Afrique SCIENCE *15(4) (2019) 169 - 190*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Design, modélisation et optimisation d'un séchoir pour matériaux textile

Alexandre BOUM*, Olivier Sosso MAYI, Benjamin DIBOMA et Zakarie NDASSA

Université de Douala, ENSET, BP 1872, Douala, Cameroun

* Correspondance, courriel : *boumat2002@yahoo.fr*

Résumé

L'objectif de cet article est le design, la modélisation et l'optimisation d'un séchoir pour matériaux textile. Après le design du séchoir, le modèle mathématique est délévoppé. Les paramètres sont determinés expérimentalement par une convection force et libre respectivement à 48°C et 33°C, à une vitesse d'air constante (m/s), avec d'humidité relative de l'air et une masse relative des vêtements de 1.935 kg. Les mesures expérimentales donne un taux d'humidité de 80.6 %, pour un temps de séchage de 160 min pour le séchoir électrique par rapport à 250 mn pour un séchage naturel. Les simulations numériques et les mesures expérimentales, nous ont permit de valider le modèle. L'erreur moyenne pour le model optimal est de 3.4 % < 10 %. Ce qui est suffisant pour valider notre modèle.

Mots-clés : *séchoir, modélisation, cinétique de séchage, optimisation.*

Abstract

Design, modeling and optimization of a dryer for textile materials

The goal of this paper is the design, modelling and optimization of a dryer for textiles material. After completion of the dryer design, the mathematical equations of the dryer are developed to define the model. The textile materials drying parameters are determined experimentally by forced convection and free convection temperatures respectively 48°C and 33°C, at a speed of constant air flow (m/s), with 69 % air relative humidity and an average mass of wet clothing 1.935 kg. The experimental results permit to obtain a moisture content of the textile samples equal to 80.6 %, with a time of 160min for the electric dryer and 250 min for natural drying. Numerical simulations of the mathematical model and experimental measurement enable us to validate the optimal model. This validation is done through the assessment of mathematical model errors on the experimental results. The average error obtained for the optimal model is 3.4 % < 10 % which is sufficient to validate our model.

Keywords : *dryer, modelling, drying kinetics, optimization.*

1. Introduction

Le séchage utilise principalement les phénomènes de transfert de masse et d'énergie comme moyens d'élimination d'eau dans les produits [1]. Il s'agit en effet d'un processus de réduction d'humidité d'un produit jusqu'à une limite de sécurité d'humidité [2]. C'est un processus essentiel dans l'industrie textile [3] et partout

ailleurs [2]. Lorsqu'on habite un petit espace, faire sécher son linge peut généralement devenir pénible, surtout en période de forte humidité. En effet, le manque de place ne permet pas forcément d'installer un sèche-linge électrique, et le recours aux étendoirs accroît l'humidité dans l'espace. L'humidité intensive engendre de la moisissure sur les vêtements et diminue par là, leur durée de vie. Aussi, un taux d'humidité très élevé peut conduire à une indisponibilité du linge au moment désiré à son emploi ; ce qui peut justifier la présence en saison pluvieuse d'un bon nombre de personnels dans les lieux de travail avec des vêtements plus ou moins humide. Cette condition influence grandement la situation socio-économique des ménages. Le présent article traite du séchage des matériaux textiles régulièrement employés comme linges dans les ménages. Il a été question de mettre au point un prototype de séchoir qui puisse être utilisé en période de forte humidité et aussi servir pour les personnes en déplacement grâce à sa mobilité. Nous proposons ici un modèle de sèche-linge électrique portatif associé à un modèle mathématique optimisé permettant de représenter la cinétique de séchage d'un matériau textile dans notre séchoir. Ce travail entre donc dans le cadre de l'amélioration de la durée de vie des matériaux textiles généralement influencés par l'humidité. Mais aussi d'assurer la disponibilité des dits matériaux en intersaison, tout en optimisant le temps de séchage. Et relativement au séchoir solaire, le modèle de séchoir proposé est conçu toutefois tenant compte des améliorations telles que la durée de séchage plus court, le gain énergétique et la meilleure qualité du produit séché.

2. Matériel et méthode

2-1. Description du sechoir

Le modèle de séchoir électrique mesure 160 cm de haut totale, 110 cm de hauteur utile (hauteur de la housse) et 41 cm de cote de base. Il est réalisé sous forme parallélépipédique et prend relativement peu d'espace pour son installation. Il est du type portatif et constitue à un ensemble de quatre pièces : l'unité de production, la chambre de séchage, la tige centrale et le support de base ou pied principale ayant chacune une fonction spécifique donnée. C'est un séchoir fonctionnant par convection qui utilise un mélange d'air (air ambiant +air chaud) pour le séchage des matériaux textiles.

2-1-1. Unité de production

Constituée d'un ventilateur et des résistances chauffantes ***(Figure 1)***, cette unité permet de pomper dans la chambre de séchage, la chaleur portée par l'air par convection au travers des résistances chauffantes. Elle est alimentée en courant alternatif 230 V/ 50 Hz avec une puissance totale de 2000 W. Elle comporte une unité de commande intégrée d'une part, assure la production contrôlée par thermostat de la chaleur à la valeur désirée en agissant sur le régulateur de température. D'autre part, il assure la régulation de la vitesse du ventilateur en agissant sur le variateur de vitesse.

Figure 1 : *Unité de production*

2-1-2. Chambre de séchage (housse)

La housse ***(Figure 2)*** est une pièce sous forme parallélépipédique, faite en tissu imperméable. Cette housse permet de canaliser le flux d'air chaud pompé par le ventilateur vers les produits à sécher. La nature du tissu toutefois limite au maximum les pertes de flux d'air chaud au travers de ses faces latérales. La hauteur totale de la chambre de séchage est de 160 cm et de base carré de côté 70 cm.

Figure 2 : *Housse*

2-1-3. La tige centrale

Constituée de deux pièces cylindriques associées l'une dans l'autre comme l'illustre la ***Figure 3***, elle permet de :

- régler la hauteur du séchoir ;
- maintenir les produits à sécher à une hauteur proche de l'unité de production et de pompage d'air chaud ;
- diminuer l'encombrement pendant le transport

La tige de base comporte un dispositif de liaison qui permet de l'emmancher au support de base ou pied. Tandis que la tige supérieure de diamètre inférieur à celui de base, est introduite dans la tige de base. Elle comporte à son sommet 4 étendoirs, sur lesquelles seront accrochées les pièces à sécher.

Figure 3 : *Tige centrale*

2-1-4. Support de base ou pied

Pris comme châssis, le support de base ou pied ***(Figure 4)*** permet de maintenir le séchoir en équilibre toutefois en supportant la charge des éléments qui le constitue.

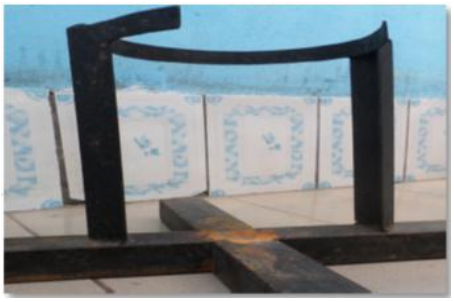

Figure 4 : *Support de base*

2-2. Fonctionnement

Le séchoir électrique portatif comme son nom l'indique est en pièces détachées. L'assemblage est simple :

- L'unité de production et de pompage d'air chaud s'emboîte sur le support de base ou pied illustré sur la ***Figure 5 (a)***
- Le séchoir monté, les vêtements directement suspendus sur les tiges étendoirs ou sur des cintres eux-mêmes accrochés aux tiges étendoirs ***(Figure 5 (b))***
- La housse est ensuite rabattu sur les vêtements ***Figure 5 (c)***.
- L'unité de production et de pompage d'air chaud est mise sous tension, générant de l'air chaud pour le séchage rapide des vêtements.
- Les vêtements secs, le séchoir est démonté, puis ranger pour diminuer l'encombrement.

(a) *(b)* *(c)*

Figure 5 : *(a) Moteur monté sur support ou Pied ; (b) Vêtements suspendus aux étendoirs ; (c) Vue générale du séchoir après avoir rabattu la housse*

2-3. Avantages de notre sechoir

Les avantages qu'offre notre séchoir sont les suivants :

- Séchoir réalisé en matériaux légers (Aluminium)
- Idéal pour les appartements
- Se monte facilement et permet un séchage rapide et hygiénique du linge
- Pratique
- Facile à assembler
- Facile à utiliser
- Faible encombrement
- Stérilise le linge à 99.3 %
- Réduit l'humidité de l'appartement par simple chauffage

2-4. Modelisation du sechoir

La modélisation, comme dans tout autre domaine est un instrument indispensable à la résolution des problèmes complexe. Ceci nous permettra de connaitre à l'intérieur du séchoir la température de séchage et l'énergie d'évaporation de l'eau sur le produit afin d'obtenir les résultats expérimentaux les plus efficients.

2-5. Hypothèses simplificatrices

Plusieurs travaux entamés sur le séchage des produits ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats [1, 8, 19]. Vu la complexité du problème, nous avons utilisé les hypothèses simplificatrices ci-dessous :

- Le séchage est opéré à température et à débit d'air constant à l'entrée du séchoir.
- Les échanges de chaleur entre l'air de séchage et l'extérieur sont négligeables
- Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés,
- L'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits (air sec et vapeur d'eau),
- L'écoulement de l'air est supposé unidirectionnel et uniforme.
- Les vêtements sont considérées comme indéformables et suffisamment humides,
- La température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit,

2-6. Modèle physique du séchoir

La ***Figure 6*** représente dans son ensemble, le modèle physique du séchoir étudié. Ce modèle prend en compte tous les aspects thermophysiques existants caractérisant le processus de séchage.

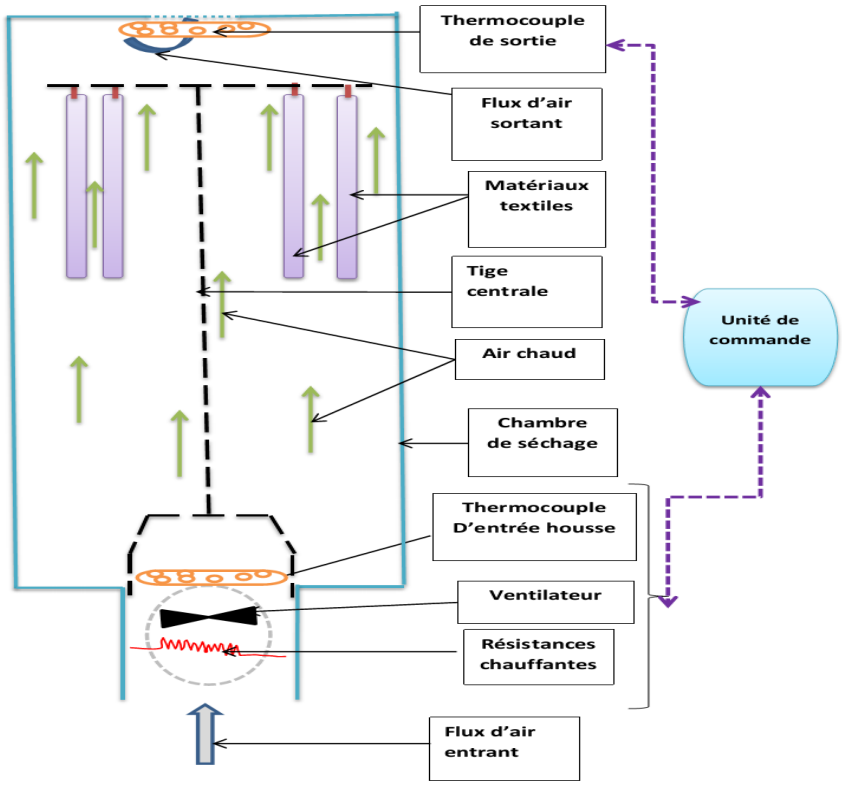

Figure 6 : *Modèle physique du séchoir type étudié*

2-7. Élaboration du modèle mathématique

Le modèle élaboré tient compte des phénomènes de transfert air-produit. Il est basé sur les bilans d'énergie dans l'air asséchant et dans les textiles (vêtements).Ces deux équations de bilans sont complétées par la prise en compte de la courbe caractéristique du séchage (C.C.S) d'une manière globale et les grandeurs physiques utilisées sont des grandeurs macroscopiques et non pas des grandeurs locales. Le produit à sécher (vêtement) est soumis à un écoulement forcé d'air chaud perpendiculaire à la base du séchoir.

2-7-1. Bilans énergétiques

En tenant compte des hypothèses précédentes, les ***Équations*** qui régissent les échanges thermiques et massiques au niveau de la chambre de séchage se traduisent par :

- *Au niveau de l'air*

$$Q = \dot{m}_a C_{pa}(T_a^* - T_a) = h_{a,pr} S_{pr}(T_a - T_{pr}) + 4h_{a,p} S_v(T_a - T_p) \quad (1)$$

avec, Q : Quantité de chaleur produit ; $\dot{m}_a$: Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir, (kg.s^{-1}) ; C_{pa} : Chaleur massique de l'air de séchage, (J.kg^{-1}.K^{-1}) ; T_a^* : Température d'entrée de l'air de séchage, (K) T_a : Température de l'air, (K) ; $h_{a,pr}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et le produit, (W.m^{-2}.K^{-1}) ; S_{pr} , S_v : respectivement surface latérale des produits et surface latérale de la house (en m^{-2}) ; T_{pr} : Température des vêtements humide, (K) ; $h_{a,p}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air de séchage et la paroi interne

- *Au niveau des produits*

$$m_{pr} Cp_{pr} \frac{dT_{pr}}{dt} = h_{a,pr} S_{pr}(T_a - T_{pr}) - P_{ev} \quad (2)$$

L'énergie reçue par les vêtements est utilisée pour évaporer l'eau qu'ils contiennent. En régime permanente et Dans le cas particulier d'un produit mince, il est possible de négliger le terme de stockage. Dans ce cas, ***l'Équation (2)*** devient :

$$P_{ev} = h_{a,pr} S_{pr}(T_a - T_{pr}) \quad (3)$$

avec, m_{pr} : Masse du produit à sécher, (kg) ; Cp_{pr}: Capacité calorifique massique du produit, (kJ.kg^{-1}.K^{-1}) ; P_{ev}: Puissance d'évaporation de l'eau contenue dans le produit. (kJ.kg^{-1}eau.s^{-1}) ; Connaissant la Chaleur latente d'évaporation de l'eau (J.kg $^{-1}$eau) et la masse d'eau évaporée nous avons ***l'Équation*** ci-dessous

$$P_{ev} = L_v(T_{pr}).m^*(T_a, W_a, D_{va}) \quad (4)$$

avec, L_v Chaleur latente d'évaporation de l'eau (J.kg $^{-1}$eau) :

$$L_v(T_{pr}) = 4186{,}5(597 - 0{,}56.T_{pr}) \quad (5)$$

Il existe plusieurs modèles pour représenter l'évolution de la teneur en eau d'un produit, tous ne sont pas applicables mais permettent plutôt de représenter les isothermes de sorption de produits. Pour le cas particulier nous allons utiliser les équations mathématiques définies dans ce chapitre pour déterminer certains paramètres dans l'étude expérimentale et lors de la simulation.

2-7-2. La cinétique de séchage

Durant toutes les expériences, la température et le débit d'air asséchant étant constants, on suit l'évolution de la masse humide $M_o(t)$ du produit à sécher au cours du temps par pesées successives jusqu'à ce qu'elle devienne stationnaire, dans le but de déterminer la masse sèche (M_s) du produit. La teneur en eau en base sèche à un instant t est définie par [12]

$$X_0 = \frac{M_h}{M_s} - 1 \quad (6)$$

$$X_e = \frac{M_h(1+X_0)}{M_s} - 1 \quad (7)$$

L'objectif consiste à modéliser la vitesse de séchage selon l'approche de la courbe caractéristique de séchage. 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 et un même modèle de comportement des produits étudier. La détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau $X(t)$ à partir des points expérimentaux en utilisant des logiciels appropriés. Le principe de la méthode développée consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$. Le terme $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ représente (en m/s) la vitesse de séchage. Cette vitesse varie entre la valeur au début du séchage et tend vers une valeur nulle en fin de séchage. A partir de la courbe expérimentale $V = -\frac{dX}{dt} = f(X)$, et pour diverses conditions opératoires maintenues constantes lors du séchage, [19] propose de nommer la vitesse de séchage $V(t)$ et la teneur en eau $X(t)$ de façon à obtenir une courbe unique caractéristique du produit étudié :

$$V_r = \frac{V}{V_0} = f(\emptyset) \quad (8)$$

où, V_r : La vitesse normée ou vitesse de séchage réduite ; V_0 : est la vitesse initiale de séchage ; $\emptyset$: est la teneur en eau normée ou réduite : $\emptyset = \left(\frac{X-X_{eq}}{X_{Cr}-X_{eq}}\right)$; X_{eq}: est la teneur en eau à l'équilibre ; X_{Cr} : est la teneur en eau critique, considère comme (est la vitesse initiale) dans le cas des matériaux textiles.

La modélisation de la courbe de séchage nécessite donc la détermination de la teneur en eau et de vitesse de séchage. Bien que beaucoup de théories s'accordent pour affirmer que le séchage des produits ne présente pas de phase à vitesse constante [17, 18], 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 : la méthode dite des corrélations, méthode de simulation et la méthode directe [12]. Le modèle mathématique de teneur en eau est représenté comme suit :

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (9)$$

A partir de cette équation nous pouvons ressortir l'équation qui définira notre modèle expérimentale ; soit par intégration :

$$X(t) = Ae^{-kt} + X_e \quad (10)$$

Le modèle présenté par l'expression ci-dessus est conforme au modèle logarithmique [5] qui sera utilisé pour décrire l'évolution de la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps. Il revient dès lors de déterminer les paramètres A et k de l'équation.

a) Détermination des paramètres A et k

Les modèles mathématiques numériques des techniques concernant le transfert de la chaleur et de la masse microscopique dans les matériaux poreux pendant le séchage ont été développées seulement dans les deux phases de séchage : la phase de séchage à vitesse constant et la phase de séchage à vitesse décroissante. Cet ainsi que S. Deng [18] rend compte d'une nouvelle méthode d'étude développer pour le contrôle d'arrêt d'un dessiccateur de vêtements, en utilisant le modèle mathématique et l'approche expérimentale. Le débit massique surfacique (G_S) dans une phase de séchage à vitesse constante (PSVC) et la phase de séchage à vitesse décroissante (PSVD) ont été développées, en utilisant une approche « semi-empirique » basé sur la connaissance et les théories existantes de séchage.

b) Modèle mathématique dans une phase de séchage à vitesse constant (PSVC)

Basé sur la théorie de séchage établie, le débit massique surfacique (G_S) dans une phase de séchage à vitesse constante (PSVC) peut être exprimé par :

$$G_{PSVC} = \frac{(X_0 - X_{Cr})}{S \cdot t_{Cr}} \cdot M_S = \frac{\overline{h}(T_{in} - T_{wb})}{L} \quad (11)$$

L'Équation (9) est employée pour déterminer le débit massique surfacique (G_S) dans les paramètres du PSVC. L'important est que des paramètres de cette équation tels que la teneur en eau de transition de la phase de séchage à vitesse constante et celle de la vitesse décroissante appelé communément la teneur en eau crique (Xcr) et la teneur en eau initiale (Xo) peuvent être déterminés à partir des courbes de séchage expérimentales. La température à l'entrée de la housse (T_{in}), la température de l'air asséchant (T_{wb}), la masse de vêtement (M_S), et la surface de vêtement (S) peuvent être obtenues ou calculées en utilisant les propriétés hygrométriques, thermophysiques, l'humidité et la température d'un système d'air-eau à la pression atmosphérique. Après détermination du débit massique surfacique (G_S) dans la phase de séchage à vitesse constante (PSVC), sa durée peut être calculée. La durée du point initial de séchage dans PSVD peut être déterminée par ***l'Équation*** suivante :

$$t_{PSVC} = t_{Cr} = \frac{W_d}{S} \cdot \frac{1}{G_{vPSVC}} (X_0 - X_{Cr}) \quad (12)$$

c) Modèle mathématique dans une phase de séchage à vitesse décroissante (PSVD)

Basé sur les mêmes principes que précédents Le débit massique surfacique (G_S) dans une phase de séchage a vitesse décroissante (PSVD) peut être exprimé par :

$$G_{PSVD} = G_{PSVC} \left(\frac{X - X_e}{X_{Cr} - X_e} \right)^n \quad (13)$$

Dans ***l'Équation (12)*** la teneur en eau critique (X_{cr}) peut être obtenue à partir des courbes de séchage expérimentales et la teneur en eau d'équilibre (X_e) est obtenue à partir de ***l'Équation (7)***. Il est complexe de déterminer exactement l'index de séchage n, dans ***l'Équation (12)***, mais chaque matériel de séchage a

ses propres index de séchage. Par exemple l'index pour des tissus de laine est environ 0,6 [9]. Dans la plupart des cas l'index de séchage d'un matériel particulier est obtenu par la conduite de séchage expérimentale pour ce matériel. Après détermination du débit massique surfacique (G_S) dans un PSVD, sa durée peut être calculée.

$$G_{PSVD} = -\frac{M_S}{S}\frac{dX}{dt} = G_{PSVC}\left(\frac{F}{F_{Cr}}\right)^n \quad (14)$$

La température d'air de sortie à un moment donné peut être déterminée à partir des équations de séchage dérivées précédemment. Le débit massique d'évaporation dG_V, d'un produit ayant une surface dS peut être représenté par :

$$dG_V = dS\frac{\bar{h}}{\lambda}(T_{in} - T_{wb})\left(\frac{F}{F_{cr}}\right)^n \quad (15)$$

L'évaporation de l'humidité dans l'air a comme conséquence la diminution de la température, qui est proportionnelle au rapport de la capacité de chaleur spécifie de l'air, C_{Pa} et de chaleur latente d'évaporation de l'eau l_v

$$dG_V = \dot{m}C_{pa}\frac{dT}{\lambda} \quad (16)$$

Par conséquent, les ***Équations (16) et (17)*** sont combinées, puis intégrées pour donner l'expression du paramètre k en fonction de la surface totale, soit :

$$\frac{\dot{m}C_{pa}}{\bar{h}(F/F_{Cr})^n}\int_{T_{in}}^{T_0}\frac{-dT}{T_{in}-T_{wb}} = \int_0^S dS \quad (17)$$

Or

$$\emptyset = \left(\frac{X-X_{eq}}{X_{Cr}-X_{eq}}\right) = \frac{F}{F_{cr}} \quad (18)$$

Comme la phase de mise en température n'est pas observer dans le textile, par conséquent $X = Xcr$; ce qui implique $F = Fcr$ et finalement $\emptyset = 1$. La température de l'air à la sortie du séchoir peut donc être estimée par :

$$T_0 = Twb + (T_{in} - T_{wb})\cdot e^{-\left(\frac{\bar{h}S}{\dot{m}C_{pa}}\right)} \quad (19)$$

En combinant les ***Équations (8) et (13)***, il vient :

$$k\cdot\frac{M_S}{S}(X - X_e) = G_{PSVC}\left(\frac{F}{F_{Cr}}\right)^n \quad (20)$$

Or par intégration de ***l'Équation (16)*** il vient :

$$\left(\frac{F}{F_{Cr}}\right)^n = \frac{\dot{m}C_{pa}}{S\cdot h}ln\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_0}\right) \quad (21)$$

D'où en remplaçant G_{PSVC} par son expression de ***l'Équation (19)*** on obtient finalement :

$$k = \frac{\dot{m}C_{pa}}{M_S\cdot l_v}ln\frac{(T_{in}-T_{wb})}{(T_0-Tw_b)} \quad (22)$$

2-8. Optimisation et validation du modele

- *Principe de la validation*

Avant d'appliquer les résultats des analyses faites précédemment à la validation du modèle mathématique de séchage des vêtements, nous allons utiliser ces résultats pour retrouver d'autres paramètres du modèle afin de déterminer les erreurs entre la courbe caractéristique du modèle et celle expérimentale. Dans le but d'optimiser le modèle nous allons appliquer la méthode des moindres carrés qui stipule que : les paramètres obtenues par la méthode des moindres carrés est telle que la somme des carrés des erreurs (Ei) soit minimale [23, 24]. Cette méthode considère un ensemble de couple $(x_1 ; y_1) ; (x_2 ; y_2),\ldots,(x_n ; y_n)$ qui représente les mesures de données. On peut reporter l'ensemble de ces points de coordonnées xi et yi sur un graphique orthonormé et on obtient un nuage de points ou un diagramme de dispersion. L'idée de la méthode des moindres carrés est de déterminer les coefficients d'une droite d'équation et la valeur des paramètres numériques obtenus par la méthode des moindres carrés (least squares) nous permettra de valider le modèle.

- *Application des moindres carrés pour l'optimisation du modèle*

Soit la fonction du modèle définie par :

$$Y = X(t) = Ae^{-kt} + X_e \tag{23}$$

La prescription des moindres carrés pour ce type de modèle s'écrit :

$$S = \sum_{i=1}^{N}\left(Y_i - f(x_i;\sigma)\right)^2 = \sum_{i=1}^{N}(Y_i - \alpha\exp(kx_i) - \beta)^2 \tag{24}$$

Le minimum de cette expression est trouvé quand les deux dérivées partielles $\partial S/\partial\alpha$ et $\partial S/\partial\beta$ sont égales à zéro. Soit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} e^{2kxi} & \sum_{i=1}^{N} e^{kxi} \\ \sum_{i=1}^{N} \mathrm{e}^{kxi} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} Y_i \mathrm{e}^{kxi} \\ \sum_{i=1}^{N} Y_i \end{bmatrix} \tag{25}$$

Ce qui donne la solution:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} e^{2kxi} & \sum_{i=1}^{N} e^{kxi} \\ \sum_{i=1}^{N} \mathrm{e}^{kxi} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} Y_i \, \mathrm{e}^{(xk)} \\ \sum_{i=1}^{N} Y_i \end{bmatrix} \tag{26}$$

- *Évaluation des erreurs pour la validation du modèle*

Le model approprié sera validé selon les critères suivant [23] :

- Erreur systématique moyenne (ESM) minimale

$$ESM = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N}(X^*exp(i) - X^*pre(i)) \tag{27}$$

- X-carrée réduit (le chi-square réduit) minimal

$$x^2 = \frac{\sum_i^N \left(X^* \exp(i) - X^*pre(i)\right)^2}{N-n} \tag{28}$$

- L'erreur moyenne de la racine carrée (RMSE) minimale

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} (X^{*}exp(i) - X^{*}pre(i))^{2}\right]} \quad (29)$$

- L'erreur maximale absolue à l'échelle locale

$$E_M = max_i |X^{*}exp(i) - X^{*}pre(i)\,| \quad (30)$$

avec, $X^{*}exp(i)$ *: teneur en eau réduite expérimentale ;* $X^{*}pre(i)$ *: teneur en eau réduite prédite*

3. Résultats de l'étude expérimentale

3-1. Étude experimentale, optimisation et validation du modele

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 physique 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. Nous étudions dans ce chapitre la cinétique de séchage de notre séchoir expérimental afin d'interpréter les courbes caractéristiques et déterminer les performances et la capacité de notre séchoir.

3-2. Expérimentation du séchoir

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. La détermination des performances de notre séchoir se fait à travers plusieurs essais de séchage de certains vêtements courants ciblés parmi tant d'autres.

3-3. Paramètres mesurés

La mesure des températures est effectuée par un multimètre numérique. Ce multimètre numérique sert à repérer la température sèche de l'air à l'entrée du séchoir, la température de l'air asséchant 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 0,01 g. Nous avons effectué les mesures sur certains vêtements courants dont les résultats sont donnés dans le ***Tableau 1*** ci-après.

Tableau 1 : *Différentes masses mesurées et indiquées des vêtements*

Vêtements	Valeurs mesurées		Valeurs indiquées [6]
	Masses sec (kg)	Masses humides (kg)	Masses sec (kg)
Chemise			
Coton :	0.320	0.598	0.300
Autres :	0.228	0.436	0.200
Chemisier			
Coton :	0.302	0.518	0.150
Autres :	0.286	0.445	0.100
Tee-shirt			
Coton :	0.320	0.610	0.125
Autres :	0.0183	0.332	/

Robe			
Coton :	0.599	1.09	0.500
Autres :	0.340	0.714	0.350
Jeans :	0.748	1.314	0.700
Jupe :	0.310	0.616	0.300
Pantalon (taille M) :	0.334	1.180	0.600
Veste :	0.566	1.301	0.600
Pull en coton	0.696	1.241	0.600

Il a été constaté qu'il existe une légère différence entre les masses mesurées et les masses moyennes indiquées par le ***Tableau 1***. Pour cela nous avons à chaque essai mesuré, les différentes masses des vêtements qui entrent en jeu dans le processus de séchage afin de minimiser les erreurs de mesure.

3-4. Essais de séchage

Suivant la saturation du séchoir, les diverses propriétés des vêtements et le fait que le séchoir n'a pas été dimensionné au préalable, nous allons effectuer plusieurs essais afin de définir les paramètres et la performance de notre séchoir. Les résultats des différents essais effectués sont donnés à chaque fois dans un tableau. Les essais ont été effectués pour les paramètres constants de température de séchage à 48°C et de température de l'air à 33°C

- *Essai 1 : 8 pièces de natures différentes*

Tableau 2 : *Résultats de l'essai 1*

Textile	**Masse sèche (Kg)**	**Masse humide (Kg)**	**Masse séché (Kg)**	**Teneur en eau (Kg_{eau} / kg_{msec})**
1	0.170	0.324	0.210	54.3 %
2	0.196	0.384	0.222	72.9 %
3	0.302	0.514	0.300	71.33 %
4	0.320	0.614	0.400	53.5 %
5	0.286	0.466	0.334	39.5 %
6	0.228	0.430	0.298	44.3 %
7	0.320	0.580	0.372	55.9 %
8	0.074	0.144	0.08	80 %
Total	1.896	3.456	2.216	
Teneur en eau moyennes (Kg_{eau} / kg_{msec})				55.9 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps(kg_{eau} /.min)				0.004
Vitesse de séchage (kg_{eau} /kg_{msec}. min)				0.002
Durée totale de séchage (min)				265

- *Essai 2 : 6 pièces de natures différentes*

Tableau 3 : *Résultats de l'essai 2*

Textile	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg $_{eau}$ / kg $_{msec}$)
1	0.170	0.336	0.180	86.6%
2	0.196	0.380	0.198	91.9%
3	0.302	0.516	0.294	75.5%
4	0.320	0.606	0.310	95.5%
5	0.320	0.590	0.332	77.7%
6	0.074	0.138	0.072	91.6%
Total	1.382	2.566	1.386	
Teneur en eau moyennes (Kg $_{eau}$ / kg $_{msec}$)				85.1 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps (kg $_{eau}$ /.min)				0.005
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.003
Durée totale de séchage (min)				237

- *Essai 3 : 4 pièces de natures différentes*

Tableau 4 : *Résultats de l'essai 3*

Textile	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg $_{eau}$ / kg $_{msec}$)
1	0.170	0.330	0.184	79.3 %
2	0.196	0.382	0.196	94.9 %
3	0.302	0.515	0.288	78.8 %
4	0.320	0.585	0.320	82.8 %
Total	0.988	1.812	0.988	
Teneur en eau moyennes (Kg $_{eau}$ / kg $_{msec}$)				83.4 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps (kg $_{eau}$ /.min)				0.005
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.003
Durée totale de séchage (min)				157

- *Essai 4 : 3 pièces de natures différentes*

Tableau 5 : *Résultats de l'essai 4*

Textile	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg$_{eau}$ / kg $_{msec}$)
1	0.196	0.381	0.200	90.5 %
2	0.302	0.515	0.294	75.2 %
3	0.320	0.587	0.310	89.3 %
Total	0.818	1.483	0.804	
Teneur en eau moyennes (Kg$_{eau}$ / kg $_{msec}$)				84.4 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps(kg $_{eau}$ /.min)				0.006
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.007
Durée totale de séchage(min)				120

- *Essai 5 : 2 pièces de natures différentes*

Tableau 6 : *Résultats de l'essai 5*

Textile	Masse séché (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)
1	0.196	0.382	0.200	91%
2	0.320	0.586	0.316	85.4%
Total	0.516	0.968	0.516	
Teneur en eau moyennes (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)				87.6%
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps(kg $_{eau}$ /.min)				0.006
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.007
Durée totale de séchage(min)				120

- *Essai 6 : 2 pièces de natures différentes*

Tableau 7 : *Résultats de l'essai 6*

Textile	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)
1	0.196	0.382	0.200	91 %
2	0.320	0.586	0.316	85.4 %
Total	0.516	0.968	0.516	
Teneur en eau moyennes (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)				87.6 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps(kg $_{eau}$ /.min)				0.004
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.009
Durée totale de séchage (min)				98

- *Essai 7 : 1 pièces en % coton*

Tableau 8 : *Résultats de l'essai 7*

Textile	Masse séché (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)
1	0.320	0.587	0.318	84.6 %
Total	0.320	0.587	0.318	84.6 %
Teneur en eau moyennes (Kg_{eau} / kg $_{msec}$)				84.6 %
Masse d'eau moyenne évaporée par unité de temps(kg $_{eau}$ /.min)				0.003
Vitesse de séchage (kg $_{eau}$ /kg $_{msec}$. min)				0.011
Durée totale de séchage(min)				75

Nous constatons ici que : plus le séchoir est chargé, plus le temps de séchage est élevé. Il est donc nécessaire de chercher la capacité moyenne de notre séchoir. Nous cherchons cette capacité à travers l'exploitation des résultats des essais précédents.

Tableau 9 : *Récapitulatifs des essais*

Essais	Masse sèche (Kg)	Masse humide (Kg)	Masse séché (Kg)	Teneur en eau (%)	Masse d'eau évaporée (kg_{eau}/min)	Vitesse de séchage (Kg_{eau} /$Kg_{sec.}$min)	Durée de séchage (min)
1	1.896	3.456	2.216	55.9	0.004	0.002	265
2	1.382	2.566	1.386	85.1	0.005	0.003	237
3	0.988	1.812	0.988	83.4	0.005	0.005	157
4	0.818	1.483	0.804	84.4	0.006	0.007	120
5	0.516	0.968	0.516	87.6	0.004	0.009	98
6	0.320	0.587	0.318	84.6	0.003	0.011	75
Moyenne	0.987	1.812	1.038	80.2%	0.004	0.006	158.7

- *Essai 8 : 5 pièces avec prise de masse en vrac par période de 25 minutes durant le séchage*

Cet essai se fait sur la basse de la capacité moyenne de notre séchoir et le temps moyen de séchage donnés par le ***Tableau*** ci-dessus.

- *Paramètres constants mesurés*
  - Température de l'air = 33°c
  - Humidité relative = 69 %
  - Température des vêtements humide = 29°c
  - Température d'entrée de l'air de séchage = 59°c
  - Température ambiante (de l'air de séchage) : 48°c

Tableau 10 : *Résultat de l'essai 8*

Durée de séchage en (min)	0	25	50	75	100	125	150	162
Masse humide (Kg)	1.935	1.715	1.535	1.365	1.205	1.105	1.072	1.071
Teneurs en eau (Kgeau/Kgms)	80.8 %	60.2 %	43.4 %	27.5 %	12.6 %	3.2 %	0.18%	0.1
Vitesse de séchage	0	0.024	0.008	0.004	0.001	0.0002	0.00012	0.0005
température ambiante	43°C	45°C	46°C	47°C	48°C	49°C	49°C	49°C

- *Essai 9 : séchage naturel avec prise de masse en vrac par période de 25 minutes durant le séchage*

- *Paramètres constants mesurées*
  - Température de l'air = 33°c
  - Humidité relative = 69 %
  - Température des vêtements humide = 29°c

Tableau 11 : *Résultat de l'essai 9*

durée de séchage en (min)	Masse humide (Kg)	Teneurs en eau (Kgeau/Kgms)	Vitesse de séchage (Kgeau/Kgms.min-1)
0	1.935	0.808	0.520
25	1.805	0.686	0.488
50	1.685	0.574	0.448
75	1.555	0.453	0.484
100	1.385	0.294	0.636
125	1.260	0.177	0.468
150	1.210	0.130	0.188
175	1.155	0.079	0.204
200	1.130	0.056	0.092
225	1.115	0.042	0.056
250	1.070	0.007	0.140

3-5. Résultats, courbes caracteristiques et interpretation des resultats

Lors de l'opération de séchage, il se produit un double transfert : thermique et de masse. Ce qui fait que l'air à sa sortie a une humidité plus grande tandis que sa température sèche a diminué. De son côté le produit voit diminuer son humidité relative et croître sa température sèche. Pour illustrer ces mouvements de transfert, il existe plusieurs courbes caractéristiques dites "courbes des séchage". On entend par courbes de séchage les courbes représentant les variations de :

- la teneur en eau en fonction du temps : $X = f(t)$
- la vitesse de séchage en fonction du temps : $-dX/dt = f(t)$
- la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau : $-dX/dt = f(X)$

La première courbe obtenue expérimentalement est $X = f(t)$. C'est elle qui contient le plus d'informations, les deux autres se déduisent par dérivation. Le transfert d'humidité entre l'air et le produit peut également être représenté par une courbe qui décrit l'évolution de la teneur en eau réduite du produit rapporté à la matière sèche, en fonction du temps : $Xr = f(t)$. Suivant les essais précédents nous avons déterminé à travers le tableau récapitulatif des valeurs moyennes qui nous permettront d'effectuer des essais conduisant aux différentes opérations de traçage des diverses courbes de séchage citées ci-dessus. Car ces résultat ne peuvent pas être exploite pour le traçage directe de ces courbes. Ceci est dû au fait que les résultats exploités sont les valeurs moyennes des mesures effectuées en prenant les informations propres à chaque vêtement. Les valeurs moyennes du tableau récapitulatif indiquent le point d'équilibre du séchoir et définissent au même moment la capacité moyenne et le temps moyen de séchage (environs pour une teneur en eau de 81 % et d'un temps de séchage de 160 min). Ce qui représente aussi un point idéal pour une meilleure exploitation de notre séchoir. Vu la diversité des vêtements, de leurs tailles et de leurs masses, l'expérience ne doit être faite sur des pièces isolées. Ainsi, nous avons été conduits à faire un séchage en vrac. La méthode de mesure consiste à suivre la perte de masse par intervalle de temps bien défini jusqu'à ce que la masse des vêtements séchés soit inferieur ou égale à sa masse sèche de référence. Cette méthode n'est utilisée que pendant les essais 8 et 9. Nous allons donc utiliser les résultats de ces derniers pour tracer les courbes caractéristiques de séchage.

3-6. Courbes caractéristiques de séchage expérimental

Il s'agit des différentes courbes caractéristiques relatives aux essais 8 et 9 respectivement pour un séchage à travers le séchoir et pour un séchage naturel (solaire). Ces courbes présentées ci-dessous par la ***Figure 7*** nous permettent de faire un discernement pratique sur les deux modes de séchage.

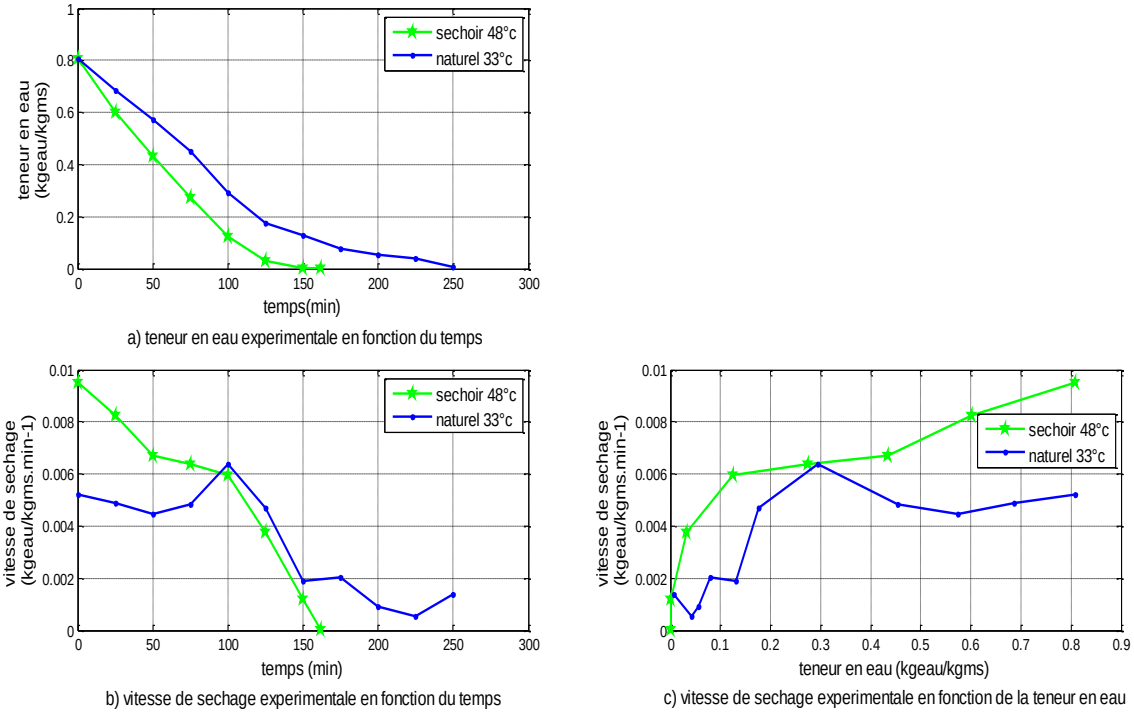

Figure 7 : *Courbes caractéristiques de séchages relatifs aux essais 8 et 9*

3-7. Interprétation

Nous constatons principalement la non-existence des phases 0 et 1 sur la ***Figure 7 (a)***, c'est-à-dire qu'il y a absence de la phase de mise en température du produit et celle de séchage à allure constante, et présente uniquement de la phase 2 qui est la phase de séchage à allure décroissante ; au cours de laquelle il y a chute du flux d'évaporation de l'eau. Ce résultat est conforme dans la littérature. La ***Figure 7 (c)*** représente la courbe de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit pour une température d'air constante. Cette figure correspondant aux très faibles teneurs en eau qui permet d'identifier une phase croissante marquée par la convexité de la courbe de vitesses. Cette phase débute toutefois pour des valeurs de x qui vaut 0 correspondant à l'origine de séchage et la valeur de x égale à 0.82 que l'on peut atteindre au cours du séchage des produits.

3-8. Comparaison des deux courbes

Pour mieux faire cette comparaison nous avons choisi le moment le plus favorable (à une température ambiante de 33°c) de séchage naturel dans la ville de Douala pour effectuer les essais de séchage naturel. Ceci nous permet de mieux déterminer les performances de notre séchoir. Suivant les courbes de la ***Figure 7 (a)***; nous constatons que la courbe de séchage naturel à un décalage sur celle du séchoir. Le séchage naturel est plus lent que celui effectuée par le séchoir. Pour les mêmes teneurs en eau initiales, le séchage naturel prend 250 minutes pour évaporer de l'eau contenu dans le produit tant dis que le séchoir prend 160 minutes. Soit une différence de 90 minutes (environ 1 h 30). Quant aux vitesses de séchage illustrées par la ***Figure 7 (b)***, nous avons constaté que la vitesse de séchage naturelle est plus perturbée que celle de notre séchoir. Ce phénomène est dû à la variation nature du vent et de la température qui sont incontrôlables. Ce qui nous amène à comprendre ici que : lorsque le débit et/ou la température augmente, la vitesse de séchage augment et lors que le débit et / ou la température d'air asséchant diminue la vitesse de séchage diminue.

3-9. Résultats d'optimisation

Nous présentons ici les différentes courbes caractéristiques de séchage relatives à l'essai 8, au modèle mathématique défini et au modèle optimale obtenu par la méthode des moindres carrés que nous avons utilisé pour la validation du modelé idéal de notre séchoir.

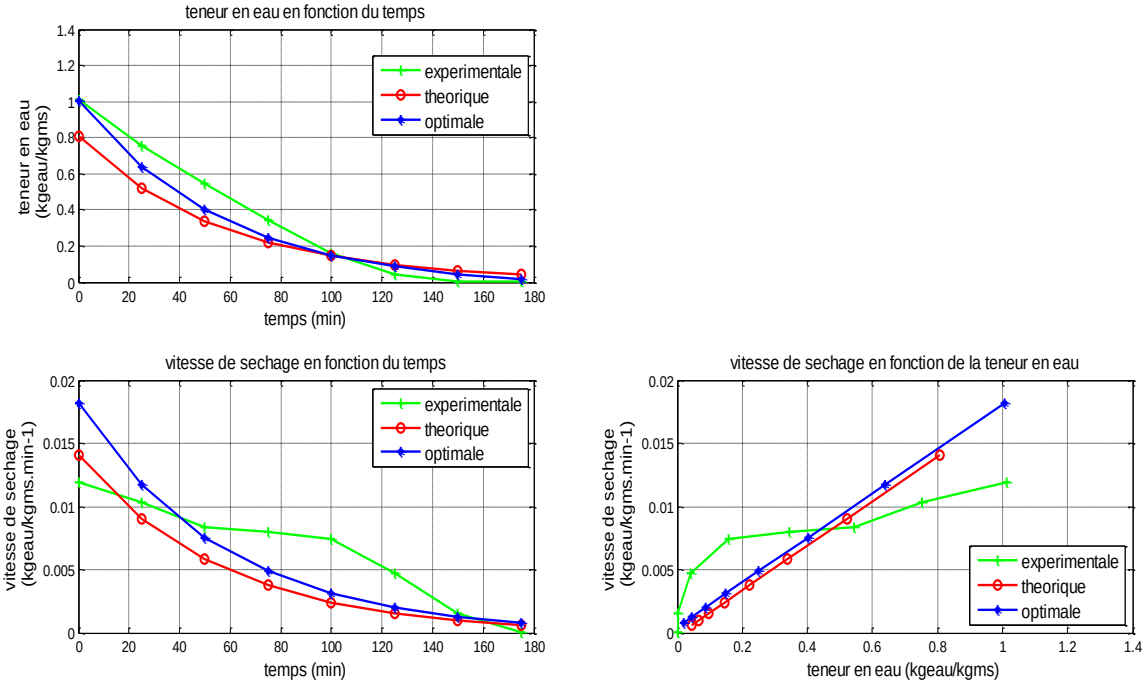

Figure 8 : *Variation des courbes caractéristiques des modèles autour de celles expérimentale de notre séchoir*

Nous constatons sur la ***Figure 8*** que les courbes caractéristiques optimales se rapprochent beaucoup plus des valeurs expérimentales que les courbes du modèle théorique non optimisé. Le ***Tableau 12*** suivant présente les coefficients de chaque modelé et les différentes erreurs qui leurs sont liée :

Tableau 12 : *Coefficients des modèles et erreurs*

Paramètres et Erreurs	Modèle theories	Modèleoptimal
paramètres	A = 0.799 Xe = 0.007 K = 0.0176	α = 1.1081 β = -0.0306 K = 0.0176
erreurs systématiques moyennes ESM (SSE)	0.1023	0.0345
ajustement paramétrique: erreur standard X^2	0.1637	0.0551
Erreur absolue maximale	0.2849	0.1519
Root-mean-square error (RMSE)	0.1417	0.0634

Nous constatons que le modèle optimal (obtenue par utilisation des moindres carrés) présente toujours une erreur inferieur à celle donnée par le modèle théorique. De plus les erreurs que présente la courbe optimisée respectent les conditions de validation d'un modèle. Car on considère généralement qu'une valeur au voisinage de 10 % donne raisonnablement une bonne simulation des résultats expérimentaux. Ce qui justifie la validation du modèle de notre séchoir. La ***Figure 9*** présente les différentes variations des courbes caractéristiques de séchage du modèle optimal autour des caractéristiques expérimentales.

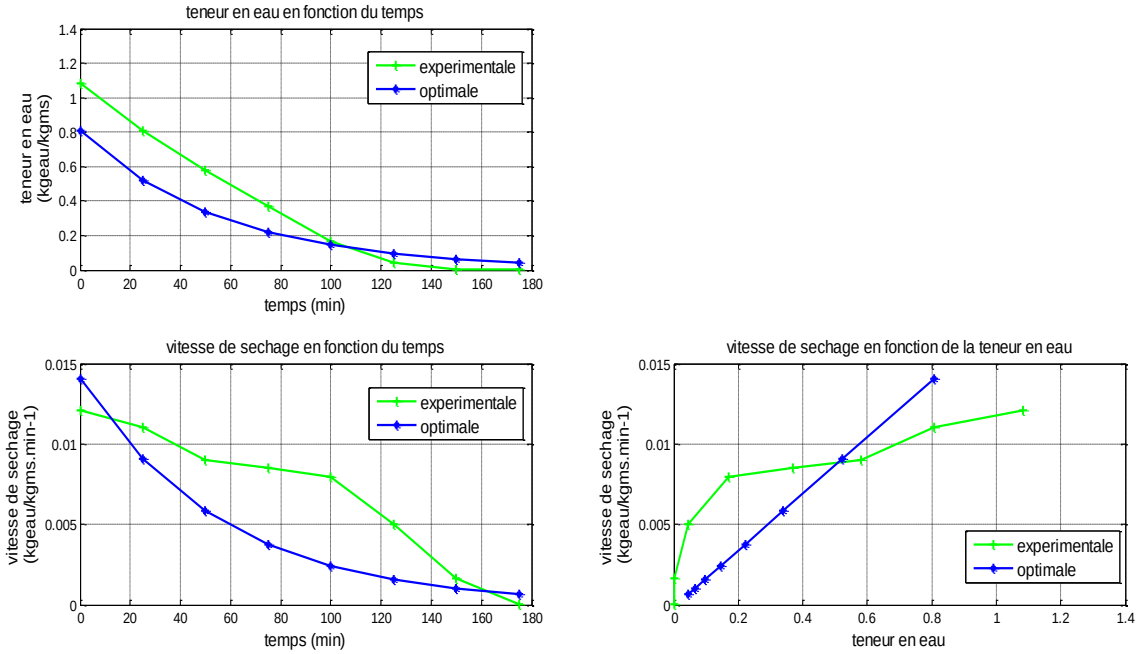

Figure 9 : *Variations des caractéristiques du modèle optimal atour des caractéristiques expérimentales*

3-10. Résultast de l'évaluation des differents parametres du sechoir

- *Détermination des caractéristiques du système*

Le travail ici sera fait en considérant les hypothèses de modélisation définies au chapitre III précèdent.

a) Température l'air à l'entrée de l'unité de pompage d'air chaud

Elle varie suivant la température de l'air ambiante de la ville de Douala (entre 23 et 33°C)

b) L'air asséchant

L'air chaud est produit à une température de 59°C juste à la sortie de l'unité de production et de pompage d'air chaud. Cette température par convection thermique avec la température des vêtements humides attend le point d'équilibre d'environs 48°C.

c) Masse volumique

La valeur de la masse volumique ρ (en kg/m^3), nous permet d'avoir la vitesse de l'air asséchant. Cette valeur dépend de la température de l'air qui varie au cours du temps. En négligeant les pertes de chaleur nous allons considérer que la température de l'air asséchant est égale à celle mesurée à la sortie de l'unité de production d'air chaud (59°C)

$$\rho = 1.293 \frac{273}{273+T} \tag{31}$$

d) Volume de la chambre de séchage :

La chambre de séchage a une forme parallélépipédique, de base carrée. Elle a une hauteur de 111 cm et un côté de base de 41 cm ; ce qui correspond à un volume de $186{,}591\ cm^3$.

- *Détermination des grandeurs des composants de l'unité de production et de pompage d'air chaud*

L'unité de production et de pompage d'air chaud contient deux groupes des résistances chauffantes montées en parallèle donc les valeurs mesurée à 33°C ainsi que la tension et la puissance maximale fournie par le constructeur sont données dans le ***Tableau 13*** :

Tableau 13 : *Valeurs caractéristiques de l'unité de production et de pompage d'air chaud*

Tension	Puissance du ventilateur	Résistances mesure (Ω)33°C	
220 V	60 W	R1 = 60	R2 = 60

a) La quantité de chaleur

La quantité d'énergie thermique (Q) est définie par rapport aux caractéristiques du ventilateur ou par rapport au volume des vêtements comme suit.

$$Q = \dot{m}_a c_{pa} (T^*_a - T_a) \tag{32}$$

avec, $\dot{m}_a$ *: Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir calculé à partir du volume* V *de la chambre et du temps de séchage* t *;* c_{pa} *: Chaleur massique de l'air de séchage.*

b) Chaleur latente (L)

$$Q = m\,L \qquad \rightarrow L = \frac{Q}{m} \tag{33}$$

c) Puissance d'évaporation de l'eau

$$P_{ev} = L(T_{pr})\,.\,m^* \tag{34}$$

d) Puissance consommée par une résistance

$$P_R = RI^2 = \frac{U^2}{R} \tag{35}$$

e) Calcul de la puissance du moteur :

$$P_M = P_t - P_R \tag{36}$$

f) Capacité du séchoir

La capacité du séchoir est définie par la moyenne des masses utilisées pour les essais de séchage expérimentales. Elle est donnée dans le ***Tableau*** récapitulatif et vaut :

$$M_{s\,moyenne} = \frac{\sum_{i=0}^{N} M_{si}}{N} \tag{37}$$

$$M_{h\,moyenne} = \frac{\sum_{i=0}^{N} M_{hi}}{N} \tag{38}$$

avec, $M_{s\,moyenne}$ *: La masse sèche moyenne* (Kg)*;* $M_{h\,moyenne}$ *: La masse humide moyenne* (Kg)*; N : le nombre d'essai effectue pour cette étude*

g) Évaluation de la consommation

➢ *Énergie consommée par les résistances chauffantes*

$$W_R = 2 \times \frac{U^2}{R_{59°c}} \times t_{cr} \tag{39}$$

$$R_{finale} = R_{initiale}(1 + \alpha\Delta T) \quad (40)$$

avec, $\alpha = 4.10^{-3}[K^{-1}]$ et $R_{59} = R_{33}\big(1 + \alpha(299)\big)$, il vient :
R_{59} =131.76 et $W_R = 1.917kWh$

- *Énergie consommée par le ventilateur*

$$W_v = P \times t_{cr} \quad (41)$$
$$W_v = 0.158kWh$$

- *Énergie totale consommée*

$$W_T = W_R + W_v \quad (42)$$
$$W_T = 2{,}07kWh$$

Donc l'énergie totale utilisée pour le séchage des échantillons des textiles est d'environs 2KWh. Soit 150franc CFA de dépense pour frais de règlement de facture due à la consommation d'énergie.

4. Conclusion

Ce travail de recherche porte sur « la modélisation et l'optimisation d'un séchoir pour matériaux textiles ». Nous avons fait le design du prototype du séchoir, les équations mathématiques tenant compte des paramètres du modèle physique du séchoir conduisant à la modélisation et la validation de son modèle optimal sont développées. Nous avons développé les équations thermophysiques pour représenter le modèle théorique de l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps. Cette équation sera comparée aux résultats expérimentaux et optimisée par l'utilisation de la technique d'ajustement des moindres carrés. Sur le plan expérimental la cinétique de séchage des matériaux textiles par la méthode statique est étudiée à une température asséchante de 48°C pour le séchoir électrique et 33°C pour le séchoir naturel. Les résultats des essais et mesures effectués sont intégrés dans un programme informatique (Matlab) qui a permis de : tracer les CCS, faire la comparaison entres les courbes, évaluer les erreurs et valider le modèle optimale. Le modèle obtenu pourra servir pour les besoins de commande et d'optimisation de ce séchoir.

Références

[1] - S. VIJAYAVENKATARAMAN, S. INIYAN and R. GOIC, *"A review of solar drying technologies"; Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 2652 - 2670

[2] - K. A. MOUSSA, Ecole Supérieure Polytechnique Centre de Thiès: Modélisation d'un séchoir rotatif pour céréales enrobées par la méthode d'analogies thermiques – électriques application au « arraw » En vue de l'obtention du Diplôme d' Ingénieur de Conception

[3] - N. CHALAL, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect, présenté pour l'obtention du diplôme de magister en génie climatique 16 /12 /2007

[4] - A. BENSEDDIK, université abou-bekrbelkaid-tlemcen : Modélisation et simulation du séchage mémoire de Master, (juin 2013)

[5] - A. S. MUJUMBAR, Marcel Decker Inc. Handbook of Industrial Drying, Vol. 1, (1995) 742 p. (ISBN 0824789962) 1 p.

[6] - J. FOURIER, «théorie analytique de la chaleur », (1922) (chapitre1 schéma convection conduction rayonnement)
[7] - D. WEIDMANN, Aide-mémoire : Textiles techniques (présentation des matériaux textiles)
[8] - F. BACK, agir ensemble / Tout-rien : Les fibres textiles
[9] - G. NEMOZ, Le textile, un matériau multifonctionnel
[10] - P. ETCHECOPAR et C. SAINT-PIERRE, démarche de modélisation en mathématiques
[11] - A. BING NG and S. DENG, A new termination control method for a clothes drying process in a clothes dryer. Available online 14 February 2008
[12] - B. TOUATI, Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire Des Feuilles De La Menthe Verte (Menthaviridis)
[13] - C. AHOUANNOU et al., modélisation du séchage de gingembre et gombo
[14] - Y. JANNOT, séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermo physique des solides (modélisation)
[15] - N. BENAOUDA, A. BENHAMOU, A. BIDDARI. A M. ABDELLAOUI and M. BELHAMEL, Conception, réalisation et expérimentation d'un séchoir à chauffage partiellement solaire fonctionnant en convection forcée
[16] - A. FADHEL, S. KOOLI, A. FARHAT et A. BELGHITH ; Séchage du raisin en plein air, dans un séchoir et sous serre ; *Revue des Energies Renouvelables* CICME', 08 (2008) 127 - 142
[17] - H. DESMORIEUX and C. MOYNE, "Analysis of dryer performance for tropical foods tuffs using the characteristic drying curve concept". Drying, 92 (1992) 834 - 843
[18] - R. S. RAPUSAS and R. H. DRISCOLL, "The Thin-layer drying characterstics of white onion slices." Drying Technology 13.8-9, (1995) 1905 - 1931
[19] - D. A. N MEEL, Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. *Chemical* Engineering Science, Vol. 9, N° 1 (1958) 36 - 44 p.