

---

# Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo

Clément AHOUANNOU<sup>1</sup>, Yves JANNOT<sup>1</sup>, Bernard LIPS<sup>2\*</sup>, André LALLEMAND<sup>2</sup>

---

## SUMMARY **Characterisation and modelisation of drying of three tropical products: cassava, ginger and okros.**

An experimental study of convection drying in thin layers of three products (cassava, ginger and okros) using a heated wind tunnel has been carried out. Thermodynamic behaviour of these products was determined for different temperatures (40°C and 55°C), different air velocities (0.5 m·s<sup>-1</sup> – 3 m·s<sup>-1</sup>) and at air moisture content of 15 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>. The characteristic parameters of drying are obtained using the drying characteristic curves (CCS). Semi-empirical correlations have been established to represent the experimental curves obtained for drying tests and sorption isotherms which are determined with the gravimetric method (discontinued control of samples weight).

**Key-words:** *drying, kinetic, sorption isotherms, modelling, foodstuffs.*

## RÉSUMÉ

Une étude expérimentale du séchage par convection forcée, en couche mince (0,5 à 3 cm d'épaisseur) a été réalisée sur trois produits agricoles (le manioc, le gingembre et le gombo) à l'aide d'une soufflerie à conditions aérauliques et thermiques contrôlées. Cette étude a permis d'apprécier le comportement thermodynamique des produits pour différentes conditions de séchage (température de l'air de séchage 40 et 55 °C, vitesses d'écoulement 0,5 à 3 m·s<sup>-1</sup>, humidité absolue d'environ 15 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>) et d'identifier les meilleures valeurs des paramètres caractéristiques du séchage par la méthode de la Courbe Caractéristique Séchage (CCS). Il a été établi des corrélations semi-empiriques qui permettent d'approcher au mieux les courbes expérimentales obtenues lors des essais de séchage et de l'étude des isothermes de désorption obtenues par la méthode gravimétrique à contrôle discontinu du poids de l'échantillon.

**Mots clés :** *séchage, cinétique, isothermes de désorption, modélisation, agro-alimentaires tropicaux.*

- 
1. Laboratoire d'énergétique, École nationale supérieure polytechnique, BP 8390, Yaoundé, Cameroun.
  2. Centre de thermique de Lyon (CETHIL), Institut national des sciences appliquées de Lyon, Bât. 404, 20 avenue Albert Einstein. 69621, Villeurbanne cedex, France.

\* Correspondance  
lips@genserver.insa-lyon.fr

## 1 - INTRODUCTION

Dans de nombreuses zones tropicales, des sources potentielles d'aliments existent, mais sont mal exploitées faute de moyens de conservation. En Afrique subsaharienne, la culture du manioc, du gingembre et du gombo occupe une place importante dans la production des cultures vivrières. Elle participe fortement à l'alimentation de base, pour la majorité des populations ou du bétail. Les pertes après récolte sont considérables. Elles s'élèvent à plus de 25 % pour certains produits et sont occasionnées par le mode de conservation.

Le séchage des produits agroalimentaires constitue un moyen approprié pour freiner ces pertes et étendre la consommation aux périodes de non-production. Ce procédé facilite également le transport des aliments vers les centres urbains.

Le séchage est une opération largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire, mais de façon artisanale par les agriculteurs africains. Ce processus qui permet de stabiliser le produit par abaissement de l'activité de l'eau (IGLESIAS et CHIRIFE, 1982), doit respecter un certain nombre de critères de qualité du produit. La prévision de la cinétique de séchage des produits agricoles est alors indispensable pour concevoir une installation de séchage ou pour déterminer les conditions optimales de son fonctionnement (DAUDIN et BIMBENET, 1982). Si les travaux relatifs au séchage des produits agroalimentaires tels la pomme de terre, le café, le cacao, la betterave, le riz, le maïs ont été largement développés au cours des dernières années, il n'en est pas de même pour certains produits tropicaux, en particulier le gingembre, le manioc et le gombo pour lesquels très peu d'articles existent à notre connaissance.

Plusieurs travaux ont montré que l'histoire du produit, son environnement et le pré-traitement ont une influence notable sur son comportement thermophysique. L'état actuel des connaissances permet de décrire parfaitement les phénomènes intervenant au cours du séchage (BIMBENET, 1978 ; FORNELL, 1979 ; MOYNE, 1982) : les transferts d'eau et de chaleur dans le produit et autour de celui-ci, le transfert de solutés et d'arômes, la déformation du produit, etc. Cependant il est impossible de prévoir la courbe de séchage d'un produit qui tiendrait compte de l'influence respective de ces phénomènes au cours du traitement. Le seul moyen de connaître la cinétique de séchage est donc de la mesurer (DAUDIN et BIMBENET, 1982).

Le premier objectif de cette étude est la détermination expérimentale des isothermes de désorption des trois produits vivriers que sont le manioc, le gingembre et le gombo, par la méthode gravimétrique à contrôle discontinu du poids de l'échantillon, avec une étuve ventilée régulée en température et en hygrométrie.

Le deuxième objectif vise à obtenir la cinétique de séchage des produits étudiés à l'aide d'une soufflerie de séchage et à définir des lois semi-empiriques qui permettront de reproduire les différentes courbes expérimentales de séchage.

## 2 - ISOTHERME DE DÉSORPTION

Tout produit humide doit être considéré, schématiquement, comme un système biphasé comprenant une certaine quantité d'eau adsorbée par un substrat sec (MAFART, 1981).

De ce fait, l'étape indispensable dans tout procédé de séchage d'un produit, qu'il soit un milieu poreux ou non, est l'évaluation de son caractère hygroscopique, qui indique l'affinité que peut avoir le matériau avec l'eau contenue dans son milieu environnant. Dans une ambiance atmosphérique donnée, l'équilibre hygroscopique d'un produit est atteint lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre les deux milieux. Les équilibres successifs permettent d'obtenir les points des isothermes de sorption, qui en fait, sont indispensables pour fixer les différents paramètres de séchage, de conservation, d'emballage et de stockage des produits agroalimentaires (SALGADO, 1988 ; XIAO, 1998). La relation d'équilibre s'écrit :

$$X_{eq} = f\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) = f(a_w)_{T_s} \quad (1)$$

$X_{eq}$  : teneur en eau du produit en équilibre avec son milieu environnant ;

$a_w = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$  : activité de l'eau dans le produit ou humidité relative de l'air en équilibre ;

$P_v$  : pression de vapeur à la surface du produit ;

$P_{v,sat}$  : pression de vapeur saturante à la température du système ;

$T_s$  : température d'équilibre du système.

Pour les produits biologiques, les courbes de sorption ont le plus souvent des allures de sigmoïde (DESMORIEUX, 1992).

### 2.1 Expérimentation

Le matériel utilisé pour la détermination des isothermes de désorption est une étuve climatique ventilée (L = 0,90 m, l = 0,90 m, H = 1,90 m) et régulée en température et humidité relative de l'air. La précision de la régulation est de l'ordre de 0,1 °C pour la température et de 1 % pour l'hygrométrie. La mesure des paramètres d'essais s'effectue sur l'air brassé à l'intérieur de l'étuve. Lorsqu'une ambiance est établie, elle permet de déterminer par pesée un point de l'isotherme de sorption.

Les échantillons testés ont été obtenus avec des produits achetés sur les marchés de la ville de Yaoundé. Ils sont préparés comme décrit dans le *tableau 1*, puis placés dans de petits paniers (6 cm × 4 cm × 1,5 cm) en grillage plastique posés sur des clayettes en acier inoxydable à l'intérieur de l'étuve. L'ensemble échantillon et contenant séjourne dans l'étuve dans une ambiance préalablement établie. Une balance de précision ( $\pm 0,01$  g) est utilisée pour peser les échantillons des produits toutes les 24 h, jusqu'à obtention de masses constantes. On obtient ainsi un point de la courbe de désorption de chacun des

## 1 - INTRODUCTION

Dans de nombreuses zones tropicales, des sources potentielles d'aliments existent, mais sont mal exploitées faute de moyens de conservation. En Afrique subsaharienne, la culture du manioc, du gingembre et du gombo occupe une place importante dans la production des cultures vivrières. Elle participe fortement à l'alimentation de base, pour la majorité des populations ou du bétail. Les pertes après récolte sont considérables. Elles s'élèvent à plus de 25 % pour certains produits et sont occasionnées par le mode de conservation.

Le séchage des produits agroalimentaires constitue un moyen approprié pour freiner ces pertes et étendre la consommation aux périodes de non-production. Ce procédé facilite également le transport des aliments vers les centres urbains.

Le séchage est une opération largement utilisée dans l'industrie agroalimentaire, mais de façon artisanale par les agriculteurs africains. Ce processus qui permet de stabiliser le produit par abaissement de l'activité de l'eau (IGLESIAS et CHIRIFE, 1982), doit respecter un certain nombre de critères de qualité du produit. La prévision de la cinétique de séchage des produits agricoles est alors indispensable pour concevoir une installation de séchage ou pour déterminer les conditions optimales de son fonctionnement (DAUDIN et BIMBENET, 1982). Si les travaux relatifs au séchage des produits agroalimentaires tels la pomme de terre, le café, le cacao, la betterave, le riz, le maïs ont été largement développés au cours des dernières années, il n'en est pas de même pour certains produits tropicaux, en particulier le gingembre, le manioc et le gombo pour lesquels très peu d'articles existent à notre connaissance.

Plusieurs travaux ont montré que l'histoire du produit, son environnement et le pré-traitement ont une influence notable sur son comportement thermophysique. L'état actuel des connaissances permet de décrire parfaitement les phénomènes intervenant au cours du séchage (BIMBENET, 1978 ; FORNELL, 1979 ; MOYNE, 1982) : les transferts d'eau et de chaleur dans le produit et autour de celui-ci, le transfert de solutés et d'arômes, la déformation du produit, etc. Cependant il est impossible de prévoir la courbe de séchage d'un produit qui tiendrait compte de l'influence respective de ces phénomènes au cours du traitement. Le seul moyen de connaître la cinétique de séchage est donc de la mesurer (DAUDIN et BIMBENET, 1982).

Le premier objectif de cette étude est la détermination expérimentale des isothermes de désorption des trois produits vivriers que sont le manioc, le gingembre et le gombo, par la méthode gravimétrique à contrôle discontinu du poids de l'échantillon, avec une étuve ventilée régulée en température et en hygrométrie.

Le deuxième objectif vise à obtenir la cinétique de séchage des produits étudiés à l'aide d'une soufflerie de séchage et à définir des lois semi-empiriques qui permettront de reproduire les différentes courbes expérimentales de séchage.

## 2 - ISOTHERME DE DÉSORPTION

Tout produit humide doit être considéré, schématiquement, comme un système biphasé comprenant une certaine quantité d'eau adsorbée par un substrat sec (MAFART, 1981).

De ce fait, l'étape indispensable dans tout procédé de séchage d'un produit, qu'il soit un milieu poreux ou non, est l'évaluation de son caractère hygroscopique, qui indique l'affinité que peut avoir le matériau avec l'eau contenue dans son milieu environnant. Dans une ambiance atmosphérique donnée, l'équilibre hygroscopique d'un produit est atteint lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre les deux milieux. Les équilibres successifs permettent d'obtenir les points des isothermes de sorption, qui en fait, sont indispensables pour fixer les différents paramètres de séchage, de conservation, d'emballage et de stockage des produits agroalimentaires (SALGADO, 1988 ; XIAO, 1998). La relation d'équilibre s'écrit :

$$X_{eq} = f\left(\frac{P_v}{P_{v,sat}}\right) = f(a_w)_{T_s} \quad (1)$$

$X_{eq}$  : teneur en eau du produit en équilibre avec son milieu environnant ;

$a_w = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$  : activité de l'eau dans le produit ou humidité relative de l'air en équilibre ;

$P_v$  : pression de vapeur à la surface du produit ;

$P_{v,sat}$  : pression de vapeur saturante à la température du système ;

$T_s$  : température d'équilibre du système.

Pour les produits biologiques, les courbes de sorption ont le plus souvent des allures de sigmoïde (DESMORIEUX, 1992).

### 2.1 Expérimentation

Le matériel utilisé pour la détermination des isothermes de désorption est une étuve climatique ventilée (L = 0,90 m, l = 0,90 m, H = 1,90 m) et régulée en température et humidité relative de l'air. La précision de la régulation est de l'ordre de 0,1 °C pour la température et de 1 % pour l'hygrométrie. La mesure des paramètres d'essais s'effectue sur l'air brassé à l'intérieur de l'étuve. Lorsqu'une ambiance est établie, elle permet de déterminer par pesée un point de l'isotherme de sorption.

Les échantillons testés ont été obtenus avec des produits achetés sur les marchés de la ville de Yaoundé. Ils sont préparés comme décrit dans le *tableau 1*, puis placés dans de petits paniers (6 cm × 4 cm × 1,5 cm) en grillage plastique posés sur des clayettes en acier inoxydable à l'intérieur de l'étuve. L'ensemble échantillon et contenant séjourne dans l'étuve dans une ambiance préalablement établie. Une balance de précision ( $\pm 0,01$  g) est utilisée pour peser les échantillons des produits toutes les 24 h, jusqu'à obtention de masses constantes. On obtient ainsi un point de la courbe de désorption de chacun des

échantillons, grâce à la mesure de la masse finale en équilibre avec l'ambiance intérieure de l'étuve.

**Tableau 1**  
Caractéristiques des échantillons testés

**Table 1**  
*Characteristics of the samples tested*

	Manioc en cossettes	Gingembre	Gombo
Pré-traitement	épluché, lavé, égoutté et découpé	lavé, égoutté et découpé en tranches	lavé, égoutté et découpé en rondelles
Forme approximée	1/4 de cylindre	Parallélépipèdes	Disque
Dimensions moyennes	$R_{\text{moy.}} = 2,5$ cm épais. = 2 à 3 cm	$L_{\text{moy.}} = 2$ à 3 cm $l_{\text{moy.}} = 0,8$ à 1,2 cm épais. = 0,4 à 0,6 cm	$R_{\text{moy.}} = 1,8$ à 2 cm épais. = 0,5 à 0,7 cm
Densité d'étalement sur la clayette	3 à 4 morceaux	10 à 15 morceaux	10 à 15 morceaux
Surface spécifique ( $S^*$ ) du produit	0,090 à 0,100 m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup>	0,375 à 0,450 m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup>	0,450 à 0,500 m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup>

L'obtention du premier point de l'isotherme de désorption est souvent très longue. Elle a duré en moyenne 175 h. Pour les autres points, le temps pour que la masse de l'échantillon se stabilise est en moyenne de 100 h.

L'isotherme de désorption du produit est définie à partir de plusieurs points obtenus pour des humidités relatives différentes variant entre 90 % et 15 %.

Après l'identification du dernier point de l'isotherme de désorption (humidité relative de l'air à 15 %), l'échantillon de produit utilisé est placé dans une étuve ventilée portée à 103 °C ± 2 K. Il est pesé toutes les 6 h. Au bout de 24 h le poids de l'échantillon ne varie plus, il correspond à la masse anhydre ( $m_s$ ) de l'échantillon. À partir de cette valeur  $m_s$ , la teneur en eau initiale de l'échantillon est calculée par l'équation (2), puis les différentes valeurs de la teneur en eau à l'équilibre, en base sèche, qui correspondent aux différents points de l'isotherme de désorption sont déduites de l'équation (3).

$$X_o = \frac{m_o}{m_s} - 1 \quad (2)$$

$$X_{eq} = \frac{m(1 + X_o)}{m_o} - 1 \quad (3)$$

Dans ces équations,  $m$  est la masse de l'échantillon du produit, les indices : o et s étant mis pour initial et anhydre.

## 2.2 Résultats et discussion

On trouve dans la littérature beaucoup de modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques qui permettent de reproduire les isothermes de sorption

obtenues expérimentalement, avec une précision relative plus ou moins bonne (IGLESIAS et CHIRIFE, 1982 ; BIZOT *et al.*, 1987 ; DA-WEN SUN WOODS *et al.*, 1994).

Cependant, très peu d'études semblent avoir été réalisées, dans ce domaine, sur les produits vivriers tropicaux tels que les fruits et les racines (le gombo, le gingembre et le manioc...). Citons les travaux de WOLF *et al.* (1972), puis de AJIBOLA et ADAMS (1986), respectivement sur le gingembre à 5, 25 et 45 °C et le manioc à 30, 40, 50 et 60 °C.

Certains auteurs s'accordent pour affirmer que dans la plage de 25 à 60 °C, la température n'a pas une influence significative sur l'isotherme de désorption (LADIPO, 1988 ; BELAHMIDI *et al.*, 1993). Inversement, la synthèse bibliographique qui a été présentée par IGLESIAS et CHIRIFE (1982), sur les travaux des isothermes de sorption et particulièrement pour les produits tropicaux (cas du gingembre), montre que les isothermes de sorption sont plus ou moins fonction de la température. Les travaux de AJIBOLA et ADAMS (1986), AGUERRE (1989) et SALGADO *et al.* (1994) aboutissent à la même conclusion.

Dans le cadre de notre étude, plusieurs modèles ont été testés pour reproduire les isothermes de désorption des trois produits agroalimentaires. Le modèle de HENDERSON modifié par THOMPSON (1967) (tableau 2) permet un parfait accord avec les isothermes de désorption du manioc, tandis que celui d'OSWIN modifié par CHEN et MOREY (1989) (tableau 2) permet de reproduire celles du gingembre et du gombo (figure 1).

**Tableau 2**

Identification des paramètres des modèles pour la détermination théorique des isothermes de désorption

**Table 2**

Identification of the parameters of the isotherms desorption models

Modèles	Corrélations	Paramètres du modèle
HENDERSON modifié	$X_{eq} = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A(T_s + B)} \right]^{1/C}$ (4)	<b>Manioc</b> A = -1,1 × 10 <sup>-7</sup> B = -400 C = 1,66
OSWIN modifié	$X_{eq} = \frac{A + BT_s}{\left( \frac{1}{a_w} - 1 \right)^{1/C}}$ (5)	<b>Gombo</b> A = 9 B = 2,5 × 10 <sup>-5</sup> C = 1,55
		<b>Gingembre</b> A = 9,5 B = 12,5 × 10 <sup>-5</sup> C = 2,0

Ces modèles comportent trois paramètres A, B, et C dont les valeurs spécifiques, pour chaque produit, sont identifiées par régression linéaire, à partir des résultats expérimentaux. La figure 1 montre que ces modèles, dont les expressions et les valeurs des paramètres sont fournies dans le tableau 2, donnent une bonne représentation des isothermes de désorption des produits étudiés.

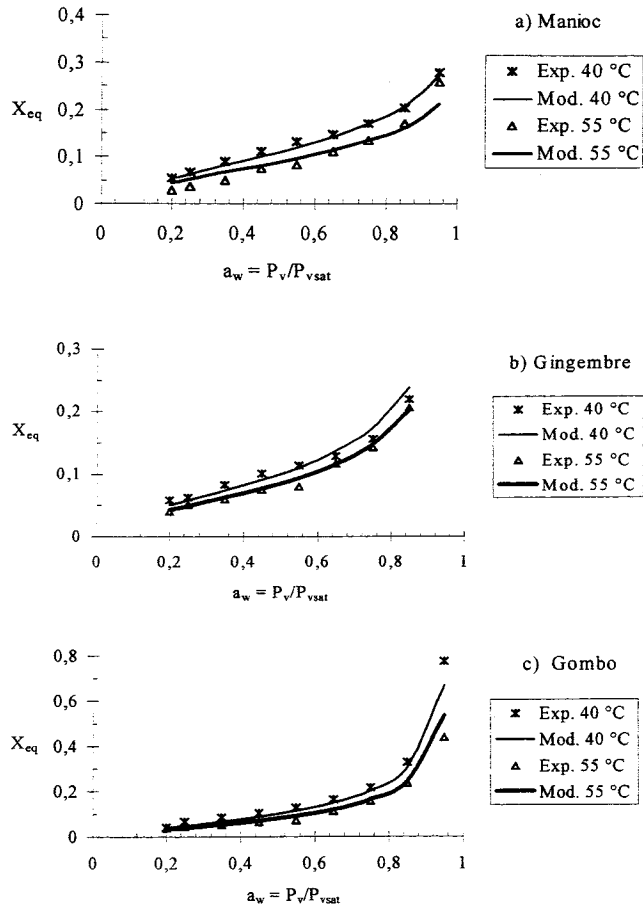


Figure 1

Isothermes de désorption du manioc, gingembre et gombo

Desorption isotherms of cassava, ginger and okros

- a) modèle de Henderson modifié  
 b) modèle d'Oswin modifié  
 c) modèle d'Oswin modifié

### 3 - CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Au cours d'un processus de séchage, les transferts de chaleur et de masse sont complexes. L'énergie d'activation est souvent apportée par le biais d'un

transfert convectif à l'aide d'un gaz chaud, mais peut transiter également par conduction dans le milieu ou par rayonnement. Simultanément, l'eau migre de l'intérieur vers l'extérieur du produit, sous forme liquide ou sous forme vapeur selon la température et le taux d'humidité. Elle est ensuite évacuée par convection naturelle ou forcée vers le milieu extérieur.

Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. La complexité des mécanismes mis en jeu et le caractère éminemment variable des produits (nature, forme, propriétés physiques) empêchent de tabler sur un modèle unique qui serait susceptible de représenter toutes les situations de séchage. Dans cet article, nous nous proposons d'étudier expérimentalement le séchage en couche mince du manioc, du gombo et du gingembre et de définir une corrélation permettant de retrouver les courbes caractéristiques de séchage.

#### 3.1 Dispositif expérimental - méthodologie

Les expériences de séchage sur les trois produits ont été réalisées dans les conditions atmosphériques suivantes (ambiance du local abritant le dispositif d'essai installé à Yaoundé) :

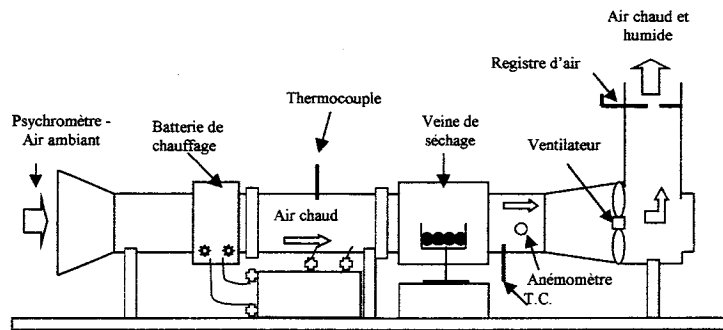
- **période sèche** (novembre à mars)  
température moyenne ambiante 28 °C  
humidité relative 67 % et absolue de l'air 16 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>
- **période humide** (avril à octobre)  
température moyenne ambiante 25,5 °C  
humidité relative 75 % et absolue de l'air 15 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air sec</sub>

Ces conditions relativement constantes (variation de l'humidité de l'air de l'ordre de 1 g/kg d'air) permettent une bonne reproductibilité des mesures malgré l'absence de régulation de la température et de l'hygrométrie du local.

**Tableau 3**  
Conditions d'essais

**Table 3**  
The experimental conditions

Température	40 °C	55 °C
Humidité absolue moyenne (g <sub>eau</sub> /kg <sub>air sec</sub> )	15 à 16	15 à 16
Produit	Vitesse de l'air (m·s <sup>-1</sup> )	
Manioc en cossettes	0,5 - 1 - 2 - 3	0,5 - 1 - 2 - 3
Gingembre	0,2 - 1 - 2 - 3	0,2 - 1 - 2 - 3
Gombo	0,5 - 1 - 2 - 3	0,5 - 1 - 2 - 3



**Figure 2**  
Banc d'essais de séchage  
Scheme of the test dryer

Les courbes de séchage ont été obtenues suivant le plan d'expériences donné dans le *tableau 3*, à l'aide d'une soufflerie à air chaud, à conditions aérauliques et thermiques contrôlées (*figure 2*). La soufflerie ne permet pas de régler l'humidité relative de l'air, mais l'hygrométrie ambiante à Yaoundé varie très peu au cours du temps, voire des saisons. Par ailleurs l'action de l'hygrométrie n'est sensible sur le processus de séchage que si la première phase à vitesse constante existe (LAGUERRE, 1986). Cette soufflerie est équipée :

- d'une batterie de chauffage de puissance 2 kW ;
- d'un régulateur P.I.D. pour la batterie de chauffage ;
- d'un ventilateur centrifuge entraîné par un moteur électrique d'une puissance de 0,75 kW et d'un registre à air pour le réglage du débit ;
- d'une veine d'essais de section 12,5 cm × 12,5 cm et de longueur 20 cm ;
- d'une gaine de circulation d'air munie de deux déflecteurs qui permettent une meilleure répartition des vitesses de l'air dans la section de la veine. Les déflecteurs sont installés respectivement en aval de la batterie de chauffage et en amont de la veine ;
- d'un panier de treillis en plastique (11 cm × 8 cm × 6 cm) introduit dans la veine et relié à une balance électronique de précision ( $\pm 0,01$  g) par un système vis et écrou. La masse du panier est de l'ordre de 5 g et les échantillons ont une masse humide de l'ordre de 20 g ;
- de deux thermocouples (T.C.) de type K installés respectivement à l'entrée et à la sortie de la veine, pour les mesures de température ;
- d'un psychromètre à moulinet de précision 0,2 K placé à l'entrée de la soufflerie ;
- d'un anémomètre à sonde télescopique et à affichage numérique introduit dans la veine et qui sert à mesurer la vitesse d'écoulement de l'air (plage de mesures 0 à 40 m/s).

La soufflerie fonctionne avec un débit d'air et une température de consigne fixés. Lorsque le dispositif atteint son régime permanent, l'échantillon de produit

à tester est déposé en couche mince (d'épaisseur  $\leq 3$  cm) dans le panier, à l'intérieur de la veine. La mesure de la masse de l'échantillon au cours d'un essai est faite par pesées discontinues, après arrêt momentané du moteur du ventilateur (15 s environ). On a montré que l'arrêt du ventilateur pendant un temps inférieur à 3 min ne perturbe pas les mesures (NGANHOU, 1987). Pour limiter au maximum le refroidissement du produit, le panier est laissé dans la veine de séchage pendant la pesée. La cinétique de séchage est calculée à partir des mesures de la variation de masse des échantillons au cours du temps.

Les échantillons testés lors des essais de séchage sont préparés de manière à reproduire les conditions réelles envisageables et les conditions d'utilisation sur le terrain en Afrique subsaharienne, et en l'occurrence au Bénin et au Cameroun (*tableau 1*). Les morceaux obtenus sont irréguliers et la valeur de la surface externe pour chaque particule de l'échantillon est la moyenne de mesures directes de longueur, largeur, épaisseur ou diamètre. Elle est fondée sur une approximation de forme (disque pour le gombo, parallélepède rectangle pour le gingembre et quart de cylindre plein pour le manioc en cossettes). La connaissance de la taille et/ou de la forme des échantillons est parfois nécessaire pour calculer la vitesse de séchage en première phase.

### 3.2 Modélisation de la cinétique de séchage

L'objectif consiste à modéliser la vitesse de séchage selon l'approche de la courbe caractéristique de séchage (CCS). Il s'agit de déterminer si, en dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (c'est-à-dire dans les pores du milieu), il est possible d'obtenir au niveau macroscopique une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux (NADEAU et PUIGGALI, 1995), et un même modèle de comportement des produits étudiés.

À partir de la courbe expérimentale  $V = \frac{dX}{dt} = f(X)$ , et pour diverses condi-

tions opératoires maintenues constantes lors du séchage, VAN MEEL (1958) propose de normer la vitesse de séchage  $V$  et la teneur en eau  $X$  de façon à obtenir une courbe unique caractéristique du produit étudié. Cette méthode présente la courbe caractéristique de séchage sous la forme (VAN MEEL, 1958), (FORNELL, 1979), (MOYNE, 1982) :

$$V_r = \frac{V}{V_0} = f(\sigma) \quad (6)$$

où,

-  $V_r$  est la vitesse normée ou vitesse de séchage réduite,

-  $V_0$  est la vitesse initiale de séchage,

-  $\sigma$  est la teneur en eau normée ou réduite :  $\sigma = \left( \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \right)$  (7)

$X_{eq}$  est la teneur en eau du produit à l'équilibre donnée par les équations 4 et 5 (*tableau 2*) des isothermes de désorption ou déterminée expérimentalement,

$X_{cr}$  est la teneur en eau critique, considérée égale à  $X_0$  (la teneur en eau initiale) dans le cas des produits biologiques.

Les théories sur la détermination des cinétiques, utilisant la méthode dite CCS, présentent *a priori* une expression mathématique simple pour la fonction  $f$  :

$$f(\theta) = \theta^n \quad (8)$$

où l'exposant  $n$  doit être déterminé par identification avec les résultats expérimentaux obtenus.

Divers auteurs s'accordent à penser que les courbes caractéristiques de séchage peuvent être classées en deux types selon la valeur de  $n$  :

- $n < 1$  : le mécanisme responsable de la migration de l'eau est un mécanisme diffusif caractéristique des gels homogènes. Le séchage se déroule alors en un temps fini ;
- $n \geq 1$  : la vitesse de séchage décroît très rapidement lors d'une phase initiale dans laquelle l'eau migre sous l'influence des forces capillaires, puis se stabilise à une valeur généralement voisine de l'humidité d'équilibre, c'est-à-dire vers la phase finale où l'eau d'origine hygroscopique est « piégée » à l'intérieur du produit et diffuse très lentement. Cette deuxième phase correspond également au schéma d'un processus « diffusif » où le coefficient de diffusion tendrait vers 0 à l'approche de l'équilibre.

La modélisation de la courbe de séchage nécessite donc la détermination de la teneur en eau initiale  $X_0$  et de la vitesse initiale de séchage  $V_0$ . Bien que beaucoup de théories s'accordent pour affirmer que le séchage des produits agroalimentaires ne présente pas de phase à vitesse constante (FORNELL, 1979 ; DESMORIEUX et MOYNE, 1992 ; RAPUSAS et DRISCOLL, 1995), la plupart des auteurs considèrent très souvent que  $V_0$  est une vitesse initiale en première phase de séchage et préconisent sa détermination par l'une des trois méthodes couramment trouvées dans la littérature : la méthode dite des « corrélations », la méthode de simulation par un produit capillaro-poreux de même nature et la méthode directe (FOTSO et LECOMTE, 1994).

#### Méthode des corrélations

La vitesse de séchage en première phase est donnée par l'équation :

$$V_0 = \left( \frac{h_0 S_0 \Delta T_0}{m_s L_v} \right) \quad (9)$$

où,  $h_0$  est le coefficient de transfert de chaleur air-produit,  $S_0$ , la surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant initial,  $\Delta T_0 = (T_s - T_h)$  l'écart psychrométrique défini par les conditions de l'air de séchage, avec  $T_s$  et  $T_h$  les températures respectives sèche et humide,  $m_s$ , la masse anhydre de l'échantillon de produit et  $L_v$ , la chaleur latente de vaporisation.

#### Méthode assimilant le produit étudié à un produit capillaro-poreux

Elle utilise la vitesse en première phase de séchage d'un produit capillaro-poreux de même forme et de mêmes dimensions que le produit étudié et placé dans les mêmes conditions expérimentales. L'équation (9) est également

$$\text{valable dans ce cas : } (V_0)_{cap} = \left( \frac{h_0 (S_{cap})_0 \Delta T_0}{m_{s, cap} L_v} \right).$$

Dans certaines estimations, il est commode d'utiliser l'infradensité des produits, définie comme étant le rapport de la masse anhydre  $M_s$  de l'échantillon du produit à son volume à l'état très frais  $\varrho_{sat}$ , mesuré à une humidité  $X_{sat}$  supérieure au point de saturation des parois cellulaires. De ce fait, les infradensités respectives du produit étudié et du produit capillaro-poreux sont données par les expressions suivantes :

$$\rho_f = \frac{m_s}{\varrho_{sat}} \quad \text{et} \quad (\rho_f)_{cap} = \frac{(m_s)_{cap}}{(\varrho_{sat})_{cap}} \quad (10)$$

En posant l'hypothèse que la masse totale d'eau évaporée du produit étudié est égale à celle évaporée du produit capillaro-poreux, on peut écrire (FOTSO et LECOMTE, 1994) :

$$V_0 = \frac{(\rho_f)_{cap}}{\rho_f} (V_0)_{cap} \quad (11)$$

#### Méthode directe

Elle est basée sur le traitement de données expérimentales brutes et permet

de déterminer la valeur de  $V_0$  d'après la courbe de séchage  $-\frac{dX}{dt} = f(X)$  ou  $f(t)$ .

Cette méthode suppose qu'en début de séchage le produit se trouve à une humidité supérieure ou égale à l'humidité critique.

En réalité, pour les produits biologiques étudiés (qui subissent des déformations et une contraction au cours du séchage), aucune des trois méthodes énumérées n'est réellement satisfaisante. Si on peut prendre le charbon de bois réhydraté pour simuler le séchage en première phase du matériau bois, on ne trouve pas facilement un produit de substitution pour les produits agroalimentaires, dont la teneur en eau en début de séchage n'est qu'une estimation de la teneur en eau initiale du produit de base, c'est-à-dire au moment de la récolte.

## 4 - RÉSULTATS ET DISCUSSION

La caractérisation du séchage doit être indépendante du taux de saturation en eau initiale du produit.

De fait, il est possible de définir une courbe caractéristique de séchage en utilisant à la place de  $V_0$  une valeur de référence  $V_{ref}$ , vitesse en « début de séchage », qui correspond à une humidité  $X_{ref}$  du produit étudié. Cette affirmation se justifie aisément à partir de l'équation (6) et de l'hypothèse (8) qui donnent la vitesse de séchage réduite. En effet si :

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right)^n \quad \text{et} \quad \frac{V_{ref}}{V_0} = \left( \frac{X_{ref} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right)^n,$$

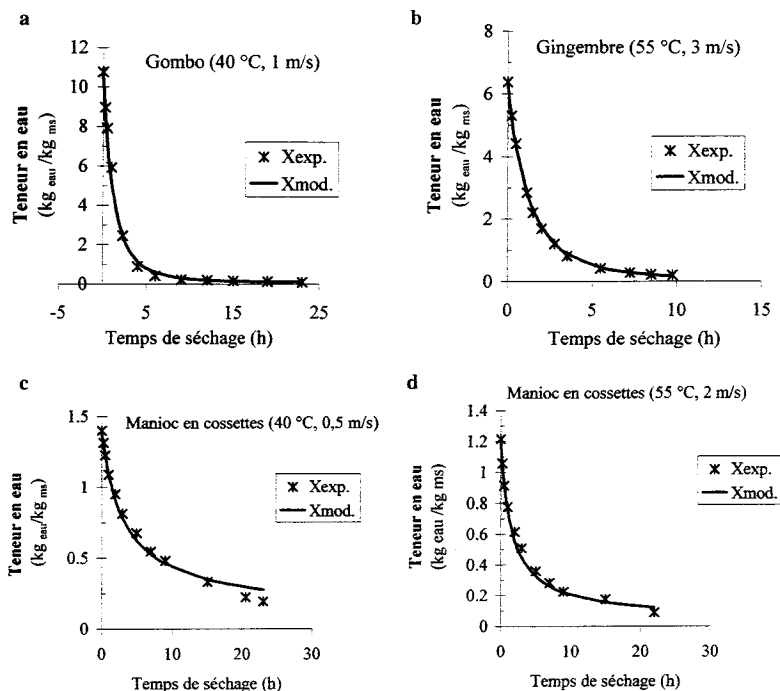


Figure 3

Comparaison du modèle théorique avec les résultats expérimentaux - Évolution au cours du temps de la teneur en eau du produit  $X(\%)$

Comparison of predicted curves and experimental kinetic data of cassava, ginger and okros in different conditions

- a) gombo (40 °C, 1 m.s<sup>-1</sup>)  
 b) gingembre (55 °C, 3 m.s<sup>-1</sup>)  
 c) manioc en cossettes (40 °C, 0,5 m.s<sup>-1</sup>)  
 d) manioc en cossettes (55 °C, 2 m.s<sup>-1</sup>)

$$\text{on a } \frac{V}{V_{ref}} = \left( \frac{X - X_{eq}}{X_{ref} - X_{eq}} \right)^n$$

Ainsi, à partir d'une courbe expérimentale  $m = f(t)$ , on détermine la courbe

$X = f(t)$  (figure 3), puis celle de la vitesse  $V$  de séchage :  $V = -\frac{dX}{dt} = f(X)$

(figure 4). La dérivée en un point de la courbe  $X = f(t)$  correspond à la moyenne des pentes des droites passant respectivement par le point considéré et les points  $(t_{i-1}, X_{i-1})$  et  $(t_{i+1}, X_{i+1})$ . Les dérivées aux points  $(t_0, X_0)$  et  $(t_n, X_n)$  sont calculées simplement par la méthode de la tangente. Pour tous les essais de séchage effectués, la valeur de la dérivée obtenue au premier point  $(t_0, X_0)$  est

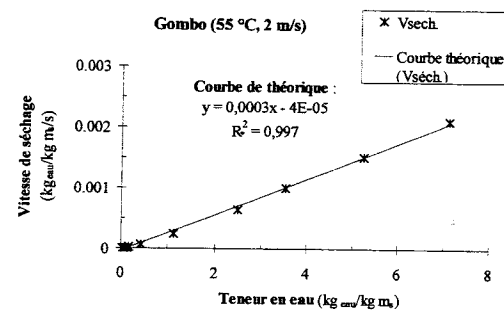


Figure 4

Courbe expérimentale de la vitesse de séchage ( $V$ ) du gombo, en kg<sub>eau</sub>/s/kg<sub>ms</sub>, en fonction de la teneur en eau  $X(\%)$  à 55 °C et 2 m.s<sup>-1</sup>

Drying rate curve of okros at 55°C and 2 m.s<sup>-1</sup>

sous-évaluée du fait de la mise en température du produit. Il vaut mieux éliminer le premier point de mesure et utiliser le deuxième point de la courbe  $X = f(t)$ . Ainsi, on utilise dans notre étude le deuxième point de mesure comme référence ( $V_{ref}; X_{ref}$ ).

Cette approche utilisée pour la détermination de  $V_{ref}$  a permis de reproduire fidèlement l'évolution de la teneur en eau du produit au cours du temps.

À partir de toutes les considérations énumérées ci-dessus, l'expression (6) peut être réécrite sous la forme :

$$V_r = \frac{V}{V_{ref}} = f\left(\frac{X - X_{eq}}{X_{ref} - X_{eq}}\right) = \left(\frac{X - X_{eq}}{X_{ref} - X_{eq}}\right)^n \quad \text{où } n > 0 \quad (12)$$

Pour identifier la meilleure valeur de  $n$ , caractéristique du produit étudié, nous avons utilisé deux méthodes, l'une analytique et l'autre graphique.

Pour la méthode analytique, la procédure est la suivante : les points  $(X, V)$  et les valeurs  $V_{ref}$ ,  $X_{ref}$  et  $X_{eq}$  sont connus pour chaque expérience et permettent de calculer  $V_r$  et  $\phi$  à l'instant  $t$ . On déduit pour chaque point expérimental une valeur  $n_t$  telle que :

$$n_t = \left( \frac{\ln V_r}{\ln \phi} \right)_t \quad (13)$$

Pour chaque expérience de séchage, à des températures différentes, réalisée sur un produit, la valeur moyenne  $n_i$  est calculée à partir de l'expression :

$$n_i = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p n_t \quad (14)$$

Pour la méthode graphique, on reporte sur le diagramme  $(V_r, \phi)$ , représenté sur la figure 5, les séries de points expérimentaux obtenues pour les essais de séchage d'un produit, et on identifie grâce aux courbes calculées  $\phi^n$  une valeur



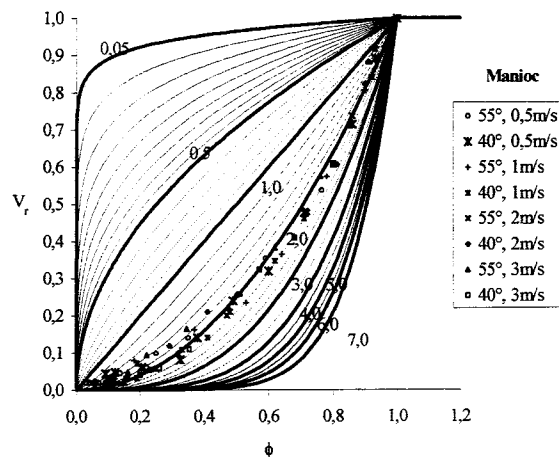


Figure 5

Détermination graphique de la valeur du paramètre  $n$   
Graphical determination of the values of the parameter  $n$

moyenne du paramètre  $n$ . Une certaine dispersion des points expérimentaux est observée par rapport aux allures théoriques identifiées. L'identification est cependant assez précise lorsqu'on considère les points expérimentaux obtenus pour des valeurs de  $\phi$  comprises entre 0,4 et 0,7.

L'écart obtenu sur la valeur de  $n$  selon les deux méthodes est de l'ordre de 10 à 15 %. Une étude de sensibilité montre qu'une fluctuation de l'ordre de 10 à 15 % sur la valeur du paramètre  $n$  influence que très peu la courbe  $X = f(t)$ , c'est-à-dire la teneur en eau théorique du produit, et donc globalement la cinétique de séchage. Les valeurs du paramètre  $n$  (caractéristique du séchage) ainsi identifiées pour chacun des produits sont données par le *tableau 4*.

Le modèle présenté par l'expression (12) est utilisé pour décrire l'évolution de la vitesse réduite en fonction de la teneur en eau réduite. Il permet de remonter à la valeur de la teneur en eau en fonction du temps, à partir de la corrélation suivante :

$$X = X_{eq} + \left[ (X_0 - X_{eq})^{(1-n)} - \frac{V_0(1-n)}{(X_0 - X_{eq})^n} t \right]^{\frac{1}{(1-n)}} \quad (15)$$

Compte tenu de l'ajustement du paramètre  $n$ , les courbes calculées (*figures 3 et 6*) sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et ce quelle que soit la valeur  $X_0 > X_{eq}$ . Pour un même produit, à différentes conditions expérimentales, les cinétiques de séchage présentent une affinité orthogonale que décrit (par exemple) la CCS du gingembre (*figure 7*).

Tableau 4

Les valeurs du paramètre  $n$  caractéristique de séchage des produits étudiés (méthode analytique et graphique)

Table 4

Drying characteristic parameter ( $n$ ) values of okros, ginger and cassava

a) Produit :	$T_s = 40^\circ\text{C}$		$T_s = 55^\circ\text{C}$		Moyenne Caractéristique du produit
	$\Delta T = 14,5^\circ\text{C}$		$\Delta T = 26^\circ\text{C}$		
Gombo ( <i>okros</i> )	$X_0 = 9,40 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 7,65 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_0 = 9,40 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 7,63 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	
Vitesse de l'air en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Valeur de $n_i$		Valeur de $n_i$		
0,5	1,14		1,47		
1	1,25		1,22		
2	1,16		1,20		
3	1,20		1,17		
Moyenne des $n_i$	1,20		1,30		1,25
Écart moyen	0,04		0,10		
b) Produit :	$T_s = 40^\circ\text{C}$		$T_s = 55^\circ\text{C}$		Moyenne Caractéristique du produit
$\Delta T = 14,5^\circ\text{C}$		$\Delta T = 26^\circ\text{C}$			
Gingembre ( <i>ginger</i> )	$X_0 = 7,35 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 4,85 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_0 = 7,35 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 4,32 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	
Vitesse de l'air en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Valeur de $n_i$		Valeur de $n_i$		
0,5	1,10		1,10		
1	1,20		0,98		
2	1,10		0,95		
3	1,12		0,96		
Moyenne des $n_i$	1,13		1,00		1,06
Écart moyen	0,04		0,06		
c) Produit :	$T_s = 40^\circ\text{C}$		$T_s = 55^\circ\text{C}$		Moyenne Caractéristique du produit
$\Delta T = 14,5^\circ\text{C}$		$\Delta T = 26^\circ\text{C}$			
Manioc en cossettes ( <i>cassava</i> )	$X_0 = 2,40 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 1,51 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_0 = 2,40 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	$X_{\text{ref}} = 1,44 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$	
Vitesse de l'air en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Valeur de $n_i$		Valeur de $n_i$		
0,5	2,11		1,86		
1	2,19		1,89		
2	1,85		2,20		
3	2,25		1,85		
Moyenne des $n_i$	2,10		1,95		2,03
Écart moyen	0,13		0,16		

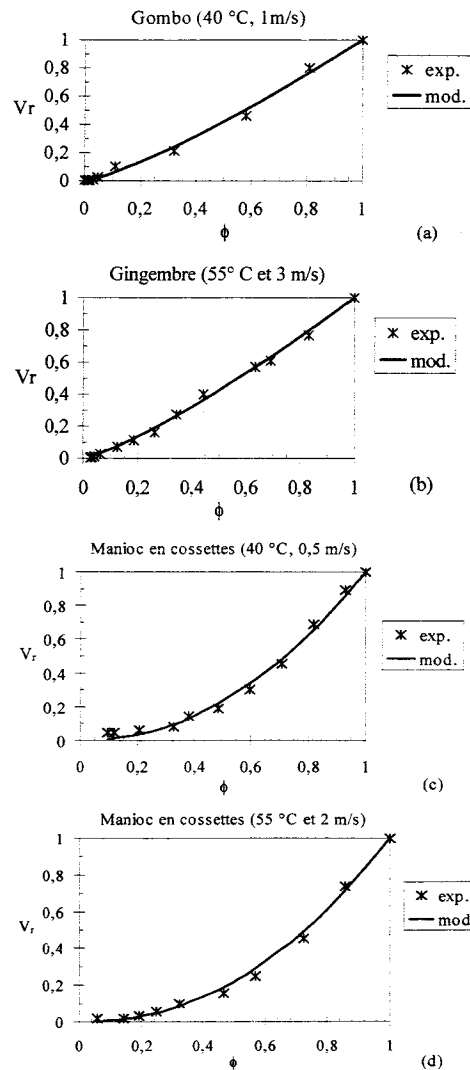


Figure 6

Comparaison du modèle théorique avec les résultats expérimentaux -  
Évolution de la vitesse de séchage réduite

Comparison of the predicted drying rate curves with the experimental data  
for cassava, ginger and okros

a) gombo (40 °C, 1 m·s<sup>-1</sup>),  $n_1 = 1,25$ ; b) gingembre (55 °C, 3 m·s<sup>-1</sup>),  $n_1 = 0,96$ ; c) manioc en cossettes (40 °C, 0,5 m·s<sup>-1</sup>),  $n_1 = 2,11$ ; d) manioc en cossettes (55 °C, 2 m·s<sup>-1</sup>),  $n_1 = 2,20$  (N.B. :  $n_1$  est la valeur du paramètre dans les conditions de séchage).

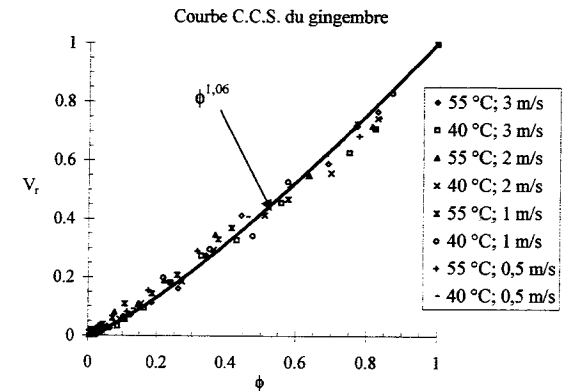


Figure 7

Courbe caractéristique de séchage (CCS) du gingembre  
Drying characteristic curve of ginger

L'erreur relative moyenne de déviation enregistrée sur l'évolution de la teneur en eau entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus pour l'équation

$$(15) \text{ est calculée à partir de l'expression ; } E(\%) = \frac{100}{p} \sum_{i=1}^p \frac{|X_{\text{exp}} - X_{\text{mod}}|}{X_{\text{exp}}}, \text{ où } p \text{ est}$$

le nombre de points de mesure ou d'observations au cours d'un essai de séchage. La valeur de  $E$  obtenue est 12,5 %. On considère généralement qu'une valeur au voisinage de 10 % donne raisonnablement une bonne simulation des résultats expérimentaux (AGUERRE, 1989).

## 5 - CONCLUSION

La méthode CCS de détermination de la cinétique de séchage est une méthode pratique et mathématiquement facile à exploiter. Elle peut être utilisée pour représenter la cinétique de séchage des produits agroalimentaires, dont on ne connaît pas les caractéristiques physiques, sans nécessiter d'hypothèses sur la nature des mécanismes internes au produit pendant le séchage. La courbe caractéristique de séchage (CCS) et l'isotherme de désorption des produits sont indispensables pour fixer les différents paramètres de séchage des produits agroalimentaires, lors de la conception des séchoirs. Les isothermes de désorption du manioc, du gingembre et du gombo ont été obtenues. Les humidités d'équilibre des produits correspondant aux conditions de séchage ont été utilisées pour le calage des modèles de détermination de la cinétique de séchage, c'est-à-dire pour la détermination de la valeur de  $n$ ,

caractéristique du produit. Les corrélations obtenues permettent une bonne reconstitution des résultats expérimentaux. Elles pourront être utilisées pour simuler des opérations de séchage dans le but de dimensionner différents types de séchoirs agricoles.

Reçu le 29 octobre 1999, révisé le 17 avril 2000, accepté le 3 mai 2000.

## NOMENCLATURE

$A, B, C$	: coefficients caractéristiques du produit (constante)
$a_w = \frac{P_v}{P_{sat}}$	: activité de l'eau dans le produit (fraction décimale)
$E$	: erreur relative moyenne de déviation sur la teneur en eau du produit (%)
$h_0$	: coefficient de transfert de chaleur convectif calculé à partir de la surface d'échange ( $W.K^{-1}.m^{-2}$ )
$L_v$	: chaleur latente de vaporisation ( $J.kg^{-1}$ )
$m$	: masse de l'échantillon testé (kg)
$n$	: valeur du coefficient caractéristique du séchage du produit
$P_v$	: pression de vapeur à la surface du produit (Pa)
$P_{vsat}$	: pression de vapeur saturante à la température de l'air en surface du produit (Pa)
$S_0$	: surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant considéré ( $m^2$ )
$S^*$	: surface spécifique ( $m^2.kg^{-1}$ )
$t$	: temps (s)
$T_s$	: température de l'air de séchage (K)
$T_h$	: température humide de l'air (K)
$\Delta T_0 = T_s - T_h$	: écart psychrométrique (K)
$V$	: vitesse de séchage du produit rapportée à la masse sèche ( $s^{-1}$ )
$X$	: teneur en eau moyenne de l'échantillon = masse d'eau rapportée à la masse du produit sec ( $kg.kg^{-1}$ )
$\alpha$	: coefficient
$\phi$	: teneur en eau réduite du produit
$\rho_i$	: masse volumique « infra » appelée couramment infradensité ( $kg.m^{-3}$ )
$\varnothing$	: volume de l'échantillon testé ( $m^3$ )

## Indices

$cap$	: capillaro-poreux
$cr$	: critique (humidité moyenne à la transition entre les phases de séchage à vitesse constante et décroissante)
$eq$	: équilibre (définie par l'isotherme de désorption du produit)
$exp$	: expérimentale
$i$	: instant de mesure
$mod$	: modèle
$moy$	: moyenne
$s$	: anhydre
$sat$	: état de saturation de l'échantillon
$o$	: valeur initiale

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AJIBOLA O.O., ADAMS B.A., 1986. Desorption equilibrium moisture content of cassava at several temperatures. *Inter. Agrophysics*, **2**, 235-239.
- AGUERRE R.J., 1989. New B.E.T type multi-layer sorption isotherms. Part II modelling water sorption in foods. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **22**, 192-195.
- 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.
- BIMBENET J.-J., DAUDIN J.D., 1984. Air drying kinetics of biological particles. Proceedings of 4th International Drying Symposium, Kyoto, 9-12 July, 249-255.
- 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.
- CHEN C.C., MOREY R.V., 1989. Comparison of four EMC/ERH equations. *Trans. ASAE*, **32**, 983-990.
- DAUDIN J.D., BIMBENET J.J., 1982. Détermination expérimentale du comportement des produits solides lors du séchage par entraînement. *Ind. Alim. Agric.*, 99<sup>e</sup> année, **4**, 226-235.
- DA-WEN SUN WOODS J.L., 1994. The selection of isotherm equations for wheat based on the fitting of available data. *J. Stored Prod. Res.*, **30**, 27-43.
- 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.
- DESMORIEUX H., 1992. Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique à partir des réalités géographiques et humaines. Thèse de l'Institut national polytechnique de Lorraine.
- FORNELL A., 1979. Séchage de produits biologiques par l'air chaud : calcul de séchoirs. Thèse de l'École nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires, Montpellier.
- FOTSO P.-J., LECOMTE D., 1994. Convective drying of cacao beans: drying curves for various external conditions, IDS-94, in: *Drying 94*, Gold Coast, Australia 1994. Vol.B, 937-944.
- IGLESIAS H.A., CHIRIFE J., 1982. *Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components*. Academic Press, New-York.

- LADIPO A., 1988. Conception et mise au point d'un séchoir solaire polyvalent modulaire à vocation industrielle adapté au Bénin. Thèse de l'Université de Poitiers.
- LAGUERRE J.C., 1986. Influence de l'histoire du produit sur la cinétique de séchage : variation de l'humidité de l'air, D.E.A., Ensia, Massy.
- MAFART P., 1981. Coût énergétique des opérations d'élimination d'eau : économies d'énergie dans les industries agroalimentaires, 3-25, Technique et Documentation C.D.I.U.P.A., Paris.
- MOYNE C., 1982. Transferts couplés chaleur masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse. Thèse de l'Institut national polytechnique de Lorraine.
- NADEAU J.-P., PUIGGALI J.-R., 1995. *Séchage : des processus physiques aux procédés industriels*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- NGANHOU J., 1987. Les transferts couplés de chaleur et de matière dans une opération de séchage en lit épais. Thèse de l'université de Poitiers.
- RAPUSAS R.S., DRISCOLL R.H., 1995. The thin-layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technol.*, **13**, 1905-1928.
- SALGADO M.A., 1988. Étude expérimentale et modélisation du séchage à l'air chaud de la pulpe de betterave et du manioc. Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse.
- SALGADO M.A., LEBERT A., GARCIA H.S., MUCHNIK J., BIMBENET J.J., 1994. Development of the characteristic drying curve for cassava chips in monolayer. *Drying Technol.*, **12**, 685-696.
- THOMPSON T.L., 1967. Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers. Ph. D. thesis. Purdue University, West Lafayette.
- VAN MEEL D.A., 1958. Adiabatic Convection Batch Drying with recirculation of a chemical. *Eng. Sci.*, **9**, 36-44.
- WOLF M., WALKER J.E., KAPSALIS J.G., 1972. Water vapor sorption hysteresis and dehydrated foods. *J. Agric. Food Chem.*, **20**, 1073-1089
- XIAO Dong Chen, 1998. A temperature dependence function of equilibrium sorption isotherms established by a reaction engineering approach. *J. Food Eng.*, **37**, 259-269.