

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University, of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية لديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة محمد بوضياف، المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER 2

En Génie Mécanique

Option : Techniques de productions industrielles

Présenté par : Merzougui Mohammed Elamine

Messaoudi Khalil Abdelbaset

Thème

**Étude du séchage naturel des nèfles sous les conditions
météorologiques de la ville de M'Sila en Algérie**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZERGANE Said	MCA	Président
KHAMA Réda	MCA	Encadreur
DJERAD Abdelkader	MCA	Co-Encadreur
MOUSSAI Toufiq	MAA	Examineur

Année Universitaire: 2021 / 2022

N° d'ordre: GM/...../2022



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

**Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis,
pour leur soutien durant toutes mes années d'études.**

**Toute ma famille, À mes très chers frères et mes
chères sœurs et leurs enfants. Et tous ceux que j'aime
et à tous mes amis et compagnons**

**Ma reconnaissance est également formulée envers tous
mes enseignants et tous les employés de l'administration
du département Génie Mécanique de l'Université de M'Sila.**

Merzougui Mohammed Elamine

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis,
pour leur soutien durant toutes mes années d'études.

Toute ma famille, À mes très chers frères et mes
chères sœurs et leurs enfants. Et tous ceux que j'aime

Et À tous mes amis et compagnons

Ma reconnaissance est également formulée envers tous
mes enseignants et tous les employés de l'administration
du département Génie Mécanique de l'Université de M'Sila.

Messaoudi Khalil Abdelbaset

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, à Dieu, le tout puissant, nous rendons
grâce pour nous avoir donné santé,
courage et volonté pour compléter la réalisation
de ce mémoire.

En premier lieu, nous tenons à remercier notre encadreur
Mr. Réda KHAMA

qui nous a aidé et conseillé durant ce travail.

Je remercie également l'ensemble de tous les
enseignants du département de Génie Mécanique
de l'Université de M'Sila qui ont contribué à notre
formation.

Que Monsieur le président et les
Membres du jury trouvent ici l'expression de notre
respect pour avoir fait l'honneur d'examiner ce travail de
mémoire de Master.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus,
encouragés et donné l'envie de mener à terme ce travail.

Résumé

Dans ce travail, une étude expérimentale a été menée sur le séchage naturel au soleil des nèfles (Mchimcha), sous les conditions climatiques de la ville de M'Sila dans la région du Hodna, en Algérie. Le séchage du fruit dépourvu de peau et coupé en moitié a eu lieu sur trois claies grillagées réalisées avec du bois local, orientées toutes les trois vers le sud et inclinées sous les angles 0° , 45° et 65° , respectivement. Les échantillons utilisés avaient une masse moyenne de 8.58 g, une teneur en eau moyenne de 7.04 kg H₂O/kg de matière sèche, un diamètre moyen de 38.74 mm et une épaisseur moyenne de 6.86 mm.

Les résultats ont montré que le séchage au soleil d'une moitié de nèfle, durant le mois de mai pour la ville de M'Sila, était optimal sur une claie inclinée de 45° par rapport à l'horizontal. En effet, l'équilibre a été obtenu en fin de séchage où la teneur en eau était de 0.48 kg H₂O/kg de matière sèche soit 93.20% de perte en eau environ, le diamètre était de 32.34 mm soit une perte de 16.52% seulement et l'épaisseur était de 6.86 mm soit une perte de 73.4 7% environ.

Mots clés : Séchage au soleil – Nèfles – Claie de séchage – Inclinaison – M'Sila – Étude expérimentale.

Liste des figures

CHAPITRE I : Étude Bibliographique

Fig. I.1 : Principe d'un séchoir solaire direct.	05
Fig. I.2 : Photo d'un séchoir solaire indirect.	06
Fig. I.3 : Séchage convectif à l'air chaud et à la vapeur surchauffée.....	06
Fig. I.4 : Les trois de périodes classiques de séchage.....	07
Fig. I.5 : Principe du séchage à l'air libre.....	09

CHAPITRE II : Matériels et Méthodes

Fig. II.1 : Des nèfles mûres de la région de M'Sila.	12
Fig. II.2 : Claies de séchage utilisées portant les échantillons de fruit.	13
Fig. II.3 : Étuve de laboratoire utilisée pour déterminer la masse sèche du fruit.	14
Fig. II.4 : Interface de l'application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie.	15
Fig. II.5 : Thermo-hygromètre utilisé pour mesurer la température et l'humidité de l'air ambiant.	15
Fig. II.6 : Pied à coulisse numérique (digital) pour mesurer les dimensions des échantillons de fruit.	16
Fig. II.7 : Balance de précision pour mesurer la masse des échantillons de fruit	16

CHAPITRE III : Résultats et Discussion

Fig. III.1 : Variation du rayonnement solaire durant deux journées de séchage.	19
Fig. III.2 : Variation de la température ambiante durant deux journées de séchage.	20
Fig. III.3 : Variation de l'humidité ambiante durant deux journées de séchage.	21
Fig. III.4 : Variation de la vitesse de l'air ambiant durant deux journées de séchage.	22
Fig. III.5 : Variation de la masse des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes.....	23
Fig. III.6 : Comparaison des variations des masses adimensionnelles des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons	24
Fig. III.7 : Variation de la teneur en eau des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.	25
Fig. III.8 : Comparaison des variations des teneurs en eau adimensionnelles des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.	26
Fig. III.9 : Variation du diamètre des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.	27
Fig. III.10 : Variation de l'épaisseur des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.	28

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Résumé	iv
Liste des figures	v
Introduction générale	01
CHAPITRE I : Étude Bibliographique	03
1. LE SÉCHAGE	04
1.1 Principes de séchage.....	04
1.2 Domaines de séchage.....	04
1.3. Méthodes de séchage	05
1.3.1. Le séchage solaire.....	05
1.3.2. Le séchage convectif.....	06
1.4. Courbes de séchage.....	07
2. LE SÉCHAGE AU SOLEIL.....	08
3. QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE SECHAGE AU SOLEIL DES FRUITS.....	10
4. CONCLUSION.....	10
CHAPITRE II : Matériels et Méthodes	11
1. MATÉRIELS	12
1.1. Le fruit étudié : les nèfles (Mchimcha)	12
1.2. Les claies de séchage utilisées.....	12
1.3. L'étuve régulée de laboratoire.....	14
2. MÉTHODES	14
2.1. Détermination du rayonnement solaire.....	14
2.2. Détermination de la vitesse de l'air ambiant.....	15
2.3. Mesures.....	15
2.3.1. Thermo-hygromètre.....	15
2.3.2. Pied à coulisse numérique.....	16
2.3.3. Balance de précision.....	16
2.4. Analyse des données	16
2.4.1. Masse sèche du fruit.....	16
2.4.2. Teneur en eau initiale du fruit.....	17
2.4.3. Teneur en eau instantanée du fruit.....	17
CHAPITRE III : Résultats et Discussion	18
1. VARIATION DES PARAMÈTRES EXTERIEURS DURANT LE SECHAGE AU SOLEIL DES NÈFLES	19
1.1. Variation du rayonnement solaire durant le séchage au soleil des nèfles.....	19
1.2. Variation de la température de l'air durant le séchage au soleil des nèfles.....	19

1.3. Variation de l'humidité relative de l'air durant le séchage au soleil des nêfles.....	20
1.4. Variation de la vitesse de l'air durant le séchage au soleil des nêfles.....	21
2. Variation de la masse des nêfles séchées au soleil.....	21
3. Variation de la teneur en eau des nêfles séchées au soleil.....	23
4. Variation des dimensions des nêfles durant le séchage au soleil	25
4.1. Variation du diamètre des nêfles durant le séchage au soleil.....	25
4.2. Variation de l'épaisseur des nêfles durant le séchage au soleil.....	27
5. CONCLUSION.....	28
Conclusion générale.....	29
Références bibliographiques.....	30

Introduction générale

Si délicieux, les fruits frais très riches en eau ou même secs riches en lipides possèdent une forte teneur en fibres, en vitamines, en antioxydants et en éléments nutritifs d'où leur importance vis-à-vis de notre santé et au bon fonctionnement de notre organisme. En effet, ils limitent les risques de cancers et les maladies cardio-vasculaires.

Depuis longtemps, l'être humain désirait la disponibilité des fruits pour sa consommation journalière, durant les douze mois de l'année. Cependant, la nature saisonnière de ces aliments était contre son souhait et son désir. Pour ce faire, il les conservait les fruits d'une manière ou d'une autre.

Pour conserver les fruits, l'être humain utilisait des méthodes traditionnelles. Comme par exemple, faire de ces fruits des confitures ou bien les faire sécher naturellement (à l'air libre, à la chaleur et au soleil). Un peu plus tard, il a utilisé le froid et la congélation comme techniques de conservation.

Par le séchage, les fruits se conservent plus longtemps tout en gardant saveur, couleur, texture, vitamines, sels minéraux et nutriments. Quand les fruits sont séchés au soleil, ils sont mis à sécher en extérieur sur des fils (comme la viande, les poissons, les gousses de vanilles), des plateaux et des claies (comme la figue, la tomate, l'abricot, le raisin, le poivron, etc.).

Le séchage est utilisé également contre le gaspillage des récoltes trop généreuses et par conséquent contre les hausses des prix hors saisons.

Le séchage au soleil fonctionne mieux dans des régions comme les villes du sud ou de l'intérieur de l'Algérie où le temps sec et clair est normal au plus fort de la récolte de fruits. Parmi ces régions, il y a la région du Hodna (M'sila) qui, à notre avis et selon notre investigation, est une région très adéquate pour le séchage thermique vu son potentiel et son gisement solaire fortement considérables.

Le séchage au soleil (naturel et classique) est une opération douce qui utilise l'effet de l'énergie thermique du soleil sur les fruits humides à sécher pour une plus longue conservation, bien entendu. En outre, les deux spécificités d'un tel séchage sont sa lenteur et sa régularité, d'où des saveurs intéressantes et uniques du produit séché quant à d'autres méthodes de conservation.

Dans ce travail de fin d'études en Master, un fruit local la nèfle (Mchimcha ou Zaaroura) de la région du Hodna a été séché naturellement au soleil, sous les conditions climatiques de la ville

de M'Sila, durant le mois de Mai 2022. Des claies de séchage en bois ont été conçues, réalisées et utilisées pour cette fin. En effet, l'effet de l'inclinaison des claies a été étudié. Il est à noter que, malgré les bienfaits des nèfles, le séchage de ce fruit est très peu réalisé et étudié et c'est pour cette raison et d'autres, notre étude a été élaborée.

Après une introduction générale, le mémoire est composé de trois chapitres. Le chapitre 1 est une recherche bibliographique qui présente des notions, des définitions et tout ce qui est nécessaire comme théorie pour notre étude. Le chapitre 2 présente la méthodologie suivie durant notre expérimentation et tout le matériel utilisé dans nos expériences de séchage au soleil des nèfles. Les résultats sont ensuite présentés, commentés et discutés dans le dernier chapitre (chapitre 3). Enfin, une conclusion générale et une liste de références bibliographiques clôturent notre manuscrit.

CHAPITRE I :
Étude bibliographique

1. LE SÉCHAGE

1.1. Principes de séchage

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement [1].

1.2. Domaines de séchage [2]

Actuellement, le séchage industriel est très utilisé dans les industries chimiques et les industries des matériaux. Cette technique possède plusieurs utilisations dans les pays en voie de développement, dans la vie de tous les jours. On peut citer : [2]

➤ En industrie agroalimentaire

Une grande partie des aliments consommables ont subi une opération de séchage. Ce dernier est une étape nécessaire à la production et la conservation de l'aliment, à titre d'exemple : les légumes et les fruits secs (figues, raisins), les pâtes alimentaires, certains produits en poudre (cacao, lait, café...) ainsi la conservation des types de grains, feuilles de thé, épices, etc.

La déshydratation est une technique très intéressante pour la conservation des fruits et légumes. C'est le mode de stockage le plus sain et la méthode la plus appropriée pour cet objectif car il permet de préserver la qualité des produits secs. Ainsi, les vitamines sont conservées et les produits séchés peuvent être reconstruits plus tard par une simple réhydratation. A cet effet, le séchage des produits agricoles est utilisé [3].

➤ En industrie papetière [2]

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

➤ En industrie du bois [2]

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, si non on s'expose à des changements de taille et de forme du bois.

➤ En industrie céramique : assiettes, bols, plats, tasses, etc [2].

➤ En biotechnologie et industrie pharmaceutique [2]

Levure en poudre antibiotiques

Séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage.

➤ En Fonderie [2]

Séchage des noyaux qui assurent l'élaboration des formes intérieures des pièces obtenues par moulage.

1.3. Méthodes de séchage

1.3.1. Le séchage solaire

Le séchage solaire est un type de séchage utilisant des dispositifs appropriés : Les séchoirs solaires. Ces appareils sont classés généralement, selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories : Les séchoirs solaires directs, les séchoirs solaires indirects, les séchoirs solaires hybrides et les séchoirs solaires mixtes. [4]

- **Le séchage solaire direct //**

Dans les séchoirs solaires directs (Figure I.1), les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher.

La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud.

La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [4].

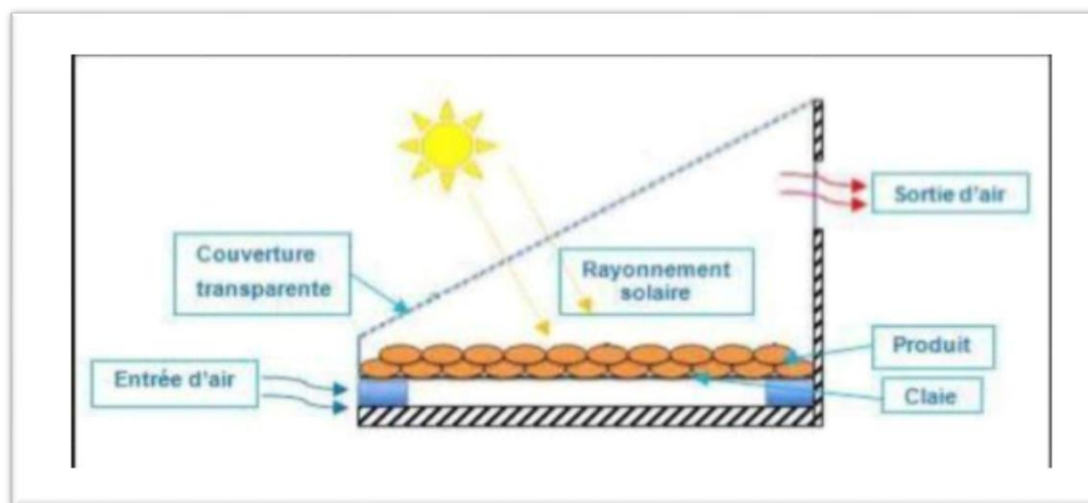


Fig. I.1 : Principe d'un séchoir solaire direct. [4]

- **Le séchage solaire indirect //**

Le séchage solaire indirect est réalisé dans un séchoir solaire indirect comme celui qui représenté sur la figure I.2. La partie essentielle d'un tel dispositif est le capteur solaire qui est utilisé pour chauffer l'air dans la partie entre la vitre et la plaque absorbante. La partie arrière et les parois latérales du collecteur sont isolées thermiquement. L'absorbeur est une plaque de

métal peinte en noir mat qui doit transmettre l'énergie recueillie dans l'air en évitant toutes les pertes thermiques. [3,5]

La deuxième partie du séchoir solaire indirect est la chambre de séchage qui est une chambre de forme parallélépipédique où le produit à sécher est installé. [3,5]



Fig. I.2 : Photo d'un séchoir solaire indirect. [3,5]

1.3.2. Le séchage convectif

On envoie sur le produit à sécher un courant d'air chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau et entraîne la vapeur formée. Exemples : le séchage de plantes aromatiques, de fruits, de grains, de charcuteries, etc. (Source : www.genie-alimentaire.com/spip.php?article149).



Fig. I.3 : Séchage convectif à l'air chaud et à la vapeur surchauffée
(Source : DSC_8668-1038x576.jpg (1038x576) (imt.fr))

1.4. Courbes de séchage

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Krishner (Courbe de Krishner) [5,6,7].

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ($\text{kg d'eau/m}^2.\text{s}$) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie, etc). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent de une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit (Figure I.4). La courbe de séchage est obtenues expérimentalement en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organoleptiques et nutritionnelles [6]. On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de 11% [8].

➤ **Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide :**

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps. [6]

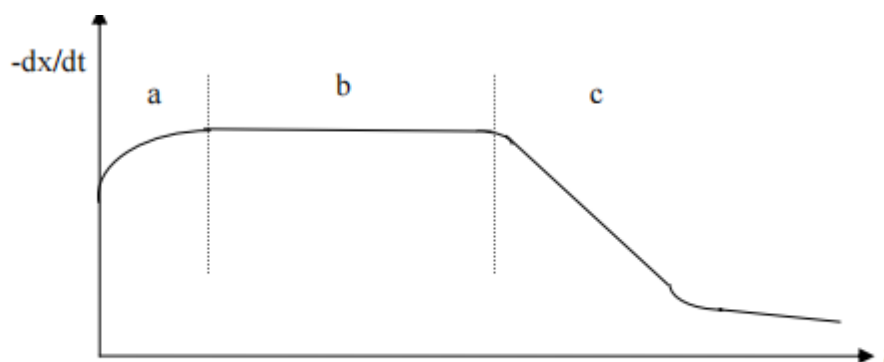


Fig. I.4 : Les trois de périodes classiques de séchage

Dans la courbe ci-dessus (Figure I.4), est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps. Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de

l'humidité restant dans la matière au cours du séchage. Il y a présence de trois périodes classiques :

Période de mise en température (région a) :

Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global.

Période à allure constante (région b) :

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau. Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante. Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [9,10].

Période de ralentissement (région c) :

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit [11]. Cette période représente souvent la quasi-totalité du séchage.

2. LE SÉCHAGE AU SOLEIL

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement.

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles [4]. On utilise directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement.

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles [4].

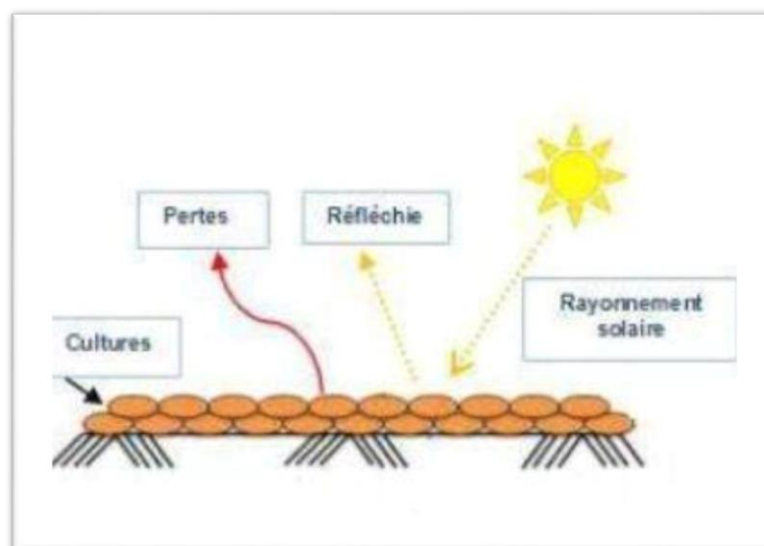


Fig. I.5 : Principe du séchage à l'air libre [4]

3. QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE SECHAGE AU SOLEIL DES FRUITS

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'un et ethnique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [12].

4. CONCLUSION

La conservation des produits alimentaires agricoles nécessite l'utilisation d'une énergie suffisante et accessible pour minimiser les pertes lors de la récolte. Le processus de séchage des fruits à l'aide de l'énergie solaire thermique est une méthode efficace pour les conserver, en particulier dans les pays en développement, et plus utile dans les régions isolées comme le grand sud et les oasis qui n'ont pas les moyens de commercialiser directement comme notre cas à travers le M'sila région. Notre région est un important producteur de fruits et légumes et dispose de gisements solaires très importants en Algérie et à Almandi, exploitables et accessibles. Dans cette thèse, nous présentons des études sur un séchoir solaire de type direct comme solution pour le séchage des produits alimentaires domestiques.

Préserver les produits agroalimentaires Utiliser de l'eau saline accessible pour réduire l'accueil des fruits qui consomment l'énergie électrique utilisée dans l'énergie solaire solaire efficace. Notre région est un important producteur de fruits et légumes et les dépositaires d'énergie sont très compétents en Algérie et dans le monde Dans cette lettre, nous vous présentons des études sur un séchoir solaire de type direct chacun pour le séchage des produits agroalimentaires locaux.

CHAPITRE II :
Matériels et Méthodes

1. MATÉRIELS

1.1. Le fruit étudié : les nèfles (Mchimcha)

C'est l'un des types de fruits d'été disponible dans la région de M'Sila. Il s'agit d'un fruit local saisonnier de qui mûrit entre début Mai et fin Juin.

Le pourcentage d'eau dans chaque fruit est estimé à 86.73 % de sa masse humide initiale soit 7.04 g H₂O/g de matière sèche.



Fig. II.1 : Des nèfles mûres de la région de M'Sila.

Des nèfles fraîches et mûres ont été achetées du marché local de la ville de M'Sila (Quartier : La Cité, et c'est le lieu même de la cueillette du fruit. Commune de Waltam, le 17 mai 2022).

Les échantillons ont été bien lavés avec l'eau du robinet puis dépourvues soigneusement de leurs peaux ainsi que de leurs pépins. Chaque échantillon de fruit a été ensuite coupé en deux moitiés égales pour être ensuite déposé sur une claie grillagée conçue et réalisée pour un séchage libre au soleil. Les moitiés de fruit avaient une masse initiale de 8.58 g environ, d'un diamètre moyen de 38.74 mm et d'une épaisseur moyenne de 6.86 mm.

1.2. Les claies de séchage utilisées

Pour le séchage naturel au soleil des moitiés de nèfles, trois claies de séchage grillagées en bois ont été conçues et fabriquées localement. Chaque claie de séchage est composée :

- d'un cadre en bois constituant sa partie supérieure dont les dimensions sont : 45 cm de longueur × 30 cm de largeur × 6 cm de hauteur (voir figure II.2). Il est à noter que nous avons fabriqué et utilisé des claies en bois vu que ce dernier est un matériau qui stocke une faible quantité de chaleur, ce qui signifie qu'il a un léger effet sur la chaleur du fruit pendant son séchage. Il s'agit en effet d'une nécessité et d'un besoin dans nos expériences de séchage afin de minimiser les erreurs expérimentales ;
- d'un filet de planche attaché au cadre en bois, constituant ainsi sa partie inférieure. Il s'agit d'un fin treillis de fer en forme d'anneau, le diamètre de ses alvéoles est de 4.35 mm et le diamètre du fil est de 0.3 mm. La raison du choix du filet en fer, c'est-à-dire :

- le choix d'une maille très fine est pour donner au fruit la plus grande quantité d'air de tous les côtés. Autrement dit, une surface trouée pour une bonne circulation de l'air ambiant où toute la surface extérieure des échantillons est touchée par cet agent asséchant.
 - et nous l'avons choisi en métal car la maille fine nécessite un matériau solide et cohésif.
- Les claies de séchage ont été posées à une hauteur de 10 centimètres du sol à l'aide de leurs pieds en fer. Le but bien entendu, est d'éviter l'effet de la température du sol sur la vitesse de séchage des échantillons de fruits.
- Enfin, il faut noter que nos trois claies étaient conçues inclinées de 0° , 45° et 65° par rapport au sol horizontal car parmi les objectifs de notre étude expérimentale est l'effet de l'inclinaison de la claie sur le processus de séchage (Figure II.2).



Fig. II.2 : Claies de séchage utilisées portant les échantillons de fruit.

1.3. L'étuve régulée de laboratoire

Une étuve régulée au sein du laboratoire de Génie Mécanique de l'Université de M'Sila a été utilisée pour la détermination des masses sèches des échantillons des nèfles. La figure II.3 est une photo de l'étuve qui a été utilisée dans nos expériences.



Fig. II.3 : Étuve de laboratoire utilisée pour déterminer la masse sèche du fruit.

2. MÉTHODES

2.1. Détermination du rayonnement solaire

Les valeurs instantanées du rayonnement solaire durant les journées de séchage ont été obtenues à partir du site officiel du centre de développement des énergies renouvelables "CDER" [calcul du rayonnement solaire \(cder.dz\)](http://cder.dz). ((Conception et méthodologie : Mohamed Rédha Yaiche & Abdellah Bouhanik. Développement informatique : Bouzeriba Sara Aicha, Nadjeh Gueriba & Samiha Mansour Khodja)).

Selon les deux chercheurs M. Mohamed Redha Yaiche et M. Abdellah Bouhanik, l'objectif de cette application consiste en la simulation des différents flux du rayonnement solaire. Pour ce faire, deux approches théoriques ont été adoptées et choisies, valables pour un ciel clair. (Source : [Application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie - Centre de Développement des Energies Renouvelables \(cder.dz\)](http://cder.dz)). La figure II.4 montre l'interface de cette application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie.

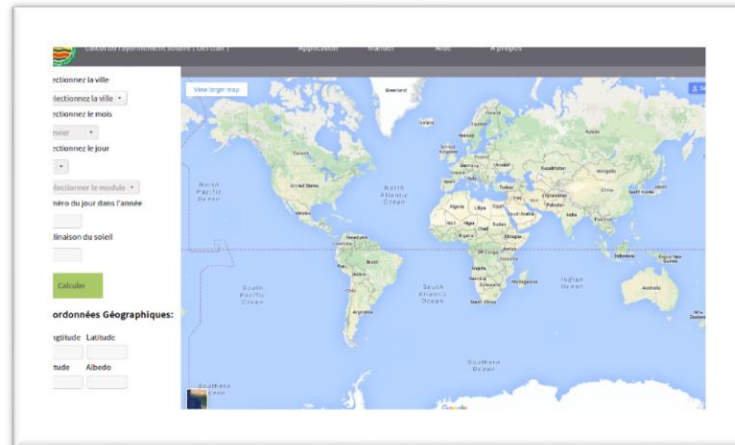


Fig. II.4 : Interface de l'application Web pour le calcul du rayonnement solaire en Algérie. (Source : [calcul du rayonnement solaire \(cder.dz\)](http://calcul.du.rayonnement.solaire.cder.dz))

2.2. Détermination de la vitesse de l'air ambiant

Durant les expériences de séchage, la valeur instantanée de la vitesse de l'air ambiant a été déterminée via le site internet : Windfinder - Carte et prévisions des vents et météo.

2.3. Mesures

Les expériences de séchage ont eu lieu grâce à l'aide du laboratoire pédagogique du département Génie Mécanique de l'Université de M'Sila. Toute l'instrumentation citée et décrite ci-dessous, nous a été fournie de cet établissement que l'on nous remercions vivement.

2.3.1. Thermo-hygromètre

Durant les journées de séchage des nêfles, la température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées à l'aide du thermo-hygromètre montré sur la figure II.5.

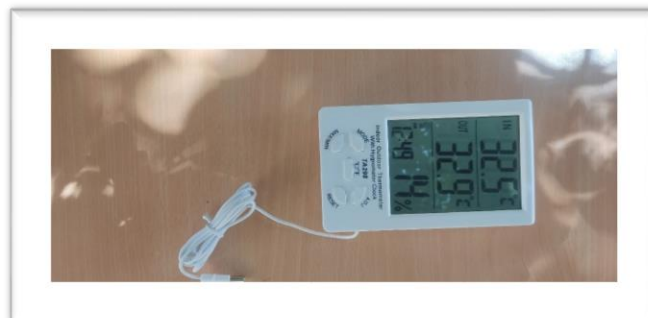


Fig. II.5 : Thermo-hygromètre utilisé pour mesurer la température et l'humidité de l'air ambiant.

2.3.2. Pied à coulisse numérique

Au cours du séchage au soleil des nèfles, les dimensions (diamètre et épaisseur) des échantillons du fruit ont été mesurées continuellement à l'aide d'un pied à coulisse numérique de la figure II.6. Une telle méthode a été utilisée lors du suivi des dimensions des tomates [5,13], des pommes [14], des pastèques [5,13] et de la viande cameline [15].



Fig. II.6 : Pied à coulisse numérique (digital) pour mesurer les dimensions des échantillons de fruit.

2.3.3. Balance de précision

Le suivi de la masse au cours de séchage a été effectué par pesée sur la balance de précision 0.001 (Type KERN PCB 3500-2 Balance de 3500 g) montrée sur la figure II.7.



Fig. II.7 : Balance de précision pour mesurer la masse des échantillons de fruit.

2.4. Analyse des données

2.4.1. Masse sèche du fruit

La détermination de la masse sèche des échantillons des fruits a été réalisée, en les introduisant en fin de séchage dans l'étuve régulée décrite dans le paragraphe 1.3, à une température de

105 °C pendant 24 heures. La masse de chaque échantillon ainsi obtenue n'est que sa masse sèche M_s (en kg).

2.4.2. Teneur en eau initiale du fruit

La teneur en eau initiale des échantillons a été obtenue grâce à l'équation classique suivante :

$$X_0 = \frac{M_0 - M_s}{M_s}$$

Avec : X_0 est la teneur en eau initiale de l'échantillon (kg H₂O/kg de matière sèche), M_0 est sa masse initiale (kg) et M_s est sa masse sèche (kg).

2.4.3. Teneur en eau instantanée du fruit

La teneur en eau instantanée des échantillons a été obtenue grâce à l'équation classique suivante :

$$X(t) = \frac{M(t) - M_s}{M_s}$$

Avec : $X(t)$ est la teneur en eau instantanée de l'échantillon (kg H₂O/kg de matière sèche), $M(t)$ est sa masse instantanée (kg).

CHAPITRE III :
Résultats et Discussion

1. VARIATION DES PARAMÈTRES EXTERIEURS DURANT LE SECHAGE AU SOLEIL DES NÈFLES

1.1. Variation du rayonnement solaire durant le séchage au soleil des nêfles

Les deux courbes de la figure III.1 représentent les variations du rayonnement solaire de deux journées de séchage en fonction des heures de journée temps. Le rayonnement est à la valeur de 400 W/m² au début de la journée voire de l'expérience. A 07:00, il continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale vers 12:00 heures qui est égale à 1040 W/m² puis commence à décroître jusqu'à atteindre la valeur de nulle à 19:00 (coucher du soleil). La même allure est obtenue durant le deuxième jour. Les deux courbes ont la forme d'une cloche chacune.

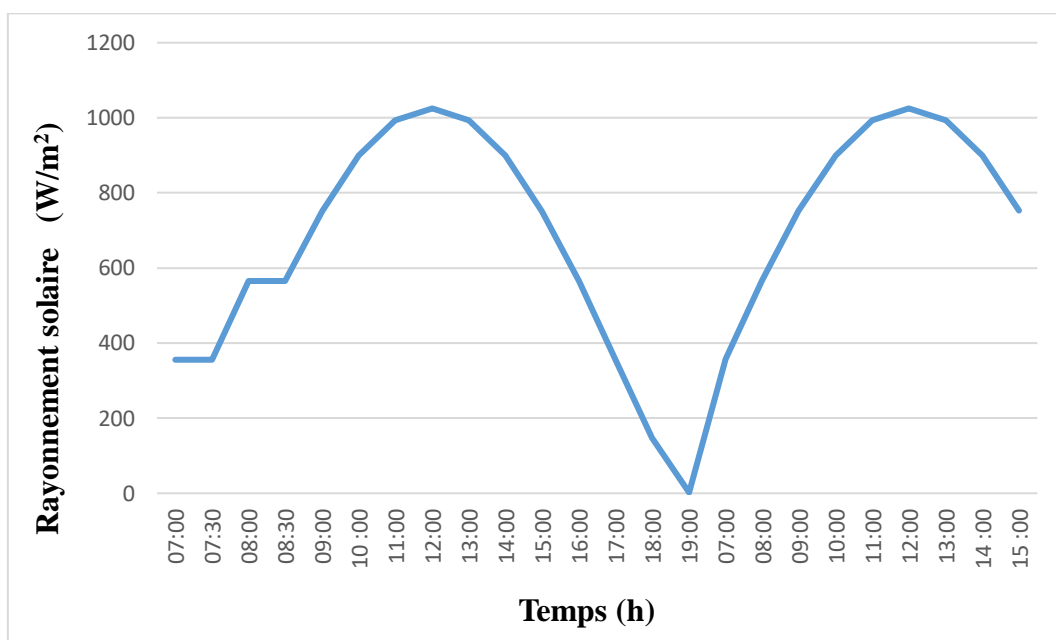


Fig. III.1 : Variation du rayonnement solaire durant deux journées de séchage.

1.2. Variation de la température de l'air durant le séchage au soleil des nêfles

Les deux courbes de la figure III.2 représentent les changements de la température de l'air ambiant en fonction du temps, durant les deux journées de séchage des échantillons de nêfle. Il y a une augmentation uniforme de la température entre 07:00 et 11:00 du matin, puis il y a une certaine stabilité pour atteindre la valeur maximale vers 15:00, soit 33°C jusqu'à ce que la valeur décroît pour atteindre 28 °C à 19:00 de l'après-midi. La même évolution de la température ambiante a été enregistrée, durant la journée suivante.

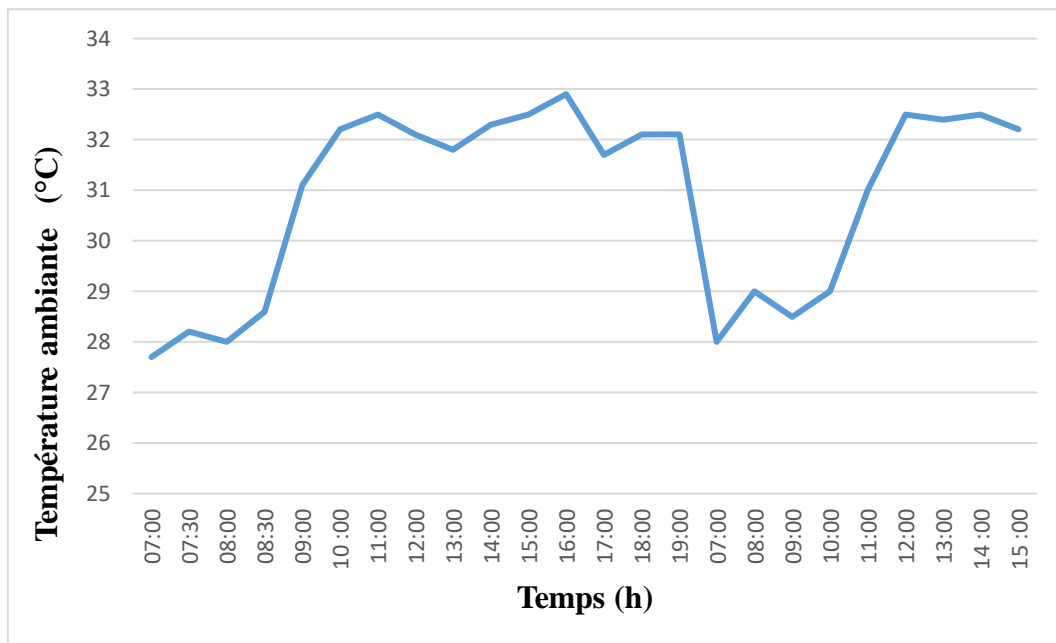


Fig. III.2 : Variation de la température ambiante durant deux journées de séchage.

1.3. Variation de l'humidité relative de l'air durant le séchage au soleil des nêfles

Les courbes graphiques (Figure III.3) représentant la variation de l'humidité en fonction du temps de 07:00 à 11:00, montrent un décalage en humidité, suivi d'une stabilité temporaire jusqu'à 15:00, qui commence à augmenter d'une manière progressive.

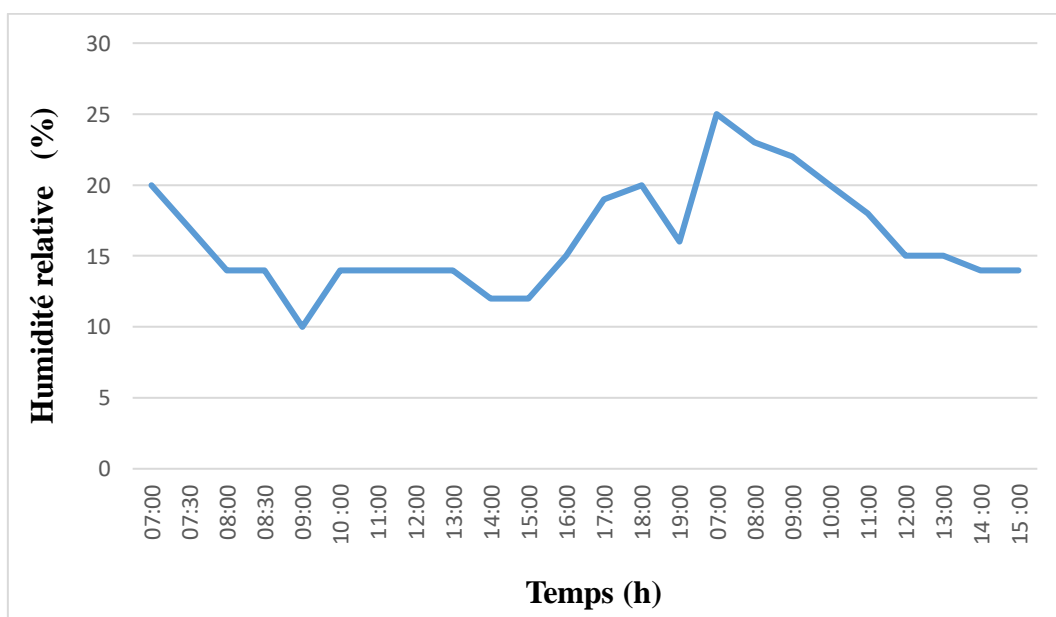


Fig. III.3 : Variation de l'humidité ambiante durant deux journées de séchage.

1.4. Variation de la vitesse de l'air durant le séchage au soleil des nêfles

La courbe de la figure ci-dessous (Figure III.4) représente l'évolution de la vitesse de l'air ambiant en fonction du temps, durant les deux journées de séchage au soleil des nêfles. On constate que la vitesse est comprise entre les valeurs 2 et 4 m/s en évoluant d'une manière oscillatoire, mais elle atteint la valeur de 5 m/s à 15:00 de l'après-midi de la deuxième journée.

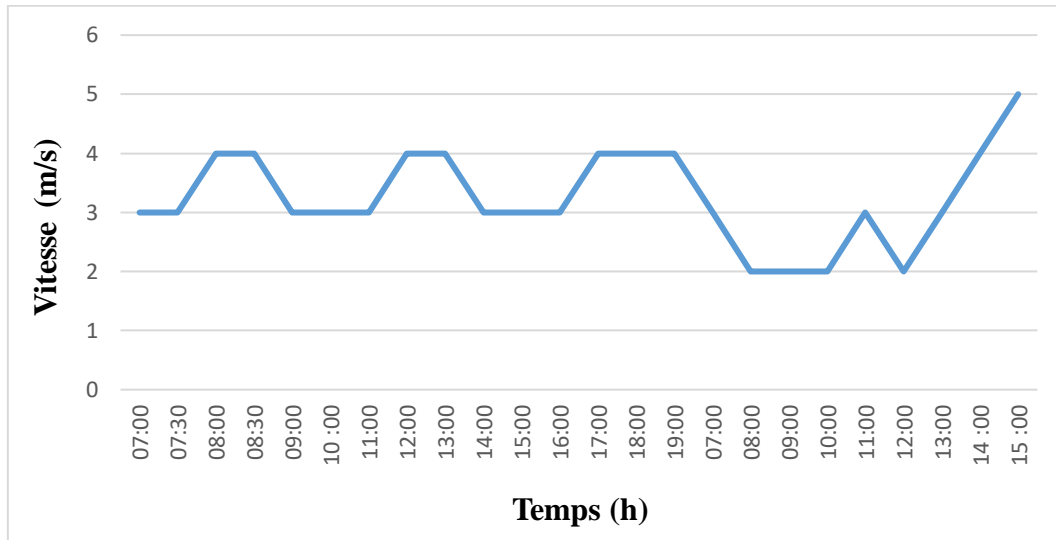
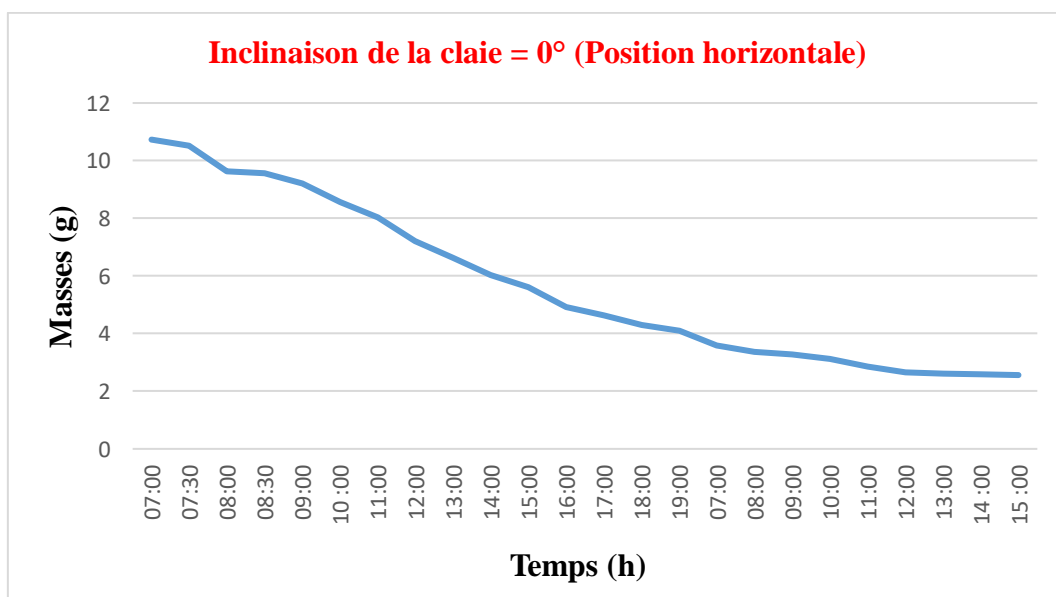


Fig. III.4 : Variation de la vitesse de l'air ambiant durant deux journées de séchage.

2. Variation de la masse des nêfles séchées au soleil

Dans la figure III.5, il y a les variations des masses des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons. En effet, chaque cas est représenté sur un diagramme propre à lui.



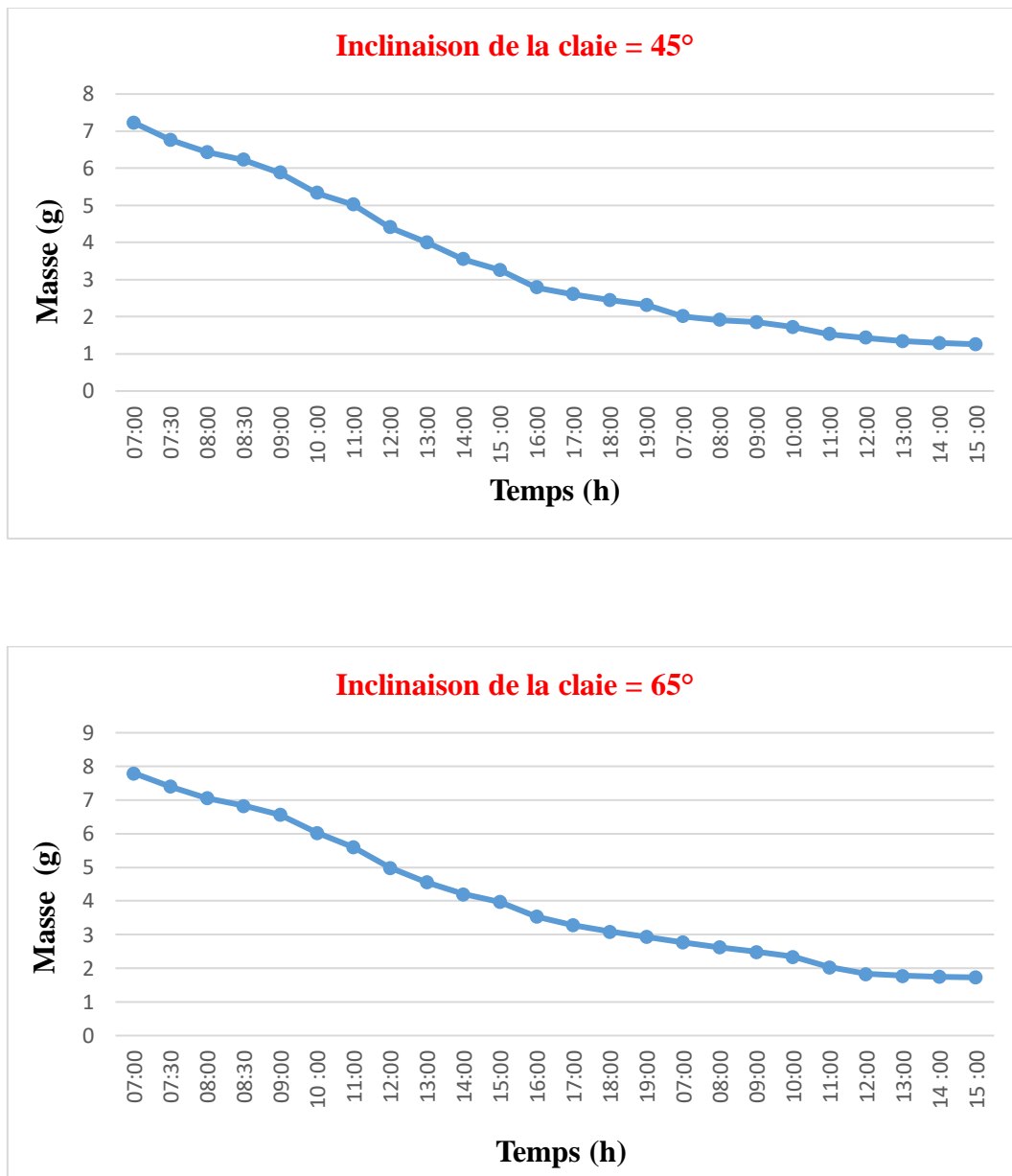


Fig. III.5 : Variation de la masse des nèfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

Sur la figure III.6, les évolutions des trois courbes des masses du fruit pour les trois inclinaisons utilisées dans cette étude, la diminution est rapide jusqu'à presque la fin de l'opération (dernières heures de séchage) pour les échantillons de la claie avec 45° d'inclinaison en comparaison avec les autres claies bien entendu.

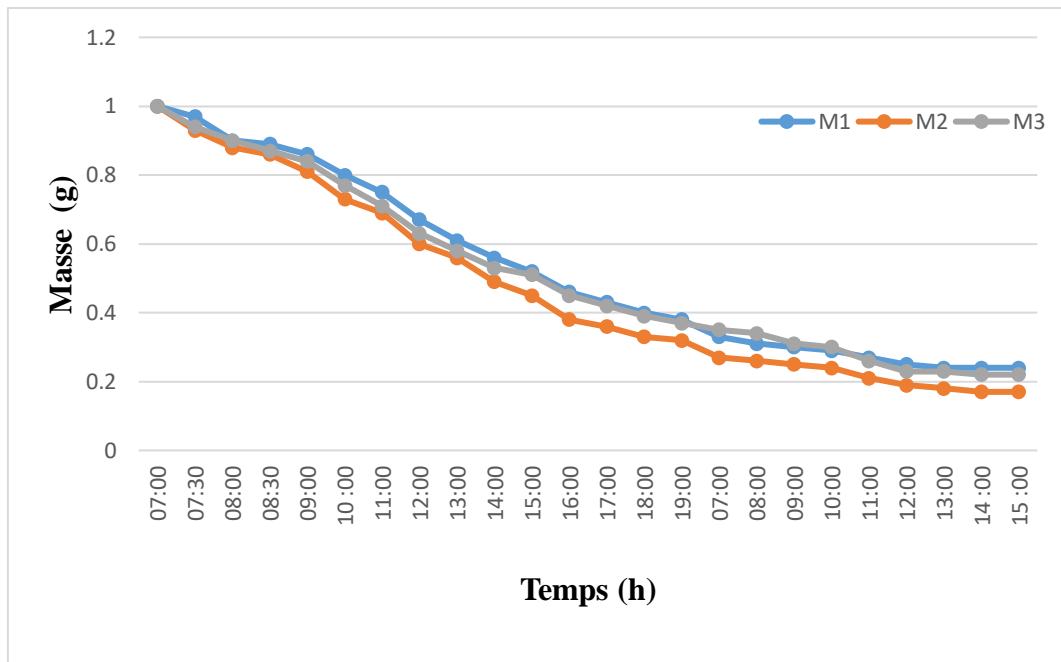
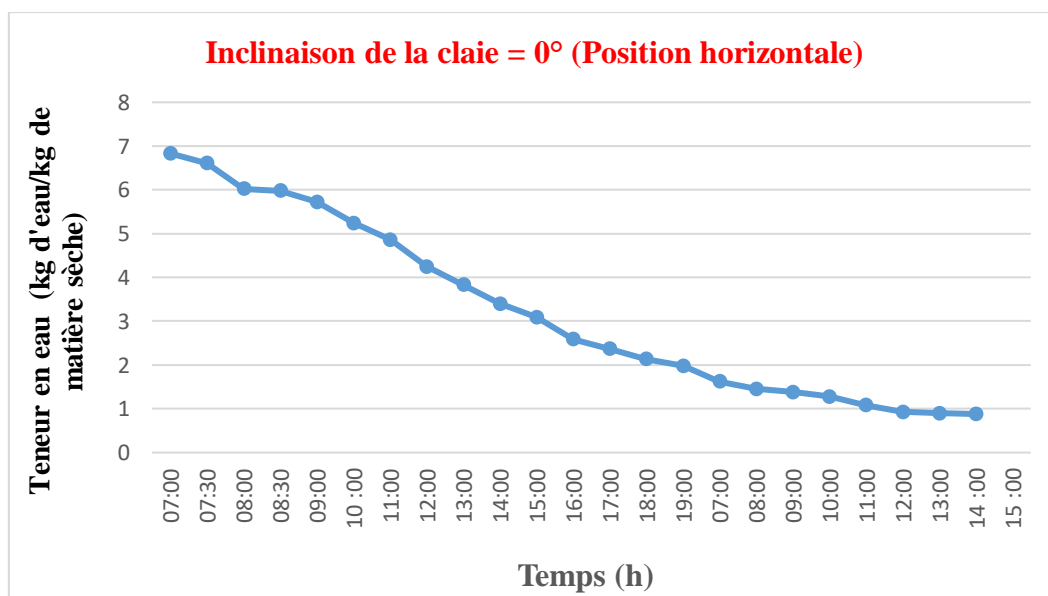


Fig. III.6 : Comparaison des variations des masses adimensionnelles des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

3. Variation de la teneur en eau des nêfles séchées au soleil

Les courbes de la figure III.7 représentent la différence de teneur en eau dans les fruits séchés au soleil en fonction du temps. On constate une diminution significative de la masse d'eau dans les premières heures de l'expérience entre 07:00 et 14:00 et elle peut atteindre un gramme par heure et commence à diminuer progressivement après la quatrième heure jusqu'à atteindre 0.3 g H₂O/g de matière sèche, mais dans les dernières heures, il atteint 0.04 g H₂O/g de matière sèche.



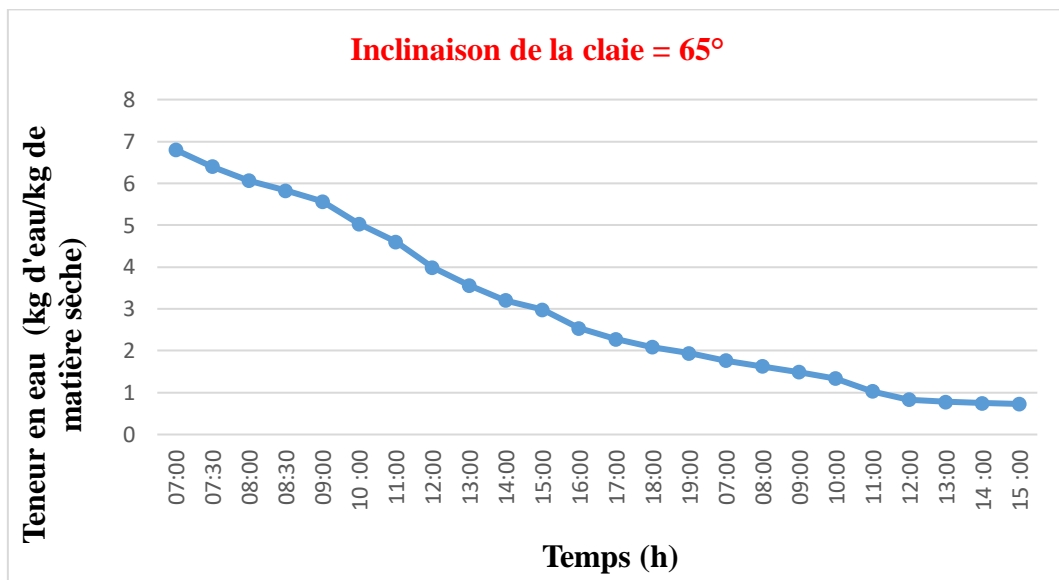
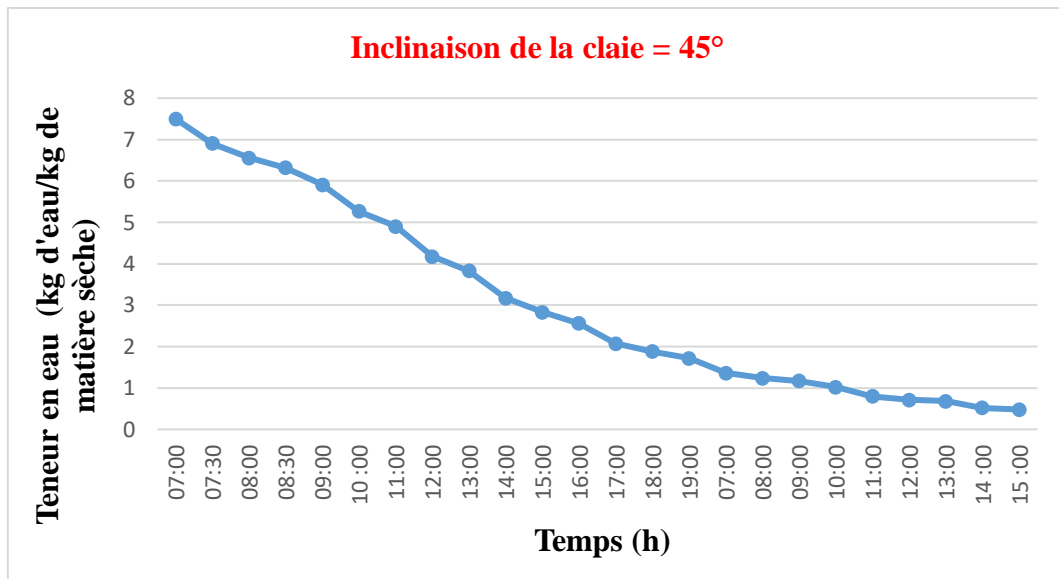


Fig. III.7 : Variation de la teneur en eau des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

Nous constatons que le séchage des échantillons des nêfles est passé par plusieurs étapes dont la première est caractérisée par une perte d'eau rapide.

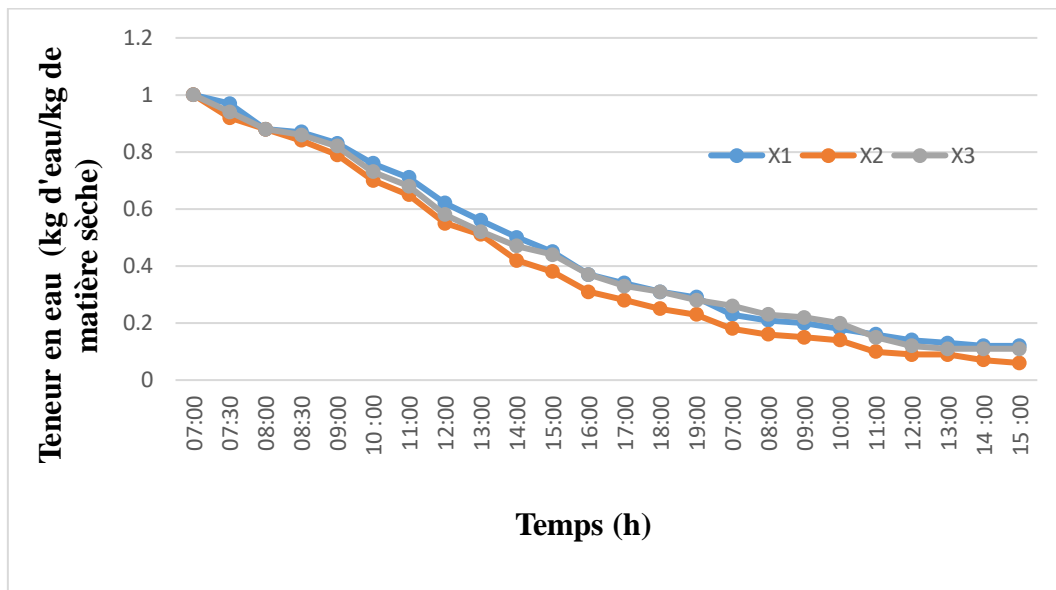
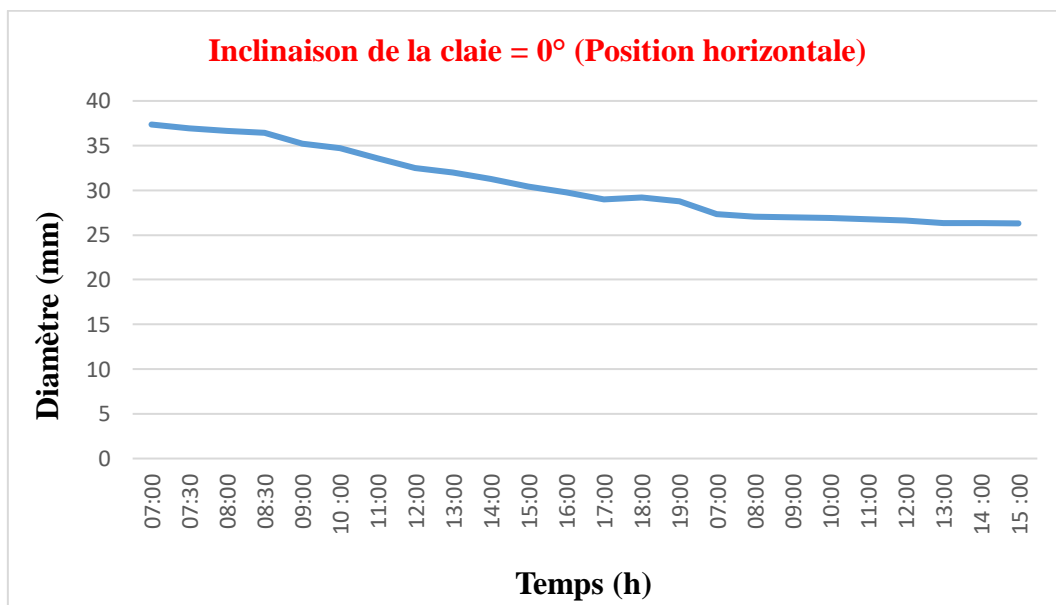


Fig. III.8 : Comparaison des variations des teneurs en eau adimensionnelles des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

4. Variation des dimensions des nêfles durant le séchage au soleil

4.1. Variation du diamètre des nêfles durant le séchage au soleil



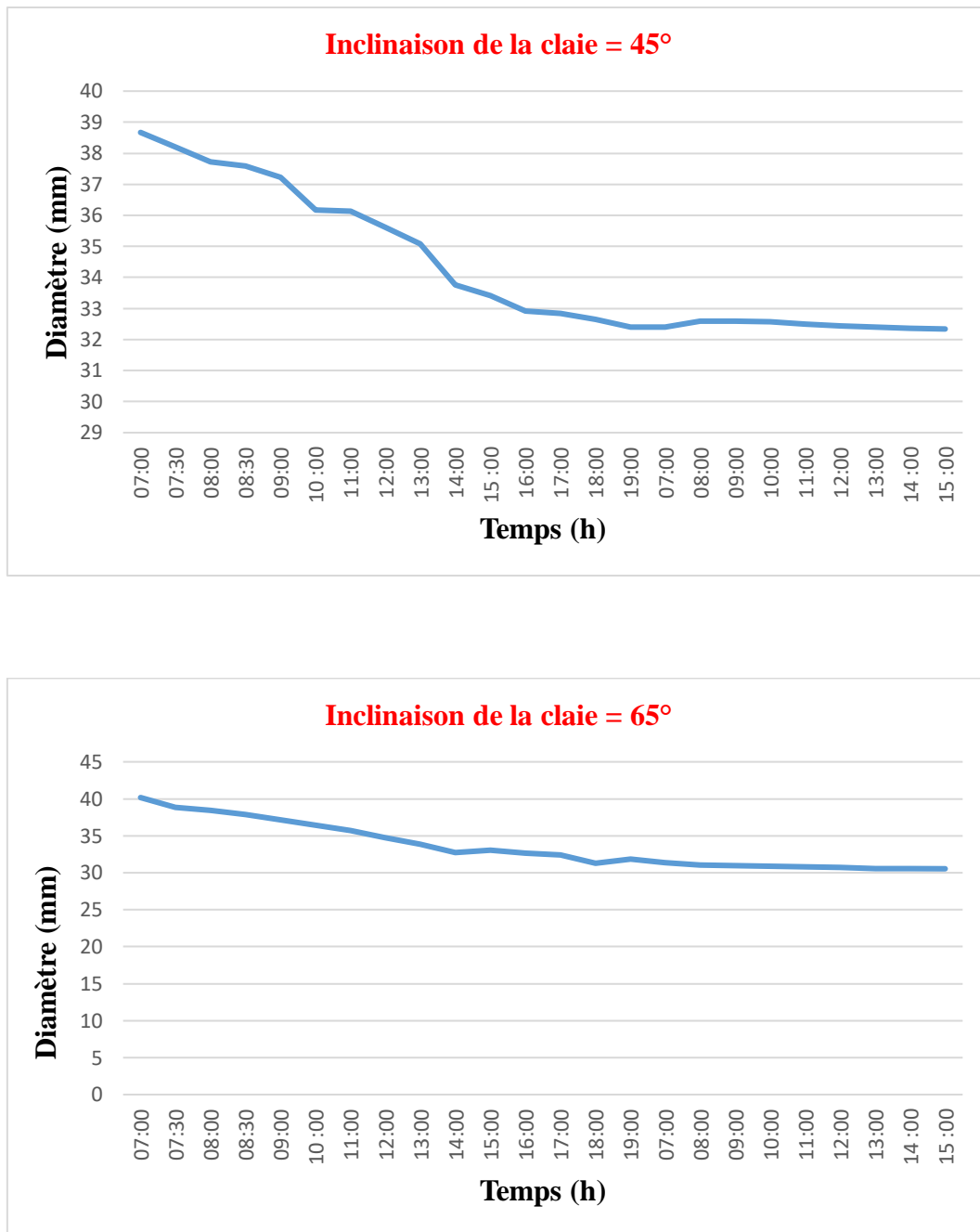
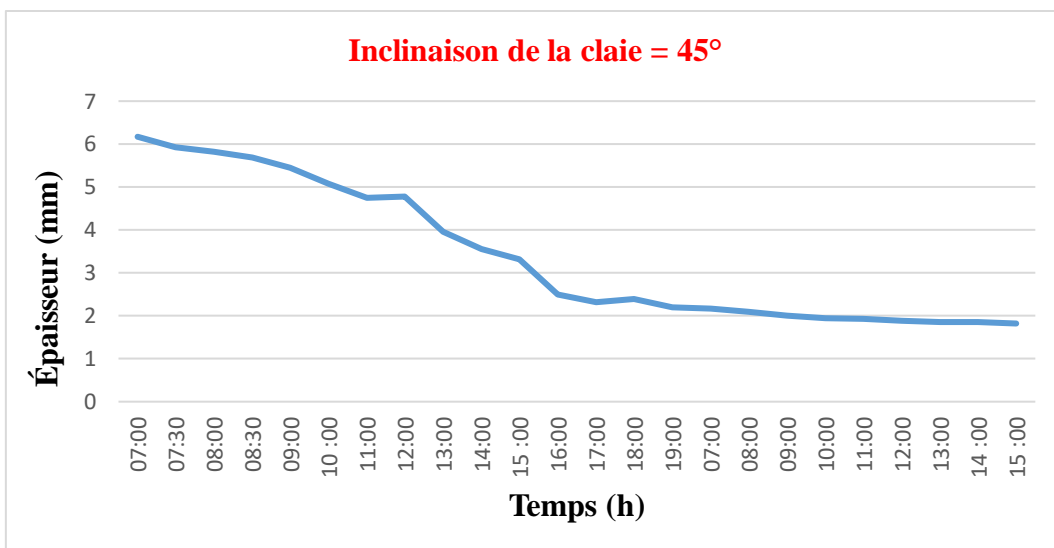
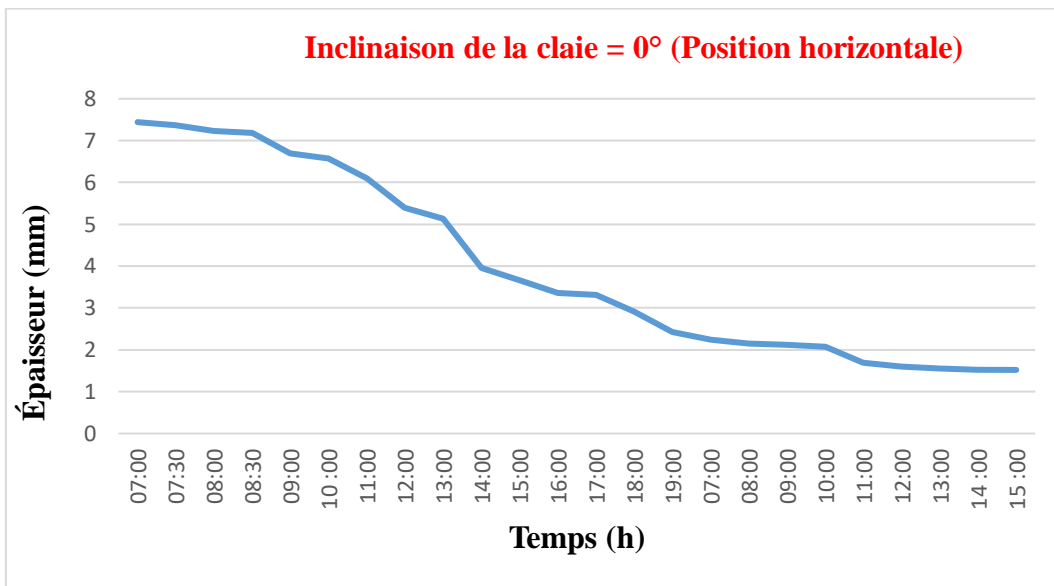


Fig. III.9 : Variation du diamètre des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

La courbe de la figure III.9 représente l'évolution du diamètre de l'échantillon en fonction du temps, durant le séchage. La diminution est lente jusqu'à 17:00 de la première journée, puis il y a une phase plus lente encore que la première, légère et irrégulière jusqu'à presque stable à la fin du séchage, durant la deuxième journée.

4.2. Variation de l'épaisseur des nêles durant le séchage au soleil



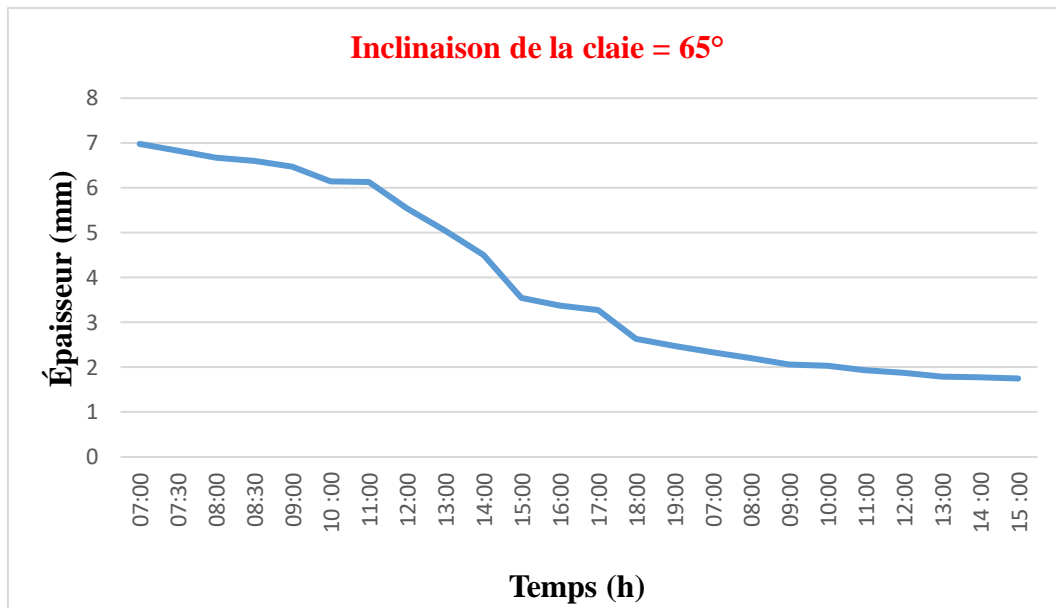


Fig. III.10 : Variation de l'épaisseur des nêfles durant le séchage au soleil sous différentes inclinaisons.

Les trois courbes de la figure III.10 représentent l'évolution de l'épaisseur des échantillons en fonction du temps t , où l'on constate une diminution lente mais notable de l'épaisseur jusqu'à 13:00 de la première journée, puis l'existence d'une phase plus lente que la première voire constante et stable, en fin de séchage.

5. CONCLUSION

Ce travail est considéré comme une contribution au processus de séchage au soleil des fruits, car il présente une étude expérimentales du processus de séchage des nêfles et c'est l'un des fruits les populaires dans la région de M'Sila.

Nous avons visé, à travers cette étude, à améliorer le séchage naturel en étudiant l'effet de l'inclinaison (angles des claies) sur la cinétique de séchage. Outre cela, on voulait trouver l'effet de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent ambiant sur le processus tout entier.

Il convient de noter que le processus de séchage touche les dimensions du fruit séché, à savoir son diamètre et son épaisseur.

Grâce aux expériences qui ont été menées, l'effet de l'angle des claies (inclinaison) sur le séchage au soleil ainsi que celui des facteurs naturels du site ont été déterminés.

Conclusion générale

L'objectif du travail de ce projet de fin d'études en Master était de contribuer à l'étude du séchage au soleil des nèfles (Mchimcha). L'étude était expérimentale via trois claies conçues et réalisées localement, de telle manière à sécher des moitiés de fruit avec trois inclinaisons différentes, sous le climat de la ville de M'Sila, en Algérie.

Les principales conclusions tirées pour le séchage au soleil des nèfles durant le mois de Mai, sous les conditions climatiques de la ville de M'Sila, peuvent être résumées comme suit :

- Pour une claie horizontale, la teneur en eau d'équilibre = 0.86 kg H₂O/kg de matière sèche soit une perte en eau de 87.78%, le diamètre à l'équilibre = 26.26 mm soit une perte de 32.21% et l'épaisseur à l'équilibre = 1.52 mm soit une perte de 77.84%.
- Pour une claie inclinée de 45°, la teneur en eau d'équilibre = 0.48 kg H₂O/kg de matière sèche soit une perte en eau de 93.20%, le diamètre à l'équilibre = 32.34 mm soit une perte de 16.52% et l'épaisseur à l'équilibre = 1.82 mm soit une perte de 73.47%.
- Pour une claie inclinée de 65°, la teneur en eau d'équilibre = 0.73 kg H₂O/kg de matière sèche soit une perte en eau de 89.63%, le diamètre à l'équilibre = 30.53 mm soit une perte de 21.20% et l'épaisseur à l'équilibre = 1.76 mm soit une perte de 74.34%.
- Parmi les trois inclinaisons choisies durant l'étude expérimentale, l'inclinaison optimale était égale à 45°.

Références bibliographiques

- [1] <https://123dok.net/article/séchage-généralités-séchage-séchoirs-solaires.1y9vn6wq>
- [2] Abdellouahab Benseddik, Modélisation et simulation de séchage de la figue par des séchoirs indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de Magister, (2011), Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen.
- [3] Réda Khama, Farida Aissani et Rezak Alkama, Design and performance testing of an industrial-scale indirect solar dryer. *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 11, No. 9 (2016) 1263 – 1281.
- [4] Souheyla Khaldi-Yahiaoui, Étude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Thèse de doctorat, (2018), Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen.
- [5] Réda Khama, Conception, réalisation et simulation d'un séchoir solaire opérant en mode convectif utilisé pour le séchage de produits agroalimentaires. Thèse de doctorat, (2016), Université Abderrahmane Mira Béjaia, Algérie.
- [6] Şen Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy, (2008), Springer.
- [7] Khama, R., F. Aissani-Benissad, R. Alkama, L. Fraikin and A. Léonard. 2022. Modeling of drying thin layer of tomato slices using solar and convective driers. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24 (1):287-298.
- [8] Slimane Boughali, Étude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de doctorat, (2010), Université Batna 2.
- [9] Autre. Université Bourgogne Franche-Comté. (H1)
- [10] Jean-Jacques Bimbenet, Albert Duquenoy et Gilles Trystram, *Génie des procédés alimentaires : Des bases aux applications*, (2002), RIA Édition Dunod, Paris.
- [11] Ibrahim Doymaz, Air drying characteristics of tomatoes, (2007), *Journal of Food Engineering* 78, 1291-1297.
- [12] Touati Tliba Marouane et Drihem Badreddine, Étude expérimentale du séchage solaire des plantes Feuillues, Mémoire de fin d'études en Master académique, (2017), Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.
- [13] Réda Khama, Farida Aissani, Rezak Alkama, Jie Li, Laurent Fraikin, Erwan Plougouven, Angélique Léonard. Study by x-ray microtomography of the tomato slices shrinkage during the convective drying. EuroDrying'2017 – 6th European Drying Conference, Liège, Belgium.

[14] Réda Khama, Amar Seghier, Sliman Rouas, Experimental study of the shrinkage phenomenon during the static and open sun drying of apple slices. 2018, Algerian Journal of Engineering Research. Vol. 4, 52-58.

[15] Youcef Rahmani and Réda Khama, "Effect of thickness and pretreatment on the physicochemical quality of sun-dried camelina meat," 2020 6th International Symposium on New and Renewable Energy (SIENR), 2021, pp. 1-5, doi:10.1109/SIENR50924.2021.9631887.

