

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique



Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie mécanique

N°:

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master Académique

Présenté par: **MOHAMED DJAAROUN**

Titre:

Etude de la cinétique du séchage

Soutenu devant le jury composé de :

IHADDADENE RAZIKA	Pr	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Encadreur
BAKHTI FATIMA ZOHRA	Dr	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Président
BERKACHE AMAR	Dr	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Examineur

Année académique: 2024 /2025

Remerciements

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, pour la foi, la patience et la force qu'Il m'a accordées tout au long de ce parcours. C'est grâce à Sa miséricorde que j'ai pu mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à ma directrice de mémoire, **Pr Ihaddadene Razika**, de l'Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, pour son accompagnement bienveillant, la qualité de son encadrement, sa disponibilité, ainsi que pour ses conseils judicieux et ses remarques constructives qui ont grandement enrichi ce travail.

Je remercie sincèrement toutes les personnes qui, par leur aide, leurs conseils ou leurs encouragements, ont contribué à l'aboutissement de ce projet.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes parents, à mes frères, à mes sœurs et à l'ensemble de ma famille pour leur soutien inconditionnel, leurs prières et leur confiance tout au long de ce parcours. Leur présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation.

J'adresse également mes remerciements sincères à mes amis pour leur soutien moral, leur camaraderie et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable.

Enfin, que Dieu bénisse Son noble Messager, Mohammed (paix et salut sur lui), ainsi que sa famille et ses compagnons, et qu'Il nous comble de Sa paix et de Sa lumière.

Contenu

Liste des figures

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	1
I État de l'art dans le séchage	3
I.1 Définition du Séchage	5
I.2 Importance du séchage des fruits	5
I.3 Différentes méthodes de séchage	6
I.3.1 Séchage mécanique	6
I.3.2 Séchage chimique	7
I.3.3 Séchage thermique	7
I.4 Principe du séchage thermique	8
I.4.1 Chargement et séchage du produit	8
I.4.2 Recirculation de l'air humide	8
I.4.3 Processus de séchage	8
I.4.4 Transport diffusif	8
I.5 Transferts d'énergie appliqués au séchage	9
I.5.1 Mécanismes de transfert de chaleur	9
I.5.2 Transfert de masse	14
I.6 L'état de l'air et son impact sur le séchage	15
I.6.1 Propriétés fondamentales de l'air de séchage	15
I.6.2 Caractéristiques de l'Air Humide	15
I.7 La cinétique de séchage	18
I.7.1 Période (1) : période de transition	19

I.7.2	Période (2) : période à vitesse de séchage constante	19
I.7.3	Période (3) : période à vitesse de séchage décroissante	19
I.8	Les paramètres influents sur la cinétique de séchage	20
I.8.1	Influence de la température de l'air de séchage (T_a)	20
I.8.2	Influence de l'humidité de l'air de séchage (H_r)	21
I.8.3	Influence de la vitesse de l'air de séchage (V_a)	21
I.8.4	Influence du taux de recyclage de l'air de séchage	21
I.8.5	Le calibre du produit à sécher	21
I.8.6	Influence de l'épaisseur du produit à sécher (E_p)	21
II	Materiels et méthodes	23
II.1	Description des appareils utilisés	25
II.1.1	Système de démonstration d'énergie solaire – ET 200	25
II.1.2	Balance électronique – JOANLAB	26
II.1.3	Support de séchage	27
II.2	Préparation des échantillons	28
II.2.1	Fraises	28
II.2.2	Poivron rouge	29
II.2.3	Potiron	29
II.3	Procédures expérimentales	30
III	Résultats et discussion	35
III.1	Étude de la cinétique de séchage	37
III.1.1	la variation des les masses en fonction de temps	37
III.1.2	La variation de Taux d'humidité relative (MR) en fonction du temps	46
III.2	Conclusion	55
	Bibliographie	59

Liste des figures

I.1	Schéma des processus de transfert de chaleur par convection	9
I.2	Vitesse de séchage en fonction du temps [10]	19
II.1	Système de démonstration d'énergie solaire – ET 200	25
II.2	Balance électronique – JOANLAB	26
II.3	Support de séchage	27
II.4	Échantillons de fraises à sécher	28
II.5	Échantillons de Poivron rouge à sécher	29
II.6	Échantillons de Potiron à sécher	30
II.7	Échantillons de poivron rouge sous le séchoir	31
II.8	Échantillons de fraises sous le séchoir	31
II.9	Échantillons de Potiron sous le séchoir	32
II.10	Le potiron sur la balance électronique – JOANLAB	33
II.11	Les fraises sur la balance électronique – JOANLAB	33
III.1	La variation de la masse des échantillons de fraises pour chaque intensité (1) 1769 W/m ² , (2) 783W/m ² , (3) 725 W/m ² et (4) 522 W/m ²	39
III.2	Evolution de la variation de la masse des échantillons de fraises en fonction du nombre d'heures.	40
III.3	variation de la masse des échantillons de poivron rouges pour chaque intensité (1) 1652 W/m ² , (2) 1327,5W/m ² , (3) 796,5 W/m ² et (4) 354 W/m ²	42
III.4	variation de la masse des échantillons du poivron rouge en fonction du nombre d'heures.	43
III.5	variation de la masse des échantillons de potiron pour chaque intensité (1) 1769 W/m ² , (2) 1357W/m ²	45
III.6	Evolution de la variation de la masse des échantillons du potiron en fonction du nombre d'heures.	46

III.7 variation de MR des echantillons de Fraises	48
III.8 variation des MR de Fraises en fonction du temps	49
III.9 variation de MR des echantillons de poivron rouge	51
III.10 variation des MR du poivron rouge en fonction du temps	52
III.11 variation de MR des echantillons de potiron	53
III.12 variation des MR du potiron en fonction du temps	54

Liste des abréviations

T :	Température de l'air (°C ou K)
T_h :	Température humide (°C ou K)
x :	Teneur en humidité de l'air (kg d'eau/kg air sec)
x' :	Humidité à saturation
C_{pa} :	Chaleur spécifique de l'air sec (kcal/kg · K)
C_{pv} :	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau (kcal/kg · K)
L :	Chaleur latente de vaporisation (kcal/kg ou J/kg)
ρ :	Masse volumique de l'air humide (kg/m ³)
H :	Enthalpie de l'air humide (kcal/kg ou J/kg)
μ :	Viscosité dynamique (Pa · s)
p_s :	Pression de vapeur saturante (atm)
C_p :	Chaleur spécifique de l'air humide
M_t :	Teneur en eau du produit à l'instant <i>t</i>
MR :	Taux d'humidité relatif
m_t :	Masse du produit à l'instant <i>t</i> (g ou kg)
m_s :	Masse sèche du produit (g ou kg)
M₀ :	Teneur en eau initiale du produit
T_a :	Température de l'air de séchage
H_r :	Humidité relative de l'air
V_a :	Vitesse de l'air de séchage
E_p :	Épaisseur du produit

Introduction générale

Le séchage est une opération thermodynamique essentielle dans de nombreux procédés industriels, notamment dans le secteur agroalimentaire, où il joue un rôle primordial dans la conservation des fruits et de leurs dérivés. Il s'agit du processus d'élimination de l'eau contenue dans les aliments afin d'allonger leur durée de vie en inhibant la croissance des micro-organismes et les réactions enzymatiques responsables de leur détérioration. Cette technique, l'une des plus anciennes méthodes de conservation utilisées par l'humanité, demeure aujourd'hui un procédé incontournable pour réduire les pertes post-récolte et valoriser les produits périssables. De nombreux produits alimentaires sont séchés afin de réduire leur poids et leur volume finaux, d'augmenter leur durée de conservation, de diminuer les coûts d'emballage et de réduire considérablement les coûts de transport et de stockage.

De nombreuses techniques de séchage solaire peuvent être utilisées pour réaliser le processus de séchage. Le séchage à air chaud par convection est la technique la plus appropriée au niveau commercial. Cette technique a montré sa supériorité sur d'autres méthodes applicables en termes de préservation de la qualité (couleur et teneur en caroténoïdes) et de faible coût d'exploitation. Dans cette étude, on s'intéresse à étudier la possibilité de sécher par rayonnement, contrairement à la convection à haute température, la méthode la plus répandue. Le rayonnement solaire a été simulé par une lampe halogène et les expériences ont été réalisées au laboratoire. Trois variétés (fraises, poivron rouge et potiron) ont été utilisées dans cette étude. L'effet de l'intensité du rayonnement a été étudié sur le séchage de ces trois. Le premier chapitre de cette étude est consacré à l'établissement des bases théoriques nécessaires à la compréhension du phénomène de séchage. Il aborde les définitions fondamentales, l'importance économique et nutritionnelle du séchage des fruits, ainsi que les différentes méthodes existantes. Une attention particulière est portée sur les mécanismes de transfert de chaleur et de masse, ainsi que sur les propriétés de l'air humide qui influencent directement la cinétique de séchage. Ce cadre théorique permet de mieux cerner les paramètres cruciaux pour optimiser le procédé, tels que la température, la durée, la vitesse de l'air et l'humidité relative.

Dans le second chapitre, l'étude se concentre sur l'aspect expérimental, qui constitue une étape clé dans toute recherche appliquée. Nous présentons ici le matériel utilisé, notamment le système d'énergie solaire artificielle ET 200 (lampes halogènes) et la balance électronique de précision JOANLAB, ainsi que la conception d'un support en bois destiné à placer les échantillons selon différents niveaux d'intensité lumineuse. La méthodologie adoptée pour la préparation et le conditionnement des échantillons est également détaillée. Trois produits alimentaires ont été choisis pour cette étude comparative : la fraise, le poivron rouge et

le potiron, sélectionnés en raison de leurs disponibilité durant cette période. Les différentes étapes expérimentales, incluant le positionnement des échantillons, la fréquence des mesures de masse et l'enregistrement des données dans le temps, sont décrites afin d'assurer un suivi rigoureux de la cinétique de séchage.

Enfin, le troisième chapitre sera consacré à l'analyse détaillée des résultats obtenus, en se basant sur la cinétique de séchage et l'influence de l'intensité du rayonnement. Cette partie mettra en lumière les performances du procédé utilisant l'énergie solaire artificielle et proposera des recommandations pour l'amélioration et l'optimisation du séchage des fruits, notamment dans des contextes ruraux où cette technique peut contribuer à une meilleure gestion post-récolte et à la réduction des pertes alimentaires.

Chapter I

État de l'art dans le séchage

Introduction

Le séchage constitue une étape cruciale dans de nombreux procédés industriels, en particulier dans le secteur agroalimentaire, où il représente un moyen efficace de conservation des produits périssables tels que les fruits et légumes. Cette opération, qui vise principalement à éliminer l'humidité contenue dans un produit, repose sur des principes thermodynamiques complexes mettant en jeu des transferts de chaleur et de masse.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons principalement à l'état de l'air utilisé dans le processus de séchage, car il joue un rôle déterminant dans l'efficacité du procédé. En effet, les caractéristiques thermiques et hygrométriques de l'air, telles que la température, l'humidité relative, l'enthalpie ou encore la vitesse de circulation, influencent directement la cinétique de séchage et la qualité finale du produit séché.

Ce chapitre débutera par une définition générale du séchage et un aperçu de son importance, notamment dans la conservation des fruits. Ensuite, nous présenterons les différentes méthodes de séchage classées selon leur principe de fonctionnement : mécanique, chimique et thermique. Une attention particulière sera portée à la compréhension du principe du procédé de séchage, aux phénomènes de transfert thermique et massique, ainsi qu'aux mécanismes internes liés à l'extraction de l'eau depuis le cœur du produit vers sa surface.

Nous aborderons également les notions fondamentales liées à l'air humide, ses propriétés physiques, et leur influence directe sur la cinétique de séchage, à travers les différentes phases que traverse un produit au cours du processus. Finalement, une analyse des paramètres influents sur l'efficacité du séchage sera proposée, afin de mettre en évidence les leviers d'optimisation possibles, en fonction des conditions ambiantes et des propriétés du matériau à sécher

I.1 Définition du Séchage

Le séchage est l'un des plus anciens procédés de conservation utilisés par l'humanité, remontant à la préhistoire. Aujourd'hui, il joue un rôle essentiel dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire, en particulier pour la préservation des fruits et légumes. Bien que le séchage des céréales domine l'industrie agroalimentaire, celui des fruits représente environ **1 % du volume total**, mais demeure crucial pour la conservation et la valorisation de ces produits périssables.[1]

D'un point de vue énergétique, le séchage repose sur l'élimination de l'eau contenue dans les fruits afin de ralentir ou d'empêcher le développement des micro-organismes et des réactions enzymatiques responsables de leur détérioration. Ce processus implique un transfert simultané de chaleur et de masse, qui peut être optimisé à l'aide de technologies avancées, notamment celles basées sur l'**énergie solaire artificielle**. L'optimisation du séchage des fruits nécessite une approche rigoureuse tenant compte de plusieurs paramètres thermodynamiques et énergétiques. Un contrôle précis de la **température (70 °C)**, de la durée de séchage et de l'exposition à l'oxydation et à la lumière est essentiel pour préserver les **composés bioactifs** et assurer une qualité nutritionnelle optimale. Ainsi, l'efficacité énergétique et la conservation des propriétés organoleptiques des fruits dépendent directement de la méthode de séchage adoptée.[1]

I.2 Importance du séchage des fruits

En général, les fruits sont des aliments qui ont une courte durée de conservation après la récolte, en particulier les fruits climactériques ou dépendants de l'éthylène dans lesquels la maturation s'accompagne d'un pic de respiration et d'une explosion concomitante d'éthylène et ont la capacité de mûrir après la récolte avec l'aide de la production d'éthylène. Les pays producteurs et exportateurs de fruits et de fruits climactériques sont toujours confrontés à des problèmes de conservation. Malgré l'importance nutritionnelle et économique des fruits et l'intérêt alimentaire que les populations leur accordent, ils sont également très périssables. Peu après leur maturation, les fruits commencent à pourrir et deviennent rapidement impropres à la consommation, ainsi leur utilisation est limitée par d'énormes pertes après récolte puisque, par exemple, l'orange fraîche peut être conservée moins de 10 jours à température ambiante. Elle ne supporte pas le gel et brunit en cas de réfrigération prolongée. Un réel problème de conservation se pose donc.[2]

C'est dans une préoccupation majeure de la détérioration rapide des fruits climactériques

que plusieurs technologies de transformation de la pulpe au jus et aux nectars existent ainsi que la production de gelées et de confitures. Parmi ces technologies, le séchage qui est une pratique très ancienne de conservation des aliments encore utilisée de nos jours. Des travaux antérieurs montrent que le séchage des fruits est une alternative intéressante et pratique, notamment en milieu rural. En effet, le séchage est une technique de déshydratation qui permet d'éliminer partiellement ou totalement le liquide imprégnant un solide et permettre l'allongement de la durée de conservation du produit. Il est connu que l'introduction d'un traitement thermique induit une augmentation, une diminution ou n'induit pas de changements significatifs de la composition chimique, affectant la biodisponibilité et la teneur en composés chimiopréventifs et l'activité antioxydante des fruits.[2]

Le séchage a pour objectif principal de transformer les denrées périssables en produits stabilisés. On considère généralement qu'un produit est stable lorsque son activité de l'eau est inférieure ou égale à 0,65. Les raisons du séchage sont aussi nombreuses que les produits à sécher, mais elles peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

- A. Allonger la durée de vie du produit, donc faciliter la conservation des produits en abaissant l'activité de l'eau.
- B. Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire et faciliter leur emballage, leur transport et leur stockage.
- C. Donner une présentation, une structure ou une particularité propre au produit.

Au vu de ces avantages, il est donc tout à fait opportun de vulgariser, au moins les techniques modernes de séchage dans les communautés rurales afin de réduire raisonnablement les pertes après récolte et les pertes lors du transport de produits frais sur de longues distances.[2]

I.3 Différentes méthodes de séchage

I.3.1 Séchage mécanique

Le séchage mécanique consiste à éliminer le liquide présent dans un produit par l'application de forces purement mécaniques telles que le pressage, la centrifugation, la compression, la décantation et la filtration.[3]

I.3.2 Séchage chimique

Ce procédé repose sur l'utilisation de produits déshydratants, comme le chlorure de calcium, pour extraire l'eau du produit.[3]

I.3.3 Séchage thermique

Le séchage thermique est un processus impliquant un transfert de masse, nécessitant au préalable une activation de l'eau par un apport énergétique sous forme de chaleur. Ce processus se déroule en plusieurs phases :

- Transfert de chaleur externe : de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne : de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne : du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe : de la surface du produit vers le milieu ambiant [3].

I.3.3.1 Séchage par ébullition

L'ébullition d'un liquide survient lorsque la pression de vapeur de l'eau contenue dans le produit est égale à la pression ambiante totale. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs :

- Pour l'eau pure à pression atmosphérique, la température d'ébullition est de 100°C.
- Pour des solutions aqueuses, la présence de substances dissoutes abaisse la pression de vapeur, nécessitant une température d'ébullition supérieure à 100°C.
- Pour les solides humides, l'eau contenue bout à 100°C ou à une température plus élevée selon son état dans le produit. La température d'ébullition varie également en fonction de la pression. Sous vide, elle est plus basse, ce qui est exploité dans les industries alimentaires et pharmaceutiques où le séchage est souvent réalisé sous vide sur des produits préalablement congelés [3].

I.3.3.2 Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est exposé à un courant d'air chaud et sec, un échange thermique et massique s'établit spontanément entre le produit et l'air ambiant :

La chaleur est transférée de l'air vers le produit en raison de la différence de température. L'eau migre en sens inverse, du produit vers l'air, en raison de la différence de concentration en vapeur d'eau.[3]

I.4 Principe du séchage thermique

I.4.1 Chargement et séchage du produit

Le produit à sécher est placé dans une enceinte fermée où la chaleur est apportée par la circulation de l'air chaud. Cette enceinte peut contenir une série de claies superposées sur lesquelles le produit est réparti en couches minces.[4]

I.4.2 Recirculation de l'air humide

L'air chargé en humidité est extrait de la chambre de séchage par un système de ventilation forcée. Cet air humide est ensuite remplacé par de l'air sec, qui est réintroduit dans la chambre de séchage pour assurer un processus de déshydratation efficace.[4]

I.4.3 Processus de séchage

Le séchage comprend plusieurs étapes impliquant des transferts de chaleur et de masse, ainsi que des transformations physiques et chimiques. Parmi ces transformations, on observe :

des modifications géométriques (rétrécissement, gonflement), des phénomènes de cristallisation et de transition vitreuse, des réactions chimiques ou biologiques pouvant entraîner des altérations de couleur, de texture, d'odeur ou d'autres propriétés du produit. L'élimination de l'humidité s'effectue en fournissant de la chaleur au produit humide, permettant ainsi la conversion de l'eau liquide en vapeur. Cette chaleur peut être transmise par convection, conduction ou rayonnement.[4]

I.4.4 Transport diffusif

La diffusion est un phénomène fondamental du transport de matière, tout comme la conduction en transfert thermique ou l'écoulement visqueux en mécanique des fluides. Elle se manifeste par le déplacement des particules des zones de forte concentration vers celles à plus faible concentration.[4]

Ce processus se produit spontanément en raison de la différence de concentration, favorisant un état d'équilibre. La vitesse de diffusion est quantifiée par le coefficient de diffusivité. Selon la loi de Fick, le flux de matière résultant est proportionnel au gradient de concentration via ce coefficient de diffusion.[4]

I.5 Transferts d'énergie appliqués au séchage

I.5.1 Mécanismes de transfert de chaleur

I.5.1.1 Convection

La convection joue un rôle crucial dans le processus de séchage. Elle agit sur la surface d'un matériau (comme les fruits) qui se trouve à une température T_s et en contact avec un fluide (l'air) à une température différente T_∞ . L'efficacité du transfert de chaleur par convection est caractérisée par le coefficient de convection h , qui dépend de divers facteurs, notamment les propriétés de l'écoulement de l'air, les caractéristiques de la surface et les différences de température.[5]

Lors du séchage, la convection facilite le transfert de chaleur de l'air chaud vers le produit et contribue également au transfert de masse en éliminant l'humidité évaporée de la surface. La densité du flux de chaleur convectif (W/m^2) est approximativement proportionnel à la différence de température entre la surface de séchage et l'air ambiant [5]

$$q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{I.1})$$

où :

- h est le coefficient de transfert thermique par convection (W/m^2K),
- T_s est la température de surface du produit, 1

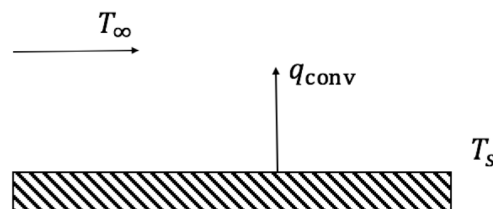


Figure I.1: Schéma des processus de transfert de chaleur par convection

L'expérience montre que La densité du flux thermique convectif (W/m^2) est approximativement proportionnel à la différence entre la température de surface T_s et la température du fluide extérieur T_∞ [5].

Types de convection

Convection naturelle : Elle correspond à la situation où aucun écoulement externe de fluide n'est appliqué sur le système. Exemple : les pertes thermiques d'une personne immobile dans une pièce sans ventilation forcée.[5]

Convection forcée : Elle se produit lorsqu'un écoulement externe est appliqué. Exemple : les pertes thermiques d'une personne lorsque le vent souffle.[5]

Convention de signe Dans l'équation précédente, q''_{conv} est défini comme une valeur absolue, toujours positive. Si la surface est plus froide que le fluide environnant, alors [5]:

$$q''_{\text{conv}} = h(T_\infty - T_s) \quad (\text{I.2})$$

tem T_∞ est la température du flux d'air ambiant.

I.5.1.2 Radiation thermique

La radiation agit sur la surface d'un corps à une température T_s exposée à un environnement à une température différente T_{sur} . À ce stade, nous considérons le cas où une surface A_s est complètement entourée par un environnement de corps noir à température uniforme T_{sur} . Le taux de transfert thermique par unité de surface est exprimé par [5]:

$$q''_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (\text{I.3})$$

où :

- T_s est la température absolue de la surface échangeant la chaleur radiative avec son environnement à T_{sur} .
- ε est l'émissivité de la surface (sans dimension), variant entre 0 et 1, et représentant l'efficacité avec laquelle une surface émet de l'énergie par rapport à un corps noir.
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$).

Les valeurs typiques de l'émissivité sont $\varepsilon \approx 0.2$ pour les métaux propres et $\varepsilon \approx 0.9$ pour la plupart des matériaux mats.

Il est essentiel d'utiliser des températures absolues (K) dans les problèmes de rayonnement thermique. Le milieu entre les surfaces échangeant de la chaleur par rayonnement doit être transparent. En général :

- Le rayonnement peut se transmettre dans le vide et à travers les gaz.
- Les liquides et les solides sont opaques au rayonnement thermique.

Par exemple, un échange de chaleur par rayonnement peut se produire entre des surfaces séparées par de l'air, mais pas entre des surfaces séparées par de l'eau (même si l'eau est transparente à la lumière visible).[5]

Souvent, T_{sur} et T_{∞} sont identiques. Par exemple, dans une pièce fermée à $20^{\circ}C$, l'air intérieur (T_{∞}) et les murs environnants (T_{sur}) sont à la même température de $20^{\circ}C$. Cependant, ce n'est pas toujours le cas. Il est important de distinguer la température de l'environnement T_{sur} de la température d'un fluide entourant un corps T_{∞} .[5]

Considérons le toit bien isolé d'une maison par une nuit d'été sans nuages dans un endroit sec. Si l'air autour de la maison est à $20^{\circ}C$, la convection se produit avec une température de fluide $T_{\infty} = 20^{\circ}C$. Cependant, le rayonnement se produit vers l'espace extérieur dans l'obscurité de la nuit, où $T_{\text{sur}} \approx 0K$.[5]

Convention de signe Dans l'équation précédente, q''_{rad} est défini comme une valeur absolue, toujours positive. Si la surface est plus froide que l'environnement, alors [5]:

$$q''_{\text{rad}} = h(T_{\text{sur}} - T_s) \quad (\text{I.4})$$

I.5.1.3 Conduction thermique

Nous avons vu que la convection, le rayonnement et le contact sont des mécanismes de transfert de chaleur qui agissent à la surface d'un corps. La conduction, en revanche, est différente : dans ce cas, la chaleur se déplace à l'intérieur du corps. Le mécanisme de conduction implique le transfert de quantité de mouvement moléculaire entre les molécules voisines. Dans un réseau cristallin (comme dans les métaux et de nombreux autres matériaux), les vibrations moléculaires sont associées aux vibrations du réseau appelées "phonons".[5]

Conduction unidimensionnelle : Loi de Fourier

La conduction unidimensionnelle (par exemple dans la direction x) signifie que la conduction dans les autres directions (y et z) est négligeable. Cela ne signifie pas nécessairement

que la géométrie du problème est unidimensionnelle. Par exemple, bien que les plaques soient généralement considérées comme ayant une géométrie bidimensionnelle, la conduction à travers une plaque dont les surfaces opposées sont à température constante est unidimensionnelle, car il n'y a aucune raison pour que la chaleur circule dans le plan de la plaque (sauf près des bords, ce qui peut être négligé lorsque l'épaisseur est bien inférieure à la hauteur et à la largeur de la plaque). Une conduction unidimensionnelle peut également se produire dans une tige (une géométrie 1D) dont les extrémités sont à des températures différentes et isolées sur les côtés.[5]

Prenons l'exemple du transfert de chaleur à travers un mur plan dont les températures sur chaque surface sont différentes : $T_{s,A}$ et $T_{s,B}$. Il a été observé expérimentalement que la chaleur transférée à travers le mur est proportionnelle à la surface du mur et à la différence de température entre les deux surfaces. Le flux thermique par conduction est également inversement proportionnel à l'épaisseur du mur [5]:

$$q_{\text{cond}} \propto A_c \frac{(T_{s,A} - T_{s,B})}{L} \quad (\text{I.5})$$

Ici, on utilise A_c car le flux thermique traverse une surface perpendiculaire à la direction du flux. Dans ce cas particulier, $A_c = A_s$ où A_s est la surface d'un côté du mur. Cependant, dans de nombreux autres problèmes, $A_c \neq A_s$. [5]

La constante de proportionnalité est appelée conductivité thermique k (W/mK), ce qui donne l'équation suivante [5]:

$$q_{\text{cond}} = k A_c \frac{(T_{s,A} - T_{s,B})}{L} \quad (\text{I.6})$$

Les matériaux hautement conducteurs, comme les métaux, possèdent une valeur élevée de k , tandis que les matériaux isolants, comme le polystyrène expansé, ont une faible valeur de k . [5]

En utilisant les concepts de flux thermique et de conductivité thermique, et en considérant un mur très mince où $L = dx$ et $(T_{s,A} - T_{s,B}) = dT$, on obtient la loi de Fourier [5]:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{I.7})$$

où q_x'' est le flux thermique dans la direction x . Le signe négatif indique que si la température augmente dans la direction x , le flux thermique se dirige dans la direction opposée ($-x$). [5]

- Convention de signe L'équation précédente définit q_{cond} comme une valeur absolue toujours positive. Si la surface A est plus froide que la surface B , alors [5]:

$$q_{\text{cond}} = kA_c \frac{(T_{s,B} - T_{s,A})}{L} \quad (\text{I.8})$$

Dans l'équation différentielle de Fourier, le signe dépend du système de coordonnées, et le résultat peut être positif ou négatif. Lorsque la coordonnée x est positive, elle indique la direction du flux thermique ainsi que l'augmentation de température. Des valeurs négatives signifient que le flux thermique se dirige vers $-x$ et que la température diminue dans la direction x . [5]

Conduction 3D dans les matériaux isotropes

Étant donné que $\frac{dT}{dx}$ dans un problème 1D représente le gradient de température, l'équation précédente peut être généralisée à la conduction en trois dimensions. Considérons d'abord le cas isotrope, où la conductivité thermique est la même dans toutes les directions. Dans ce cas, la forme tridimensionnelle de la loi de Fourier est [5]:

$$\mathbf{q}'' = -k\Delta T \quad (\text{I.9})$$

où Δ (Delta ou del) est l'opérateur gradient.

En coordonnées cartésiennes (x, y, z) [5]:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \quad (\text{I.10})$$

En coordonnées cylindriques (r, ϕ, z) , où $r = \sqrt{x^2 + y^2}$: [5]

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} e_\phi + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \quad (\text{I.11})$$

En coordonnées sphériques (r, θ, ϕ) , où $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, θ est l'angle polaire et ϕ est l'angle azimutal [5]:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} e_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi} e_\phi \quad (\text{I.12})$$

- Matériaux anisotropes

Dans le cas des matériaux anisotropes, comme les composites (par exemple, les structures en fibre de carbone) ou les cristaux non cubiques, la conductivité thermique k n'est plus un scalaire mais devient une matrice symétrique 3×3 . [5]

- Convention de signe en 3D Étant donné que l'équation 3D fait intervenir des expressions différentielles, les composantes numériques de \mathbf{q}'' peuvent être positives ou négatives. [5]

I.5.2 Transfert de masse

I.5.2.1 Transfert de matière par diffusion

Le phénomène de diffusion moléculaire correspond aux petits mouvements aléatoires quasiment indépendants des atomes ou molécules individuel(le)s, qui tend à rendre uniforme la concentration de l'espèce diffusante (en l'absence de conditions limites particulières imposées aux frontières du système ou de réaction consommant ou produisant cette espèce). Ces mouvements sont inévitables puisqu'ils sont le résultat de l'agitation thermique moléculaire. L'analyse du comportement de mélanges dont la composition n'est pas uniforme (homogène dans l'espace) est beaucoup plus difficile que celle du comportement de fluides purs (ou de mélanges homogènes). Cette complexité tient au fait que la température et la pression ne suffisent plus à définir l'état thermodynamiquement stable du système, il faut également connaître sa composition.[5]

I.5.2.2 Convection massique

Dans le cas des transferts de quantité de mouvement et des transferts thermiques, on distingue les milieux immobiles des milieux en écoulement pour distinguer la diffusion de la convection. Dans le cas de la diffusion de matière un mouvement non intentionnel peut être provoqué lorsque l'on impose des conditions aux limites susceptibles de provoquer la diffusion. On parlera dans ce cas de convection massique : le fluide n'est pas intentionnellement mis en mouvement, mais subit inévitablement la convection massique. Notons également que dans le cas où le transfert de matière induit un mouvement, la condition limite au niveau des parois solides devrait être modifiée en distinguant : une composante parallèle à la paroi pour laquelle on conserve la condition d'adhérence (vitesse nulle si la paroi est immobile) ; une composante perpendiculaire à la paroi qui est non nulle dès que la paroi est une source ou un puits de matière. Cependant les vitesses de convection massique restent –presque toujours– très faibles, notamment par rapport aux mouvements intentionnels de convection, même très lents. On peut mettre en parallèle cette convection massique et la convection naturelle décrite en transferts thermiques.[5]

I.6 L'état de l'air et son impact sur le séchage

I.6.1 Propriétés fondamentales de l'air de séchage

I.6.1.1 Humidité

L'humidité est la présence d'eau dans les solides, les liquides ou les pâtes, et son élimination est recherchée pendant le séchage.[6]

I.6.1.2 Humidité relative

L'humidité relative est donnée par le rapport de la pression partielle de vapeur dans l'air à la pression de vapeur saturante à la même température.[6]

I.6.1.3 Humidité absolue

L'humidité absolue, aussi appelée teneur en humidité, est la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air, exprimée en g/m^3 . [6]

I.6.1.4 Température sèche du gaz

La température sèche du gaz est la température indiquée par un thermomètre placé dans le courant gazeux.[6]

I.6.1.5 Température humide du gaz

La température humide est la température mesurée à l'aide d'un matériau solide imbibé d'eau pendant une phase à vitesse de séchage constante.[6]

I.6.2 Caractéristiques de l'Air Humide

La détermination de l'état hygrométrique d'un air humide passe par la mesure de sa température sèche ou réelle T et de sa température humide T_h . La connaissance de ces deux grandeurs permet le calcul de l'humidité absolue, et par suite, des autres caractéristiques de l'air.[7]

I.6.2.1 Le psychromètre à deux thermomètres

C'est le procédé de mesure le plus représentatif. Il se compose de deux thermomètres dont l'un a son réservoir maintenu sec et l'autre, son réservoir maintenu humide grâce à une mèche

de mousseline imbibée d'eau par capillarité. Le thermomètre sec indique la température réelle T de l'air humide. On fait circuler au contact du thermomètre humide l'air étudié. Ce thermomètre reçoit du courant d'air la chaleur sensible nécessaire à l'évaporation d'une certaine quantité d'eau. Un équilibre s'établit. La température du liquide atteint une valeur appelée température humide de l'air considéré : T_h . À la surface du bulbe, l'air est saturé. La formule (2) permet donc de calculer x' . On peut alors calculer x en écrivant le bilan thermique. Pour 1 kg d'air sec, on obtient [7]:

$$L \frac{dt}{dm} (x' - x) + C_{pa}(T - T_h) = C_{pv}(T - T_h) \quad (\text{I.13})$$

où :

- $m \frac{dt}{dm}$: masse totale d'eau évaporée - L : chaleur latente de vaporisation

Soit [7]:

$$x = \frac{L + C_{pv}(T_h - T)}{L + C_{pv}(T - T_h)} \quad (\text{I.14})$$

C_{pa} et C_{pv} sont les chaleurs spécifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau [7]:

$$C_{pa} = 0,24 \text{ Kcal Kg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{I.15})$$

$$C_{pv} = 0,46 \text{ Kcal Kg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{I.16})$$

I.6.2.2 Masse volumique de l'air humide

Si m_a et m_v sont les masses d'air sec et de vapeur d'eau contenues dans 1 m^3 d'air humide à la température T , la masse volumique vaut [7]:

$$\rho = m_a + m_v = \frac{p_a}{rT} + \frac{p_v}{rT} = \frac{p_a - 0.378p_v}{rT} \quad (\text{I.17})$$

I.6.2.3 Enthalpie de l'air humide

Considérons une masse m d'air humide contenant 1kg d'air sec ($m_a = 1$). Si H_a et H_v sont les enthalpies massiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, l'enthalpie de l'unité d'air humide s'écrit [7]:

$$H = h_a + xH_v \quad (\text{I.18})$$

Soit [7]:

$$H = H_{a0} + C_{pa}dT + H_v + C_{pv}dT \quad (\text{I.19})$$

À 0°C ; $H_{a0} = 0$; $H_{v0} = L$ et donc [7]:

$$H = C_{pa}T + L + C_{pv}T \quad (\text{I.20})$$

$$H = 0,24T + (597 + 0,46T)x \quad (\text{I.21})$$

I.6.2.4 Conductivité thermique

On l'exprime sous la forme [7]:

$$\lambda = \lambda_0 + 0,00476 \frac{1}{1-x} \quad (\text{I.22})$$

où λ_0 est la conductibilité thermique de l'air sec, approchée numériquement par un polynôme de degré 3 en T , d'après les valeurs fournies par DASCALESCU.

I.6.2.5 Viscosité dynamique

[7]

$$\mu = \frac{\mu_a p_a + \mu_v p_v}{p} \quad (\text{I.23})$$

avec [7]:

$$\mu_a = k_a(1 + 122(T - 273)) \quad (\text{I.24})$$

$$\mu_v = k_v(1 + 673(T - 273)) \quad (\text{I.25})$$

où :

$$k_a = 25,393 \times 10^{-7}, \quad k_v = 30,147 \times 10^{-7} \quad (\text{I.26})$$

g : accélération de la pesanteur.

I.6.2.6 Pression de vapeur saturante

Nous avons utilisé la formule de J.BERTRAND, valable entre 0 et 200°C :[7]

$$\log p_s = 3,868 - \frac{2795}{T} - 7,443 \log T \quad (\text{I.27})$$

T étant exprimée en K et p_s en atmosphère.

I.6.2.7 Chaleur spécifique

[7]

$$C_p = C_{pa}(1 - C_v) + C_{pv}C_v \quad (\text{I.28})$$

avec [7]:

$$C_{pa} = 1004,4 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{I.29})$$

$$C_{pv} = 1862,3 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{I.30})$$

I.7 La cinétique de séchage

La mesure de la variation de la masse des échantillons est un paramètre crucial pour comprendre le processus de séchage (la cinétique de séchage).[8]

La teneur en eau des produits (M_t) à l'instant t est donnée par :[9]

$$M_t = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (\text{I.31})$$

Le taux d'humidité des produits (MR) à l'instant t se calcule comme suit :[8]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (\text{I.32})$$

où :

- m_t : la masse des produit au temps t ,
- m_s : la masse sèche des produit,
- M_0 : la teneur en eau initiale des produit.

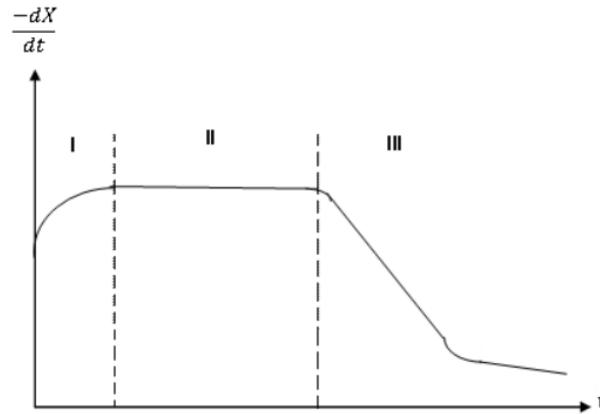


Figure I.2: Vitesse de séchage en fonction du temps [10]

I.7.1 Période (1) : période de transition

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide.[3]

I.7.2 Période (2) : période à vitesse de séchage constante

Durant cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet des forces capillaires. L'équilibre entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air-matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité interne au sein du produit vers la surface est établi. La température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface. Cette période s'achève lorsque les forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation de surface et couvre généralement une grande partie du temps de séchage.[3]

I.7.3 Période (3) : période à vitesse de séchage décroissante

La quantité d'eau amenée à la surface par les forces capillaires est insuffisante pour maintenir une vaporisation constante.[3]

Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- **Disparition de l'eau libre en surface du produit** : Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme

liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.[3]

- **L'épaisseur du produit** : Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.[3]
- **La diffusivité de l'eau dans le produit** : Elle varie avec la teneur en eau du produit. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.[3]
- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.[3]
- **Le croutage** : Certains composés solubles, notamment les sucres et les sels, accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.[3]

I.8 Les paramètres influents sur la cinétique de séchage

- Température de l'air de séchage (T_a)
- Humidité relative de l'air de séchage (H_r)
- La vitesse de l'air de séchage (V_a)
- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- Le calibre du produit à sécher
- L'épaisseur du produit à sécher (E_p)

I.8.1 Influence de la température de l'air de séchage (T_a)

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température

de l'air est élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit deviennent importantes.[3]

I.8.2 Influence de l'humidité de l'air de séchage (Hr)

La teneur en eau de l'air joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. Il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.[3]

I.8.3 Influence de la vitesse de l'air de séchage (Va)

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.[3]

I.8.4 Influence du taux de recyclage de l'air de séchage

Le recyclage est d'une grande importance dans les opérations de séchage car quoique l'air sortant du séchoir soit plus humide, sa température est élevée.[3]

I.8.5 Le calibre du produit à sécher

La vitesse de déshydratation dépend en outre de la vitesse de diffusion intracellulaire de l'eau de dilution du suc cellulaire, fonction elle-même de l'épaisseur du fruit. Le comportement de la datte au séchage dépend de ses caractéristiques morphologiques. De ce fait, la datte est utilisée entièrement pour se rapprocher des conditions réelles des dattes dans l'industrie.[3]

I.8.6 Influence de l'épaisseur du produit à sécher (Ep)

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.[3]

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de mettre en évidence les différents aspects de ce processus complexe, qui repose sur des principes thermodynamiques et énergétiques précis.

Le séchage, bien que pratiqué depuis des millénaires, demeure un procédé fondamental pour prolonger la durée de vie des fruits, réduire les pertes post-récolte et limiter les altérations biochimiques. Il s'agit d'un transfert simultané de chaleur et de masse, influencé par plusieurs paramètres tels que la température, l'humidité de l'air, la circulation de l'air et les propriétés physiques du produit.

L'air joue un rôle primordial dans la cinétique du séchage en facilitant le transport de l'humidité hors du produit et en influençant les mécanismes de convection, de conduction et de rayonnement thermique. La gestion adéquate de la température et de l'humidité de l'air permet d'optimiser le séchage et d'assurer la préservation des qualités organoleptiques et nutritionnelles des fruits. Des méthodes de séchage variées existent, allant du séchage mécanique et chimique au séchage thermique, chacune ayant ses avantages et contraintes selon le type de fruit et les conditions de séchage.

Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de transfert d'énergie appliqués au séchage est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés et minimiser les pertes. La convection permet d'éliminer efficacement l'humidité à la surface du produit, tandis que la conduction et la radiation influencent directement la diffusion de la chaleur à l'intérieur du fruit. Ces phénomènes doivent être contrôlés pour éviter les dégradations structurelles et assurer une déshydratation homogène.

Chapter II

Materiels et méthodes

Introduction

Dans le cadre de notre étude portant sur l'analyse de la cinétique de séchage à l'aide de l'énergie solaire artificielle, il a été impératif de suivre une démarche expérimentale rigoureuse, garantissant la fiabilité des données obtenues ainsi que la reproductibilité des résultats.

Dans ce chapitre on présente le matériels utilisé durant notre étude a savoir les produits à séchés(fraises, poivron rouge et le potiron), le dispositif de séchage, la balance utilisée pour mesurer la variation de la masse des produits à séchés au cours du temps. De meme la procédure experimntale utilisé durant l'opération de séchage.

II.1 Description des appareils utilisés

II.1.1 Système de démonstration d'énergie solaire – ET 200

Le système **ET 200** constitue une plateforme pédagogique et expérimentale avancée, spécifiquement développée pour l'étude de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique dans un cadre de laboratoire. Grâce à sa conception modulaire et sa flexibilité d'utilisation, il est largement employé dans diverses applications telles que le chauffage de l'eau, l'analyse des transferts thermiques ainsi que le séchage de matériaux par énergie solaire.

Dans le cadre de notre étude expérimentale, une lampe halogène a été utilisée afin de simuler le rayonnement solaire. Ce dispositif permet de reproduire, dans des conditions contrôlées en laboratoire, l'effet de l'ensoleillement sur les échantillons étudiés, tout en assurant une uniformité d'exposition et une stabilité des conditions de séchage.



Figure II.1: Système de démonstration d'énergie solaire – ET 200

II.1.2 Balance électronique – JOANLAB

La balance électronique de type **JOANLAB** est un instrument de laboratoire de haute précision utilisé pour mesurer la masse avec une grande exactitude. C'est un outil essentiel dans les expériences nécessitant un suivi des variations de masse lors des processus de séchage . Il s'agit d'une balance électronique de fabrication chinoise, capable de mesurer des masses avec une précision de $\pm 0,001$ g, dans une plage allant de 0 à 600 g. Son rôle ne se limite pas à la mesure de la masse finale ; elle est également utilisée pour enregistrer la masse à des intervalles réguliers, ce qui permet d'analyser l'évolution de la masse au cours du temps.

Dans le cadre de notre travail expérimental sur le séchage des produits alimentaires (fruits et légumes) à l'aide d'une source de chaleur solaire artificielle (via une lampe halogène), cette balance a été utilisée pour déterminer la masse des échantillons à des intervalles bien déterminés. En calculant la différence entre la masse instantanée mesurée et la masse du support à chaque étape, il a été possible d'estimer directement la quantité d'humidité perdue.



Figure II.2: Balance électronique – JOANLAB

II.1.3 Support de séchage

Dans le cadre de cette étude, un support de séchage a été conçu. Il a été utilisé pour le séchage d'échantillons de fruits tranchés, tels que le poivron rouge, à l'aide d'une source de chaleur artificielle. Ce dispositif permet de simuler l'effet du rayonnement solaire dans un environnement de laboratoire, et d'observer le comportement des matériaux soumis à différentes intensités solaires.

L'appareil est illustré sur la figure II.3. Il est constitué d'une structure en bois robuste, composée d'une base carrée qui soutient une colonne verticale. Sur cette colonne, trois plateformes horizontales sont disposées à des hauteurs différentes et successives. La hauteur entre la plateforme 1 et la plateforme 2 est d'environ 14 cm, celle entre la plateforme 2 et la plateforme 3 est d'environ 13,8 cm, et celle entre la plateforme 3 et la base est d'environ 14,5 cm.

Durant les expériences, les supports en verre contenant les produits à sécher sont placés sur les quatre niveaux, chacun exposé à une intensité lumineuse différente. Ce support de séchage doit être positionné directement sous la lampe halogène afin d'assurer une variation des intensités du rayonnement sur les quatre niveaux.



Figure II.3: Support de séchage

II.2 Préparation des échantillons

II.2.1 Fraises

Des fraises fraîches ont été achetées du marché local de la ville de M'Sila (Algérie).elles ont été transportées au laboratoire du département de génie mécanique . Une sélection de ces fraises a été soigneusement lavée avec de l'eau propre, sans ajout de produits chimiques ni de désinfectants.

Ensuite, elles ont été essuyées avec du papier absorbant. À l'aide d'un coupe-tomates, les fraises ont été découpées en morceaux homogènes d'une épaisseur de 5 cm, afin d'assurer une uniformité lors du séchage et d'obtenir des résultats expérimentaux fiables.

Des échantillons de fraises ont ensuite été placés dans des supports en verre, comme illustré sur la figure II.4, afin d'être déposés sur les quatre niveaux d'intensité.

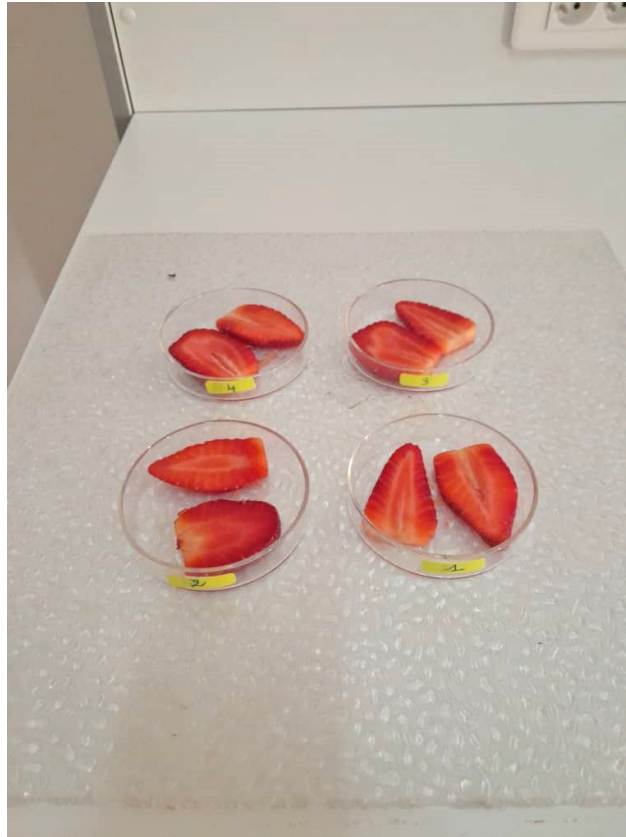


Figure II.4: Échantillons de fraises à sécher

II.2.2 Poivron rouge

Des poivrons rouges ont également été achetés au marché de la ville de M'Sila pour être soumis à une opération de séchage au niveau du laboratoire. Ils ont été lavés à l'eau propre pour éliminer toutes les impuretés, puis essuyés à l'aide de papier absorbant. Ensuite, les poivrons rouges ont été découpés en morceaux réguliers afin de faciliter le processus de séchage.

La Figure II.5 illustre quatre échantillons de poivron rouge destinés à être séchés à l'aide d'une lampe halogène.



Figure II.5: Échantillons de Poivron rouge à sécher

II.2.3 Potiron

Le potiron a également été sélectionné parmi les produits frais du marché de M'Sila pour être séché. Une fois arrivé au laboratoire du département de génie mécanique, il a été rincé abondamment à l'eau, puis essuyé à l'aide de papier absorbant. La peau externe a été retirée, et la chair a été râpée manuellement à l'aide d'une rape afin d'obtenir des filaments fins.

Cette méthode permet d'augmenter la surface de contact durant le séchage, ce qui accélère la procédure de séchage. Quatre échantillons de potiron ont été placés dans des supports en verre, comme illustré sur la figure II.6, afin d'être déposés sur les quatre niveaux d'intensité pour être séchés.



Figure II.6: Échantillons de Potiron à sécher

II.3 Procédures expérimentales

Avant de commencer le processus de séchage, la masse initiale des produits (fraise, poivron rouge, potiron) a été mesurée avec précision, en plus de l'intensité du rayonnement pour chaque niveau et pour chaque produit. Un appareil de mesure du rayonnement a été utilisé pour déterminer la valeur exacte du rayonnement auquel chaque niveau de la structure expérimentale est exposé, garantissant ainsi que chaque échantillon reçoive la quantité d'énergie adéquate dans l'environnement expérimental.

Le processus de séchage a ensuite été réalisé à l'aide d'une lampe halogène intégrée dans le capteur solaire plan ET200, disponible dans les laboratoires du département de génie mécanique de l'Université de M'sila. Cette lampe simule le rayonnement solaire de manière contrôlée et reproductible, ce qui en fait un outil adapté pour réaliser des expériences de séchage en environnement de laboratoire.

Pour réaliser l'expérience, le support de séchage avec les échantillons (support + la matière à sécher) est placé en dessous de la lampe halogène, comme illustré sur les figures II.7 et II.8.

Chaque niveau est placé à une distance différente de la source de chaleur, ce qui entraîne une diminution de l'intensité du rayonnement du haut vers le bas.

Des échantillons des produits (fraise, poivron rouge, potiron) ont été placés simultanément sur les quatre niveaux, et le processus de séchage a été suivi par des mesures périodiques de leur masse afin de déterminer la quantité d'eau évaporée au fil du temps.

Les mesures de masse ont été effectuées à l'aide d'une balance numérique électrique de marque **JOANLAB**, ayant une précision allant jusqu'à $\pm 0,001$ gramme, ce qui permet un suivi précis de la perte de masse due à l'évaporation (figures II.10 et II.11).

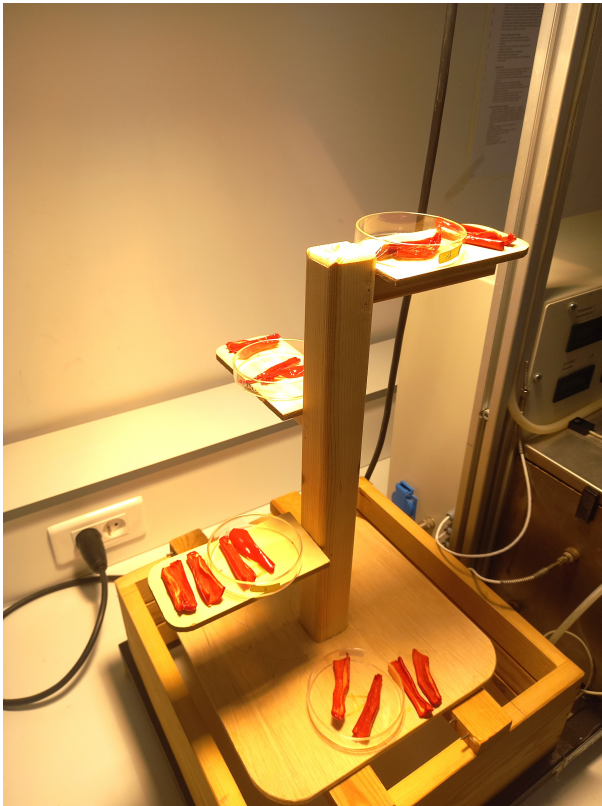


Figure II.7: Échantillons de poivron rouge sous le séchoir

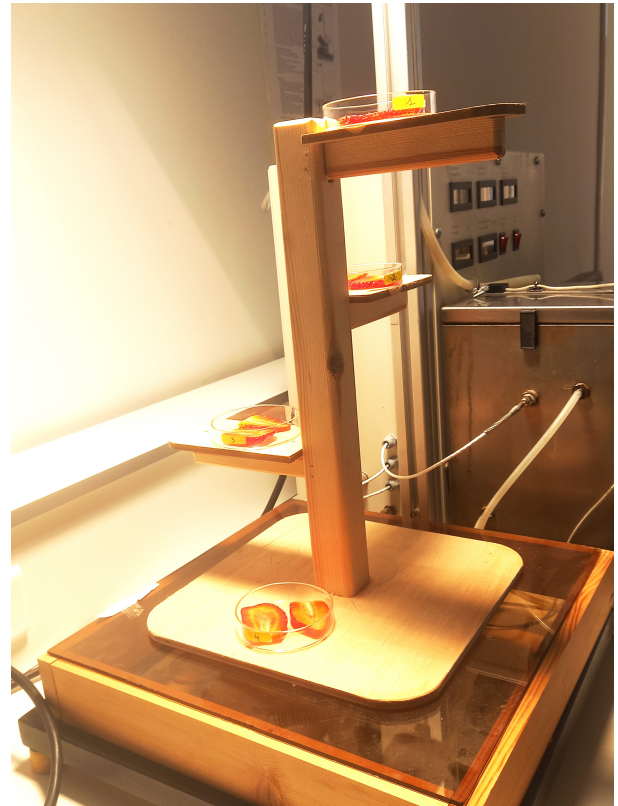


Figure II.8: Échantillons de fraises sous le séchoir

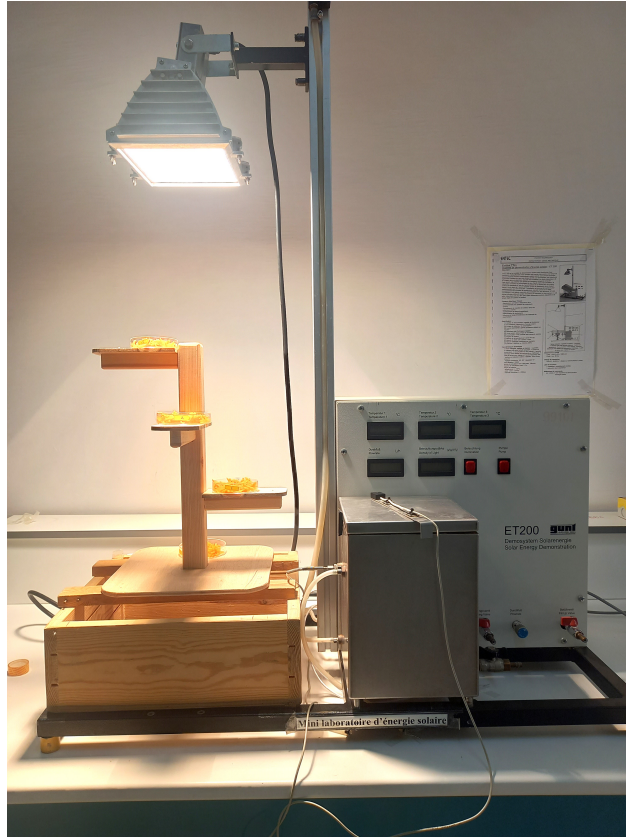


Figure II.9: Échantillons de Potiron sous le séchoir

La fréquence des mesures a été ajustée en fonction de la distance des échantillons par rapport à la source de chaleur :

- Pour le niveau (1), étant le plus proche de la lampe halogène et le plus exposé au rayonnement, des mesures ont été prises toutes les 30 minutes.
- Pour les niveaux (2), (3) et (4), les mesures ont été prises toutes les heures, ce qui correspond à une plus faible intensité de rayonnement à ces emplacements. Afin de tracer l'évolution du taux d'humidité MR en fonction du temps, la masse sèche de chaque produit à sécher doit être déterminée comme illustré dans les équations. Pour cet effet, une masse bien déterminée doit être placée dans une étuve avec une température de 105°C et durant 24 heures pour calculer sa masse sèche.



Figure II.10: Le potiron sur la balance électronique – JOANLAB



Figure II.11: Les fraises sur la balance électronique – JOANLAB

Conclusion

Après avoir présenté les équipements utilisés, les matériaux soumis aux expériences, ainsi que les procédures méthodologiques suivies dans cette étude, l'importance d'une préparation soignée de la phase expérimentale apparaît clairement pour garantir la précision et la fiabilité des données. L'utilisation d'équipements de haute précision, tels que la balance électronique et la lampe halogène, a permis de créer un environnement expérimental contrôlé qui a facilité le suivi de l'évolution de la masse à intervalles de temps précis. De plus, la conception du support en bois à plusieurs niveaux a permis d'étudier de manière pratique et organisée l'impact de la variation de l'intensité du rayonnement sur le comportement de séchage. En unifiant la méthode de préparation des échantillons et en les répartissant de manière étudiée sur différents niveaux, des données comparables entre les différents produits et conditions de séchage ont été obtenues. Les résultats obtenus grâce à cette approche expérimentale constitueront la base de l'analyse quantitative et qualitative qui sera abordée dans le chapitre suivant, dédié à la discussion des résultats et à l'interprétation des phénomènes enregistrés au cours de l'expérience.

Chapter III

Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus lors du processus de séchage de trois types de produits agricoles : les fraises, le poivron rouge et le potiron avec quatre intensités différentes. Ces produits ont été soumis à un séchage sous source de chaleur artificielle simulant le rayonnement solaire dans le but d'étudier leur comportement thermique et d'évaluer la cinétique de perte d'humidité en fonction du temps.

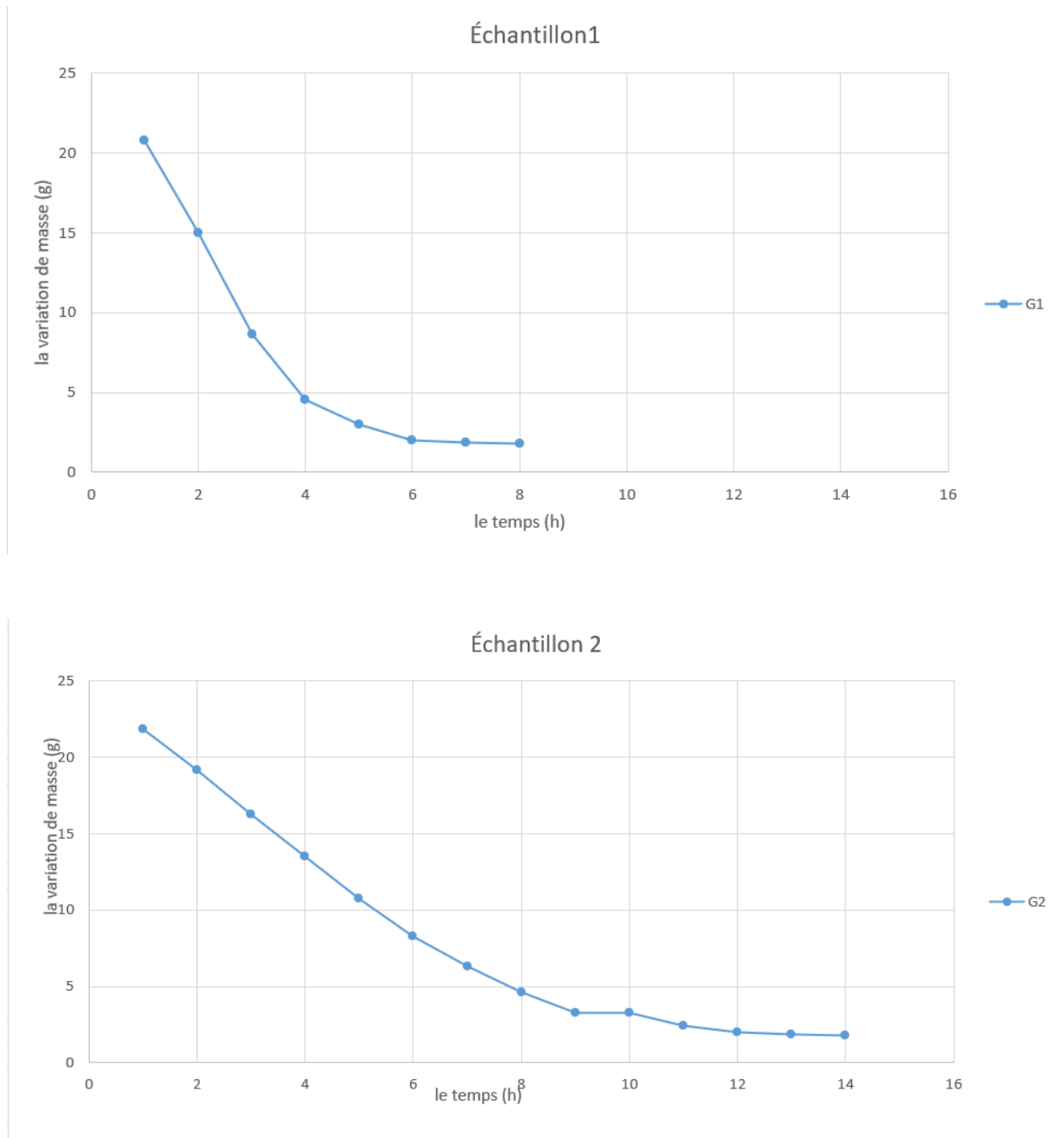
III.1 Étude de la cinétique de séchage

III.1.1 la variation des les masses en fonction de temps

III.1.1.1 Évolution de la masse du la fraise au cours du séchage

Les courbes de variation de la masse pendant le séchage montrent que les quatre échantillons de fraises suivent le même schéma général : une perte de masse rapide au cours des premières heures en raison de l'évaporation de l'humidité superficielle, suivie d'une diminution progressive jusqu'à atteindre un état quasi stable. Les valeurs initiales de la masse au début du séchage étaient respectivement de 20,759 g pour l'échantillon 1, 21,837 g pour l'échantillon 2, 21,123 g pour l'échantillon 3, et 26,222 g pour l'échantillon 4, tandis que les masses finales enregistrées après séchage étaient de 1,780 g pour l'échantillon 1, 1,792 g pour l'échantillon 2, 1,798 g pour l'échantillon 3, et 3,389 g pour l'échantillon 4. Ces différences peuvent s'expliquer par la variation des masses initiales et par l'intensité du rayonnement reçue par chaque échantillon. Bien que les courbes aient une forme similaire, la durée et la vitesse de séchage diffèrent d'un échantillon à l'autre, ce qui met en évidence l'influence de l'intensité du rayonnement sur la cinétique et l'efficacité du séchage.

Ces différences s'expliquent par la variation de la masse initiale, de l'épaisseur et de la teneur en eau de chaque échantillon. Bien que les courbes aient une forme similaire, la durée et la vitesse de séchage diffèrent d'un échantillon à l'autre, soulignant l'effet de l'intensité du rayonnement sur la cinétique et l'efficacité du séchage à titre d'exemple, durant la première heure de séchage le premier échantillon ayant une intensité de rayonnement de 1769 W/m² a perdu une masse de 5.762 g, l'échantillon 2 ayant une intensité de rayonnement de 783 W/m² a perdu une masse de 2.808g, l'échantillon 3 ayant une intensité de rayonnement de 725 W/m² a perdu une masse de 2.681g et l'échantillon 4 ayant une intensité de rayonnement de 522 W/m² a perdu une masse de 2.063g. Donc la variation de masse durant la première heure suit une tendance proportionnelle à l'intensité du rayonnement reçue. Cela confirme que plus l'intensité du rayonnement est élevée, plus le processus de séchage est rapide et efficace, traduisant une cinétique de séchage plus dynamique sous des conditions thermiques plus intenses..



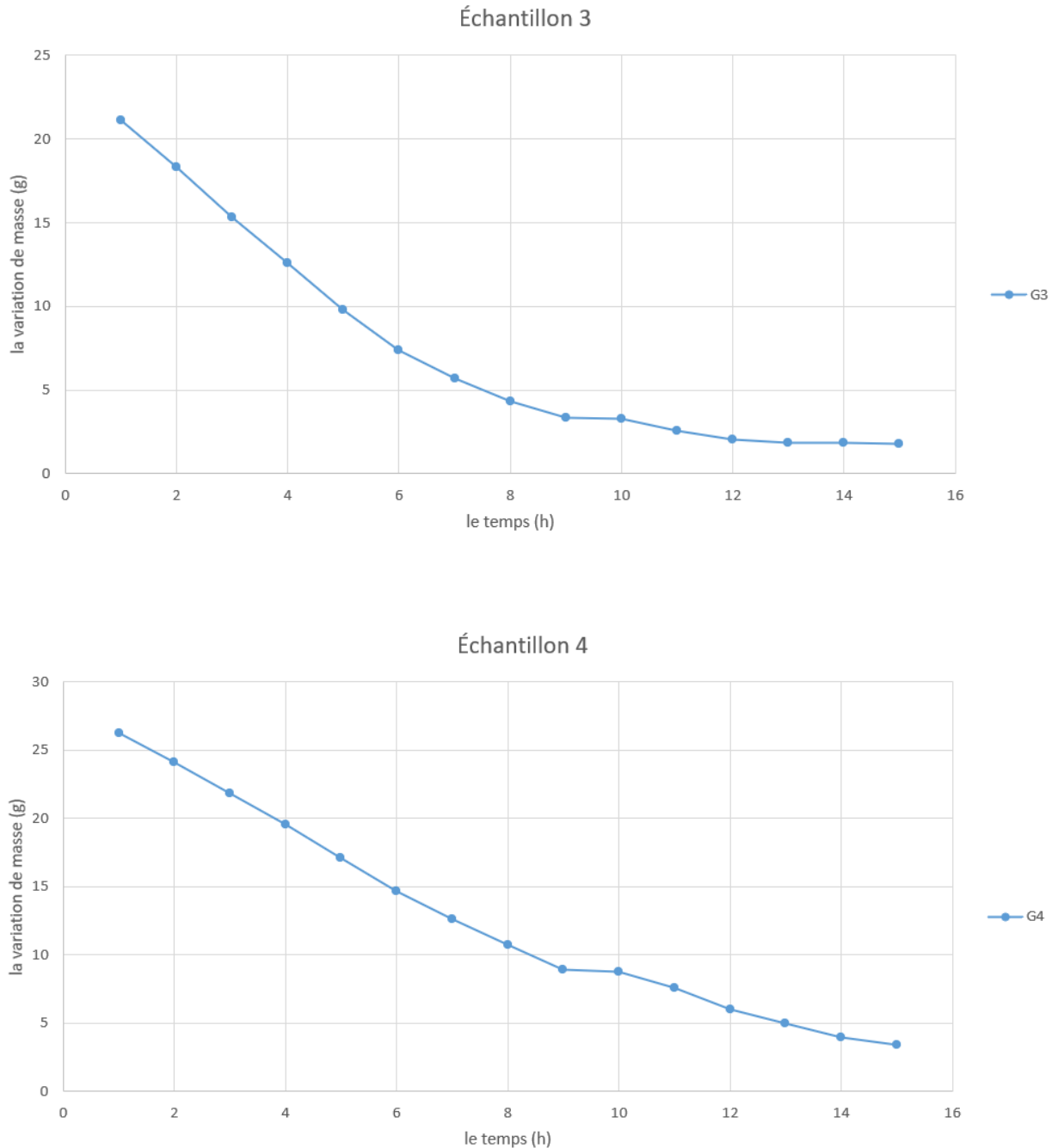


Figure III.1: La variation de la masse des échantillons de fraises pour chaque intensité (1) 1769 W/m², (2) 783W/m², (3) 725 W/m² et (4) 522 W/m²

Globalement, ces résultats mettent en évidence l'impact important sur la dynamique de perte d'humidité, soulignant ainsi la nécessité de bien les contrôler pour assurer un séchage rapide et efficace, Comme illustré dans la Figure III.2 .

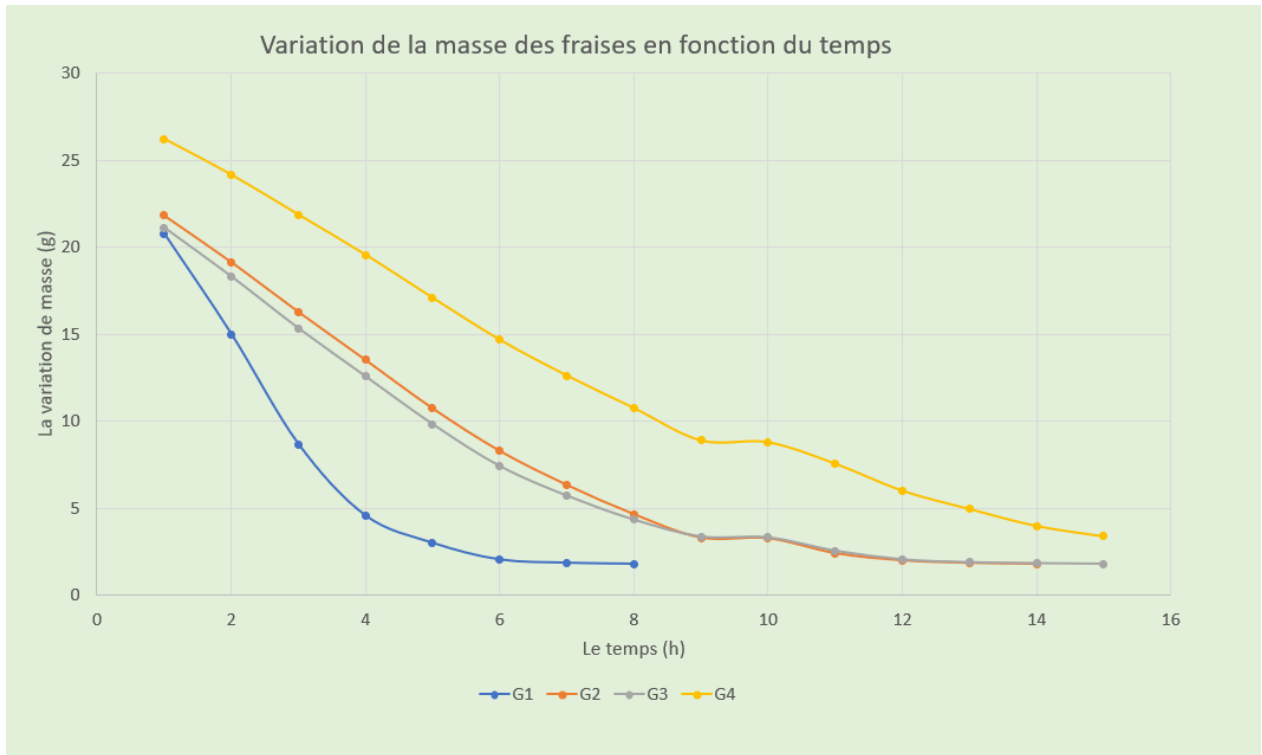


Figure III.2: Evolution de la variation de la masse des échantillons de fraises en fonction du nombre d'heures.

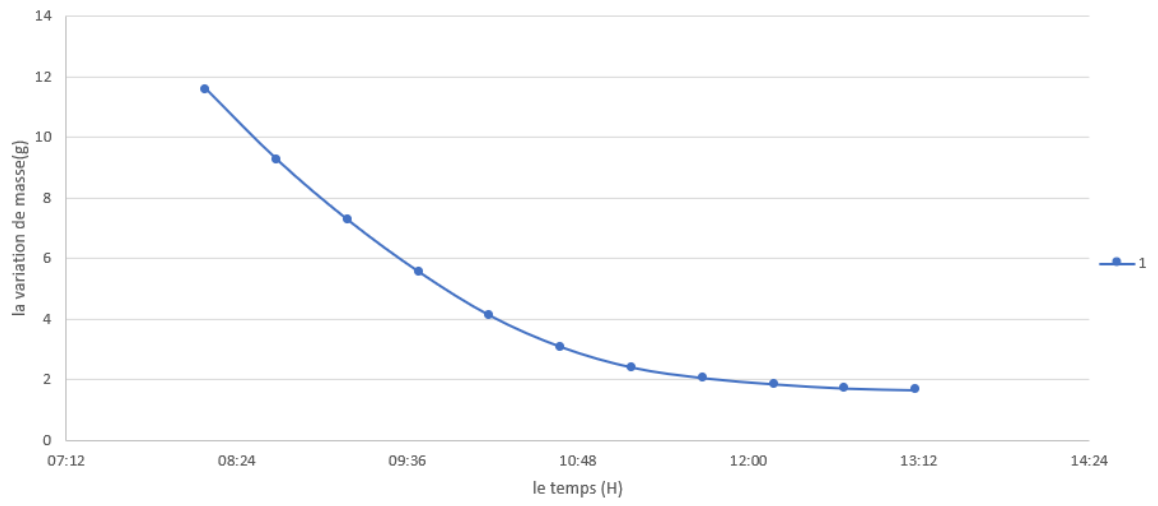
III.1.1.2 Évolution de la masse du poivron rouge au cours du séchage

Les courbes de variation de la masse durant le processus de séchage montrent que les quatre échantillons de poivron rouge suivent un même schéma général : une diminution rapide de la masse pendant les premières heures, due à l'évaporation de l'humidité superficielle, suivie d'une décroissance progressive jusqu'à atteindre un état quasi-stable.

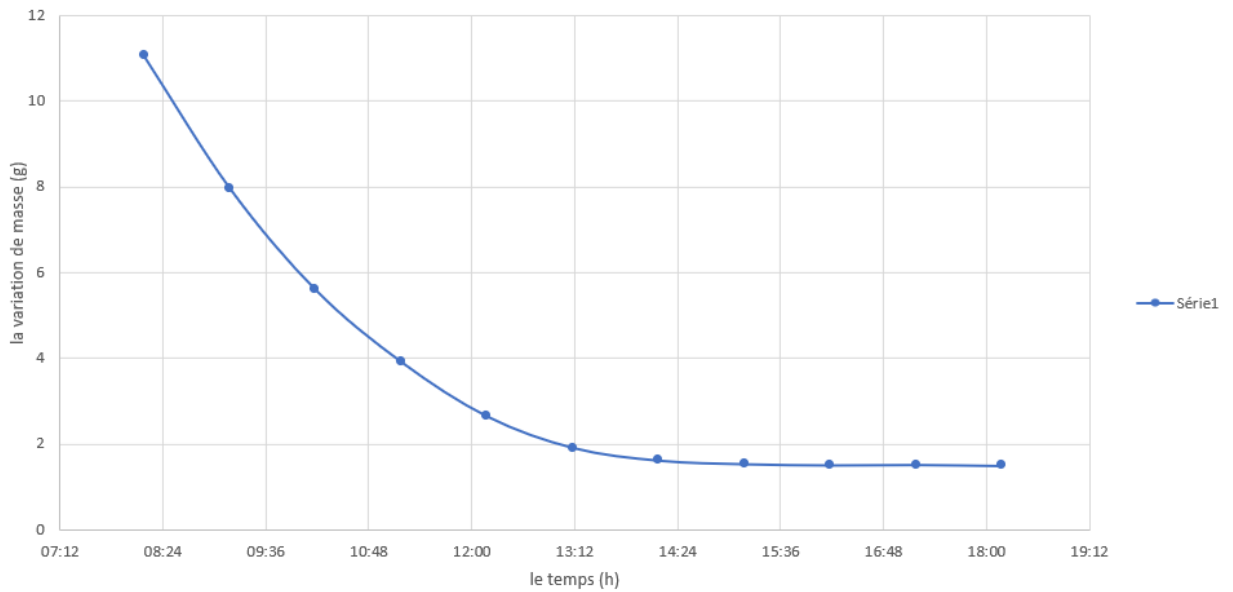
À la fin du séchage, les masses finales étaient les suivantes : échantillon 1 : 1,652 g, échantillon 2 : 1,488 g, échantillon 3 : 1,294 g et échantillon 4 : 2,471 g.

Ces différences sont attribuées à la variation de la masse initiale, et de l'intensité des radiations. Bien que la forme générale des courbes soit similaire, la durée et la vitesse de séchage diffèrent entre les échantillons.

Échantillon 1



Échantillon 2



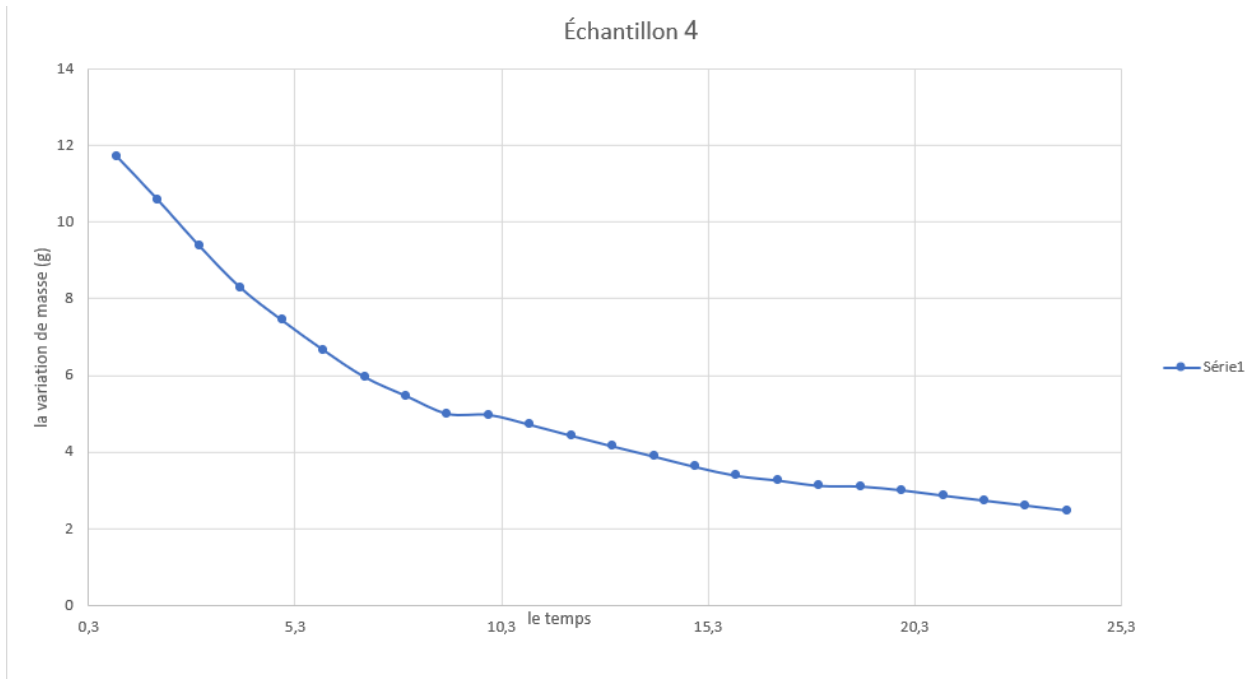
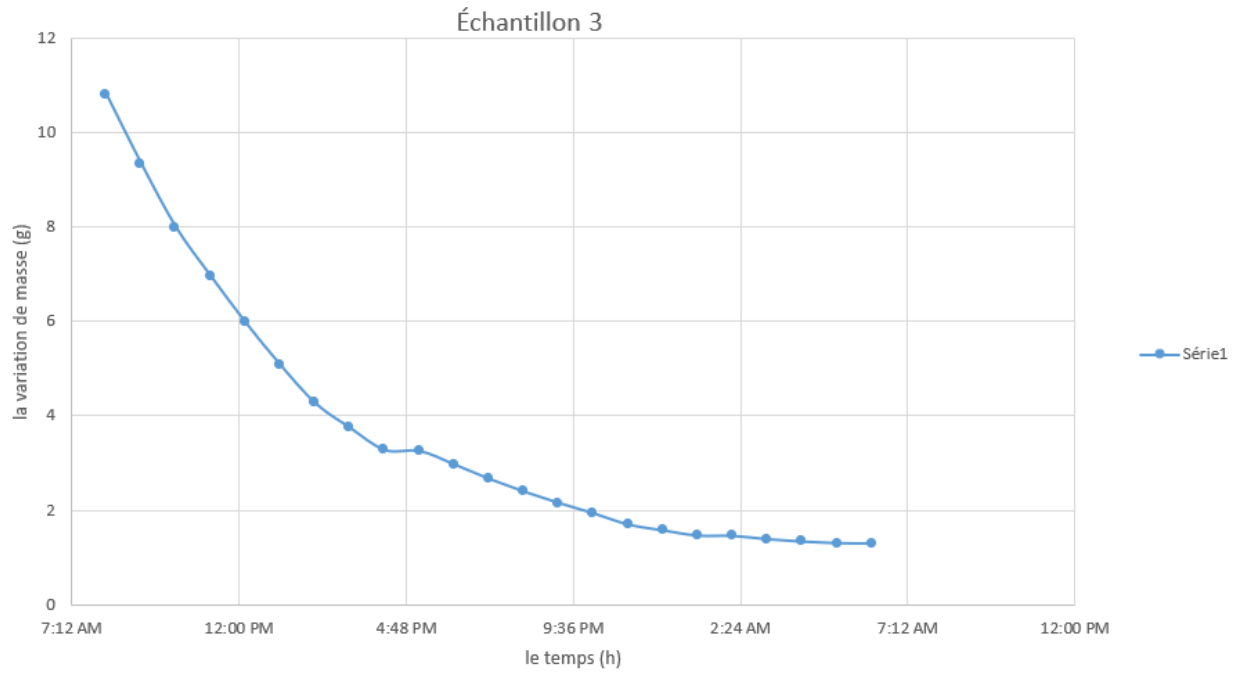


Figure III.3: variation de la masse des échantillons de poivron rouges pour chaque intensité (1) 1652 W/m², (2) 1327,5W/m², (3) 796,5 W/m² et (4) 354 W/m²

La Figure III.4 illustrent le comportement de séchage de quatre échantillons soumis à différentes conditions opératoires (G1, G2, G3, G4). On observe que l'échantillon G1 présente

une diminution rapide de la masse, atteignant des niveaux faibles en un temps relativement court, ce qui traduit des conditions de séchage très efficaces . L'échantillon G2 suit avec une perte de masse rapide au début, puis une stabilisation à un certain niveau, suggérant un arrêt partiel du séchage dû à un équilibre hygroscopique ou à une efficacité réduite. En revanche, l'échantillon G3 montre une baisse progressive et modérée de la masse, indiquant une efficacité de séchage intermédiaire. L'échantillon G4 enregistre le taux de séchage le plus lent, conservant une masse plus importante sur toute la durée, ce qui reflète une faible efficacité des conditions appliquées, possiblement à cause d'un éloignement de la source de chaleur ou d'une mauvaise circulation d'air. Comme illustré dans les courbes, toutes les courbes présentent deux phases distinctes : une première phase rapide correspondant à l'évaporation de l'eau libre en surface, suivie d'une phase plus lente liée à la migration de l'humidité interne vers la surface. Ces résultats soulignent l'importance cruciale des conditions de séchage dans l'optimisation du temps de traitement et la qualité du produit final

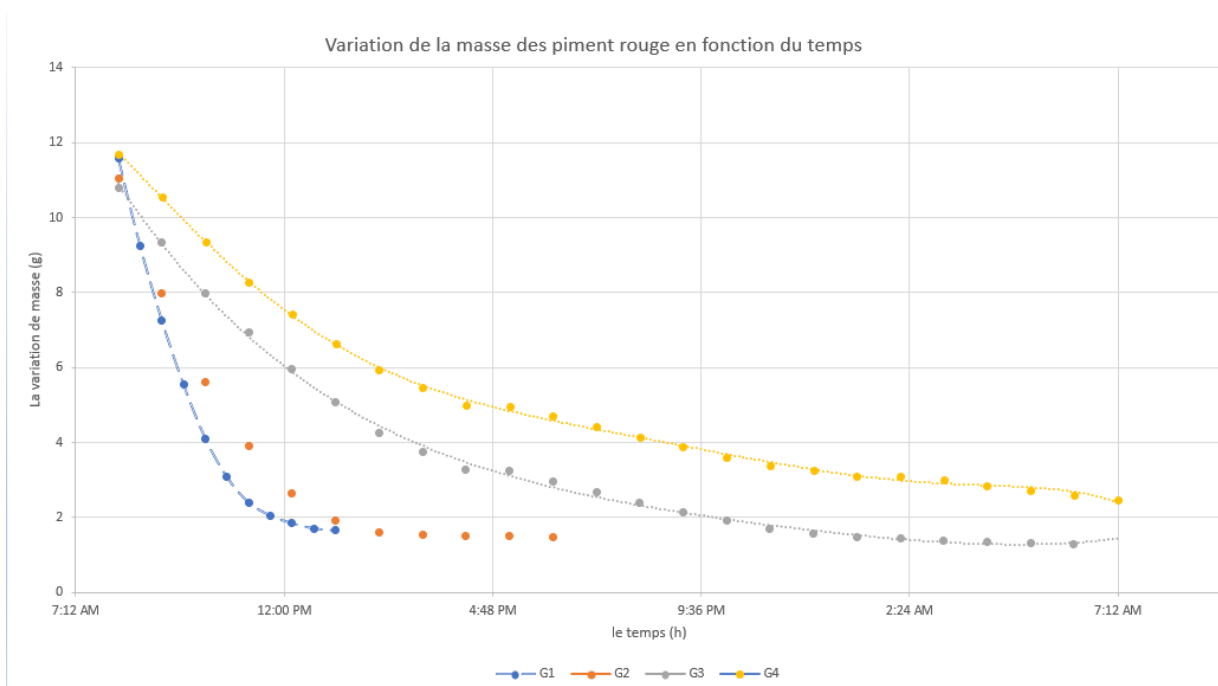


Figure III.4: variation de la masse des échantillons du poivron rouge en fonction du nombre d'heures.

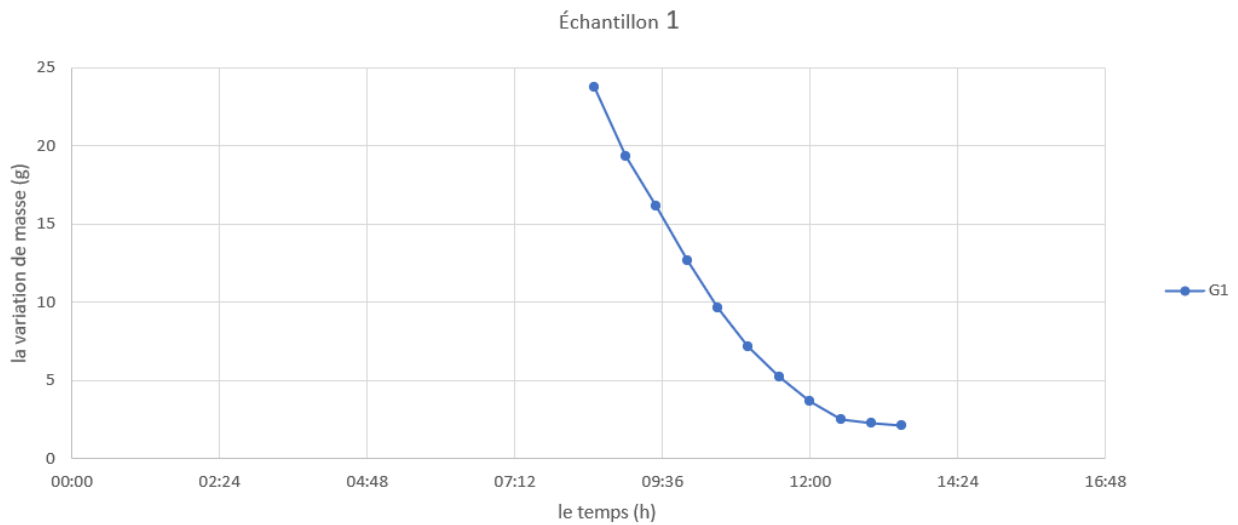
III.1.1.3 Évolution de la masse du potiron au cours du séchage

Dans le cas du potiron, seules deux intensités, G1 et G2, ont été suivies en raison d'une erreur de manipulation commise par l'ingénieur du laboratoire, entraînant la perte partielle

des masses des échantillons 3 et 4, ce qui a rendu la poursuite de l'expérience impossible. Les courbes de variation de la masse durant le processus de séchage montrent que les deux échantillons de potiron suivent un même schéma général : une diminution rapide de la masse pendant les premières heures, due à l'évaporation de l'humidité superficielle, suivie d'une décroissance progressive jusqu'à un état quasi-stable.

À la fin du séchage, les masses finales étaient d'environ 2,11 g pour l'échantillon 1 et 2,501 g pour l'échantillon 2.

Ces différences sont attribuées à la variation de la masse initiale, et l'intensité des rayonnement. Bien que la forme générale des courbes soit similaire, la durée et la vitesse de séchage diffèrent entre les échantillons, ce qui souligne l'importance des conditions citées sur l'efficacité et la cinétique du séchage.



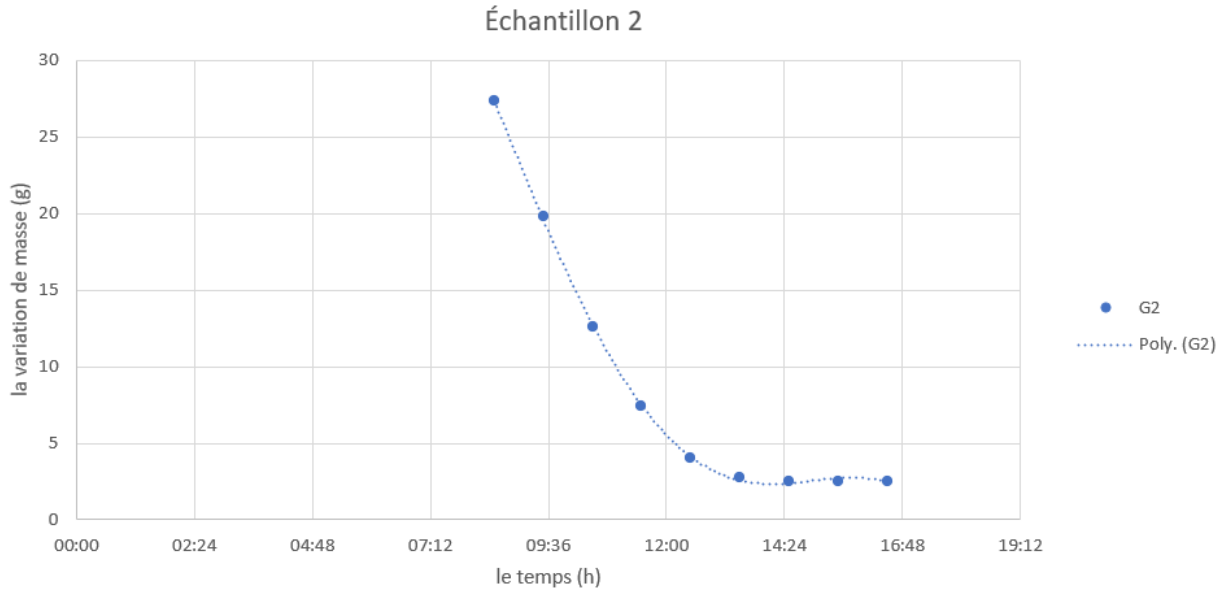


Figure III.5: variation de la masse des échantillons de potiron pour chaque intensité (1) 1769 W/m², (2) 1357W/m²

la Figure III.6 montrent l'évolution de la masse de deux échantillons (G1 et G2) au cours du processus de séchage. On observe une diminution rapide de la masse au début du processus, ce qui correspond à la phase initiale de séchage durant laquelle l'eau libre est éliminée facilement. L'échantillon G1 a montré une perte de masse plus rapide que G2 pendant les premières heures, ce qui indique que les conditions de séchage appliquées à G1 étaient plus favorables, que ce soit en termes d'intensité du rayonnement. Avec l'avancement du temps, la vitesse de séchage a progressivement ralenti, jusqu'à ce que les deux échantillons atteignent des masses résiduelles proches, ce qui traduit un séchage presque complet. Cette évolution reflète la transition entre une phase de séchage rapide et une phase plus lente, liée à la migration de l'humidité interne vers la surface. Bien que G1 ait présenté une efficacité supérieure au début du séchage, la performance globale des deux échantillons reste relativement comparable sur l'ensemble du processus.

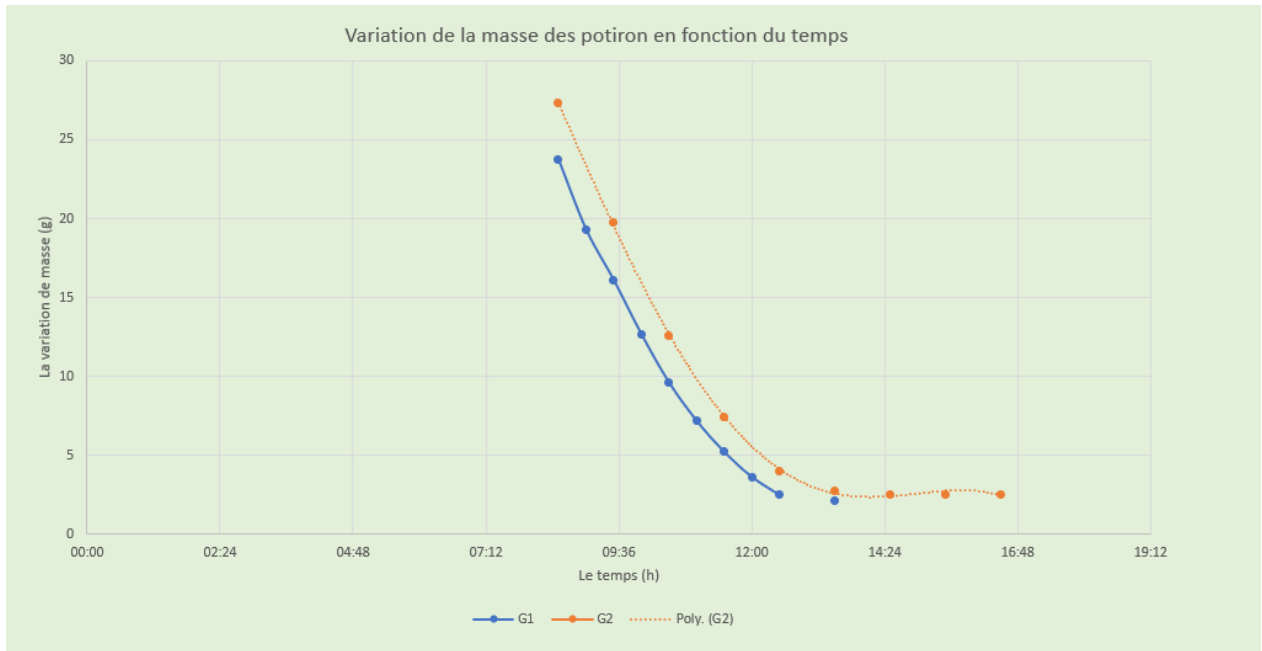


Figure III.6: Evolution de la variation de la masse des échantillons du potiron en fonction du nombre d'heures.

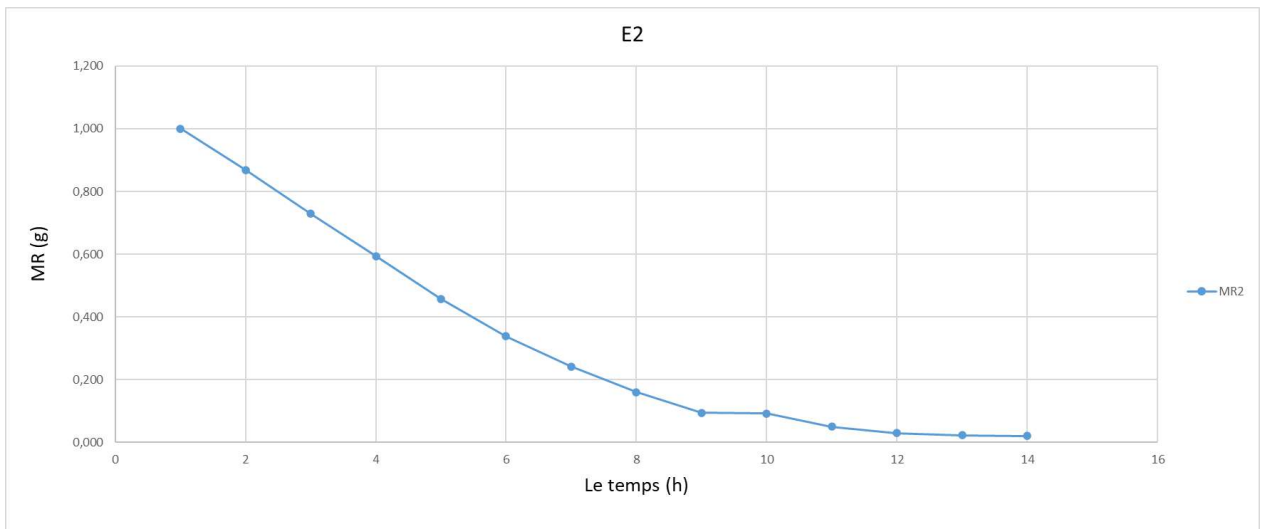
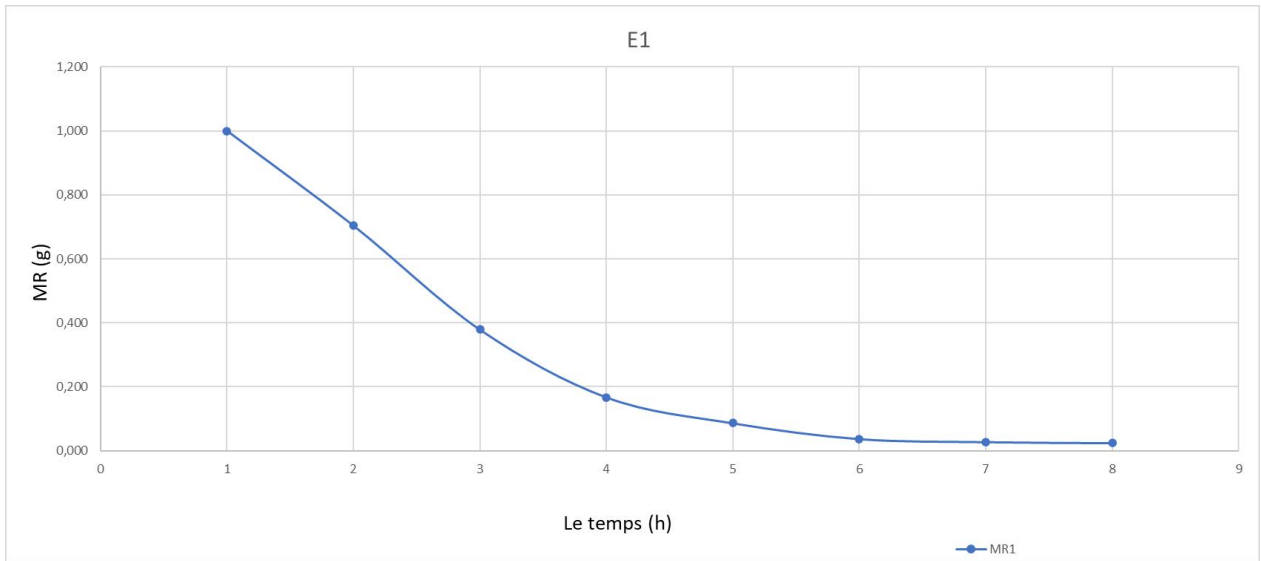
III.1.2 La variation de Taux d'humidité relative (MR) en fonction du temps

III.1.2.1 Évolution de MR du fraise au cours du séchage

Dans le cadre de notre étude expérimentale, l'évolution de Taux d'humidité relative (MR) en fonction du temps pour quatre échantillons de fraises, soumis à un séchage à l'aide d'une lampe halogène, est illustré dans la **Figure III.7**. Au début de l'expérience, la valeur initiale de la masse relative est identique pour tous les échantillons, avec $MR = 1$, indiquant un point de départ commun.

Les courbes présentent un comportement similaire, marqué par une baisse rapide de la MR durant les premières heures, suivie d'une diminution plus lente et progressive jusqu'à atteindre une valeur stable. Ce profil reflète deux phases principales du séchage : l'évaporation de l'humidité superficielle, puis le transfert de l'humidité interne vers la surface.

Malgré cette similarité, les échantillons diffèrent en termes de vitesse et d'efficacité de séchage. À la fin du processus, l'échantillon 1 a atteint une MR de 0,024, l'échantillon 2 une MR de 0,020, l'échantillon 3 une MR de 0,023, tandis que l'échantillon 4, le plus lent, s'est stabilisé à une MR de 0,071.



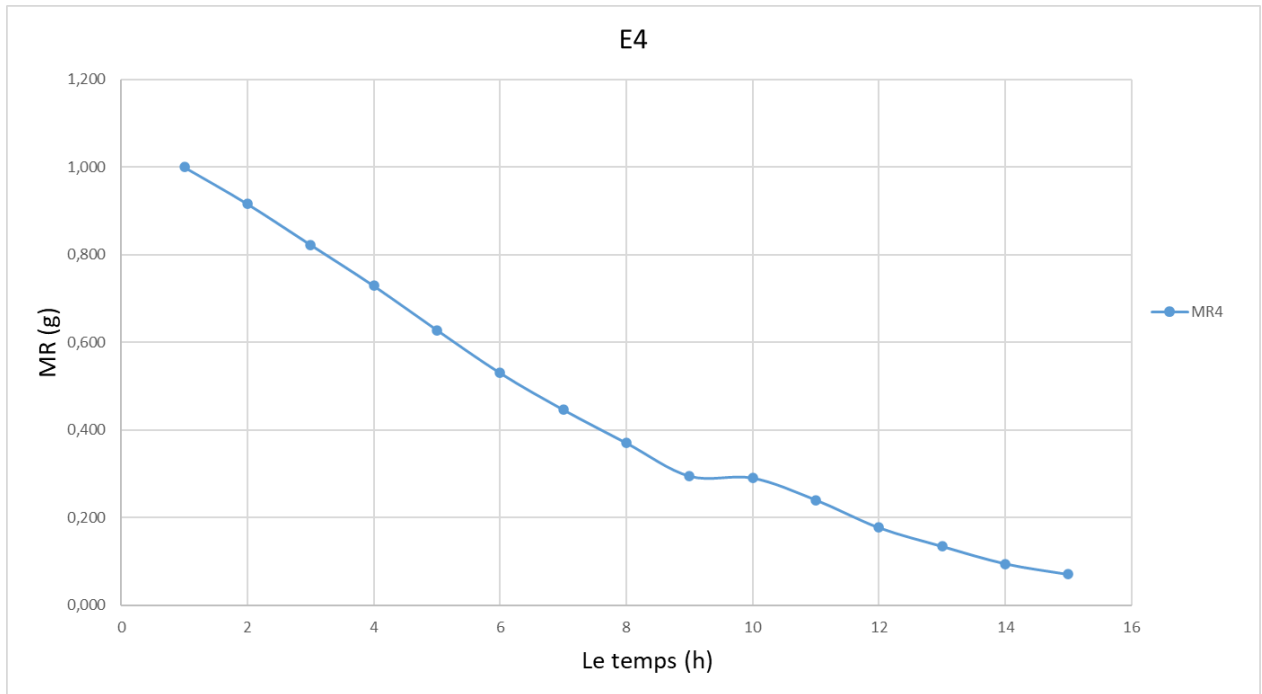
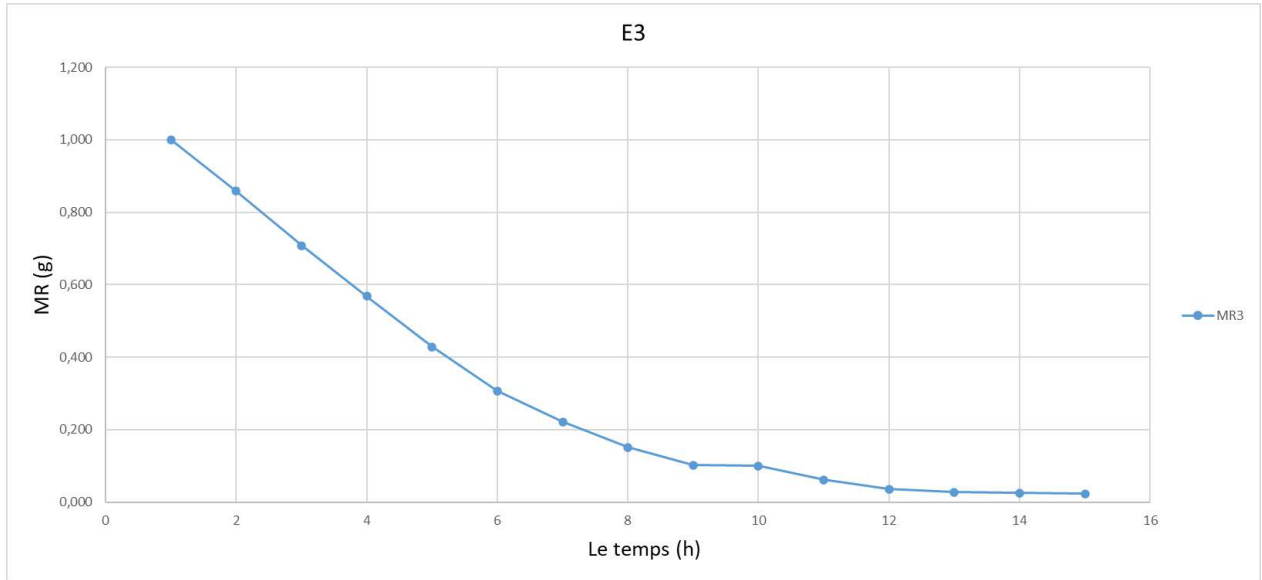


Figure III.7: variation de MR des échantillons de Fraises

La figure ci-jointe illustre l'évolution de la masse relative (MR) de quatre échantillons de fraises, pendant le processus de séchage sous une source de chaleur artificielle simulant le rayonnement solaire. Toutes les courbes démarrent à la valeur initiale commune de $MR = 1$, indiquant un état initial identique en termes d'humidité.

On observe une différence notable dans la vitesse de séchage entre les échantillons, attribuée principalement à l'intensité variable du rayonnement thermique reçu en fonction de

la position de chaque échantillon par rapport à la source. L'échantillon MR1 présente une diminution rapide et marquée de la masse relative, atteignant une valeur quasi nulle après environ 6 heures, ce qui révèle un séchage très rapide en raison de sa proximité avec la source de chaleur.

À l'inverse, l'échantillon MR4 montre une décroissance lente de la MR, maintenant des valeurs relativement élevées jusqu'à la fin du processus de séchage (environ 14 heures), traduisant une exposition moins intense au rayonnement thermique.

Les échantillons MR2 et MR3 affichent un comportement intermédiaire, avec une réduction modérée de la MR, atteignant leurs valeurs minimales entre la dixième et la douzième heure.

Ces observations confirment que l'intensité du rayonnement thermique est un facteur déterminant dans la vitesse et l'efficacité du séchage. Plus l'échantillon est exposé à une intensité élevée, plus le processus d'évaporation est rapide, entraînant une réduction plus rapide de la masse relative. Bien que tous les échantillons suivent une tendance générale similaire (diminution progressive de la MR), la position par rapport à la source thermique engendre des différences significatives dans le temps nécessaire pour atteindre le séchage final.

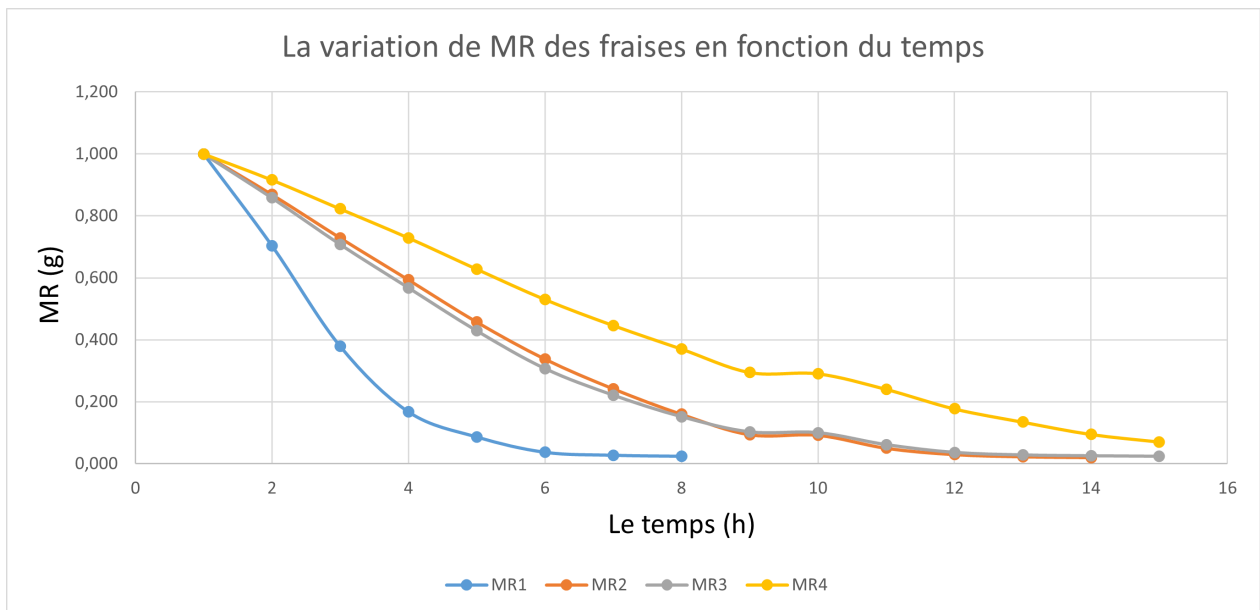
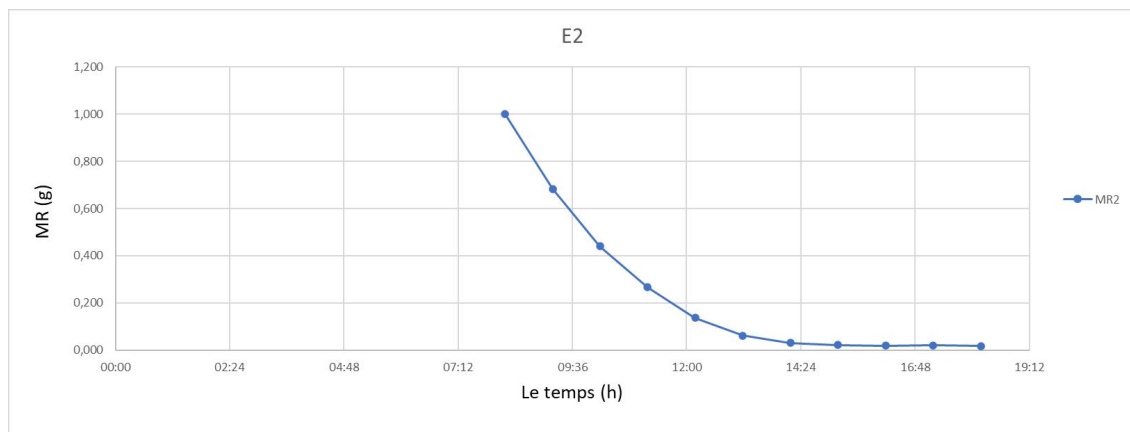
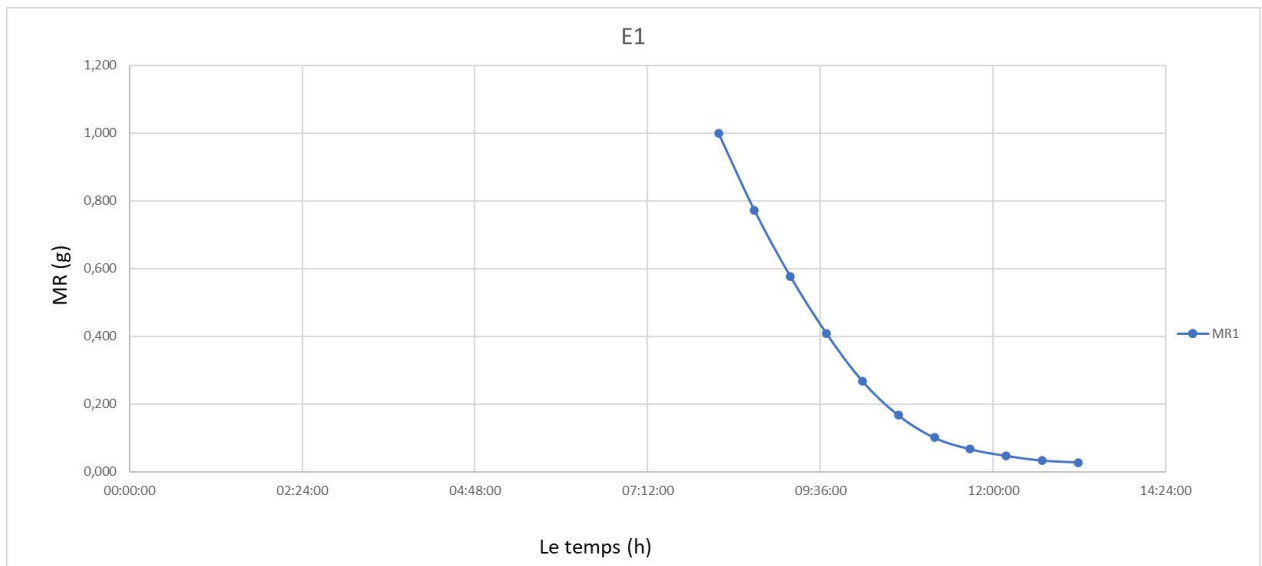


Figure III.8: variation des MR de Fraises en fonction du temps

III.1.2.2 Évolution de MR du poivron rouge au cours du séchage

Les graphiques illustrent la variation de la Taux d'humidité relative (MR) de quatre échantillons de poivron rouge lors du séchage à l'aide d'une source de chaleur artificielle. Au début

de l'expérience, la valeur initiale de la masse relative était uniforme pour tous les échantillons et égale à $MR = 1$, ce qui signifie que tous les échantillons partaient du même point. Les courbes présentent le même comportement général : une diminution rapide de MR durant les premières heures, suivie d'une diminution progressive jusqu'à la stabilisation, reflétant ainsi deux phases essentielles du séchage : la perte d'humidité superficielle puis le transfert de l'humidité interne vers la surface. Malgré la similarité des courbes, les échantillons diffèrent en termes de vitesse et d'efficacité de séchage, comme suit : l'échantillon 3 a complètement séché en environ 11 heures avec une MR de 0.02 g ; l'échantillon 2 s'est stabilisé à $MR = 0.06$ g après environ 13 heures ; l'échantillon 1 a atteint $MR = 0.04$ g vers 14 heures ; enfin, l'échantillon 4 a été le plus lent, s'arrêtant à $MR = 0.15$ g après environ 15 heures, comme illustré dans la Figure III.9.



Les échantillons MR3 et MR4 enregistrent les vitesses de séchage les plus faibles, conservant un taux d'humidité plus élevé pendant une période prolongée, en particulier pour MR4. Cela traduit une efficacité relativement moindre des conditions expérimentales adoptées dans ces deux cas.

Du point de vue du comportement de séchage, tous les profils présentent un schéma commun caractérisé par deux phases distinctes : une première phase rapide correspondant à l'élimination de l'humidité libre en surface, suivie d'une seconde phase plus lente liée à la migration de l'humidité interne vers la surface.

Ces résultats mettent en évidence l'influence significative des conditions de séchage sur l'efficacité du processus, ce qui constitue un indicateur clé pour déterminer les conditions optimales visant à assurer un séchage efficace, tant en termes de durée que de qualité du produit final.

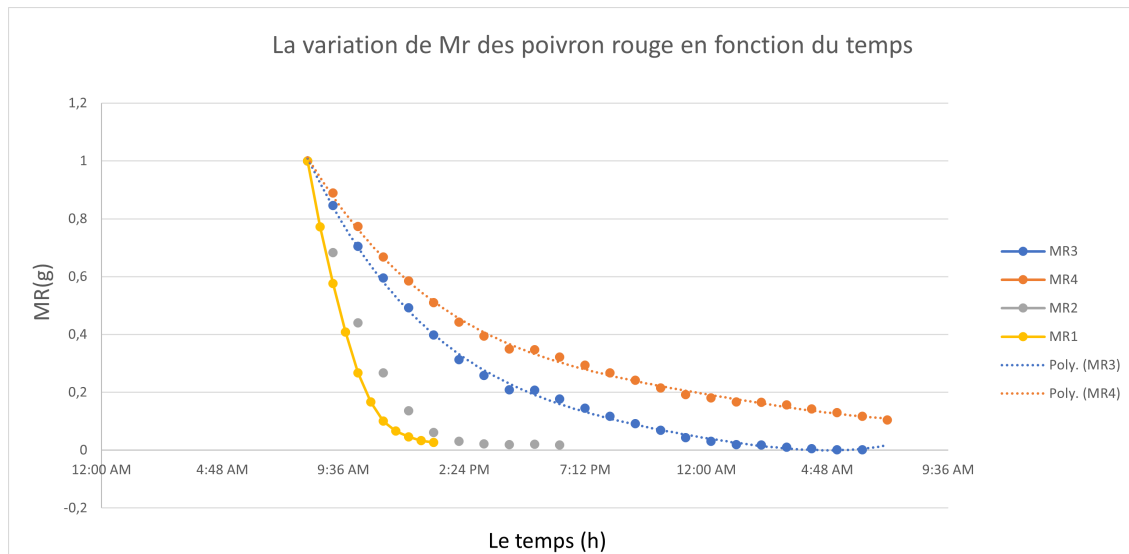


Figure III.10: variation des MR du poivron rouge en fonction du temps

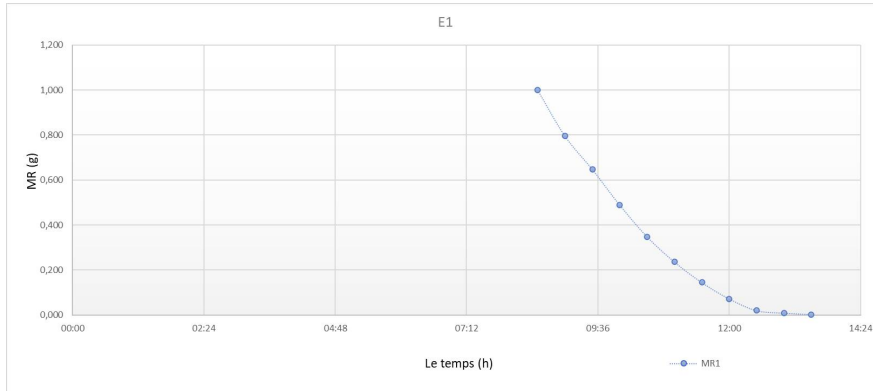
III.1.2.3 Évolution de MR du potiron au cours du séchage

Dans le cadre de cette étude expérimentale, l'évolution de la Taux d'humidité relative (MR) de deux échantillons de potiron a été suivie durant le processus de séchage à l'aide d'une source de chaleur artificielle, comme illustré dans la **Figure III.11**. L'expérience a commencé dans des conditions initiales identiques, avec une valeur de $MR = 1$ pour les deux échantillons.

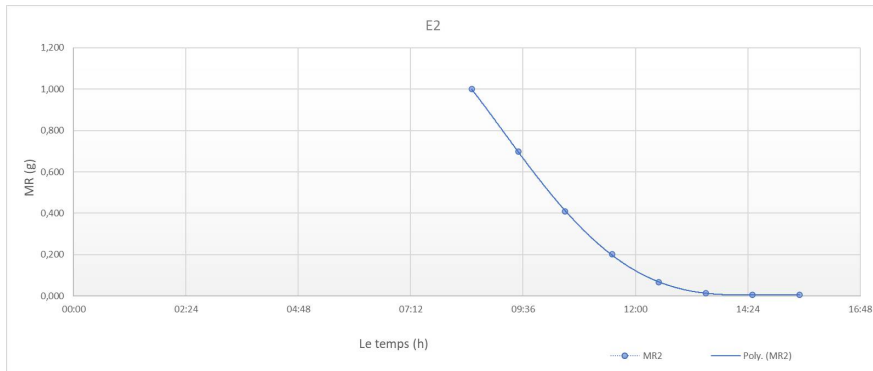
Les courbes présentent un comportement typique caractérisé par une diminution rapide de la MR au début, due à l'évaporation de l'humidité en surface, suivie d'une baisse plus progressive correspondant au transfert de l'humidité interne vers la surface, jusqu'à atteindre

une stabilité où la perte devient presque négligeable.

Les résultats indiquent que l'échantillon 1 a séché plus rapidement, atteignant une MR finale de 0,002, tandis que l'échantillon 2 a enregistré une valeur légèrement supérieure de 0,005. Cette différence peut être attribuée à une variation dans la position des échantillons ou dans l'intensité du rayonnement thermique reçu au cours de l'essai.



(a)



(b)

Figure III.11: variation de MR des échantillons de potiron

Les courbes présentées représentent Dans la Figure III.12 la variation de la teneur en humidité relative (MR) de deux échantillons de potiron au cours du séchage sous une source de chaleur artificielle. On remarque que les deux échantillons (MR1 et MR2) commencent avec une valeur initiale de MR égale à 1, ce qui indique une masse d'humidité initiale identique au début de l'expérience.

Avec le temps, on observe une diminution progressive de la MR, traduisant la perte continue d'eau des échantillons. L'échantillon MR1 présente une courbe plus abrupte, ce qui suggère un séchage plus rapide et une réduction presque complète de l'humidité avant la douzième heure. Cela peut s'expliquer par une proximité plus grande à la source de chaleur ou

par des conditions de séchage plus efficaces (intensité de rayonnement plus élevée, meilleure circulation de l'air, etc.).

L'échantillon MR2, bien qu'il suive une tendance similaire, montre une pente moins prononcée, indiquant une perte d'humidité plus lente. Cette différence peut être attribuée à la position de l'échantillon, à son épaisseur ou à la surface exposée à la chaleur.

Ainsi, ces résultats montrent clairement que plusieurs facteurs influencent la cinétique de séchage, notamment l'intensité du rayonnement thermique, la position de l'échantillon et ses caractéristiques physiques. Ces éléments doivent être pris en compte lors de la conception ou de l'optimisation des procédés de séchage.

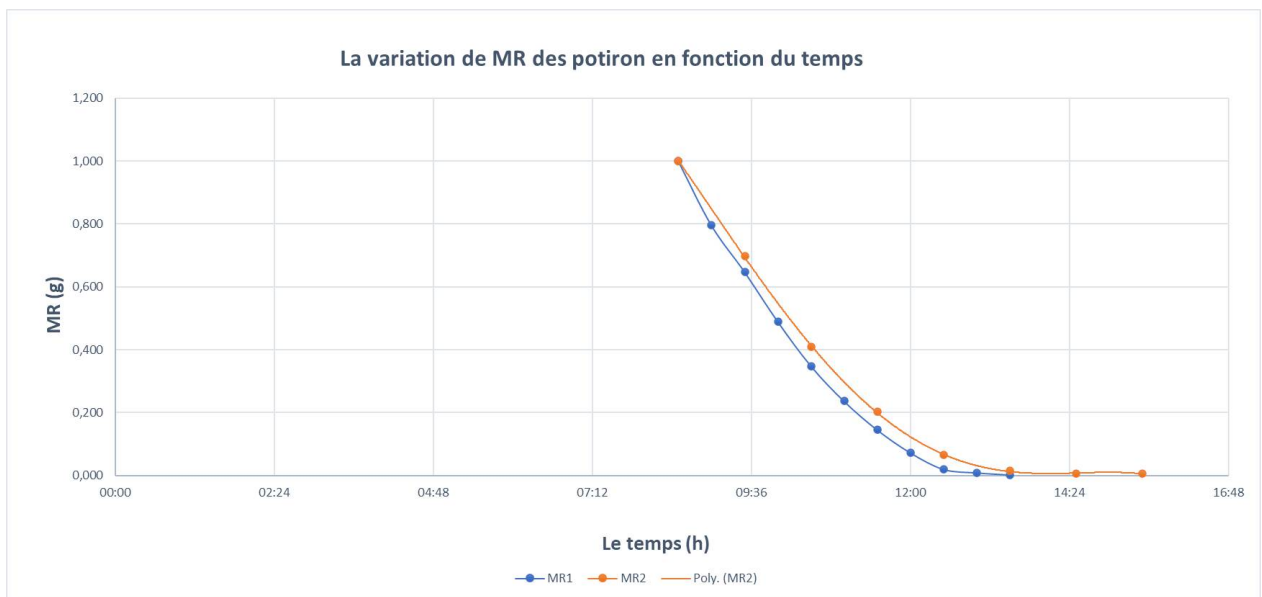


Figure III.12: variation des MR du potiron en fonction du temps

III.2 Conclusion

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre met en évidence un comportement globalement cohérent des échantillons soumis au séchage thermique. Tous les produits étudiés ont suivi une courbe typique de séchage comportant deux étapes majeures : une phase initiale rapide où l'humidité superficielle est éliminée, et une phase secondaire plus lente où l'eau résiduelle migre lentement de l'intérieur vers la surface.

Cependant, malgré cette similarité dans le profil global, des différences notables ont été observées entre les échantillons, notamment en termes de durée de séchage, de masse finale et de taux d'humidité résiduelle. Ces différences s'expliquent par des variations dans les caractéristiques physiques des échantillons (épaisseur, surface exposée, densité, etc.) ainsi que par leur position par rapport à la source de rayonnement, ce qui a un impact direct sur l'intensité thermique reçue.

Ces résultats permettent non seulement de mieux comprendre la cinétique de séchage, mais aussi de mettre en évidence les paramètres les plus influents sur la performance du procédé. Ils ouvrent ainsi la voie à une optimisation des conditions de séchage, que ce soit à l'échelle expérimentale ou industrielle, en tenant compte des spécificités des produits et des conditions environnementales. Ce travail constitue donc une base solide pour des études futures portant sur la modélisation du séchage, le développement de prototypes ou encore l'adaptation des technologies de séchage aux contraintes locales, notamment dans les zones chaudes comme la région de M'Sila.

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude du séchage thermique de produits alimentaires tels que la fraise, le poivron rouge et le potiron, dans des conditions expérimentales rigoureusement contrôlées, en simulant l'effet du rayonnement solaire à l'aide d'une lampe halogène.

La démarche méthodologique adoptée, reposant sur l'utilisation d'un équipement précis et bien calibré, a permis de collecter des données fiables concernant l'évolution de la masse et la perte d'humidité des échantillons au cours du temps, tout en tenant compte des variations de l'intensité du rayonnement thermique selon la position verticale des échantillons sur un support en bois à plusieurs niveaux. Les résultats ont clairement montré que l'intensité du rayonnement influence directement la durée du séchage : une intensité plus élevée entraîne une évaporation plus rapide de l'eau et, par conséquent, une réduction significative du temps de séchage.

Par ailleurs, l'analyse des courbes a révélé que la fonction MR (taux d'humidité résiduelle) varie selon le type de produit, en fonction de sa structure physique et de sa composition chimique, notamment sa densité, son épaisseur, sa porosité et sa teneur initiale en eau. Ces différences soulignent que la réponse des produits alimentaires aux conditions de séchage n'est pas uniforme et que l'efficacité du processus dépend autant des facteurs internes au produit que des paramètres externes tels que l'intensité du rayonnement et la température ambiante.

Cette étude a permis une meilleure compréhension de l'impact des facteurs thermodynamiques et environnementaux sur la cinétique du séchage, et a mis en évidence l'importance de maîtriser les mécanismes de transfert de chaleur et de masse – notamment la convection, la conduction et le rayonnement – pour assurer un séchage efficace tout en préservant les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des produits.

Les résultats ont montré que la lampe halogène constitue un moyen efficace pour le séchage thermique, en reproduisant les effets du rayonnement solaire de manière à garantir un séchage rapide et homogène, avec la possibilité d'ajuster l'intensité en fonction de la position de l'échantillon. Sa simplicité d'utilisation et son efficacité en font une solution adaptée aux essais en laboratoire ainsi qu'aux applications à petite échelle, notamment dans les régions à ressources énergétiques limitées. Elle peut donc être considérée comme une alternative pratique et peu coûteuse, offrant une base solide pour le développement de systèmes de séchage plus performants et durables.

Sur le plan pratique, les résultats obtenus constituent une base solide pour améliorer les procédés de séchage à petite et grande échelle, et ouvrent des perspectives prometteuses, que ce soit pour la conception de nouveaux prototypes de séchoirs efficaces, ou pour l'intégration

des énergies renouvelables dans ces dispositifs.

En somme, cette étude représente une contribution significative à la compréhension des phénomènes de séchage thermique et à l'amélioration des techniques de conservation des denrées alimentaires dans des contextes locaux contraignants. Elle encourage également la poursuite des recherches, en élargissant le champ des produits testés, en intégrant davantage de variables environnementales, et en collaborant avec le secteur industriel pour le transfert technologique des résultats obtenus.

Bibliographie

- [1] Naseer Ahmed, Jagmohan Singh, Harmeet Chauhan, Perna Gupta, Anisa Anjum, Harleen Kour. *Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances*, Int. J. Food Nutr. Saf., vol. 4(1), pp. 34-42, Jan. 2013.
- [2] Benmeziane, D. F. *Drying of Fruits: A Mini-Review*, Nov Tech Nutri Food Sci., vol. 3(5), NTN.F.000571.2019. DOI: 10.31031/NTNF.2019.03.000572.
- [3] M. Benali Abdeledjalil, Mlle. Ferhat Hanane Wahiba Ikrame. *Étude Expérimentale et Simulation de la Cinétique de Séchage Solaire de Carotte*, Université Ahmed Draïa Adrar, 2022.
- [4] Djouama Mohamed Hamza, Djeridi Abd Errahmane. *Amélioration du Séchage Industriel de l'Agriculture par NaCl*, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021–2022.
- [5] Patricio F. Mendez. *ChE 314 Heat Transfer: Heat Transfer Mechanisms*, University of Alberta.
- [6] <https://dspace.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/fe6cafc0-6092-41d3-989b-2031fc744d9c/content>
- [7] Prof. Abdelmajid El Bouardi. *Initiation de Techniques de Séchage*, Université Abdelmalek Essaadi, Département de Physique.
- [8] Badaoui, O., Hanini, S., Djebli, A., Haddad, B., Benhamou, A. *Experimental and Modelling Study of Tomato Pomace Waste Drying in a New Solar Greenhouse: Evaluation of New Drying Models*, Renewable Energy, vol. 133(C), pp. 144–155, 2019.
- [9] Razika Ihaddadene, Nabila Ihaddadene, Réda Khama, Hachemi Benouadah. *Effect of Solar Radiation Intensity on the Drying of Tomatoes*, 10th Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy Proceedings, 2025.

- [10] Said Bachir. *Modélisation Mathématique de Séchage Solaire Indirect des Dattes Deglet-Nour Réhumidifiées*, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.

Abstract

This work is part of an experimental study on the drying kinetics of certain food products (strawberry, red bell pepper, pumpkin) under the effect of an artificial solar energy source, with the aim of analyzing the behavior of these products during drying and identifying the effect of radiation intensity on the rate of moisture loss. The tests were carried out in the laboratory using a halogen lamp from the ET 200 solar system device, which simulates solar radiation and can thus be used for drying the three mentioned products. A wooden support was used to provide four different levels of intensity. A drying protocol was adapted during the drying procedure. The results obtained from the evolution of the moisture ratio (MR) over time indicate the feasibility of drying using a halogen lamp. Likewise, radiation intensity affects the drying duration: with increased radiation intensity, the drying time decreases. The MR function also varies from one product to another depending on its composition and structure.

Key words: mass evolution, relative humidity, drying, halogen lamp, strawberry, red bell pepper, pumpkin, radiation intensity, drying efficiency.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale de la cinétique de séchage de certains produits alimentaires (fraise, poivron rouge, potiron) sous l'effet d'une source d'énergie solaire artificielle, dans le but d'analyser le comportement de ces produits durant le séchage et d'identifier l'effet de l'intensité du rayonnement sur la vitesse de perte d'humidité. Les essais ont été effectués dans le laboratoire en utilisant une lampe halogène du dispositif du système solaire ET 200 qui simule le rayonnement solaire et ainsi peut être utilisé pour le séchage des trois produits cités. Un support en bois a été utilisé pour avoir 4 niveaux d'intensités différentes. Un protocole de séchage a été adapté durant la procédure de séchage. Les résultats obtenus de l'évolution du taux d'humidité (MR) en fonction du temps indiquent la possibilité de sécher en utilisant une lampe halogène. De même, l'intensité de rayonnement affecte la durée de séchage, avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement, la durée de séchage diminue. La fonction MR varie également d'un produit à un autre selon sa composition et selon sa structure.

Mots clés: évolution de la masse, humidité relative, séchage, lampe halogène, fraise, poivron rouge, potiron, intensité du rayonnement, efficacité du séchage.

الملخص

يندرج هذا العمل ضمن دراسة تجريبية لحركية تجفيف بعض المنتجات الغذائية (الفراولة، الفلفل الأحمر، والقرع) تحت تأثير مصدر طاقة شمسية اصطناعية، بهدف تحليل سلوك هذه المنتجات أثناء التجفيف وتحديد تأثير شدة الإشعاع على معدل فقدان الرطوبة. تم إجراء التجارب في المختبر باستخدام (ET 200). الذي يحاكي الإشعاع الشمسي، مما يجعله مناسباً لتجفيف المنتجات الثلاثة المذكورة. مصباح هالوجين تابع لجهاز النظام الشمسي وقد تم استخدام حامل خشبي للحصول على أربع درجات مختلفة من شدة الإشعاع، كما تم اعتماد بروتوكول خاص بالتجفيف خلال العملية. تشير النتائج المحصلة حول تطور نسبة الرطوبة (MR). مع الزمن إلى إمكانية اعتماد مصباح هالوجين كوسيلة فعالة للتجفيف كما ان شدة الإشعاع تؤثر على مدة التجفيف فكلما زادت الشدة. قلت مدة التجفيف كما تختلف دالة الرطوبة النسبية من منتج لآخر حسب تركيبه البنوي و الكيميائي

الكلمات المفتاحية: تطور الكتلة، الرطوبة النسبية، التجفيف، مصباح هالوجين، الفراولة، الفلفل الأحمر، القرع، شدة الإشعاع، فعالية التجفيف