DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v2i2.932 *Rev. Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 87-97*

Approche Expérimentale de la Cinétique de Séchage de la Verveine (Lippia Citriodora)

Abdelhamid Belghit [1], Mounir Kouhila [2] et Bouchra Boutaleb [1]

[1] Laboratoire de Mécanique des Fluides et Energétique, Faculté des Sciences Semlalia, B.P. 2390, Marrakech, Maroc

[2] Laboratoire d'Energie Solaire, Ecole Normale Supérieure B.P. 2400, Marrakech, Maroc

(Accepté le 27.10.99)

Résumé - *Cet article se propose de contribuer à l'optimisation et au dimensionnement des séchoirs solaires pour plantes médicinales, en déterminant expérimentalement les isothermes de sorption de la verveine pour différentes températures. Ensuite, l'influence de la vitesse de l'air asséchant, de sa température et de son humidité sur la cinétique de séchage du produit dans un séchoir tunnel, est étudiée. La courbe caractéristique de séchage et par suite la corrélation exprimant la vitesse de séchage de la verveine sont élaborées à partir des résultats de l'expérience.*

Abstract - *This paper aims to contribute to the optimization and design of solar dryers intended for medical herbs by determining experimentally the isotherms of sorption of verbena at different temperatures. Then, the influence of drying air velocity, drying air temperature and air moisture content on the drying kinetics of product in a drying tunnel is studied. The characteristic curve of drying and the expression of the drying rate of verbena are elaborated from the experimental results*.

Mots clés : Isothermes de sorption - Séchage - Verveine - Vitesse de séchage - Séchoir tunnel.

1. INTRODUCTION

L'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité biologique du produit séché. Ces considérations ont conduit à de nombreux travaux, et ce aux différents niveaux du processus : le séchoir, le produit et le coût économique [1]. Nous étudions dans ce travail les isothermes de sorption et la cinétique de séchage de la verveine dans le but de contribuer à la compréhension du séchage de plantes médicinales et la conception des séchoirs solaires adaptés à ces produits.

Le séchage thermique artificiel est le mode adopté dans cette étude. Ce mode est souvent utilisé dans le domaine agro-alimentaire pour éviter la détérioration des produits et faire des réserves, et dans le domaine industriel pour créer de nouveaux produits.

En procédant à un séchage artificiel, on est souvent confronté aux difficultés suivantes : la première difficulté provient du fait que chaque produit a une cinétique de séchage qui lui est propre. En outre, le pouvoir évaporatoire de l'air chaud et humide augmente les processus de détérioration d'un produit biologique. A part les difficultés dues aux produits à sécher, il existe des difficultés techniques liées à l'expérience.

La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable dans l'étude du séchage du fait qu'elle donne des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit à sécher. C'est l'objectif de la première partie de ce travail.

La seconde partie est consacrée à la cinétique de séchage dans une soufflerie à atmosphère

contrôlée. Il s'agit de déterminer la courbe caractéristique de séchage (C.C.S) à partir de laquelle on pourrait déduire la corrélation exprimant la vitesse de séchage du produit.

2. ISOTHERMES DE SORPTION

L'isotherme de sorption-désorption est une courbe qui rapporte la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit étudié en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure. Ces courbes peuvent différer l'une de l'autre bien qu'on soit à la même valeur de l'humidité relative HR et à une température donnée. Cette différence est observée selon que ces courbes représentent une adsorption ou une désorption.

Bien que les isothermes de sorption et de désorption aient des allures semblables, le principe permettant leur obtention est complètement différent. En effet, s'il s'agit d'un produit préalablement sec, mis en présence d'un air humide, alors le système favorise la fixation d'une partie de l'eau contenue dans l'air par le produit. L'équilibre est donc dû à la sorption et la relation entre l'humidité relative et la teneur en eau d'équilibre constitue une isotherme de sorption de ce produit. Dans le cas où il s'agit d'un produit humide maintenu à une température constante et placé dans une enceinte où règne le vide, on suit la variation de la pression qui augmente d'une valeur très faible à une valeur d'équilibre due à l'évaporation de l'eau contenue dans le produit. Ainsi, la relation entre l'humidité relative du produit et la tension de vapeur d'équilibre correspondante constitue l'isotherme de désorption. Les deux courbes présentent une hystéresis dans la plupart des cas. [2]

2.1 Détermination expérimentale de la courbe de sorption

2.2.1 Matériel et mode opératoire

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer expérimentalement les isothermes de sorption. Dans ce travail, nous avons opté pour une méthode statique. Ainsi, on peut utiliser, soit des solutions d'acide, soit des solutions de sels saturés. Nous avons opté pour ces dernières. En effet, même si les solutions salines exigent une longue durée pour que l'équilibre thermodynamique se réalise, elles ont l'avantage de présenter un domaine plus restreint de variation de l'humidité relative et sont plus stables que les solutions acides. [3]

Le dispositif expérimental consiste en une série de six bocaux, d'un litre chacun, remplis au quart par une solution de sel saturée et comportant un porte-échantillon sur lequel est placé environ 0,1 g de verveine. Les six bocaux sont placés dans un bain thermostaté muni d'un régulateur de température. (Fig. 1)

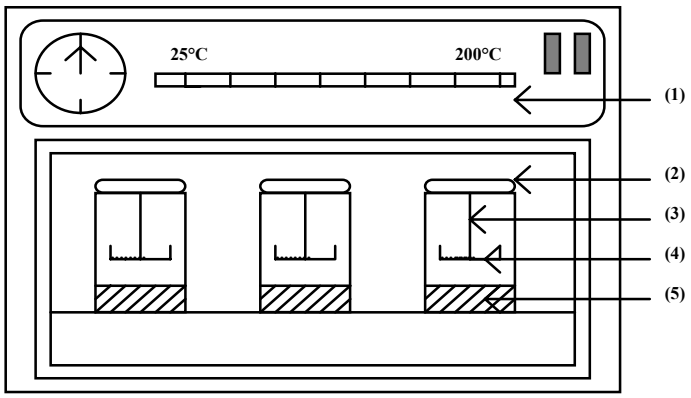

Fig. 1: Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption
(1) Bain thermostaté (2) Bocal (3) Porte échantillon
(4) Verveine (5) Solution saline saturée

On a utilisé six sels différents de sorte qu'on puisse avoir des l'humidité relative allant de 0 à 100 %.

2.1.2 Préconditionnement et déroulement de l'expérience

Après avoir rempli au quart les bocaux par les solutions salines saturées, on les place dans le bain thermostaté rempli complètement d'eau et dont la température est fixée à 40 °C. Cette valeur de température indiquée par le régulateur et pouvant être confirmée par un thermomètre, constitue notre température de travail.

Avant de mettre 0,1 g de verveine dans chaque flacon, les six échantillons subissent un préséchage les préparant au phénomène de sorption. Le préséchage est réalisé dans une étuve portée à une température de 50 °C et ceci jusqu'à déshydratation maximale du produit. Chaque prise d'essai est ensuite placée dans le flacon, puis dans le bocal. Dans les bocaux où l'humidité de l'air est importante (plus de 60 %)**,** leurs flacons sont munis d'un couvercle de protection contre les gouttelettes qui proviennent de la condensation afin d'éviter toute réhumidification des échantillons.

2.1.3 Résultats expérimentaux

La masse humide du produit est pesée par intervalles de temps successifs. Au fur et à mesure que la variation de la masse devient petite, on augmente l'intervalle de temps jusqu'à l'obtention d'une masse fixe indiquant l'atteinte de l'équilibre hygroscopique.

Dès que les masses des six échantillons deviennent stationnaires, on arrête l'expérience et les échantillons sont pesés et placés dans une étuve réglée à environ 105 °C pendant six à sept heures jusqu'à ce que leurs masses ne varient plus avec le temps. L'objectif de cette dernière opération est de déterminer les masses sèches des six échantillons. La connaissance de la masse humide et de la masse sèche du produit avant et après le séchage dans l'étuve, nous permet d'avoir la teneur en eau à l'équilibre $X_{eq} = (M_h\text{-}M_s)/M_s$ dans chaque bocal. Les résultats de cette expérience sont représentés sur la figure 2.

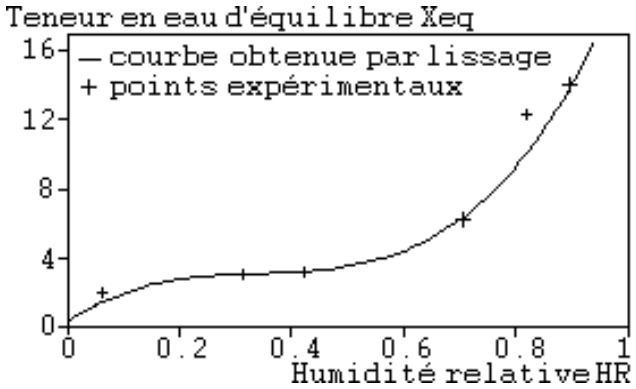

Fig. 2: Isotherme de sorption de la verveine obtenue à 40 °C

2.2. Modélisation des isothermes de sorption

Pour modéliser les courbes de sorption, de nombreuses corrélations empiriques existent dans la littérature scientifique. Parmi ces modèles, on a choisi ceux d'Henderson et de B.E.T.

2.2.1. Modèle d'Henderson

Afin de mieux tenir compte de l'influence de la température sur l'équilibre hygroscopique, nous utilisons le modèle d'Henderson [4], qui présente l'avantage de décrire l'ensemble des isothermes de sorption. La corrélation exprimant ce modèle s'écrit :

$$X_{eq}\left(T', HR\right) = \left[\frac{-\,Ln\left(1-HR\right)}{k\left(1{,}8\,T' + 492\right)}\right]^{1/n} \qquad (1)$$

Cette écriture permet de calculer les isothermes de sorption pour n'importe quelle température de travail T'. Les constantes k et n dépendent de la température et des caractéristiques du produit. Pour les déterminer, la relation (1) peut être mise sous la forme suivante :

$$n\,Ln(X_{eq}) + Ln(k) = Ln(-Ln(1-HR)) - Ln(1{,}8\,T' + 492) \qquad (2)$$

C'est l'équation caractéristique d'une droite dont la pente n'est autre que la constante 'n'. Ln (k) est la coordonnée du point où cette droite coupe l'axe des ordonnées. Le tracé de cette fonction montre clairement l'existence de deux droites de pentes différentes :

- pour $0 \leq HR \leq 0{,}35$, les valeurs de k et n sont : $k = 52\ 10^{-6}$ et $n = 2{,}014$
- pour $0{,}35 \leq HR \leq 1$, les valeurs de k et n sont : $k = 345\ 10^{-6}$ et $n = 0{,}97$

A partir de ces coefficients, on a calculé la courbe de sorption à la température 40 °C. La représentation de ces résultats est montrée sur la figure 3, dans laquelle on remarque que la courbe calculée à partir du modèle d'Henderson et les points expérimentaux ont pratiquement la même allure.

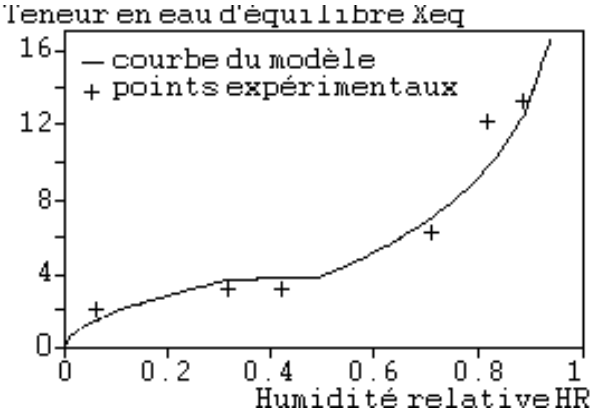

Fig.3: Courbe de sorption calculée à partir du modèle d'Henderson à T = 40°C

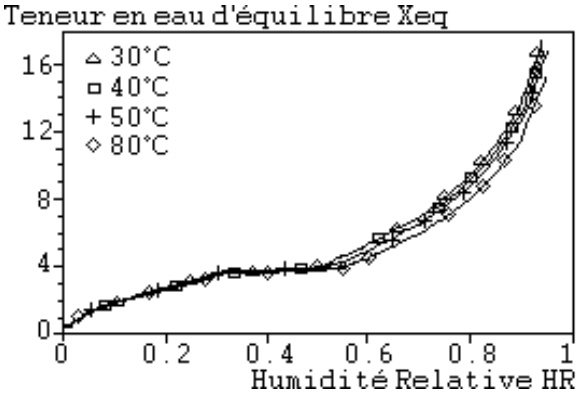

Fig. 4: Courbe de sorption calculée à partir du modèle d'Henderson pour différentes températures

Pour étudier l'influence de la température, on a calculé les courbes de sorption pour les températures T = 30 °C, 50 °C et 80 °C. La figure 4 montre que la teneur en eau à l'équilibre décroît lorsque la température augmente.

2.2.2 Modèle de B.E.T

Dans le but de mieux comprendre comment s'effectue la sorption dans la verveine, nous avons utilisé le modèle proposé par Brunauer, Emmet et Teller (noté B.E.T) [5]. Ce modèle permet d'examiner les phénomènes de fixation et de libération des molécules d'eau. Il s'écrit sous une forme générale comme suit :

$$X_{eq} = \left[\frac{HR\ X_M\ a}{1 - HR}\right]\left[\frac{1 - (n'+1)\,HR^{n'} + n'\,HR^{n'+1}}{1 + (a-1)\,HR + a\,HR^{n'+1}}\right] \qquad (3)$$

Si on ne tient compte que des monocouches adsorbées (n' = 1) et si on néglige le terme au carré de l'humidité relative HR, l'équation (3) devient :

$$\frac{HR}{(1-HR)\,X_{eq}} = \frac{1}{a\,X_M} + \frac{(a-1)}{a\,X_M}\,HR \qquad (4)$$

En traçant HR / [(1 - HR) X_{eq}] en fonction de HR, on obtient une droite dont la pente est (a - 1)/(a X_M) et l'ordonnée à l'origine est 1/(a X_M), ce qui permet de calculer les constantes suivantes :

$$\begin{cases} a = 45{,}76 \\ X_M = 2{,}292 \quad [kg/kg\,de\,ms] \end{cases}$$

Sur la figure 5, on a tracé la courbe de sorption de la verveine calculée à partir du modèle de B.E.T. Ce modèle n'est adapté qu'aux faibles humidités relatives (0 < HR < 50 %), ce qui correspond à la fixation de la monocouche des molécules d'eau.

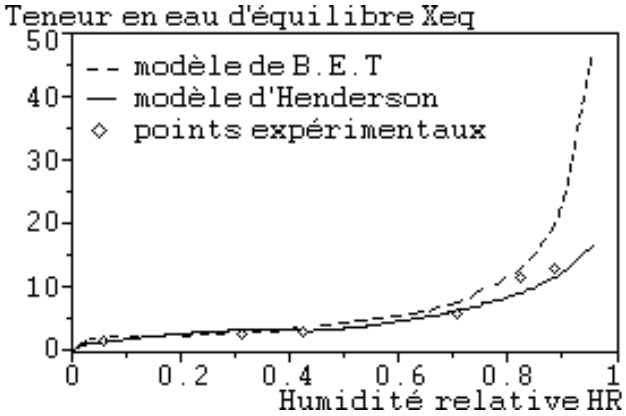

Fig. 5: Isothermes de sorption de la verveine calculées à l'aide des modèles de B.E.T et d'Henderson pour 0 ≤ HR ≤ 100 %

Dans le but de comparer les performances des deux modèles, on a porté sur la figure 5 les points expérimentaux et les courbes obtenues à partir des modèles de B.E.T et d'Henderson pour des humidités relatives allant de 0 à 100 %. On en conclut que le modèle de B.E.T décrit mieux que celui d'Henderson l'isotherme de sorption de la verveine. Cependant, ce modèle est valable uniquement dans la gamme d'humidités allant de 0 à 50 %. Pour les hautes valeurs de HR, les résultats obtenus par ce modèle sont loin des points expérimentaux.

3. CINETIQUE DE SECHAGE DE LA VERVEINE

3.1 Introduction

Dans la partie précédente, on a étudié l'équilibre hygroscopique de la verveine, ce qui a permis d'avoir une idée sur la teneur en eau d'équilibre relative à une humidité donnée. Les résultats de cette étude ont permis d'avoir les courbes de sorption, nécessaires pour connaître les conditions permettant le stockage du produit et l'étude de sa cinétique de séchage.

Il existe plusieurs modèles numériques qui ont été utilisés pour rendre compte de la cinétique de séchage [2]. Cependant, vu la complexité des mécanismes et la diversité des produits, un modèle unique ne peut représenter toutes les situations. Ainsi, seule une étude expérimentale permettrait de déterminer la cinétique de séchage d'un produit.

C'est l'objet de la partie suivante, où une étude expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine en vrac est présentée et l'influence de quelques paramètres de l'air tels que la température et la vitesse sur la vitesse de séchage sera étudiée.

3.2 Description de l'appareillage expérimental

Le dispositif expérimental permettant l'étude de la cinétique de séchage consiste en une soufflerie à atmosphère contrôlée (genre de séchoir tunnel) que nous avons équipée par les instruments de mesure appropriés. [1]

3.2.1 Description de la soufflerie

Il s'agit d'une soufflerie à air humide montée sur un châssis, dans laquelle on peut contrôler à la fois la température, la vitesse et l'humidité de l'air. Elle comprend : (Fig. 6)

a) Une veine d'essai de forme carrée de dimension (25 cm x 25 cm). Elle comprend un emplacement prévu pour fixer les échantillons et des entrées pour y placer les thermocouples et le tube de Pitot.
b) Un humidificateur alimenté en eau à température variable.
c) Une batterie chauffante (24 kW) régulée par une sonde de température.
d) Une unité de traitement de l'air comprenant un ventilateur à vitesse variable.

La soufflerie comprend également une armoire de commande régissant :

- un régulateur de batterie de chauffe
- un régulateur d'humidité
- une commande de la vitesse de ventilation
- une commande de l'électrovanne du circuit de l'humidificateur.

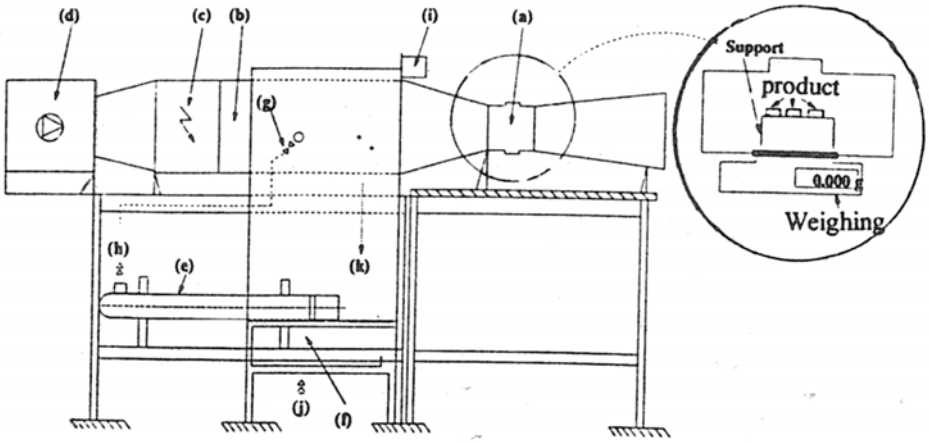

Fig. 6*:* Schéma de la soufflerie aérothermique à atmosphère contrôlée
(a) veine d'essai (b) humidificateur (c) chauffage (d) ventilateur
(e) réchauffeur (f) électrovanne (g) vanne de réglage (h) eau chaude
(i) sondes d'humidité et de température (j) eau froide (k) rejet

3.2.2 Paramètres mesurés

La mesure des températures est effectuée par des thermocouples de type Chromel/Alumel de diamètre Φ = 1 mm et de précision 0.5 K. Ces thermocouples servent à repérer la température sèche de l'air et la température à la surface du produit. Les mesures des pertes de masse, sont effectuées au moyen d'une balance électronique à affichage numérique, de précision 0,001 g. La vitesse de l'écoulement de l'air, est obtenu au moyen d'un vélocimètre de précision connecté au tube de Pitot, se trouvant dans la veine d'essai près de la surface du produit.

3.3 Déroulement de l'expérience

Vu le poids léger de la feuille de verveine, l'expérience ne peut être faite sur des feuilles isolées. Ainsi, on a été conduit à faire un séchage en vrac. La méthode de mesure consiste à suivre la perte de masse par une balance placée juste au-dessous de la veine d'essai. Elle joue

le rôle d'un support pour les échantillons. Mais, pour les mêmes raisons évoquées ci-dessus, un faible débit d'air projette le produit hors de la veine. Ainsi, nous étions amenés à utiliser une cage grillagée comme support des échantillons que nous avons placé sur la balance.

Le principe de l'expérience consiste à fixer la vitesse et la température de l'air pour chaque essai. On laisse le système se stabiliser (environ 1 heure), ensuite le produit est introduit dans la veine d'essai. Dès ce moment, on commence à suivre la variation de la masse du produit. L'intervalle de temps entre deux mesures successives est de quelques secondes au début de l'opération. Au fur et à mesure que la masse diminue, on augmente cet intervalle pour devenir à la fin de l'ordre d'une heure. Cette façon de procéder entraîne des fluctuations de masse considérables dues à l'effet de la poussée d'air. Certains chercheurs ont adopté comme solution la prise des mesures après arrêt de la ventilation [6]. Le séchage est alors non continu et les perturbations apportées par ces arrêts entraînent d'autres incertitudes.

Les courbes de séchage recherchées se basent sur la variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps. La masse humide étant connue, et pour connaître la masse sèche, on place le produit dans une étuve réglée à 105 °C jusqu'à atteindre la déshydratation complète.

3.4 Résultats expérimentaux et discussion

On étudie la variation de la teneur en eau en fonction du temps et l'influence de quelques paramètres de l'air asséchant (vitesse et température) sur l'allure de séchage pour déterminer la courbe caractéristique de séchage. Le tableau 1 représente les conditions expérimentales dans lesquelles on a opéré.

Tableau 1: Conditions de l'air asséchant pour chaque essai expérimental

Essai	Vitesse de l'air V ($m.s^{-1}$)	Température sèche T_∞ (°C)	Température humide T_h (°C)	Humidité relative de l'air HR (%)
1	2,1	30	18,5	26
2	2,6	30	20,2	40
3	3,1	30	19,4	38
4	1,8	40	23,5	28
5	2,6	50	25,4	15

Les figures 7 et 8 représentent les courbes de séchage dans des conditions variables de l'air. On constate que ces conditions ont une influence déterminante sur l'allure de celles-ci.

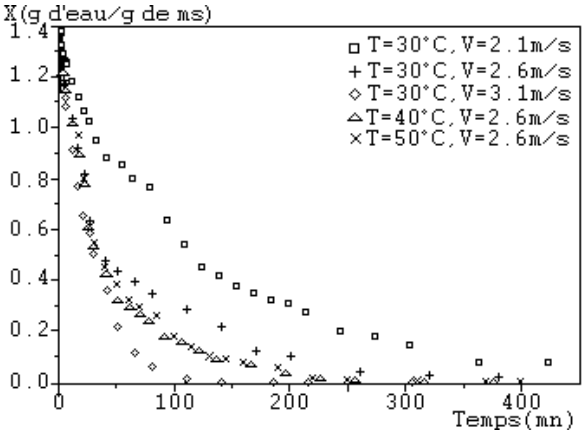

Fig. 7: Variation de la teneur en eau de la verveine en fonction du temps pour différentes conditions de l'air

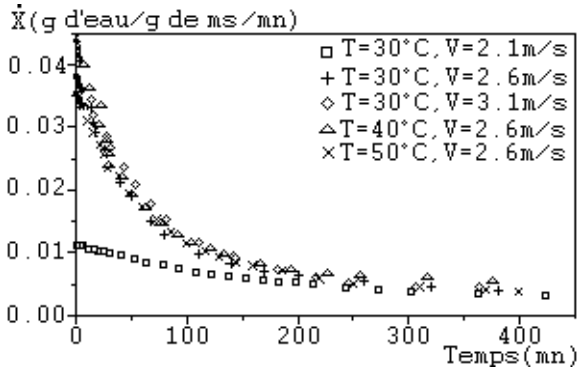

Fig. 8: Variation de la vitesse de séchage de la verveine en fonction du temps pour différentes conditions de l'air asséchant

On en tire deux constatations principales :

♦ la non-existence des phases 0 et 1, c'est-à-dire il y a absence de la phase de mise en température du produit et celle de séchage à allure constante, et présence uniquement de la phase 2 qui est la phase de séchage à allure décroissante. Ce résultat est conforme à la littérature. En effet, Bimbenet et al. [7] ont signalé que la période de mise en température disparaît pratiquement lorsque le produit est en particules ou en feuilles et que la période à allure constante n'est pas observée dans de nombreux cas lorsqu'il s'agit de produits végétaux. Ceci apparaît nettement dans les figures 7 et 8 qui présentent une allure décroissante dès le début du séchage.

♦ le parfait accord avec la théorie [2]. En effet, les conditions variables de l'air semblent n'avoir aucun effet vers la fin du séchage où on constate que les courbes ont tendance à coïncider. Au niveau de la phase de ralentissement, qui est la seule existante dans ce cas, les conditions de l'air ont une influence qui diminue jusqu'à devenir nulle à la fin du séchage.

3.4.1 Influence de la température de séchage

Dans cette étude, on va utiliser les résultats des essais 2, 4 et 5 qui sont effectués à la même vitesse pour des températures différentes. Les figures 9 et 10 représentent les courbes de séchage dans les conditions spécifiées.

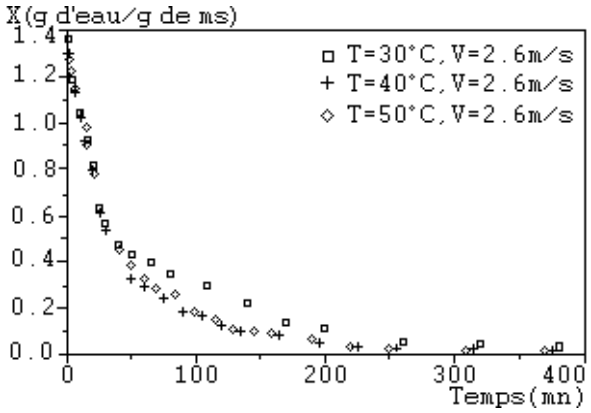

Fig. 9: Influence de la température de l'air sur l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps

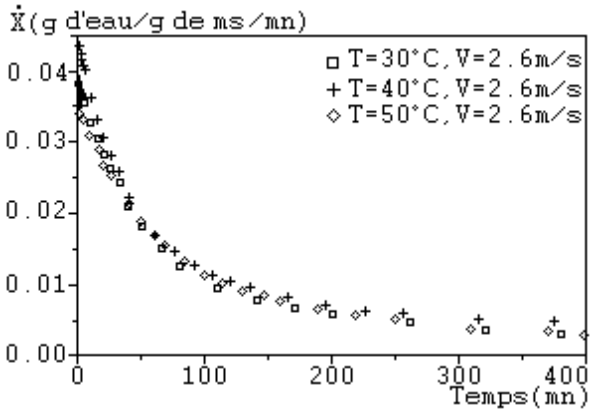

Fig. 10: Influence de la température de l'air sur l'allure de séchage en fonction du temps

La teneur en eau réduite X^* est donnée par :

$$X^* = \left(X - X_{eq}\right)/\left(X_{in} - X_{eq}\right) \quad (5)$$

Quant à la vitesse de séchage, elle augmente avec la température. Cependant, pour le cinquième essai, une anomalie apparaît car la vitesse de séchage est moins grande que pour les essais 2 et 4 même si la température a augmenté. Ceci peut être expliqué par le fait que le séchage n'est plus contrôlé par la température seule (désorption), mais plutôt par une résistance diffusionnelle sensible à la vitesse de l'air [8]. D'ailleurs, on constate clairement d'après les courbes 9 et 10 que la température n'a pas une grande influence. Ainsi la résistance due à l'évaporation superficielle n'est plus négligeable.

3.4.2. Influence de la vitesse de l'air asséchant

Pour mettre en évidence l'influence de la vitesse sur la cinétique de séchage, on a procédé à des essais en faisant varier la vitesse de l'air à température fixe (T_∞ = 30 °C). Les résultats des essais 1, 2 et 3 sont rapportés dans la figure 8.

Les résultats obtenus sont en parfait accord avec la théorie [2]. En effet, la teneur en eau a une allure décroissante au fur et à mesure que la vitesse augmente. Cependant, la vitesse de séchage $\dot{X}$ augmente d'autant plus que la vitesse de l'air asséchant augmente. Daguenet [2] explique ce phénomène en donnant la vitesse de séchage $\dot{X}$ en fonction du coefficient de transfert de vapeur d'eau dans l'air qui augmente avec la vitesse d'écoulement de l'air. Ce paramètre exerce donc une influence importante sur l'allure de séchage. Dans le cas de la verveine, la vitesse de l'air asséchant semble avoir un effet plus important que la température.

3.4.3. Détermination de la courbe caractéristique du séchage

Le but de cette partie est de synthétiser les résultats obtenus en déterminant, à partir des essais réalisés, une courbe de base dite courbe caractéristique de séchage (C.C.S). La méthode adoptée consiste à porter la vitesse de séchage normée $\frac{\dot{X}}{\dot{X}_i}$ en fonction de la teneur en eau réduite X^*, ce qui conduit à un resserrement des différentes valeurs obtenues autour d'une courbe moyenne qui est la C.C.S.

La teneur en eau d'équilibre X_{eq} peut se déduire de l'isotherme de sorption. La figure 11 représente la C.C.S ainsi obtenue. L'intérêt de cette courbe est important. En effet, il suffit de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et celle d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique du séchage dans n'importe quelle condition de l'air asséchant.

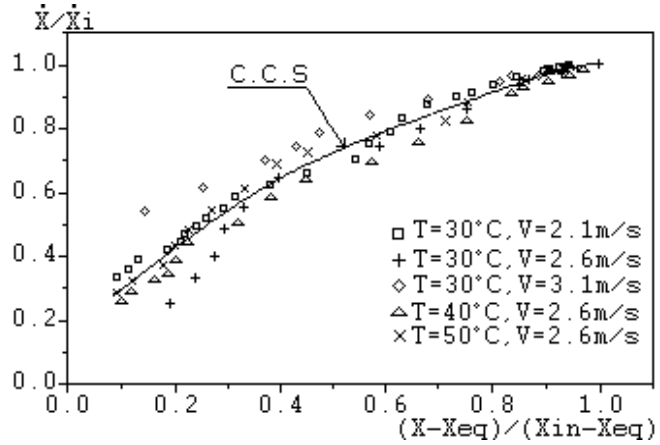

Fig. 11: Courbe caractéristique de séchage de la verveine obtenue pour différentes conditions de l'air asséchant

Un lissage de la C.C.S nous a permis de déterminer l'équation de cette dernière. Il s'agit d'un polynôme de degré 5 dont les coefficients sont les suivants :

$$\left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_i}\right) = 0{,}1880 + 0{,}8315\,X^* + 3{,}2493\,X^{*2} - 9{,}7577\,X^{*3} + 10{,}3257\,X^{*4} - 3{,}8368\,X^{*5} \qquad (6)$$

Pour la détermination de $\dot{X}_i$, on utilisera la corrélation proposée par Fornell [10] :

$$\dot{X}_i = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_i = \beta\,\alpha\,V^{\beta}(T_\infty - T_h) \qquad (7)$$

L'exploitation des résultats a permis l'identification des coefficients α et β :

$$\alpha = 9{,}01\,10^{-5} \qquad \text{et} \qquad \beta = 3{,}25$$

4. CONCLUSION

L'expérience décrite dans la première partie et consistant à déterminer l'isotherme de sorption a donné lieu à d'autres résultats. En effet à partir de six points expérimentaux et en effectuant un lissage à l'aide d'un polynôme de troisième degré dont les coefficients sont :

$$X_{eq}(40\,°C) = 0{,}0037 + 0{,}00215\ HR - 0{,}00006\ HR^2 + 5{,}8156.10^{-7}\ HR^3 \quad (8)$$

La détermination des constantes d'Henderson (k et n) nous a permis de calculer les isothermes de sorption de la verveine pour les températures 30, 40, 50 et 80 °C. En utilisant un autre modèle, en l'occurrence celui de B.E.T, on a pu comparer les courbes de sorption calculées théoriquement à partir de ces deux modèles.

A partir des résultats obtenus, on peut conclure que l'isotherme de sorption de la verveine suit bien l'allure générale de la courbe de sorption donnée par Multon [9] et que le modèle d'Henderson décrit bien l'isotherme obtenue à 40 °C.

Dans la deuxième partie, on a tracé les courbes caractéristiques de séchage de la verveine. On a constaté, en particulier, l'absence des phases 0 et 1 et l'influence de la température et de la vitesse de l'air sur l'allure de séchage.

NOMENCLATURE

a: constante de B.E.T

T: température de séchage (°C)

HR: humidité relative de l'air (%)

k et n: constantes d'Henderson

ms: matière sèche (kg)

M_h: masse humide du produit (kg)

Ms : masse sèche du produit (kg)

n': nombre de couches adsorbées

X^*: teneur en eau réduite

X_M: teneur en eau adsorbée sur la mono couche (kg d'eau/kg de ms)

X^*: teneur en eau réduite

X_{in} : teneur en eau initiale (kg d'eau/kg de ms)

T_∞ = T: température sèche de l'air (°C)

$\dot{X}$ = -dX/dt: vitesse de séchage (kg d'eau/kg de ms /s)

T_h : température humide de l'air (°C)

X_{fin} : teneur en eau finale (kg d'eau/kg de ms)

X_{eq}: teneur en eau d'équilibre (kg d'eau/kg de ms)

X_{eq}: teneur en eau d'équilibre (kg d'eau/kg de ms)

$\dot{X}_i$: vitesse initiale de séchage (kg d'eau/kg de ms /s)

X=(M_h- Ms)/M_s: teneur en eau en base sèche (kg d'eau/kg de ms)

T': température du bain thermostaté ou température de travail (°C)

V :vitesse de l'air asséchant ($m.s^{-1}$)

REFERENCES

[1] B. C. Boutaleb, '*Etude expérimentale du séchage convectif de plantes médicinales : application à la sauge et à la verveine*', Thèse de 3ème cycle, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 1997.

[2] M. Daguenet, '*Les séchoirs solaires : théorie et pratique*', Publication de l'UNESCO, Paris, France, 1985.

[3] M. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, A. Mir et M. Kaoua, '*Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires*', Revue Générale de Thermique, 380-381, pp. 444-453, (1993).

[4] S. M. Henderson, '*A basic concept of equilibrium moisture*', Agric. Eng. Vol. 33, N°1, pp. 29-32, 1952.

[5] S. Brunauer, P.H. Emmet and E. Teller, '*Adsorption of gases in multimolecular layers*', J. Arn, Chern. Soc., 60, 309, 1938.
[6] P. Ferrao, A. Figueiredo and F. Freire, '*Experimental analysis of the drying kinetics of a food product*', Drying Technology, 16 (8), pp. 1687-1702, 1998.
[7] J. J. Bimbenet, J. D. Daudin and E. Wolff, '*Air drying kinetics of biological particles*', Proceeding of the fourth International Drying Symposium, Kyoto, 1984.
[8] A. Fornell, '*Séchage de produits biologiques par l'air chaud. Calcul de séchoirs*', Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSIA, Massy, France, 1979.
[9] J. L. Multon, '*Etat de liaison de l'eau dans les aliments. Problèmes fondamentaux de séchage*', ATP-PIRDES, 1980.