



Journal of Renewable Energies

Revue des Energies Renouvelables

journal home page : <https://revue.cder.dz/index.php/rer>

Research Paper

Détermination de la vitesse de séchage du Curcuma par analogie au modèle de sorption de Bradley

Laurencia Randriafeno Rajonandrianina ^{a,*}, Jean Désiré Ranarijaona ^b, Josoa Randriamorasata ^a, Jean Luc Rasoanaivo ^b

^a École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Vontovorona, Antananarivo, Madagascar

^b Centre National de Recherche Industrielle et Technologique, 38 Rue Rasamimanana Fiadanana, Antananarivo, Madagascar

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 February 2021

Accepted 29 May 2021

Mots clés:

Curcuma

Isotherme de sorption

Séchage

Keywords:

Turmeric

Sorption isotherm

Drying

RESUME

A Madagascar, le séchage du Curcuma consiste à les exposer directement au Soleil. Ce qui n'est pas toujours productif. Ce travail vise à apporter des informations sur le séchage du Curcuma par la détermination de la courbe de séchage afin d'envisager un séchage industriel. Pour se faire, deux étapes ont été conduites : une expérimentation de séchage et une modélisation de la courbe de séchage par analogie au modèle empirique de Bradley. Ce qui a permis d'obtenir la courbe de séchage du Curcuma. L'obtention de cette courbe permet de prévoir le comportement du produit au séchage et ainsi, définir l'énergie nécessaire à apporter pour le sécher et surtout, déterminer la durée de séchage. Tout cela pourra conduire essentiellement dans les calculs théoriques et techniques pour la réalisation du séchoir et à l'étude de faisabilité d'un tel projet.

ABSTRACT

In Madagascar, the drying of Curcuma consists of exposing them directly to the Sun. This is not always productive. This work aims to provide information on the drying of turmeric by determining the drying curve in order to consider industrial drying. To do this, two steps were conducted: an experiment of drying and modeling of the drying curve by analogy with the empirical model of Bradley. This allowed obtaining the drying curve of Curcuma. The obtaining of this curve allows to predict the behavior of the product in the drying and so to define the necessary energy to bring to dry it and especially, to determine the duration of drying. All this will be able to lead essentially in the theoretical and technical calculations for the realization of the dryer and continuation of the feasibility study of such a project

* Corresponding author, E-mail address: laurajonandrianina@gmail.com

Tel.: + 261346068436



1. Introduction

Dans les pays producteurs à grande échelle comme en Europe ou aux Etats Unis, la consommation énergétique liée à l'agriculture est colossale. Comme en France par exemple, sur une consommation d'énergie nationale, tous secteurs confondus, Elle est de 162 millions de tonne équivalent pétrole (Mtep) en 2007. L'agriculture représente une consommation d'environ 4 Mtep soit 2,5 % [1]. Une des activités énergivores dans l'agriculture est le séchage car cette opération nécessite un apport thermique important [2], [3]. Le séchage est une pratique qui a déjà existé depuis des siècles. Elle permet la conservation de divers produits [4], [5].

Par définition, le séchage est une technique qui consiste à abaisser ou à éliminer la teneur en eau ou l'humidité absolue d'un produit. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. [3], [4], [6], [7]. En d'autre terme, sécher un produit revient à le ramener, dans une condition de température convenable, à un stade où la teneur en eau est suffisamment diminuée [8].

A Madagascar, la technique de séchage traditionnelle : le séchage direct au soleil sur des nattes ou des claies reste encore le plus exploité. Malheureusement, cette technique ancestrale présente d'inconvénients majeurs : elle est très lente, aussi, les produits sont exposés aux poussières et insectes qui favorisent la détérioration de la qualité des produits, favorisant les pertes lors du séchage. De ce fait, les études sur des séchoirs ayant recours aux énergies renouvelables et principalement solaires sont de plus en plus abordés [9].

Pour réaliser un séchoir, on doit de prime abord connaître les paramètres de séchage. Parmi ceux-ci figurent la vitesse de séchage, les isothermes de sorption. D'un côté, la vitesse de séchage permet de contrôler le processus de séchage. Les isothermes de désorption indiquent les seuils de température maximale et les teneurs en eau finales qui servent à optimiser les conditions de séchage de manière à assurer sa stabilité physico-chimique durant le stockage. La modélisation de ces paramètres fait souvent intervenir des coefficients qui ne sont pas connus et qui nécessitent le recours à des procédés expérimentaux très délicats [10], [11], [12]. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit ainsi qu'aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au-delà des limites de l'expérience [13], [14], [15].

L'objectif de cet article se positionne justement sur ce fait. Il propose de déterminer les paramètres de séchage du curcuma, une plante très cultivée dans la région Est de Madagascar,

afin de pouvoir dimensionner un séchoir pour son séchage par la suite. Sachant qu'aucune étude n'a encore été faite pour ce produit dans la littérature.

2. Matériels et méthodes

2.1 Description du système d'expérimentation

Le séchoir que nous avons utilisé au Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) est un séchoir indirect à ventilation forcée. Il a été utilisé pour mener notre expérience sur l'énergie solaire comme source principale de production d'air chaud.

L'unité de séchage comprend :

- un champ d'insolateurs composé de quatre modules de capteurs solaires assurant la transformation des rayons solaires en chaleur ;
- une armoire de séchage dans laquelle sont disposés sur des claies les produits à sécher ;
- un système de ventilation (ventilateur centrifuge) assurant la parfaite circulation de l'air asséchant ou le fluide caloporteur depuis le capteur vers l'armoire de séchage pour être refoulé à l'état d'air vicié vers l'extérieur ;
- un chauffage auxiliaire (deux résistances électriques) qui réchauffe l'air à la sortie des insolateurs lorsque la température est inférieure à celle désirée.

La figure 1 illustre en détail le séchoir solaire.

2.1.1 Fonctionnement du séchoir

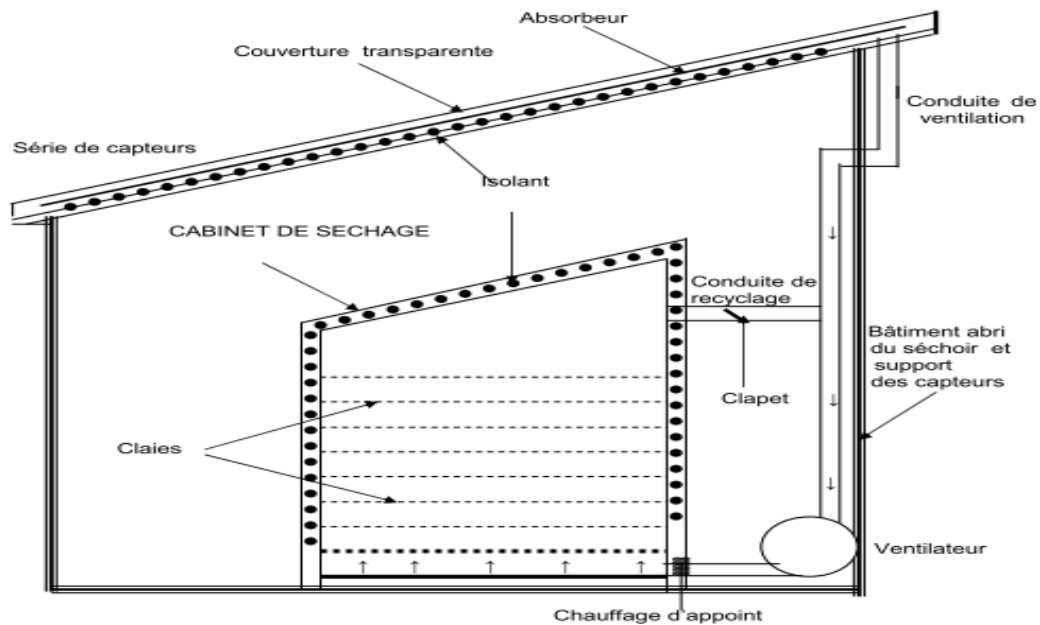
Le fonctionnement du séchoir se définit comme suit : l'air atmosphérique chauffé par le groupe de capteurs est aspiré par un ventilateur centrifuge puis envoyé vers la partie basse du séchoir pour traverser ensuite les claies de l'armoire de séchage. Le flux de l'air est donc perpendiculaire à la surface des claies ce qui favorise les échanges thermiques entre les produits et l'air de séchage. A l'entrée de l'armoire de séchage, un appoint électrique muni d'un régulateur de température a été installé afin d'assurer une température de consigne constante et de protéger les produits à sécher contre les variations nocturnes de température, nuisibles aux qualités nutritionnelles du produit. A la sortie du séchoir, l'air est soit évacué directement vers l'extérieur, soit recyclé à travers la conduite d'aspiration aéraulique, suivant sa température (Fig.1.).



1.a Les insolateurs du séchoir



1.b La chambre de séchage



1.c La chambre de séchage

Fig. 1. Le séchoir solaire du CNRIT

2.1.2 Les dispositifs de mesures

Pour réaliser nos mesures, nous avons installé dans le séchoir les éléments suivant :

- Un thermo hygromètre offrant une précision de mesure des humidités relatives de l'ordre de 2% HR, gamme de mesure entre 10 à 95 % HR. Pour la mesure de température, la précision est de 0.4% en °C et 0.8% en °F, pour une gamme de mesure entre 0 à 60°C, ou encore 32 à 140°F. (Fig. 2. et Fig. 3.)

- Un anémomètre (marque, type) ; pour la mesure de la vitesse de l'air circulant dans l'enceinte du séchoir. (Fig 2.)

A l'entrée du séchoir, on a aussi positionné un thermomètre à mercure.



2.a Thermo- hygromètre



2.b Anémomètre

Fig. 2. Instruments utilisés

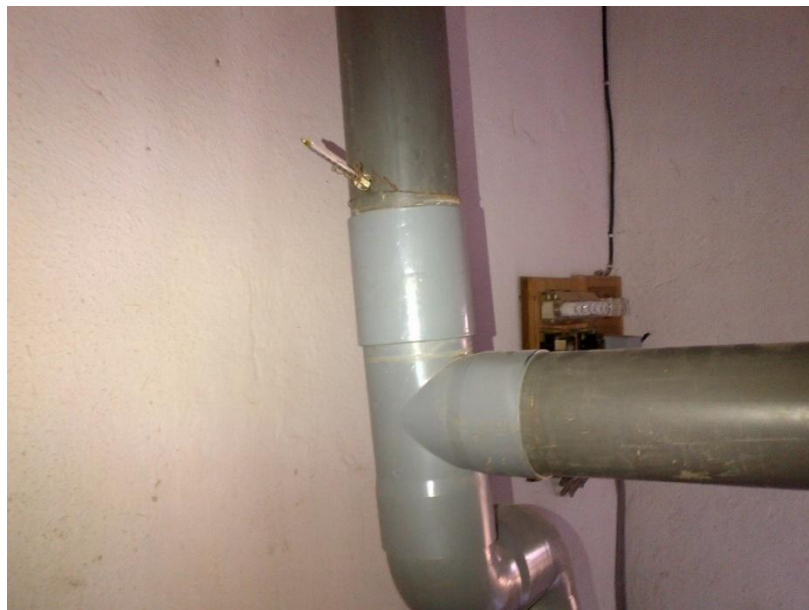


Fig. 3. Thermomètre à mercure pour lecture directe

2.1.3 Le système d'acquisition et de traitement des données

La prise des mesures a été faite manuellement lors de l'expérimentation, on a relevé à chaque instant de mesure, tous les 15 mn par une lecture directe de l'écran des instruments utilisés les valeurs lu. On a ensuite recopié ces valeurs dans un tableau de mesure à la main.

2.1.4 Le produit à sécher : le curcuma

Le curcuma dénommé tamotamo en malgache appartient à la famille des Zingibéracées, tout comme le gingembre. De ce fait, le curcuma a de nombreuses similitudes avec ce dernier, notamment au niveau de leurs caractéristiques agro-écologiques. Une cinquantaine de variétés de curcuma ont déjà pu être mises en évidence. Celui qui nous intéresse est le curcuma longa, variété la plus cultivée dans le monde. Aussi appelée curcuma domestica, elle est plus cultivée dans la région Est de Madagascar, plus précisément à Anivorano-Est.

Le curcuma est une plante herbacée rhizomateuse de 70 cm de haut à feuilles alternes. Sa multiplication végétative forme un complexe charnu composé d'un tubercule primaire et de ramifications comme les doigts. Le rhizome est utilisé, aussi bien comme plante alimentaire que tinctoriale. Lavé et broyé, il donne une poudre jaune qu'on appelle curcumine. La curcumine est un colorant naturel, utilisé pour colorer le beurre et certains fromages. C'est aussi l'un des principaux composants du curry. Dans le domaine de la médecine, les propriétés du Curcuma ne sont pas des moindres, comme par exemple on peut en citer ses pouvoirs cholérétique, anti-inflammatoire, hépato protectrice, immunostimulante, antivirale, antimicrobienne, antifongique, antimutagène, anti tumorale. Enfin, le Rhizome est aussi féculent, il contient de l'amidon. [16], [17]. La figure 4 nous montre l'aperçu du curcuma dans sa forme rhizomateuse et poudre.



Fig. 4. Le Tamotamo ou curcuma

Sachant que le curcuma est jusqu'à aujourd'hui séché de façon traditionnelle à Madagascar, la détermination de ses paramètres cinétique serait d'une grande utilité, surtout qu'aucune étude

n'a encore été entamé dans la littérature, afin de valoriser sa culture en grande quantité dans la région.

2.2 Protocole expérimental

Pour déterminer expérimentalement la vitesse de séchage du curcuma, nous avons lancé le séchoir avec les conditions de séchage :

- débit de l'air chaud : constant assuré par le ventilateur centrifuge du séchoir
- Température de consigne : constant, qui a été prise par le thermomètre à mercure, équivalant à la température de l'air chaud entrant dans le séchoir (lecture directe).
- Humidité de l'air asséchant : qui a été supposé égal à l'humidité mesurée de l'air dans le séchoir
- Disposition du produit : sur 03 niveaux de claies différents soient : la masse M1 sur la claie n°1, la masse M2 sur la claie n°2, la masse M3 sur la claie n°3,

Nous n'avons pas varié les conditions de séchage, en faisant varier par exemple le débit ou encore la température, nous n'avons donc pas étudié l'influence des variations des conditions de séchage.

Nous donnons, dans ce qui suit, la procédure que nous avons adoptée pour la conduite de nos expériences et le mode de détermination des différents paramètres.

2.2.1 Procédure d'expérimentation

Après la mise en marche de la machine, on fixe les valeurs de consigne pour la température de séchage et la vitesse de l'air asséchant. L'humidité relative de l'air asséchant n'étant pas fixé mais dépend directement de l'air ambiant qui a été chauffé. Les valeurs réelles s'affichent sur l'écran des instruments de mesures. Par ailleurs, on peut voir aussi, les mesures prises du thermo hygromètre dont la sonde est installée dans le séchoir mais que l'affichage est visible comme le montre la figure ci-après (Fig. 5.).



Fig. 5. Affichage des instruments utilisés pour la mesure à l'intérieur du séchoir

Le produit à étudier a subi plusieurs traitements préliminaires. Il a d'abord été lavé, puis découpé (Fig. 6). Après cela, on a réparti en couche mince sur les claies les lamelles de Curcuma. Un échantillon a été pesé pour avoir la masse initiale, puis mis sur un filet (afin de faciliter le pesage plus tard) avant d'être posé sur les claies.

L'instant de mis en place des échantillons de produits pour l'expérience de séchage correspond au moment où les valeurs de consigne sont atteintes pour l'air asséchant, c'est-à-dire 45°C.

La lecture pour avoir les mesures ont été prises à intervalles de temps réguliers espacés de 15mn.



Fig. 6. Prétraitements du curcuma

Le flux ascendant d'air « lèche » le produit. Il s'effectue ainsi un échange de chaleur et de masse entre l'air et le produit. On s'est arrangé à ce que les mesures soient effectuées à chaque 15 mn qui passe. L'opération de prise de mesure s'est poursuivie jusqu'au coucher du soleil, ou après le chauffage de l'air s'est effectué par la résistance d'appoint du séchoir solaire. Les mesures ont été reprises le lendemain matin et s'est poursuivie jusqu'à la fin du séchage. Durant ce laps

de temps sans prise de mesure, le séchoir a continué de marcher, et n'a pas été arrêté. Même pendant la mesure de la variation de la masse des échantillons, on n'a pas arrêté le séchoir, on a juste ouvert la porte du séchoir pour faire sortir l'échantillon à mesurer qu'on a ensuite pris le soin de remettre rapidement après pesage. Une action qui a été refaite 3 fois à chaque prise de mesure sachant qu'on a fait 03 échantillons disposés sur les différents niveaux de claies. L'opération de séchage s'est poursuivie jusqu'à ce que la masse des échantillons reste constante.

2.2.2 Détermination des différents paramètres

- Mesure des températures :

Les températures suivantes sont relevées :

T_{air} : la température de l'air asséchant (prise à l'entrée du séchoir par le thermomètre à mercure)

T_p : la température du produit (du curcuma, prise par le thermo hygromètre à l'intérieur du séchoir).

- Mesure de l'humidité relative de l'air asséchant :

Par le thermo hygromètre dont la sonde est installée dans le séchoir, et l'écran affichant la valeur mesurée accessible en lecture (HR)

- Détermination de la masse de matière sèche du produit :

Elle se fait par différence de poids après un séjour dans un étuve (Fig. 7) (Dry-Line) de 100 g d'un échantillon du curcuma porté à la température de 105°C pendant 24 heures (temps nécessaire pour la déshydratation complète). On peut en déduire facilement la masse de matière sèche M_s contenue dans l'échantillon initial.

- Détermination de la masse du produit :

La mesure se fait manuellement, par mis sur la balance (Electronic compact scale, SF 400C) de l'échantillon à chaque instant de prise de valeurs.

- Détermination de l'humidité du produit :

L'humidité absolue du Curcuma a été obtenue par la formule :

$$X = \frac{M_e}{M_s} \quad (1)$$

Où M_e est la masse d'eau contenue dans le produit et M_s la masse sèche.



Fig. 7. Etuvage du curcuma

2.3 Modélisation de la vitesse séchage du curcuma

La vitesse de séchage dépend du procédé, de l'espèce, de l'épaisseur, de l'humidité initiale et finale et des conditions de séchage (température et niveau de vide) [18]. Elle se traduit par la quantité $\dot{m}$ d'eau enlevée dans le produit (le tamotamo) par unité de surface par rapport au temps. Pour se faire, on suppose que le mouvement de l'humidité s'effectue sous l'effet d'une différence de pression partielle plutôt que d'une différence de teneur en humidité. C'est-à-dire, une différence de pression entre le curcuma et l'air asséchant.

On a donc la vitesse de séchage exprimée par $\dot{m}$ ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) tels que:

$$\dot{m} = h_m(P_{vpr} - P_{va}) \quad (2)$$

Où

P_{va} (Pa) : la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$P_{va} = P_s(T_{air}).HR \quad (3)$$

$P_s(T_{air})$: Pression de vapeur saturante à la température de l'air T_{air} (°K), elle est donnée par la formule de Bertrand. La formule de Bertrand de la forme pour une température T est donné par:

$$P_s(T) = 101325.10^{(17.443 - \frac{2795}{T} - 3.868 \log_{10} T)} \quad (4)$$

HR (%): Humidité relative de l'air

P_{vp} (Pa) : la pression partielle de vapeur d'eau dans le curcuma :

$$P_{vp} = P_s(T_p) \cdot HR_{\acute{e}q} \quad (5)$$

$P_s(T_p)$: Pression de vapeur saturante à la température du curcuma, calculée aussi à partir de la formule de Bertrand.

$HR_{\acute{e}q}$ (%) : Humidité relative d'un air à une température donnée avec laquelle le curcuma serait en équilibre.

h_m (kg.s⁻¹.Pa⁻¹.m⁻²): Coefficient de transfert de masse entre le produit et l'air

La vitesse de séchage sous cette forme suppose que le mouvement de l'humidité s'effectue sous l'effet d'une différence de pression partielle plutôt que d'une différence de teneur en humidité.

Nous englobons tous les modes de transferts internes et externes dans un seul coefficient h_m :

$$h_m = \frac{Nu_m D_p}{l_{tam}} \quad (6)$$

Nu_m : Nombre de Nusselt pour les transferts de masse défini par la relation suivante :

$$Nu_m = 0,063 Sc^{1/3} Re^{2/3} \left(\frac{T}{T_{tam}} \right)^{2,0} \quad (7)$$

Pour $2,5 \cdot 10^5 < Re < 1,6 \cdot 10^6$ et $1,4 \cdot 10^{-2} < \frac{T-T_{tam}}{T_{tam}} < 0,17$

Re : Nombre de Reynolds

Sc : Nombre de Schmidt (nombre adimensionnel) :

$$Sc = \frac{\nu}{D_c^a} \quad (8)$$

ν (m².s⁻¹): Viscosité cinématique de l'air

$$D_c^a = \frac{2,29}{101325} \left(\frac{T}{213} \right)^{1,8} \quad (9)$$

D_p (kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹): Coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air libre et qui est donné par la formule de Bramhall :

$$D_p = \frac{6,98 \cdot 10^{-6}}{70,43 - 0,133 T_{tam}} \exp\left(\frac{HA}{0,1792 - 2,553 HA} - 9,2\right) \quad (10)$$

l_{tam} (m): Largeur d'une avivé

Pour pouvoir modéliser la vitesse de séchage donc, il faut avoir une expression analytique donnant les isothermes de sorption. Ces isothermes sont les expressions de la teneur en humidité du curcuma en fonction de l'humidité relative de l'air à température constante. Dans la littérature, on peut trouver des expressions analytiques de différents produits hygroscopiques [19], [20], [21]. Parmi ces modèles, nous avons choisi le modèle de Bradley défini comme suit :

$$HR_{\text{eq}} = \exp(-K_2 K_1^{100X} - K_3) \quad (11)$$

Où K_1 , K_2 , K_3 sont des paramètres qui dépendent du produit et de sa température.

Le choix de ce modèle est justifié par la supposition que la composition du curcuma se rapprocherait de la texture du bois qui est fibreuse. Pour trouver les paramètres qui représenteraient le mieux le curcuma, on s'est inspiré des valeurs de Simpson [22], [23] et on a posé :

$$K_1 = K_{11} + K_{12}T_p + K_{13}T_p^2 \quad (12)$$

$$K_2 = K_{21} + K_{22}T_p + K_{23}T_p^2 \quad (13)$$

$$K_3 = K_{31} + K_{32}T_p \quad (14)$$

On a procédé à la validation du modèle en utilisant la méthode des moindres carrés en tenant référence des résultats d'expérience qu'on a obtenue.

3. Résultats et discussions

Les expériences de séchage nous ont permis de relever les paramètres qui nous ont aidés à définir la cinétique de séchage du curcuma. On a effectué plusieurs essais de séchage, les résultats des expériences (Fig 8.). D'après ces courbes, on peut remarquer que la vitesse de séchage n'est pas la même pour chaque niveau de claies. Les curcuma des claies inférieures sèchent plus vite du fait qu'ils sont plus près de l'air chaud, sachant que le soufflage de l'air s'est fait de bas en haut, l'air passant dans les claies supérieures est déjà chargé des eaux évaporées des curcuma où il est déjà passé.

L'expérience a été faite en mois de février, donc en une période chaude, alors on n'a pas pu constater de grande différence entre l'humidité relative de l'air à l'arrêt et reprise de séchage le lendemain car l'air ne subit pas de grande variation de température; il faut toujours tenir en

compte du fait que le séchage dépend aussi des conditions extérieurs (de l'air ambiant : température, humidité relative,...)

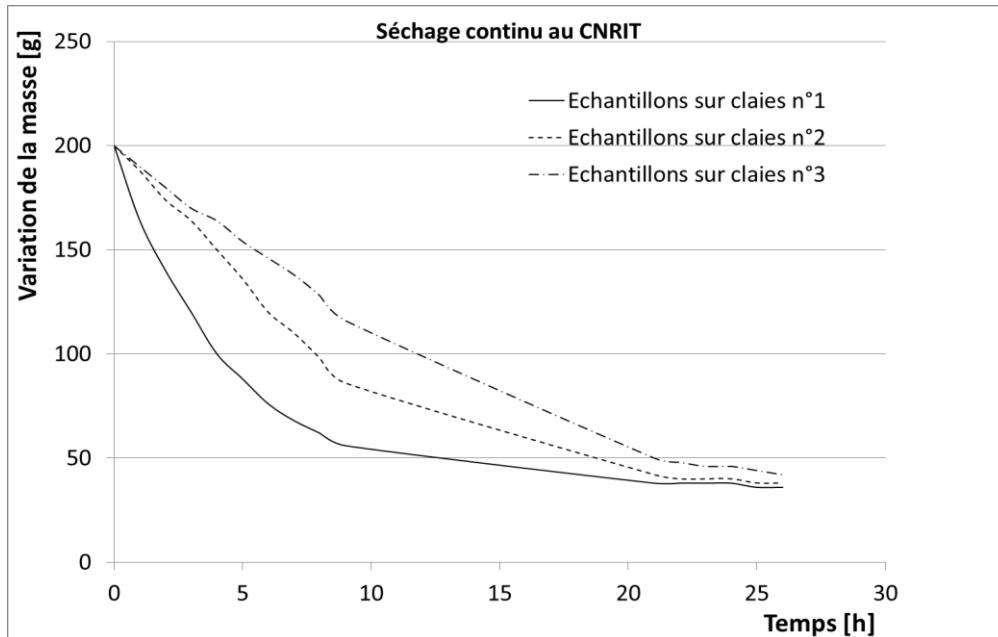


Fig. 8. Courbe de séchage expérimental

Les calculs à partir des modèles empiriques nous ont emmenés aux résultats suivants :

$$K_1 = 0,607 + 278 * 10^{-5} T_p - 5 * 10^{-6} T_p^2$$

$$K_2 = -8,958 + 0,0762 T_p - 13,9 * 10^{-5} T_p^2$$

$$K_3 = 14,685 * 10^{-7} + 15,46 * 10^{-6} T_p$$

Ce sont les coefficients des paramètres K1, K2, K3 propre au Curcuma. A partir de ces nouveaux coefficients, on a tracé l'isotherme du curcuma à la température de 45° (Fig. 9.). On peut voir sur cette courbe que les valeurs modélisés se rapprochent des valeurs expérimentales, un fait qui nous a permis de garder ce résultat avec un coefficient de détermination R2=0,89.

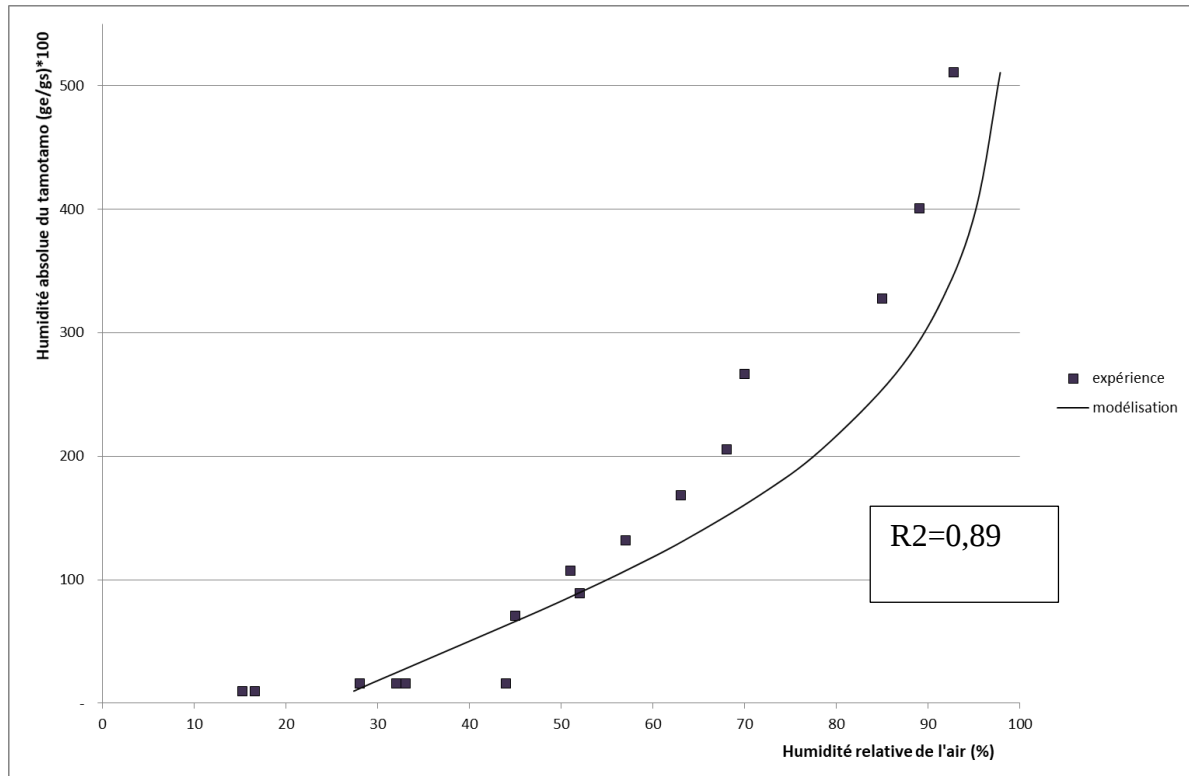


Fig. 9. Isotherme du curcuma à 45°C

De plus, si l'on se penche sur l'allure de notre isotherme, elle avoisine le type d'isotherme III dans les cinq types définis par Brunauer et al. cité par Le Cloux [24] (Fig. 10) en rappelant que ce type III représente d'après cette étude les produits moins hygroscopiques, comme des caoutchoucs, les fibres synthétiques ou les produits agroalimentaires à fortes teneurs en glucose.



Fig. 10. Les 05 types d'isothermes d'adsorptions définies par Brunauer et al. D'après le Cloux [24]

On s'est permis de tracer par la suite les isothermes obtenues pour quelques valeurs de températures (Fig. 11.). Cela nous induit à la conclusion que la température idéale pour le séchage du Curcuma ne doit dépasser les 50°C parce qu'à partir de cette température, le séchage serait trop brusque ce qui endommagerait plutôt le produit, car il sera plus brûlés que séché.

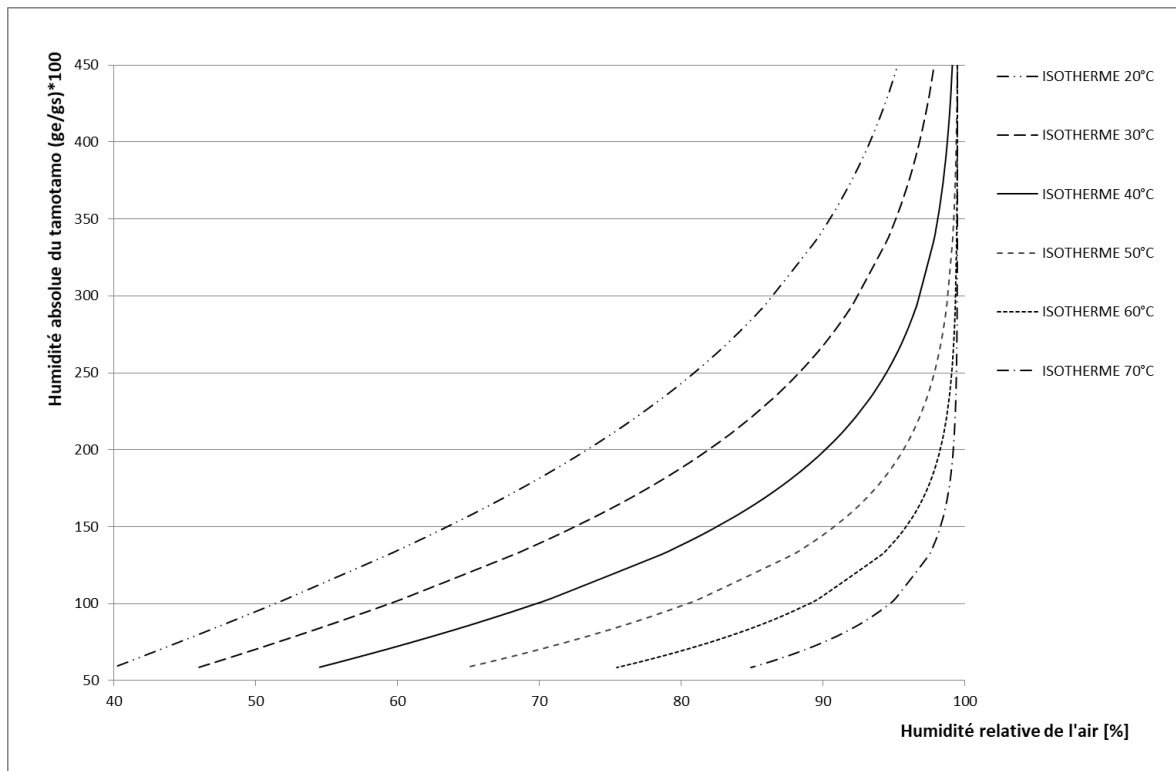


Fig. 11. Isothermes pour quelques valeurs de température

Durant notre expérience de séchage, 03 facteurs importants sont à maîtriser. En premier, l'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface. La température du produit a intérêt à être la plus élevée possible pour obtenir une vitesse de séchage importante. Elle ne doit cependant dépasser une certaine valeur $T_{\max}$ au-delà de laquelle le produit peut-être altéré ou détruit. Ceci est particulièrement vrai pour les fruits et légumes dont les éléments nutritifs peuvent être détériorés. Ensuite, la capacité de l'air environnant à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit : l'humidité relative

Et enfin, la vitesse de l'air asséchant car la migration de l'eau ne peut se faire que si il y a de l'air pour le porter. On notera qu'une vitesse de séchage trop élevée en début d'opération peut conduire à un phénomène de croûtage : formation d'une pellicule résistante au passage de la vapeur d'eau qui ralentit ensuite le séchage. Pour ce dernier, on peut constater que pour une valeur fixée (dans notre cas : vitesse et température de l'air asséchant) la vitesse de séchage diminue au fur et à mesure que le séchage progresse. L'humidité relative de l'air asséchant influe aussi sur la vitesse de séchage, plus elle est élevée, et plus la vitesse décroît. La vitesse de séchage croît avec la température de l'air asséchant (Fig. 12.).

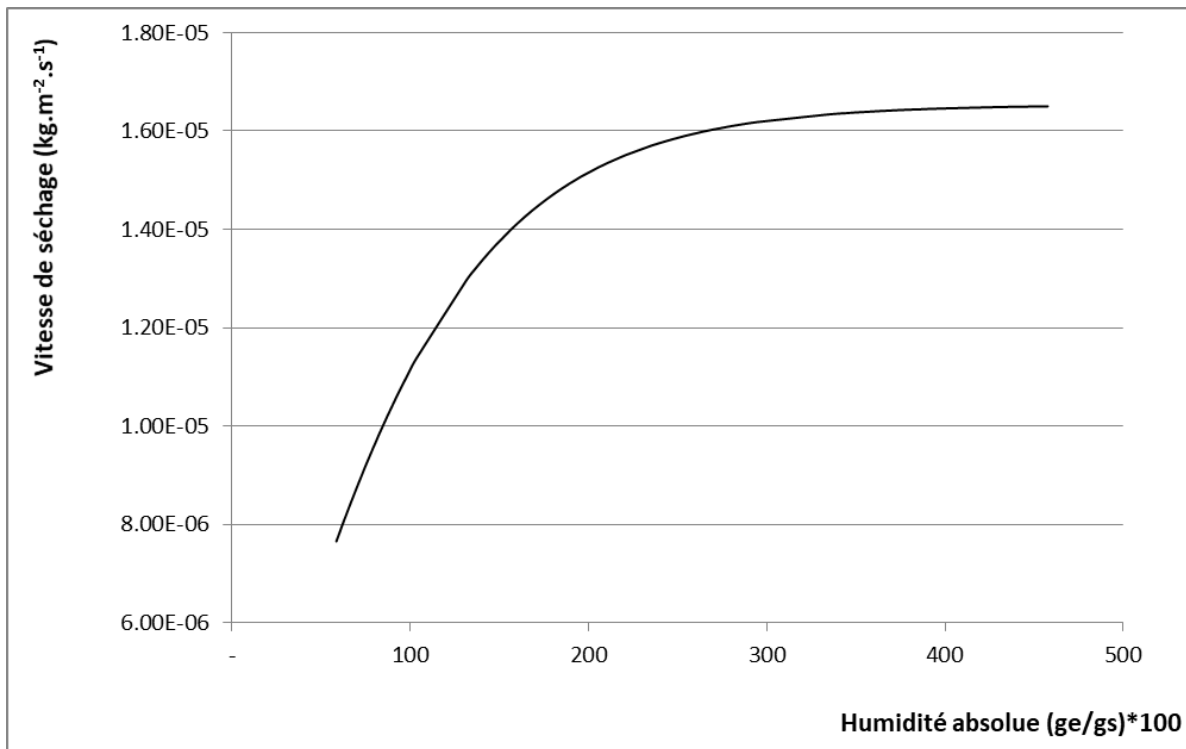


Fig. 12. Courbe de vitesse de séchage du curcuma

4. Conclusion

Le présent document contribue à la détermination des paramètres de séchage du Curcuma afin de pouvoir dimensionner un séchoir qui serait bien optimisé pour assurer son séchage, calculer la faisabilité et rentabilité d'un tel projet plus tard.

Pour cela, le travail s'est fait en 02 temps : la première par une étude expérimentale du séchage du curcuma, et par la suite, une modélisation.

Les travaux d'expérimentation nous ont permis de relever les paramètres de séchage du curcuma, qu'on pourra ensuite référer avec le modèle de Bradley, un modèle mathématique communément utilisé pour le séchage du bois dans de nombreux travaux déjà faite.

On a pu obtenir la courbe de sorption du curcuma, par analogie au modèle de Bradley en s'appuyant des données obtenus des expérimentations, et de ce fait, la vitesse de séchage du curcuma a pu être tracé. Ces courbes sont d'une grande importance dans la suite des travaux de séchage qu'on pourra mener sur le curcuma.

Même si les résultats que nous avons obtenus par la simulation sont significatifs et satisfaisantes, il existe encore des améliorations qu'on pourrait apporter vu l'importance et la pertinence du sujet. Pour cela, on pourrait essayer de comparer les résultats obtenus avec le

modèle de Bradley avec d'autres modèles sachant que ce travail est le premier, encore faite sur le produit et qu'il n'existe encore aucun résultat à confronter avec ce qu'on a obtenu.

Nomenclature

h_m	: Coefficient de transfert de masse entre le produit et l'air	($\text{kg.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
HR	: Humidité relative de l'air	(%)
HR_{eq}	: Humidité relative d'un air à une température donnée avec laquelle le produit serait en équilibre	(%)
l_p	: Largeur d'une avivé	(m)
$\dot{m}$	: Vitesse de séchage	($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
M_p	: Masse du curcuma	(kg)
N_u	: Nombre de Nusselt	
P_{va}	: Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	(Pa)
$P_s(T)$	: Pression de vapeur saturante à la température de l'air	(Pa)
P_{vp}	: Pression partielle de vapeur d'eau dans le curcuma	(Pa)
Re	: Nombre de Reynolds	
R_e	: Résistance d'encrassement	
Sc	: Nombre de Schmidt	
T_{air}	: Température de l'air	(°K)
T_p	: Température de curcuma	(°K)
σ	: Constante de Stephan Boltzman	
ρ	: Masse volumique	(kg.m^{-3})
ν	: Viscosité cinématique	($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

5. Références

- [1] Pleau, R., Desnos, G., & Vancrayenest, L. (2011). Utilisation rationnelle de l'énergie pour le séchage des grains et des fourrages. France: ADEME.
- [2] ADEME, A. (2006). Le séchage thermique. France: Département Industrie et Agriculture.

- [3] Boukadoum, A. (2013). Le séchage solaire des produits agricoles. Recherche Et Développement.
- [4] Helinomenjanahary, M. (2011). Etablissement de la vitesse de séchage en couche mince du paddy en utilisant la méthode du réseau de neurones. Madagascar: Université de Fianarantsoa.
- [5] Ahamadi, M. (2010). Etude théorique d'une serre à section droite triangulaire isocèle de faible coût pour le séchage des produits agricoles. Université d'Antananarivo: Mémoire de DEA.
- [6] Ratsimbazafy, A. (2006). Etude et réalisation d'un séchoir solaire à usage domestique. Université d'Antananarivo: Mémoire de DEA.
- [7] F Emilson. Analyse technico-économique d'un système de séchage du bois: Sechoir a bois semi-industriel. Mémoire de DEA: Université d'Antananarivo; 2006.
- [8] Andrianirina, H. L. (2000). Etudes et réalisation d'une étuve de séchage pour l'acquisition des données permettant la modélisation des courbes de vitesse de séchage et d'isotherme de desorption. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo: Mémoire d'Ingéniorat.
- [9] Slim, R. (2007). Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe chaleur(Thèse de Doctorat). Mines Paris Tech, France.
- [10] M Lamharrar, Abdelkader Kane, Sidi Ethmane,Idlimam Ali,Akkad Siham, Kouhila Mohamed Mimet Abdelaziz Ahachad. Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot. In 13^è Journées Internationales de Thermique; 2007, pp. 1–5.
- [11] Aghfir, M., Kouhila, M., & Jamali, A. (2005). Isothermes d'adsorption-desorption des feuilles de romarin (*Rosmarinus officinalis*). 12^è Journées Internationales de Thermiques
- [12] Touati, B. (2004). Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Thèse de Doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen.
- [13] Bruno, D. V. (2014). Détermination des paramètres de la cinétique de séchage et conception d'un séchoir à chauffage partiellement solaire pour le paddy (Thèse de Doctorat). Université d'Antananarivo, Madagascar.
- [14] Akkad, S., Idlimam, A., & Essaber, M. (2008). Evaluation des isothermes de désorption et de la chaleur isostérique de deux plantes aromatiques et médicinales par la méthode gravimétrique statique en vue de leur séchage. *Rev Des Energies Renouvelables*, 1-6.

- [15] Jannot, Y. (2006). Du séchage des produits alimentaires à la caractérisation thermophysique des solides. Université de Bordeaux: HDR.
- [16] Lamouche, C. (2011). Etude des conditions de mise en oeuvre d'une indication géographique sur le curcuma d'Anivorano Est Madagascar (Thèse de maîtrise). Istom.Ecole d'Agro-développement.
- [17] Lamouche, C. (2011). Etude de cas: la commercialisation du curcuma de la commune d'Anivorano Est, Distric de Brickaville, Région Antsinanana. Istom: Ecole d'Agro-développement Int.
- [18] Defo, M. (1999). Modélisation du séchage du bois sous vide par contact: l'approche du potentiel hydrique (Thèse de Doctorat). Université de Laval.
- [19] Jannot, Y. (2008). Isothèrmes de sorption. Cours.
- [20] Ramamonjisoa, B. O. (1993). Contribution au développement de séchoir à chauffage partiellement solaire à la Réunion: mise au point d'un dispositif de mesure de vitesse de séchage en couche mince et d'un code de calcul d'abaques de dimensionnement (Thèse de Doctorat). Université de la Réunion.
- [21] Ramamonjisoa, B. O. (1997). Elaboration d'un logiciel interactif pour le dimensionnement et diagnostic énergétique de séchoirs à chauffage partiellement solaire (Thèse de Magister). Université d'Antananarivo.
- [22] Ranarijaona, J. D. (1986). Analyse technico-économique d'un système solaire de séchage pour le bois (Thèse de Doctorat). Université d'Antananarivo.
- [23] Aissani, L., & Mezaache, N. A. E. (2008). Etude de l'évolution de l'humidité et de la température lors du séchage d'un milieu poreux: le bois. *Revue Des Energies Renouvelables*.
- [24] Leonard, A. (2002). Etude du séchage convectif de boue des stations d'épuration - suivi de la texture par microtomographie à rayon X (Thèse de Doctorat). Université de Liège.