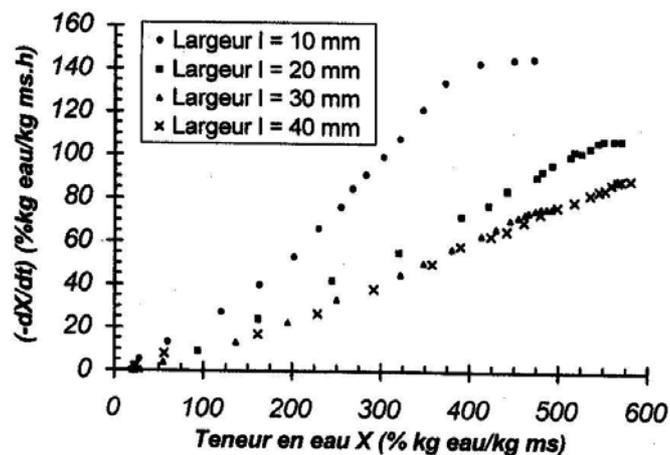


Figure 15

Influence des dimensions (largeur) de la mangue sur les vitesses de séchage
à $\theta_a = 50^\circ\text{C}$ et $V_a = 0,5\text{ ms}^{-1}$
*Influence of dimensions (width) of mango on the drying rate curves at $\theta_a = 50^\circ\text{C}$
and $V_a = 0,5\text{ ms}^{-1}$*

La mise en évidence de l'influence de la taille du produit est obtenue en changeant, d'un essai à l'autre, la largeur des morceaux de mangue avec les caractéristiques de l'air maintenues constantes. La *figure 15* illustre cet effet sur la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit.

L'utilisation de la cinétique de séchage dans la modélisation se fait sous forme adimensionnelle en appliquant les équations (4), (5) et (10). Le *tableau 3* présente les valeurs moyennes des paramètres α et \bar{X}_{cr} identifiés à partir des résultats expérimentaux avec leurs écarts types. La *figure 17* présente quelques cinétiques de la mangue en coordonnées réduites. On note également sur cette figure une faible dispersion autour d'une courbe moyenne définie par la relation (11). Cette courbe

représente la courbe caractéristique de séchage de la mangue. Cette équation tient compte de la vitesse initiale de séchage $(-d\bar{X}/dt)_{im}$, moyenne des vitesses de première phase de séchage, qui dépendent des conditions aérodynamiques externes. Ces vitesses sont déduites graphiquement à partir des mesures expérimentales.

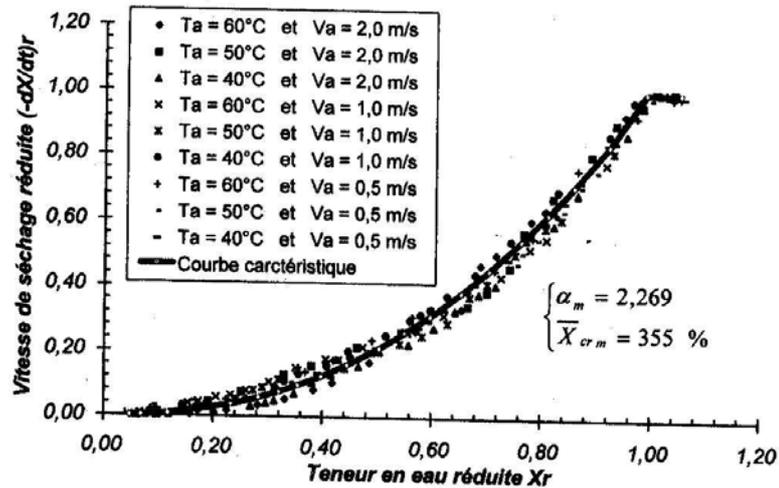


Figure 16

Courbe caractéristique du séchage de la banane obtenue pour différents essais
Drying characteristic curve of banana obtained after different experiments

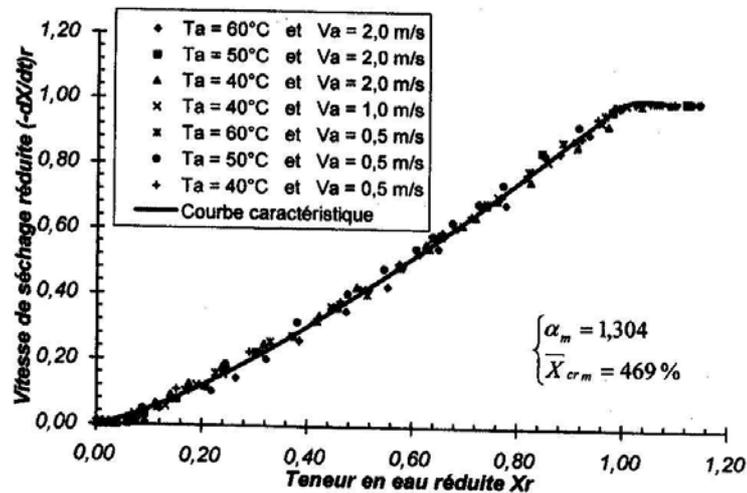


Figure 17

Courbe caractéristique du séchage de la mangue obtenue pour différents essais
Drying characteristic curve of mango obtained after different experiments

5 - CONCLUSION

Les isothermes d'adsorption/désorption de la banane et de la mangue ont été obtenues en utilisant la méthode gravimétrique dynamique. Les résultats

montrent qu'on peut sécher ces deux produits jusqu'à une teneur en eau inférieure 0,20 kg eau/kg ms dans une ambiance où le degré hygrométrique atteint 60 %. Les résultats obtenus ont été simulés par le modèle semi-empirique de HENDERSON.

Par ailleurs ces travaux ont permis, par le modèle simplifié de courbe caractéristique de séchage, de mettre en évidence l'influence des différents paramètres aérothermiques sur le processus de séchage de ces produits. Les corrélations empiriques décrivant leurs caractéristiques ont été en outre établies. Ces résultats permettent d'optimiser le dimensionnement des séchoirs adaptés au séchage de ces fruits tropicaux.

NOMENCLATURE

Symboles	Désignation	Unités
D	Diamètre moyen du produit	m
e	Humidité relative de l'air	—
k, n	Coefficients caractéristiques du produit	—
L	Longueur du produit	m
l	Largeur du produit	m
m	Masse du produit	kg
ms	Matière sèche	—
p	Nombre d'essais réalisés pour chaque produit	—
P_v	Pression de vapeur à la surface du produit	P_a
P_{vsat}	Pression de vapeur saturante à la température de l'air en surface du produit	P_a
T	Température absolue de l'air	$^{\circ}K$
t	Temps écoulé	s
V	Vitesse d'écoulement de l'air dans la veine de séchage	ms^{-1}
\bar{X}	Teneur en eau moyenne du produit en base sèche	$\% \text{ kg eau/kg ms}$
α	Coefficient caractéristique du séchage du produit	—
θ	Température de l'air	$^{\circ}C$
Indices	Désignation	
a	Ambiant	
cr	Critique	
eq	Équilibre (relatif à l'isotherme de sorption du produit)	
i	Initial	
l	Première phase	

<i>j</i>	Numéro d'essai
<i>m</i>	Moyenne
<i>r</i>	Réduite
<i>s</i>	Sèche
<i>t</i>	Instant de mesure

Reçu le 2 avril 2001, accepté le 8 octobre 2001.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AJIBOLA O.O., ADAMS B.A., 1986. Desorption equilibrium moisture content of cassava at several temperatures. *Inter. Agrophysics*, **2**, 235-239.
- BELAHMIDI E., BELGHIT A., MRANI A., MIR A., KAOUA M., 1993. Approche expérimentale de la cinétique du séchage des produits agroalimentaires : application aux peaux d'oranges et à la pulpe de betterave. *Rev. Gén. Therm.*, 380-381, 444-453.
- BIMBENET J.J., 1978. Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires. *Cahiers du Génie Industriel Alimentaire*, SEPAIC, Paris.
- BIZOT H., RIOU N., MULTON J.L., 1987. Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau. *Sci. Aliments*, Hors série.
- DESMORIEUX H., 1992. Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique à partir des réalités géographiques et humaines. Thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique de Lorraine.
- DESMORIEUX H., MOYNE C., 1992. Analysis of dryers performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. *In: Drying 92*, Elsevier Amsterdam, 834-843.
- FORNELL A., 1979. Séchage de produits biologiques par l'air chaud : calcul de séchoirs. Thèse de Doctorat de l'École nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires, Montpellier.
- HENDERSON S.M., 1952. A basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Eng. St Joseph*, **33**, 29-32.
- IGLESIAS H.A., CHIRIFE J., 1982. Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components. Academic Press, New York.
- LAGUERRE J.C., 1986. Influence de l'histoire du produit sur la cinétique de séchage : variation de l'humidité de l'air. Mémoire de DEA, Ensia, Massy.
- Ministère de l'Agriculture, 1986. L'agriculture camerounaise en chiffres. Yaoundé, Cameroun.
- NELSON R.M. Jr, 1983. A model for sorption of water by cellulosic materials. *Wood and Fiber Science*, **15**, 8-22.
- ROSTEIN E., CORNISH A.R.H., 1978. Prediction of sorptional equilibrium relationship for drying foodstuffs. *AIChE J.*, **24**, 956-966.
- TALLA A., 1999. Étude expérimentale des propriétés thermophysiques des fruits tropicaux en vue de leur séchage : application à la banane, la mangue et la papaye. Mémoire de DEA, ENSP, Yaoundé.
- TRICHAIYAPORN S., 1991. Contribution à l'étude du séchage en discontinu de sucre cristallin en lit fluidisé. Thèse de Doctorat de l'INPT.