

**.République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A. MIRA – Bejaia**



**Faculté des Sciences et de la Nature et de la Vie**  
**Département des Sciences Alimentaires**  
**Filière : Sciences Biologiques**  
**Spécialité : Sciences Alimentaires**  
**Option : qualité des produits et sécurité alimentaire**

**Réf:.....**

**Mémoire de Fin de Cycle**  
**En vue de l'obtention du diplôme Master**

**Thème**

**Technologies de séchage.**  
**Etude de cas: séchage de deux matrices végétales par**  
**étuve**

Présenté par : **Saf Anis & Reddam Souad**

Soutenu le : **20 juin 2018**

Devant le jury composé de :

Mme Soufi Ouahiba

MCA Présidente

Mme Slimani Sakina

MCB Examinatrice

Pr Khodir Madani

Encadreur

**Année universitaire : 2017/2018**

# Remerciement

*Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour achever ce travail.*

*Au terme de la réalisation de ce travail, nous exprimons notre très grande gratitude à notre encadreur Monsieur « Khodir Madani », non seulement d'avoir accepté l'encadrement de ce travail, mais surtout pour son aide, ses orientations judicieuses, sa disponibilité et ses encouragements, sa gentillesse tout au long de la réalisation de ce présent travail.*

*On tient à remercier chaleureusement Mme Soufi de nous avoir fait l'honneur de présider le jury*

*Nos vifs remerciements vont également à Mme Slimani d'avoir fait parti jury d'examinations*

*A Melle Guemouni Sara et Monsieur Boukhalfa Farid pour leurs aides Scientifiques précieuses et tous les conseils qu'ils nous ont fournis, les efforts, la gentillesse, et le support qu'on a reçus lors des moments les plus difficiles de ce travail.*

*Enfin, merci pour toutes nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles*

*Merci*



# *Dédicaces*

*Je ne trouve aucun mot ou expression, qui vont exprimer mes vifs  
sentiments de gratitude et de remerciement :*

*A ma chère mère qui n'a jamais cessé de m'apporter tout ce dont j'ai  
besoin pour réaliser ce travail et tout au long de mon parcours  
éducatif, ainsi que sa tendresse et sa compréhension.*

*Merci mama;*

*A mon très cher père allahirahmou qui a toujours peiné pour me créer  
les conditions nécessaires pour bien réussir dans mes études.*

*Je t'aime toujours papa ;*

*A mes chères cousines : wahiba, samia, sarah, lina et houria sans oublier  
mon chère oncle lahcen et mon cousin hakim qui m'ont beaucoup aidé  
durant tout mon parcours universitaire.*

*A toutes mes amis : feriel, yamina, kahina, Nesrine, salim, lydia  
, amine, anis, celia, dihia, billal, farid, lyes et hafid et à toute la  
promotion de Sciences Alimentaires et surtout ceux de laboratoire :  
guemouni sarah, hicham, karim, rebiha et hassiba , Je n'oublierais  
jamais votre bonté et votre aide ,j'espère être là pour vous comme vous  
l'êtes pour moi. Je vous aime tous.*

*A mes petits anges : ines, marwa, madjid.*

*Souad*



# *Dédicaces*

*Je ne trouve aucun mot ou expression, qui vont exprimer mes vifs  
sentiments de gratitude et remerciement :*

*A mes chers parents qui n'ont jamais cessés de m'apporter tout ce dont  
j'ai besoin pour réaliser ce travail et tout au long de mon parcours  
éducatif, ainsi que leur tendresse et leur compréhension.*

*A mes chères frères et soeurs : Yacine, Yasmina, sofiane, Ghiles,  
Fahima et Meftah qui m'ont beaucoup aidé.*

*A tous mes amis: Belkacem, Nouh, Rahim, yanis, Menad, Melissa,  
Katia, Sonia, feriel , Nerine, Dounia, Amine, Billal, Farid, lyes et  
Hafid et à toute la promotion de Sciences Alimentaires et surtout ceux  
du laboratoire : Sara Guemouni, Hicham, karim, Rebiha et Hassiba, Je  
n'oublierais jamais votre bonté et votre aide ,j'espère être là pour vous  
comme vous l'êtes pour moi. Je vous aime tous.*

*Anis*

## Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction .....1

### **PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

Chapitre I : Technologie de séchage des produits agro-alimentaire.....3

I.1. Historique..... 3

I.2. Définition du séchage ..... 3

I.3. Le séchage et l'énergie..... 4

I.4. Les domaines d'utilisations..... 5

I.5. Technologies de séchage..... 6

I.5.1. Les modes de séchage ..... 6

I.5.1.1. Séchage thermique..... 6

I.5.1.2. Séchage non thermique..... 9

Chapitre II : Technologie de séchage solaire des produits agro-alimentaires.....10

II.1. Le séchage solaire..... 10

II.2. Description d'un séchoir solaire ..... 10

II.3. Classification des types de séchoirs solaires ..... 11

II.3.1. Les séchoirs solaires directs ..... 11

II.3.1.1. Type de séchoirs directs ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.2. Les séchoirs Indirects..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.3. Séchoirs solaire hybrides ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.3.4. Les séchoirs solaires mixtes ..... **Erreur ! Signet non défini.**

II.4. Avantages et inconvénients du

séchage.....**Erreur ! Signet non défini.**

## **PARTIE II: Partie Expérimentale.**

Chapitre III :Matériels et méthodes.....	18
III.1.1.Matériel végétal.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.1.1.tomate.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.1.2. Gingembre .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.1.3. Détermination de la teneur en eau .....	20
III.1.3. Préparation et séchage du matériel végétal .....	20
III.1.3.1.Protocole de séchage de la tomate .....	20
III.1.3.2.Protocole de séchage de gingembre.....	22
III.2. Résultats et discussion.....	24
III.2.1. Résultats .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3. La modélisation.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.1 Les modèles empiriques.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.2. Modélisation des cinétiques de séchage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.3. Résultats de la modélisation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Conclusion.....	32
Références Bibliographiques.	
Annexes.	

**PAI** : Produits alimentaires intermédiaires.

**Ppa** : Pression partielle.

**PAM** : Plantes aromatiques et médicinales.

**CDER** : Centre de développement des énergies renouvelables.

## Liste de figures

<b>Figure 1 :</b> Image de séchage de la tomate sous le soleil.....	7
<b>Figure 2 :</b> Etuve de séchage.....	8
<b>Figure 3 :</b> Micro-onde pour le séchage.....	9
<b>Figure 4 :</b> Illustration d'un séchoir solaire.....	10
<b>Figure 5 :</b> Schéma représente types des séchoirs solaires.....	11
<b>Figure 6 :</b> Illustration d'un séchoir solaire directe.....	11
<b>Figure 7 :</b> Le séchoir solaire intégral.....	12
<b>Figure 8 :</b> Le séchoir solaire coquillage à trois claies.....	13
<b>Figure 9 :</b> Illustration d'un séchoir solaire indirecte.....	14
<b>Figure 10 :</b> Représentation schématique d'un séchoir tunnel.....	14
<b>Figure 11 :</b> Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM, réalisé au CDER.....	15
<b>Figure 12 :</b> Illustration d'un séchoir solaire mixte.....	16
<b>Figure 13 :</b> Photographie de la tomate.....	18
<b>Figure 14 :</b> Photographie du gingembre.....	19
<b>Figure 15 :</b> Schéma représentant le protocole de séchage de la tomate.....	21
<b>Figure 16 :</b> Photographie de l'échantillon de tomate à sécher par étuve.....	22
<b>Figure 17 :</b> Schéma représentant le protocole de séchage de gingembre.....	23
<b>Figure 18 :</b> Photographie des échantillons de gingembre.....	24
<b>Figure 19 :</b> Photographie d'une étuve.....	24
<b>Figure 20 :</b> Evolution de la masse de la tomate fonction du temps et de la température.....	25

<b>Figure 21</b> : Evolution de la masse du gingembre en fonction du temps et de la température.....	26
<b>Figure 22</b> : Modélisation de la cinétique de séchage de la tomate à différentes températures.....	28
<b>Figure 23</b> : Modélisation de la cinétique de séchage du gingembre à différentes températures.....	30

## Liste des tableaux :

<b>Tableau 1 :</b> Tableau représentant la taxonomie de la tomate.....	19
<b>Tableau 2 :</b> Tableau représentant la taxonomie du gingembre.....	20
<b>Tableau 3 :</b> Tableau représentatif des modèles empiriques et leurs équations.....	27
<b>Tableau 4 :</b> Tableau des résultats de modélisation des courbes de la tomate.....	29
<b>Tableau 5 :</b> Tableau des résultats de modélisation des courbes de gingembre.....	31

Le séchage des fruits et légumes est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments connues par l'homme, car il a un grand effet sur la qualité des produits secs. L'objectif majeur dans le séchage des produits agricoles est la réduction de la teneur en humidité à un niveau qui permet le stockage en toute sécurité sur une période prolongée. Il entraîne également une réduction du poids ainsi que de volume, ce qui réduit l'emballage, le stockage et les frais de transport (**Heldman, Lund *et al.*, 2006**).

Le choix des aliments à sécher s'est posé sur la tomate et le gingembre. Premièrement, pour leur cultivation très répandue dans le monde, pour leurs richesses en éléments nutritifs et surtout pour leurs vertus médicinales qui permettent le traitement de diverses maladies telle que le cancer de la prostate, ainsi que les diarrhées et nausées. Deuxièmement pour leur disponibilité irrégulière. Cependant, leur conservation par procédé de séchage permet de la continuité dans leur disponibilité (**D. Mennouche, B. Bouchekima *et al.*, 2007**), (**Gigon 2012**), (**Liu, Suzuki *et al.*, 2000**).

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduction des dépenses et pertes après les récoltes. Le séchage solaire a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air. Il a été employé pour sécher des grains, fruits, viandes, poissons et d'autres produits alimentaires destinés à la consommation (**Bonazzi, Dumoulin *et al.*, 2008**).

Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou des séchoirs solaires pouvant réduire les inconvénients cités précédemment et permettent aussi l'amélioration de la qualité des produits (**Boulemtafes, 2011**).

Beaucoup de scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage.

Les concepts de base, les différentes méthodes de séchage, et les différents types de séchoirs à ont été examinés par divers auteurs dans des articles de revue et des monographies **(Bennamoun and Belhamri, 2007)**.

Le document comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux principales notions sur le séchage et s'attache à rappeler les différentes techniques de séchage des produits agroalimentaires.
- Le deuxième chapitre présente l'état de l'art sur le séchage solaire comportant une vue générale sur les techniques de séchage solaire des produits agro-alimentaires, les types des séchoirs solaires utilisés ainsi que l'avantage et les inconvénients du séchage solaire.
- Le troisième chapitre est une étude expérimentale, qui vise à déterminer les cinétiques de séchages de deux matrices végétales, la tomate et le gingembre et leurs modélisations primaires

## I.1. Historique

La déshydratation est l'une des plus anciennes méthodes de préservation des aliments que l'on connaisse. Les peuples primitifs déshydrataient ou faisaient sécher les herbes, les racines, les fruits et la viande en les exposants au soleil. Ils avaient appris que la déshydratation des aliments leur permettait de survivre durant les durs et longs hivers alors que la nourriture était plus rare ou encore inexistante. La légèreté ainsi que la valeur nutritive élevée des aliments déshydratés permettaient aussi aux peuples d'autrefois de parcourir de plus grandes distances lors de leurs voyages de chasses ou d'exploration.

Depuis les débuts de la civilisation, presque tous les peuples de notre planète ont recourt à la déshydratation ou au séchage des aliments. En fait, les plus anciens documents écrits sur le sujet, mentionnent que les Phéniciens ainsi que d'autres peuples pêcheurs de la Méditerranée avaient l'habitude de faire sécher leurs prises au grand air.

Le séchage au soleil des feuilles de thé était très répandu chez les Chinois. Plusieurs autres cultures d'autrefois consommaient divers aliments déshydratés. Par exemple, quand certains anciens tombeaux Égyptiens ont été excavés récemment, les scientifiques ont découvert une variété d'aliments déshydratés, incluant des grains de blé. Ces aliments étaient sensés soutenir l'esprit du défunt dans son voyage après la vie. Lors d'une expérience, des grains âgés de plusieurs siècles furent par la suite réhydratés. Miraculeusement, ils germèrent, prouvant que la déshydratation est véritablement un moyen naturel et viable de préservation de la nourriture à long terme.

À l'époque des explorateurs du 15<sup>ème</sup> et 16<sup>ème</sup> siècles, la plupart des marins mangeaient une variété d'aliments séchés afin de garder la santé durant leurs voyages en mer (**Anonyme 1**).

## I.2. Définition du séchage

Par définition, le séchage est une technique de purification visant à débarrasser un mélange homogène ou hétérogène d'un constituant liquide. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation.

Il existe plusieurs procédés de séchage : les procédés mécaniques (presse, décantation ou centrifugation), les procédés physico-chimiques (adsorption, absorption, réfrigération et séchage par évaporation). Ce dernier consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse qui le baigne.

Le changement de phase exige un apport de chaleur assez considérable. Il peut être direct (chauffage par échangeur, par effet joule, par radiations infrarouges ou par courants de haute fréquence) ou bien c'est la phase gazeuse elle-même qui assure l'apport de chaleur nécessaire (air chaud). Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert, le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second est un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires (**Boulemtafes, 2011**).

Selon (**Bonazzi et al., 2008**), l'utilisation du séchage dans les industries agro-alimentaires a de multiples buts :

- Accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons, ...).
- Stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, ...) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage de malt, ...).
- stabiliser des co-produits industriels pour l'alimentation animale (pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drêches de brasserie, farines de viande et de poisson, lactosérum, ...)
- produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires (PAI). Ce sont par exemple des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes, colorants.

## I.3. Le séchage et l'énergie

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie, globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés, dans une démarche économique mais aussi écologique.

Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre" et lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure. Il suffit pour la vaporiser d'environ 2250 kJ/kg. Lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée". L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie.

Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée : aussi la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage (**Léonard Angélique, 2002**).

## 1.4. Les domaines d'utilisations

Si le séchage consomme autant d'énergie c'est qu'il intervient dans de nombreuses industries. Les produits concernés nous touchent souvent de près dans la vie de tous les jours. Le choix d'une opération de séchage peut être effectué pour diverses raisons:

- le produit humide se conserve mal.
- le liquide doit être enlevé pour le déroulement de la suite du procédé.
- l'enlèvement de l'eau donne une texture et une structure finale du produit et constitue une étape à part entière du procédé.

### ✓ Industrie agroalimentaire

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage, et ce dernier peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. On peut citer par exemple :

- la viande fumée : saucisson, jambon...
- les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée

- le sucre cristallisé est obtenu par évaporation
- les légumes (pois, poivron...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots, figes...)
- les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation
- café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épice, certains biscuits apéritifs

Actuellement, il existe plus de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire.

### ✓ **Industrie papetière**

Dans ce type d'industrie, le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

### ✓ **Industrie du bois**

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.

### ✓ **Bouchons de liège**

Afin de garantir un meilleur vieillissement des vins, une attention toute particulière est portée à la qualité des bouchons de liège. Au cours de leur fabrication, l'opération de séchage doit être parfaitement maîtrisée au risque de donner un goût de moisi au vin.

### ✓ **Matériaux de construction et industrie céramique**

Par exemple : les briques, le carrelage, les assiettes, les bols et les plats.

### ✓ **La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique**

Comme la fabrication de la levure en poudre, des antibiotiques et le séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage (Vasseur, 2009).

## **I.5. Technologies de séchage**

Le séchage est une opération de transfert couplé de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie. Plusieurs méthodes de séchage ont été adaptées à différentes situations, d'utilisation facile et pratique, les paramètres opératoires des procédés de séchage peuvent être aisément contrôlés. Ces procédés dits classiques notamment le

séchage au soleil et le séchage à l'air chaud sont les plus couramment utilisés pour les fruits et légumes (Thu Ha Nguyen, 2016), il existe aussi d'autres modes de séchage qui sont définis ci-dessous.

### I.5.1. Les modes de séchage

#### I.5.1.1. Séchage Thermique

##### ✓ Au soleil

Le séchage au soleil s'est largement développé dans les zones arides ou semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée.

Le séchage s'effectue sur le sol, sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons. Ce système présente deux principaux avantages pour les communautés : peu de travail et pas d'investissement, mais, très souvent, les résultats obtenus sont médiocres car les produits sont souillés de sable et de poussière, ils subissent les attaques des animaux, des insectes et des micro-organismes, les pertes sont ainsi importantes. De plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité (Thu Ha Nguyen, 2016).



**Figure 1** : Image de séchage de la tomate sous le soleil (Anonyme 2).

##### ✓ Séchage à l'air libre

Le séchage à l'air libre est réalisé dans l'ombre, avec une circulation naturelle de l'air. La température moyenne de la chambre est de  $22 \pm 2$  °C. Le séchage est contrôlé par convection naturelle, (Lahmari *et al.* 2012).

### ✓ Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation

- l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau.

La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et elle est ensuite entraînée par le gaz (**Bonazzi et al., 2008**).

### ✓ Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude, séchoirs cylindres...etc.), dans toutes ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale ou dépasse la pression totale ambiante (**Bonazzi et al., 2008**).

### ✓ Le séchage à l'étuve

Dans ce type de séchage, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif ; la convection est principalement impliquée. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. Le choix de ces deux critères (Taille et temps de séjours) doit être adapté au rapport surface/volume (**Vasseur, 2009**).



**Figure 2** : Etuve de séchage

### ✓ Le séchage par micro-onde

Le chauffage par micro-ondes se rapporte à l'utilisation d'ondes électromagnétiques afin de produire de la chaleur dans le matériel à sécher.

Le fonctionnement d'un four à micro-onde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertit l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal), les ondes produites sont dirigées vers l'agitateur d'onde et pénètrent dans l'enceinte métallique où se trouve l'aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire d'être exposé aux ondes qui pénètrent l'aliment pour atteindre les molécules d'eau (Mathavi, Sujatha *et al.*, 2013).

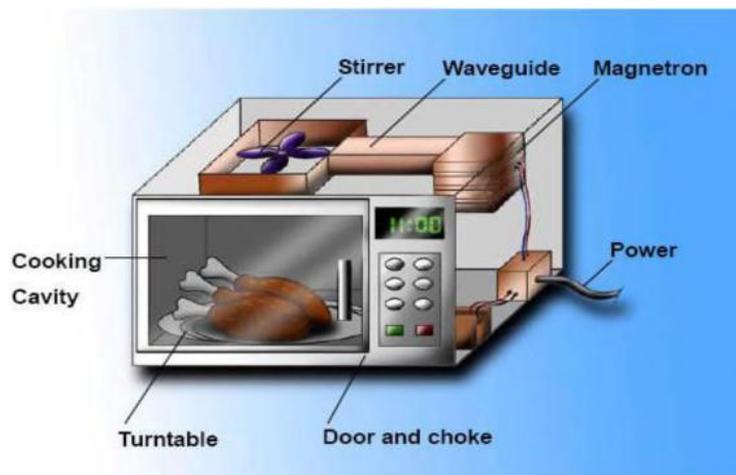


Figure 3 : Schéma d'une micro-onde (Mathavi, Sujatha *et al.* 2013)

### I.5.1.2. Non thermiques

#### ✓ La lyophilisation

C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles.

La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé « sublimation ». La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'une fraction d'eau liée, à une température de plus en plus élevée. En atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide, ce procédé obéit à des principes comparables à l'ébullition, mais ce séchage peut aussi se faire en présence d'un

certain taux de gaz incondensables dans l'atmosphère autour du produit, tel que la pression de vapeur dans le gaz externe soit seulement une pression partielle ppa (Vasseur, 2009).

### ✓ Le séchage osmotique

Ce qu'on appelle déshydratation osmotique dans le domaine de la transformation des fruits et légumes, est un procédé de réduction de la teneur en eau obtenue par immersion de ces derniers, entiers ou en morceaux, dans une solution hypertonique de sucres et/ou saline.

En principe, l'osmose décrit les mouvements de l'eau et des solutés qui se produisent quand deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable, en raison de la pression osmotique relative de chaque composant (Enrico Maltini, 2003).

### II.1. Le séchage solaire

Dans les pays en développement, le séchage au soleil est une méthode populaire, efficace et économique utilisée pour le séchage et la conservation des produits agricoles, alimentaires et de nombreux autres produits. Le séchage des produits alimentaires agricoles par l'énergie solaire est une application rentable. Par contre le séchage industriel consomme des grandes quantités de combustibles traditionnels pour fournir de l'air chaud (Midilli et Kucuk, 2003).

Le séchage se fait de plusieurs manières. La machine à sécher existe sous différentes formes en fonction du mode de transfert de chaleur, le prix, la forme d'énergie consommée et le mode de circulation du fluide (Amelin et Souriau, 2014).

### II.2. Description d'un séchoir solaire

Le séchoir solaire est une construction qui capte les rayons solaires pour sécher les aliments disposés à l'intérieur. Il nous permet comme le déshydrateur de sécher tous les fruits, légumes, herbes, poissons et viandes. Il est souvent construit en bois avec une plaque de verre qui sert à reproduire un effet de serre à l'intérieur du séchoir.

Le séchoir solaire a un potentiel important dans le secteur agricole, où il est utilisé pour le séchage des légumes, des fruits et des plantes médicinales. Ainsi minimiser la dépendance sur le séchage au soleil et le séchage industriel, d'où économiser d'énormes quantités de fossiles (Mann, Harris *et al.*, 2004).

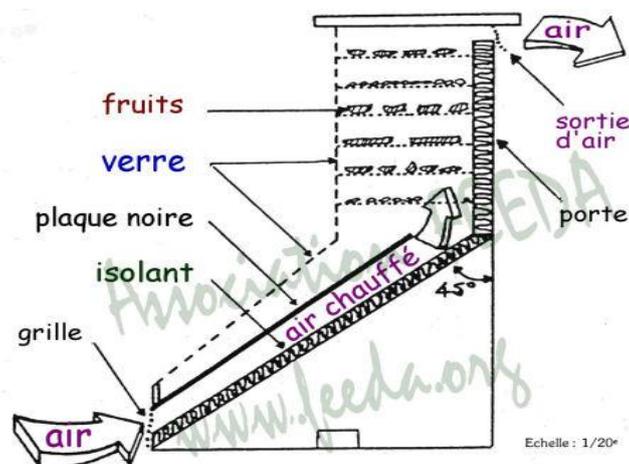
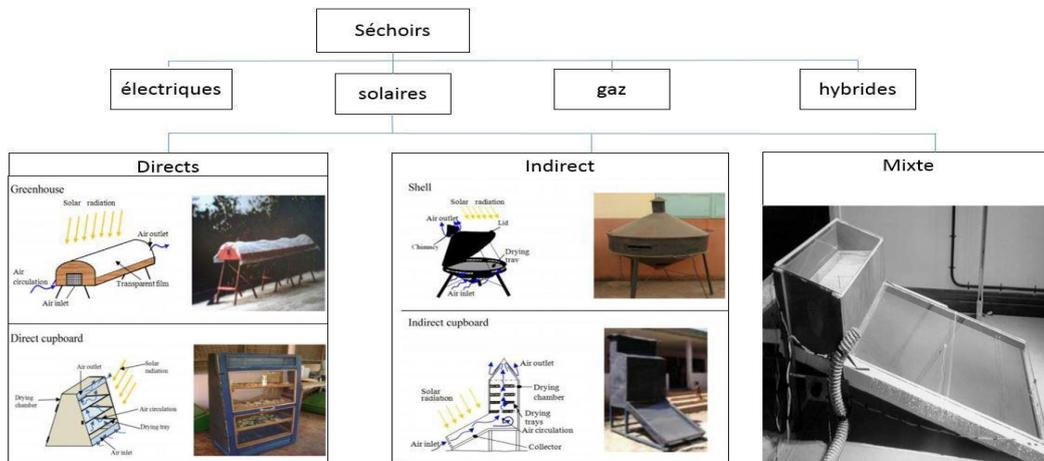


Figure 4: Illustration d'un séchoir solaire (El-Sebail, Aboul-Enein *et al.* 2002)

## II.3. Classification des types de séchoirs solaires

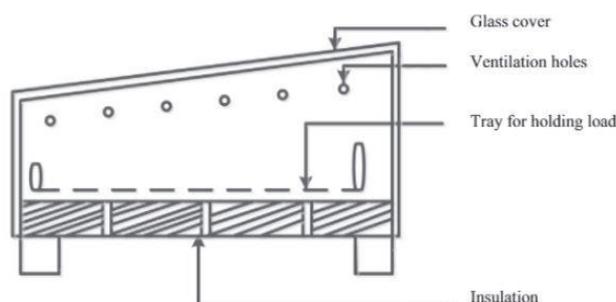
Selon la forme d'énergie consommée, il y a des séchoirs électriques, des séchoirs à gaz et des séchoirs hybrides. Plusieurs gammes de séchoirs solaires existent : les séchoirs directs, indirects et mixtes.



**Figure 5 :** schéma représente types des séchoirs solaire (Vasseur, 2009)

### II.3.1. Les séchoirs solaires directs

Dans ce type de séchoirs, les rayons solaires frappent directement les produits. Et d'après la figure (04) le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois d'une chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction directe « rayonnement solaire – produit » engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments (Madhlopa, Jones *et al.*, 2002).



**Figure 6:** Illustration d'un séchoir solaire directe (Amelin and Souriau 2014)

### II.3.1.1. Type de séchoirs directs

#### ✓ Le séchoir intégral à convection naturelle :

C'est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empêche directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu.

Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec.

Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande (Ekechukwu et Norton, 1999).

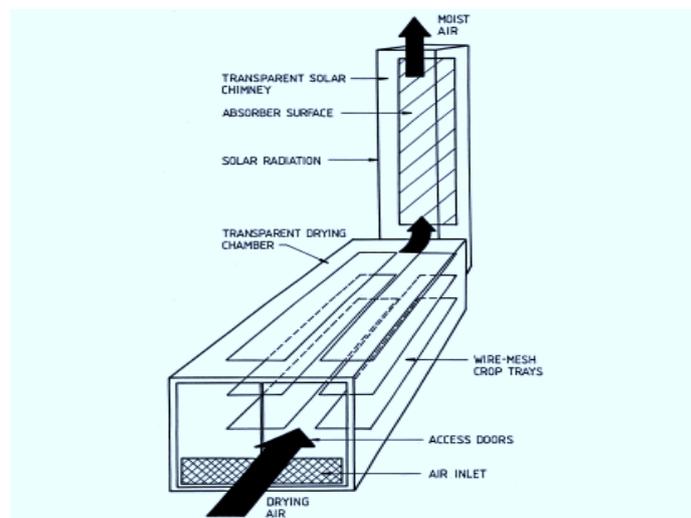


Figure 7: Le séchoir solaire intégral (Amelin and Souriau 2014)

#### ✓ La boîte de séchage ou séchoir coffre

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, Légumes, poissons et de la viande (Pangavhane et Sawhney, 2002).

#### ✓ Le séchoir solaire "coquillage"

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles et les groupes de femmes.

## Chapitre II Technologies de séchage solaire des produits agroalimentaires

Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques (Mennouche, 2006).

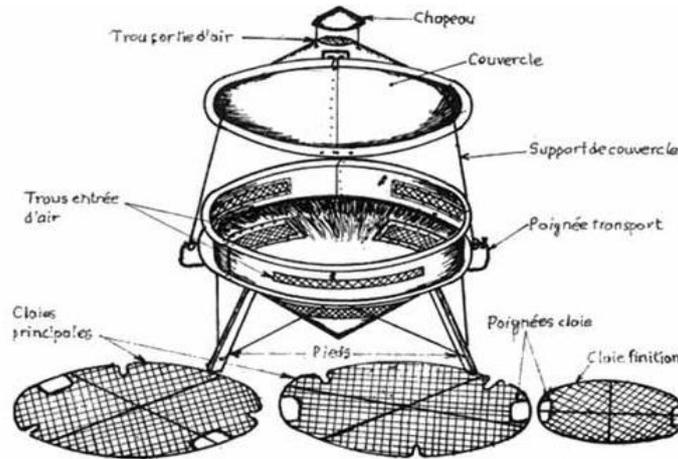


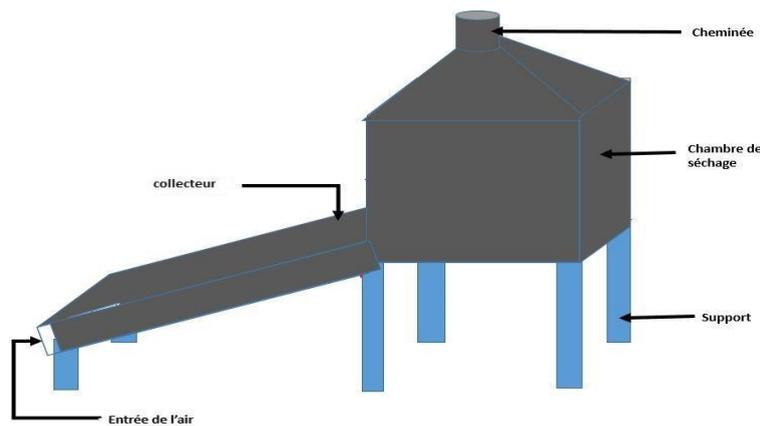
Figure 8: Le séchoir solaire coquillage à trois claies (Mennouche, 2006)

### II.3.2. Les séchoirs Indirects

Les séchoirs solaires indirects ont un capteur solaire séparé et une unité de séchage. Elles sont généralement constituées de quatre éléments, à savoir, capteur solaire, l'unité de séchage, un ventilateur, et de conduits de circulation d'air. Unité de collecteur solaire est utile pour atteindre des valeurs de température plus élevées avec un air contrôlé.

Cependant, on observe également que, dans des conditions de fonctionnement des températures plus élevées, l'efficacité du capteur solaire est réduite. En général, la plupart des capteurs solaires sont constitués de bois ou des métaux avec un revêtement approprié de matériaux absorbants tels que polyéthylène noir pour une meilleure absorption de la chaleur nécessaire au séchage du produit. (Mann, Harris *et al.*, 2004).

Le produit n'est pas exposé directement au soleil, il est même à l'abri de la lumière, ce qui autorise une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment.

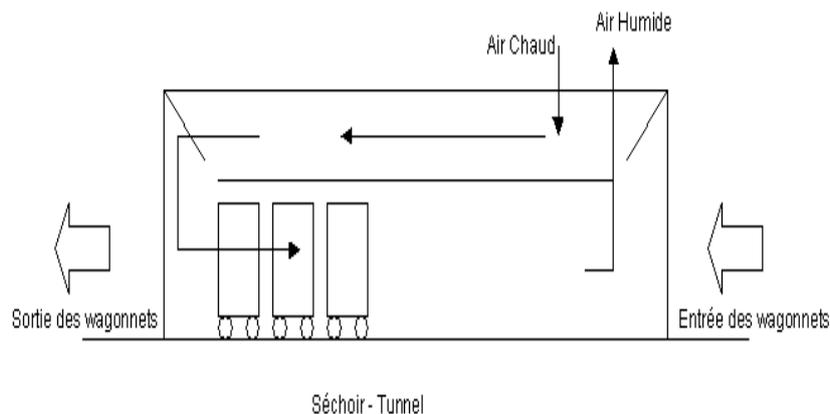


**Figure 9:** illustration d'un séchoir solaire indirecte (Mennouche 2006)

### II.3.2.1. Types des séchoirs indirects

#### ✓ Les séchoirs-Tunnel

Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue. (Madhlopa, Jones et al., 2002).



**Figure 10:** représentation schématique d'un séchoir tunnel (Vasseur, 2009)

#### ✓ Les séchoirs solaires destinés aux plantes aromatiques et médicinales

Le séchage des plantes aromatiques et médicinales (PAM) est une étape essentielle dans l'industrie agro-alimentaire et pharmaceutique, car tout en facilitant les prochaines étapes de

## Chapitre II Technologies de séchage solaire des produits agroalimentaires

---

transformation, elle permet aux plantes de garder toutes leurs qualités et permet de les conserver plus longtemps. L'Algérie, de par sa position géographique, jouit de conditions climatiques et de ressources hydriques très favorables au développement de cultures intensives des PAM. Cependant cette filière reste encore très peu développée dans notre pays.

Depuis plusieurs années, l'équipe système solaire basses températures du CDER (centre de développement des énergies renouvelable), à travers le projet séchage solaire, s'intéresse au rôle que peut apporter l'énergie solaire au développement de l'industrie agro-alimentaire et pharmaceutique (**Boulemtafes et Benaouda, 2006**).

A cet effet, un premier séchoir solaire indirect destiné au séchage des plantes aromatiques et médicinales a été réalisé et testé pour le séchage de quelques plantes aromatiques. (**Midilli et Kucuk, 2003**).



**Figure 11:** Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM, réalisé au CDER  
(**Boulemtafes and Benaouda 2006**)

### II.3.3. Séchoirs solaire hybrides

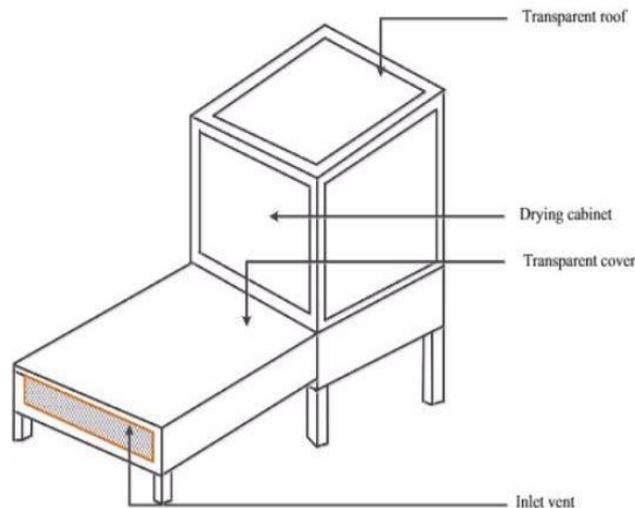
Ce sont des séchoirs qui utilisent l'énergie solaire mais aussi une autre source énergétique consommatrice de réserves fossiles pour suppléer au chauffage et/ou à la ventilation.

Dans le monde d'aujourd'hui de la technologie de pointe, des séchoirs solaires hybrides sont le meilleur dispositif alternatif disponible pour le séchage solaire rapide des produits avec la qualité des produits requis (**Cruz, Troude et al., 1988**).

### II.3.4. Les séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

Un séchoir mixte à circulation naturelle (**figure 10**) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral (**Ekechukwu et Norton, 1999**).



**Figure 12 :** Illustration d'un séchoir solaire mixte (**Mennouche, 2006**)

### II.4. Avantages et inconvénients du séchage

Comme toutes les méthodes de préservation thermique des produits, l'utilisation du séchage présente des avantages et des inconvénients.

#### II.4.1. Les avantages

Les principaux avantages du procédé de séchage sont :

- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement ;
- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois ;
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments ;

## Chapitre II Technologies de séchage solaire des produits agroalimentaires

---

- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau ;
- Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes ;
- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique (**fourrier, 2003**).

### II.4.2. Les inconvénients

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier,

- des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments (**Boroze, 2011**), des réactions de brunissement, des durcissements superficiels.
- des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils.
- la modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération (**Nguyen, 2015**)

En général, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments (**Ekechukwu et Norton, 1999**).

Cette partie est dédiée à une approche expérimentale du séchage sous étuve à différentes températures (60 ; 80 et 100 °C) pour deux matrices végétales, le gingembre et la tomate.

Les cinétiques de séchage obtenues seront traitées par une modélisation primaire et empirique.

### III.1. Matériels et méthodes

#### III.1.1. Matériel végétal

##### III.1.1.1. tomate

La tomate est une plante annuelle buissonnante, poilue et qui renferme des tiges plutôt grimpantes, elle est aromatique lorsqu'on la froisse, cette plante potagère herbacée à une taille qui varie de 40cm jusqu'à 5 mètres selon les variétés et le mode de culture. **(Toussaint et Baudion, 2010).**

La tomate est un aliment très peu énergétique mais qui présente une bonne densité nutritionnelle avec 94% d'eau et 6% de matière sèche, Cette dernière renferme de nombreux constituants majeurs tels que le sucre 50%, acides organiques, fibres, caroténoïdes et autres métabolites secondaires, ce fruit est également une bonne source d'oligoéléments et de minéraux, elle apporte beaucoup de potassium, et de vitamine C. Sa composition en antioxydants et lycopène permet d'éviter l'oxydation et diminuer le risque de maladie cardiovasculaire et le cancer. **(Kisselmina, 2013).**



**Figure 13:** Photographie de la tomate (**Anonyme 3**).

✓ **Classification botanique****Tableau 1** : tableau représentant la taxonomie de la tomate. (Cronquist Takhtadzhian, 1981).

Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Asteridae
Ordre	Solanales
Famille	Solanaceae
Genre	Solanum
Nom	Solanum lycopersicum Mill

**III.1.1.2. Gingembre**

Le gingembre (*Zingiber officinale*) est une plante vivace herbacée, de la famille des Zingiberaceae, dont la taille peut aller de quatre-vingt-dix centimètres à un mètre cinquante de hauteur. Les feuilles sont longues et lancéolées (En forme de fer de lance) pouvant atteindre vingt centimètres. Ses fleurs, entourées de bractées, sont teintées de couleur jaune, blanche ou rouge, variant selon les espèces.

Le rhizome de gingembre renferme des glucides (amidon), des lipides, des protéines, des fibres, des vitamines et des minéraux. Mais il contient aussi, et surtout, des polyphénols et des composés volatils. Ses nutriments et ses composés actifs en font un aliment extrêmement riche et bénéfique pour la santé (Pinson et Minker, 2012).

**Figure 14** : Photographie du rhizome du gingembre (Anonyme 3).

### ✓ Classification botanique

**Tableau 2** : Tableau représentant la taxonomie du gingembre (Faivre, Lejeune et al., 2006)

Classe	Liliopsida
Sous-classe	Zingiberidae
Ordre	Zingiberales
Famille	Zingiberaceae
Genre	Zingiber
Nom	Zingiber Officinales Roscoe

#### III.1.1.3. Détermination de la teneur en eau

Pour détermination de la teneur en eau de la tomate 5 g de matière végétale sont séchés à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  dans une étuve ventilée. L'abaissement du poids est suivi jusqu'à sa stabilisation.

La teneur en eau est calculée selon la formule suivante :

$$H\% = \frac{(P_{\text{initial}} - P_{\text{final}})}{P_{\text{initial}}} * 100$$

**H (%)** : taux d'humidité

**P<sub>initial</sub>** : poids de l'échantillon avant mise à l'étuve en gramme.

**P<sub>final</sub>** : poids de l'échantillon après mise à l'étuve en gramme.

#### III.1.3. Préparation et séchage du matériel végétal

##### III.1.3.1. Protocole de séchage de la tomate

➤ Préparation de l'échantillon :

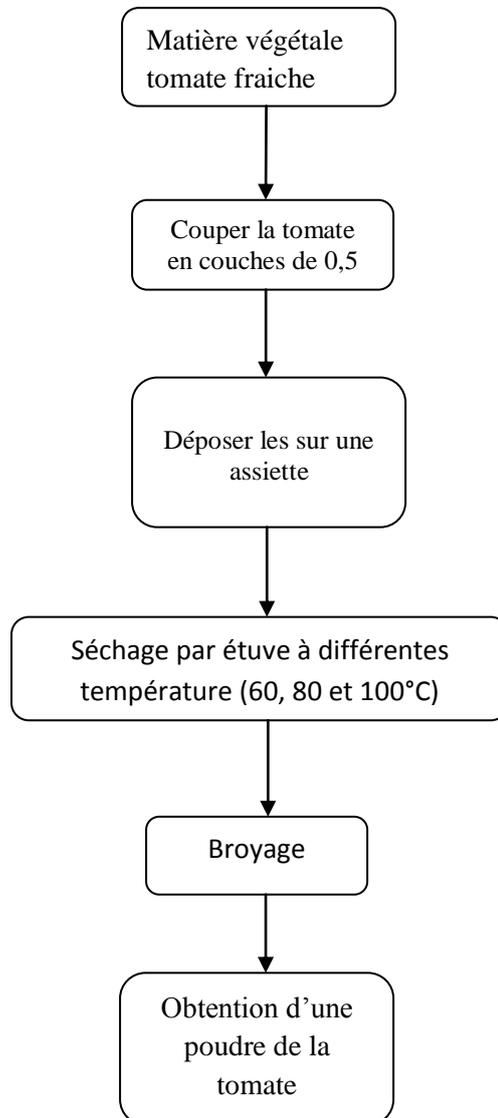
Des échantillons de 200 g ont été lavés une première fois avec l'eau de robinet, puis une deuxième fois avec de l'eau distillée pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides et autres contaminants. Ils sont ensuite découpés en tranches d'épaisseur de 0,5 cm qui ont été séchées à l'étuve (Memmert) à différentes température (60, 80 et  $100^\circ\text{C}$ ), (**figure 15**).

Pour le séchage les différentes tranches ont été étalées sur une assiette en verre, et les échantillons sont posés sur des étagères, puis des pesées sont effectuées chaque 5 min pour les

différentes températures citées précédemment au moyen d'une balance (RADWAG PS 1200. R2).

➤ Broyage du matériel végétal :

Après chaque opération de séchage, les échantillons séchés sont broyés à l'aide d'un broyeur électrique de type (IKA model A11 basic), afin d'obtenir une poudre qui est conservée dans des boîtes à conserve pour d'autres utilisations.



**Figure 15** : Schéma représentant le protocole de séchage de la tomate.



**Figure 16** : Photographie de l'échantillon de tomate à sécher par étuve

### III.1.3.2. Protocole de séchage de gingembre

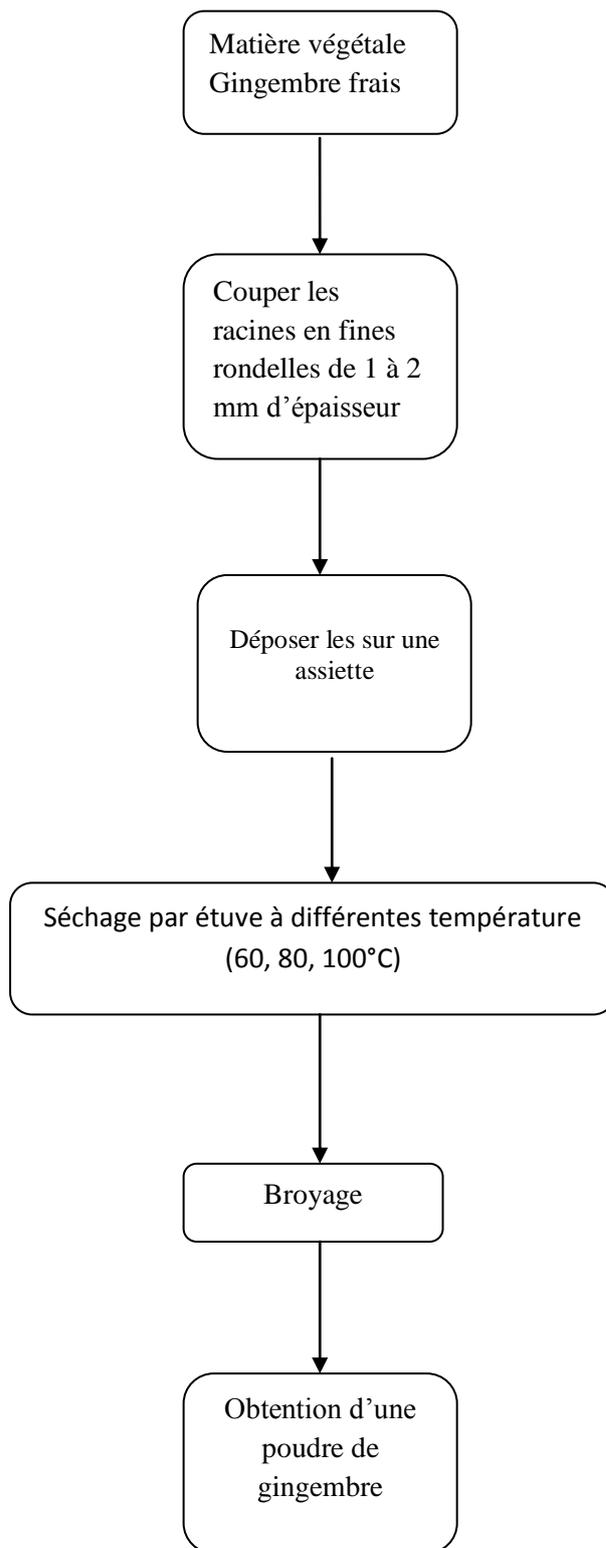
➤ Préparation de l'échantillon

Triage et lavage des racines de gingembre à l'eau distillée, suivi du Découpage des ces racines en fines tranches de 1 à 2 mm d'épaisseurs, ces dernières ont été mise à l'étuve de type (Memmert) pour le séchage a différentes températures (60, 80 et 100°C).

Des échantillons de 25g ont été pesés à l'aide d'une balance (RADWAG PS 1200. R2) jusqu'à masse constante pour chaque 30 min afin de suivre la cinétique de séchage.

➤ Broyage

Est réalisée a l'aide d'un broyeur électrique (IKA model A11 basic), afin d'obtenir une poudre de gingembre (**Figure 17**).



**Figure 17:** Schéma représentant le protocole de séchage de gingembre



**Figure 18:** Photographie des échantillons  
De gingembre



**figure 19:** Photographie d'une étuve

## III.2. Résultats et discussion

### III.2.1. Résultats

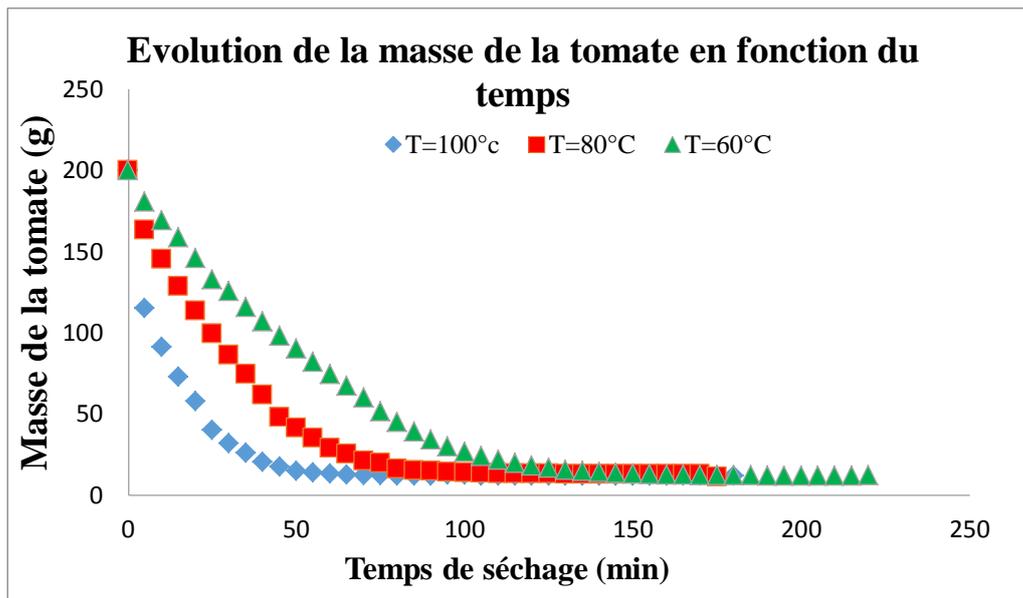
#### III.2.1.1. Cinétique de séchage

Le séchage est une technique très importante, utilisées sur certains fruits et légumes en l'occurrence la tomate et le gingembre, qui sont considérés comme étant des aliments périssables vu le taux élevé d'eau qu'elles renferment.

Afin de convertir ces aliments à un état stable et permettre leur stockage à température ambiante, le séchage consiste à enlever l'excès d'humidité de ces derniers par évaporation de l'eau qu'il contient. (Bonazzi et Dumoulin, 2011)

#### ➤ La tomate

Les résultats de l'évolution de la masse des différentes tranches de tomates séchées à l'étuve ventilée à différentes températures sont représentés dans la (figure 20)



**Figure 20:** Evolution de la masse de la tomate fonction du temps et de la température.

En observant la courbe de séchage conventionnel, on distingue deux phases. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et un deuxième où cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage.

Les résultats obtenus de la présente étude, ont révélés que le temps de séchage diminue avec l'élévation de la température.

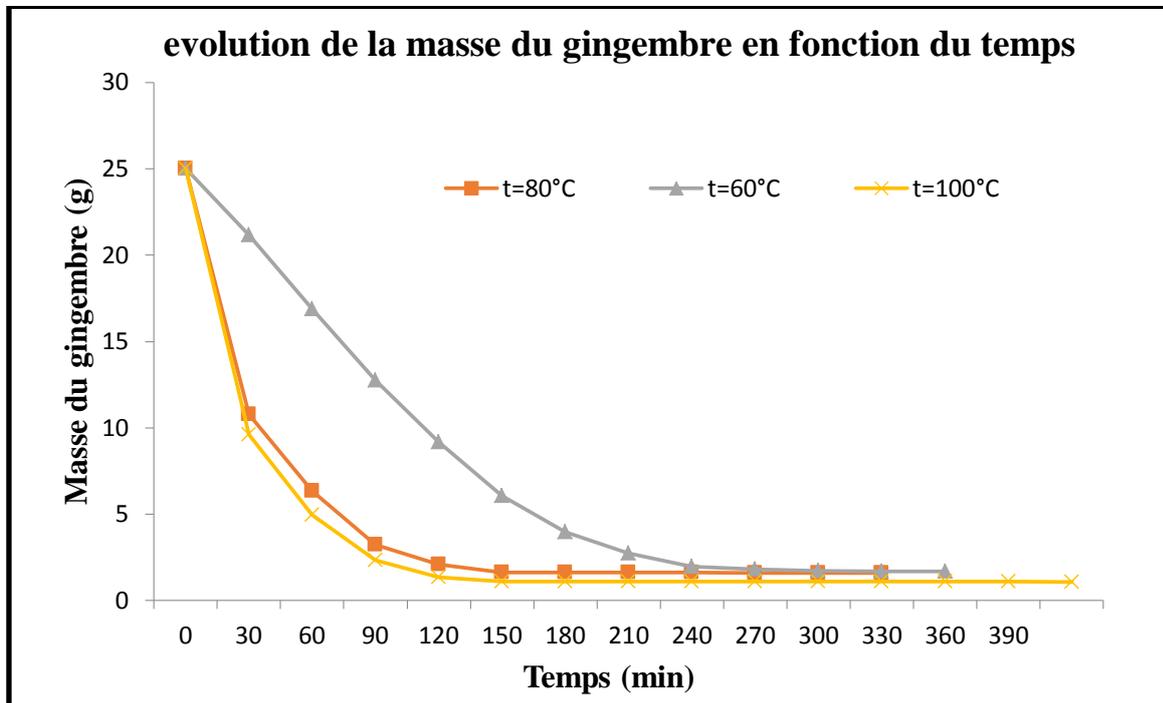
Par ailleurs à 100°C, la perte en eau contenue dans la tomate a été très rapide. En atteignant un temps de 60 min, une phase de stabilisation s'installe jusqu'à la fin du séchage. Tandis qu'à faible températures 80 et 60°C, la dégradation de la masse de l'aliment est moins rapide ce qui est confirmé par le temps 80 et 150 min avant la phase de stabilisation.

Il faut 6h pour une température de 100°C pour l'évaporation totale de l'eau contenue dans la matrice végétale, et environ 8h et 11h pour 60 et 80°C respectivement.

Les résultats obtenus peuvent être comparés à plusieurs travaux d'autres chercheurs tels que (Ferradji, Chabour *et al.*, 2011) dont l'étude s'est focalisée sur la figue et (Toğrul et Pehlivan, 2003) qui se sont intéressés au séchage de l'abricot.

### ➤ Le gingembre

Les résultats de l'évolution de la masse des différentes tranches de gingembre séchées à l'étuve ventilée à différentes températures sont représentés dans la (**figure 21**)



**Figure 21:** Evolution de la masse du gingembre en fonction du temps et de la température.

Les résultats obtenus de la courbe de séchage à l'étuve, montre le rapport inversement proportionnel entre le temps de séchage et la température, plus cette dernière est élevée, plus le temps de séchage est réduit. D'ailleurs, à température de 100 et 80°C, on a remarqué que la perte en eau dans le gingembre diminue rapidement, et après 130 min et 170 min de séchage respectivement apparait une phase de stabilisation, où la perte est assez lente ou même nulle jusqu'à la fin du séchage. Tandis que pour une température de 60°C, la perte en eau est moins rapide cela a été confirmé par le temps 390 min au totale qui ont été nécessaire pour avoir une matière sèche avec un poids stable.

Ces résultats peuvent êtres comparés à plusieurs travaux comme ceux réalisés sur la tomate, l'oignon et les raisins par (El-Sebaï, Aboul-Enein et al. 2002) et (Yaldýz and Ertekýn 2007).

### III.3. La modélisation

C'est une représentation ou interprétation abstraite d'une réalité ou d'un phénomène physique, qui est accessible à l'analyse et aux calculs.

Les modèles sont sous forme d'équations à une seule ou à plusieurs variables (**Allaire 2005**).

#### III.3.1 Les modèles empiriques

La méthode empirique est une méthode basée sur des données expérimentales et des analyses sans dimension. Les modèles empiriques de séchage montrent une relation directe entre la teneur moyenne en humidité et le temps de séchage.

Les modèles empiriques ne tiennent pas compte des fondamentaux du processus de séchage et ne sont en mesure d'expliquer que la courbe de séchage pour les conditions de séchage, mais pas les processus qui se produisent pendant le séchage, ils aident à comprendre la tendance des variables expérimentales/processus à la fois dépendantes et indépendantes.

Les principaux défis auxquels sont confrontés les modèles empiriques, c'est qu'ils dépendent en grande partie des données expérimentales et fournissent des informations limitées sur le transfert de chaleur et de masse au cours du processus de séchage (**Uwem Ekwere Inyang, Innocent Oseribho Oboh et al. 2018**)

Selon une étude réalisée en 2018 par les chercheurs cités précédemment, il existe environ 33 modèles empiriques.

#### III.3.2. Modélisation des cinétiques de séchage

Les données expérimentales de la teneur en eau de la tomate et du gingembre obtenues à différentes températures, ont été simulées à l'aide de deux modèles empiriques présentés dans (Tableau 3) :

**Tableau 3** : Tableau représentatif des modèles empiriques et leurs équations.

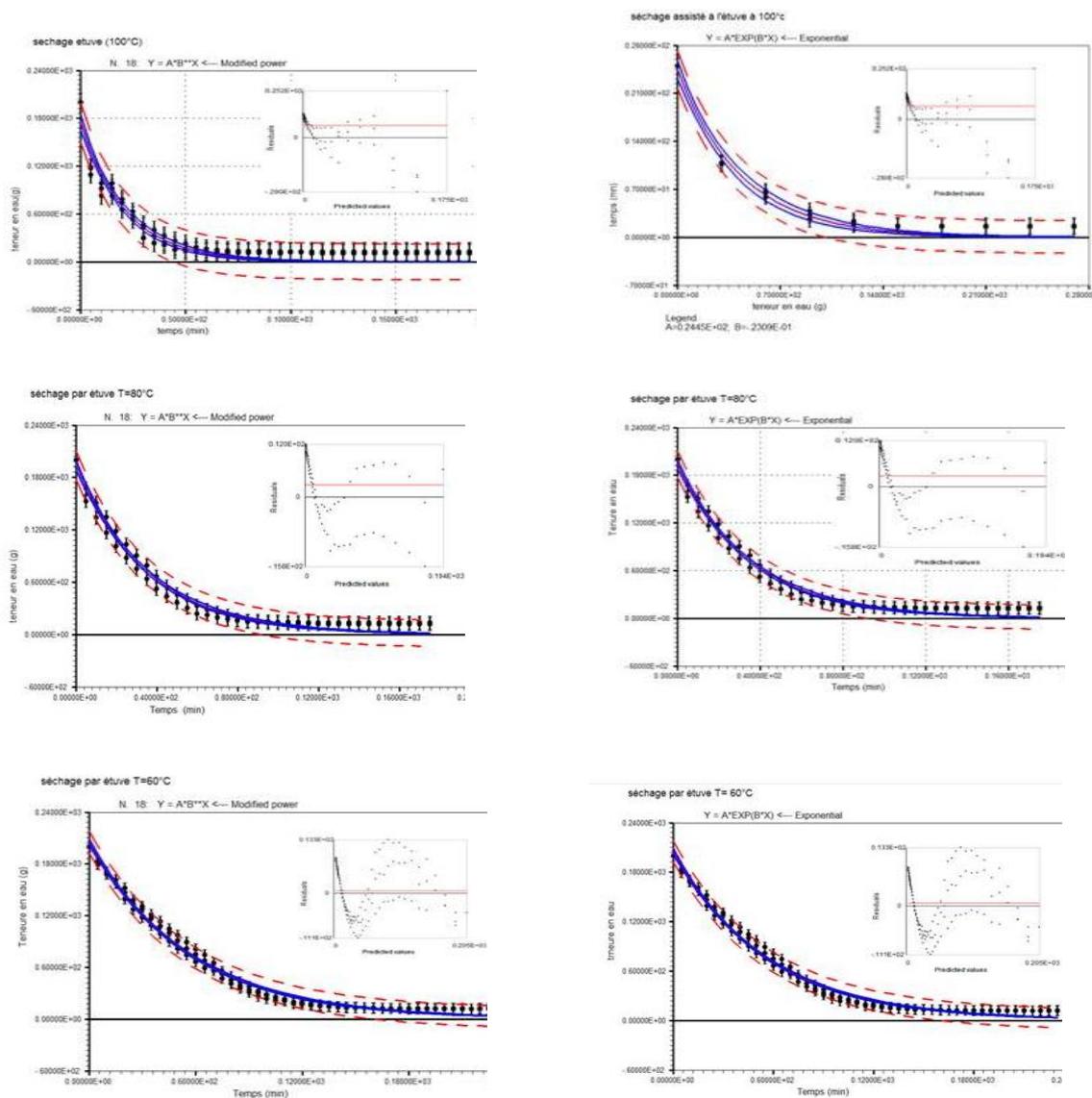
Nom du modèle	Equation du modèle
Modified Power	$y = AB^X$
Exponentiel	$y = Ae^{(BX)}$

### III.3.3. Résultats de la modélisation

La régression non linéaire est utilisée pour déterminer les constantes du modèle, l'efficacité de ce dernier est indiquée à partir d'un paramètre statistique qui est le facteur de corrélation  $R^2$ ; et l'analyse des résidus. L'analyse de cette régression a été effectuée au moyen d'un programme informatique « curve fitting » ou « lissage des courbes ».

#### ✓ Résultats de la modélisation de la courbe de séchage de la tomate

Les résultats sont représentés dans les courbes suivantes :



**Figure 22:** Modélisation de la cinétique de séchage de la tomate à différentes températures.

D'après les résultats obtenus, les modèles Modified Power et Exponentiel sont considérés comme les meilleurs pour décrire le comportement du séchage de la tomate par étuve.

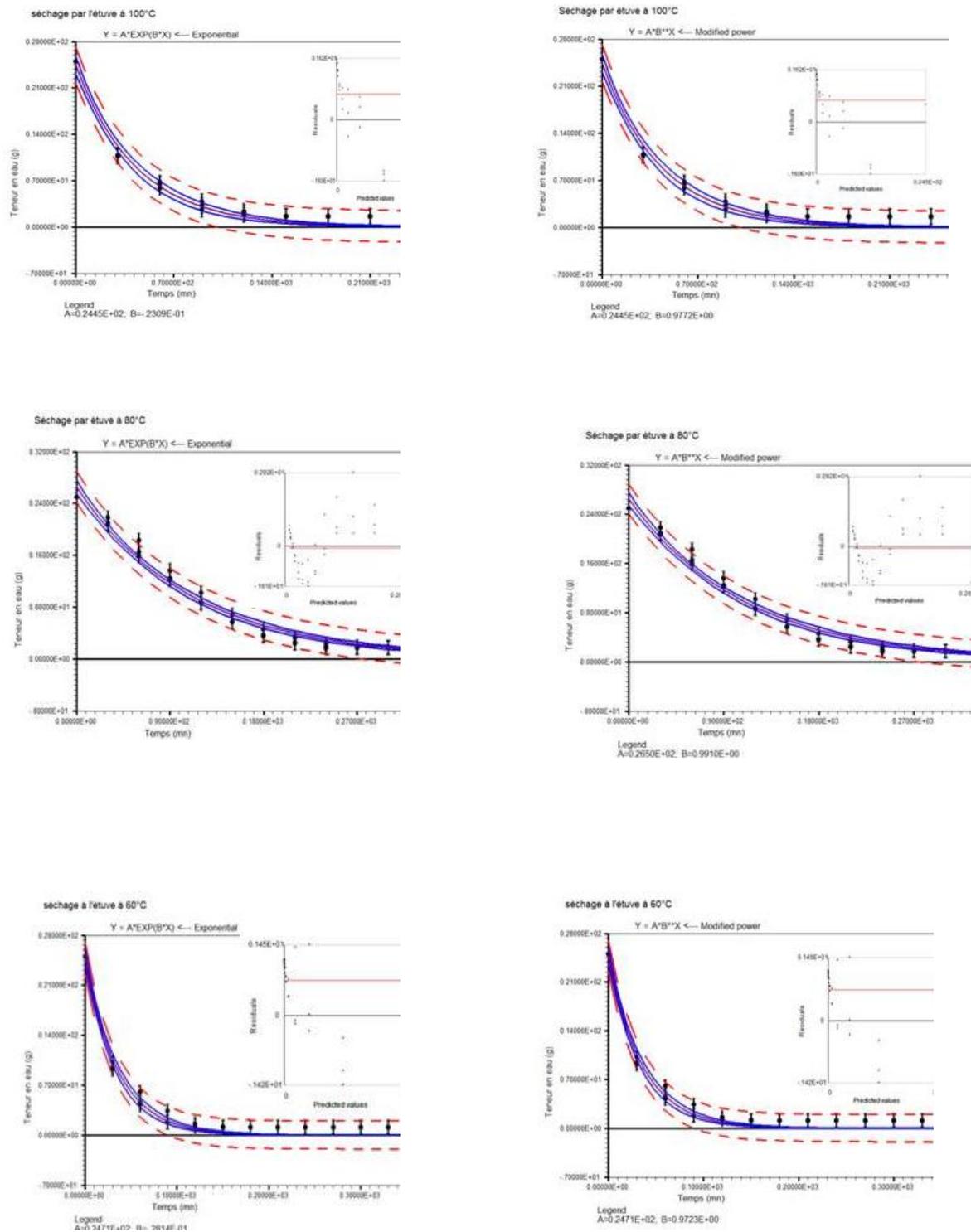
Les résultats de la modélisation des courbes de séchage sont présentés dans le (tableau 4), qui indique que le facteur de corrélation  $R^2$  est très proche de 1 donc elle est parfaite.

**Tableau 4:** Tableau des résultats de modélisation des courbes de la tomate.

	Nom du modèle	A	B	$R^2$
T =100°C	Modified power	$0,174.10^3$	$0,465.10^{-1}$	0,95
	Exponentiel	$0,174.10^3$	$-0,465.10^{-1}$	0,95
T=80°C	Modified power	$0,193.10^3$	$-0,280.10^{-1}$	0,98
	Exponentiel	$0,193.10^{-1}$	$- 0,280.10^{-1}$	0,98
T=60°C	Modified power	$0,240.10^3$	0,9823	0,98
	Exponentiel	$0,204.10^3$	$- 1,780.10^{-1}$	0,98

✓ **Résultats de la Modélisations de la courbe de séchage du gingembre**

Les résultats de la modélisation sont indiqués dans les courbes suivantes :



**Figure 23 :** Modélisation de la cinétique de séchage du gingembre à différentes températures.

Les résultats obtenus après la modélisation de la courbe de séchage du gingembre, montre que le  $R^2$  présente des valeurs proches de 1, ce qui indique que la corrélation est parfaite et que les modèles utilisés sont fiables.

Les résultats de la modélisation des courbes de séchage sont présentés dans le (Tableau 5).

**Tableau 5:** Tableau des résultats de modélisation des courbes de gingembre.

	Nom du modèle	A	B	$R^2$
T =100°C	Modified power	$0,244.10^2$	0,977	0,98
	Exponentiel	$0,244.10^2$	$-0,230.10^{-1}$	0,98
T=80°C	Modified power	$0,264.10^2$	0,990	0,98
	Exponentiel	$0,264.10^2$	$-0,908.10^{-2}$	0,98
T=60°C	Modified power	$0,247.10^2$	0,972	0,99
	Exponentiel	$0,247.10^2$	$-2,814.10^{-1}$	0,99

L'étude bibliographique réalisée a montré que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit du point de vu théorique ou expérimental.

Le séchage étant une opération unitaire de la technologie des industries agroalimentaires, il en existe plusieurs modes de séchage du plus lent au plus rapide.

Le séchage solaire reste le mode de séchage le plus répandu au monde ; avec des variantes de séchage direct et indirect.

La partie expérimentale est basée sur le séchage par étuve de deux produits agroalimentaires, la tomate et le gingembre, dont l'objectif est de suivre leur cinétique de séchage, et établir des courbes de la variation des teneurs en eau pour ces produits en fonction du temps et modélisation mathématique à partir des résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus à partir des courbes de séchage de la tomate et du gingembre, indiquent que la perte de teneur en eau est plus rapide à température de 100°C et les pertes sont de moins au moins rapide lorsque les températures sont de l'ordre de 60 et 80°C respectivement. D'ailleurs, il faut 6h pour que la tomate atteigne le seuil 6% de teneur en eau, contrairement au gingembre auquel il faut 5h et 30minutes.

D'après les résultats de la modélisation des courbes, utilisées à l'aide de deux modèles empirique montre que le facteur de corrélation  $R^2$  varient entre 0.95 et 0.99.

Les perspectives à entreprendre sont :

- ✓ Faire une étude comparative par rapport au séchage solaire, micro-ondes et autres types de séchages.
- ✓ Réalisation de tests phytochimiques.
- ✓ Application les coefficients obtenue à partir de la modélisation primaire et les projeter dans une modélisation secondaire, afin de déterminer l'énergie d'activation par l'utilisation de la loi d'Arrhenius d'une part et la diffusivité massique en ayant recours a la 2<sup>eme</sup> loi de Fick.
- ✓ Augmenter la gamme des températures d'étude.
- ✓ Faire une modélisation primaire et secondaire.

### Bibliographie

#### A

1-Allaire, 2005 : Analyse numérique et optimisation: Une introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique, Editions Ecole Polytechnique.

2- Amelin et Souriau, 2014 : Fabrication de cuiseurs et de séchoirs solaires, CTA.

3- Angèle, F. (2017). "Les Zingiberaceae en phytothérapie : l'exemple du gingembre."

#### B

4- Bonazzi et Dumoulin, 2011: "Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes."

5- Bonazzi, C., E. Dumoulin, et al., 2008: "Le séchage des produits alimentaires." *Industrie Alimentaire Agricole* **125**(03-04): 12-22.

6- Boroze, T. T. E, 2011: "Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux."

7- Boulemtafes, A, 2011: "Le séchage solaire des produits agricoles."

8- Boulemtafes et Benaouda, 2006: *Le Séchage Solaire des Plantes Médicinales et Aromatiques-Application au Séchage de la Menthe*, 1er Séminaire Maghrébin sur les Sciences et Technologies de Séchage, 'SMSTS.

9- Bénard, C. (2009). "Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate."

#### C

10- Cruz, J.-F *et al.*, 1988 : Conservation des grains en régions chaudes, Ministère de la coopération et du Développement.

11-Cronquist, A. and A. L. Takhtadzhian (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*, Columbia University Press.

#### E

## Références bibliographiques

---

12- Ekechukwu, O. V. et B. Norton, 1999 : "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology." *Energy conversion and management* 40(6): 615-655.

13- El-Sebaili, A., S. Aboul-Enein, *et al.*, 2002 : "Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables." *Energy* 27(9): 845-859.

14- Enrico Maltini, 2003: "La déshydratation osmotique et les produits de semi-confisage."

### F

15- Ferradji *et al.*, 2011: "Séchage solaire des figues."

16- Faivre, C., R. Lejeune, et al. (2006). "Monographie médicalisée, Zingiber officinale Roscoe."

### G

17- Gigon, F. (2012). "Le gingembre, une épice contre la nausée." *Phytothérapie* 10(2): 87-91.

### H

18- Heldman, D. R., D. B. Lund, et al. (2006). *Handbook of food engineering*, CRC press.

### K

19- Kisselmina, 2013: "Amélioration de la qualité de la tomate séché par assisté par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique".

### L

20- Léonard Angélique, 2002: le Séchage.

Faculté des Sciences Appliquées, Département de Chimie Appliquée, Laboratoire de Génie Chimique dans le cadre du Printemps des Sciences.

<http://www.ulg.ac.be/sciences> Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne – Hemes  
Les métiers de l'énergie – Ingénieurs de l'énergie (consulté le 29/04/2018).

21- Liu, Q., K. Suzuki, et al. (2000). "Antioxidant activities of natural 9-cis and synthetic all-trans  $\beta$ -carotene assessed by human neutrophil chemiluminescence." Nutrition Research 20(1): 5-14.

### M

22- Madhlopa *et al.*, 2002: "A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration." *Renewable energy* 27(1): 27-37.

23- Mann *et al.*, 2004: "Renewable and sustainable energy reviews.

24- Mathavi *et al.*, 2013 : "New trends in food processing." Int J Adv Eng Technol 5(2): 176-187.

25- Mennouche, 2006 : "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire." Mémoire de Magister, Université de Ouargla.

26- Midilli et Kucuk, 2003: "Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio." *Energy* 28(6): 539-556.

27- D. Mennouche, B. Bouchekima, et al. (2007). "SECHAGE SOLAIRE DE LA TOMATE DANS UN SECHOIR INDIRECT A

CONVECTION NATURELLE."

### N

28- Lahmari *et al.*, 2012: "Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra)."

29- Nguyen, 2015 : Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Lorient.

30- Nguyen, 2016: "Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux."

### P

31- Pangavhane et Sawhney, 2002 : "Review of research and development work on solar dryers for grape drying." *Energy conversion and management* **43**(1): 45-61.

32- Pinson et Minker, 2012 : "Gingembre et curcuma."

### *T*

33- Toğrul et Pehlivan, 2003 : "Modelling of drying kinetics of single apricot." *Journal of Food Engineering* **58**(1): 23-32.

34- Toussaint et Baudion, 2010 : "Biodiversité chez la tomate, stratégie de conservation et valorisation de la collection."

### *U*

35- Uwem Ekwere Inyang *et al.*, 2018: "Kinetic Models for Drying Techniques, Food materials."

### *V*

36- Vasseur, 2009 : "Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1)."

### *Y*

37- Yaldýz et Ertekýn, 2007: "Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables." *Drying Technology* **19**(3-4): 583-597.

### **Webographie:**

38- Anonyme 1:(<http://www.aliv-e.com>. Consulté le 30/06/2018). Art et histoire de la déshydratation.

39- Anonyme 2: (<https://www.leboncomplement.com>,consulté le 10/06/2018).

40- Anonyme 3: (<https://fr.dreamstime.com> consulté le 24/05/2018).



**Tableau 1** : tableau qui représente la composition de la tomate (Bénard, 2009).

Valeur nutritionnelle pour 100 g	
Énergie (kcal)	15 kcals
Protéines	0,68 g
Lipides	0,10 g
Glucides	2,80 g
Fibres	1,20 g
Eau	94 g

**Tableau 2** : tableau représentant les différents composés biochimique de la tomate (Bénard, 2009).

Acides gras saturés	0,028 g
Acides gras mono-insaturés	0,03 g
Acide aspartique	0,166 g
Acide glutamique	0,442 g
Alanine	0,034 g
Alpha-carotène	78
Thiamine (Vitamine B1)	0,06 mg
Riboflavine (Vitamine B2)	0,04 mg
Niacine (Vitamine B3 ou PP) en équivalent en niacine totale	0,65 NE

**Tableau 3** : tableau déterminant la composition du gingembre (Angèle, 2017).

Composant	Quantité	Min-Max
Eau	90.9 g	70.5 - NC g
Protéines	1.1 g	NC - 2.5 g
Lipides	1.1 g	0.7 - NC g
Acides gras saturés	0.09 g	-
Glucides	3.4 g	NC - 15.8 g
Sucre	1 g	NC - 1.7 g
Fibres	2.7 g	2 - NC g
Polyphénols totaux	0.2 mg	-
Equivalent Vitamine A	7.17 µg	-
Vitamine B1	0.018 mg	NC - 0.026 mg
Calcium	11 mg	NC - 18 mg

## Résumé

Le séchage est un procédé qui permet la déshydratation des aliments, afin de faciliter leur conservation et leur stockage. L'utilisation de séchoirs solaire demeure un élément très important dans les industries agroalimentaires, avec des variantes de séchage direct et indirect.

Dans cette étude expérimentale effectuée sur deux matrices végétales (*Lycopersicon esculentum* Mill et *Zingiber officinale*) au moyen d'une étuve ventilée, le but est le suivi ainsi que la modélisation des cinétiques de séchage de ces deux matrices en fonction de deux paramètres (la température et le temps de séchage).

Les résultats obtenus ont montré que le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la température, dans le cas de la tomate le séchage à 100°C a pris 6h. Par contre 5h et 30minutes ont été suffisantes pour le séchage du gingembre à 100°C.

Après avoir effectué la modélisation des cinétiques à l'aide de deux modèles empiriques, on a enregistré un facteur de corrélation variant entre 0.95 et 0.99.

Mots clés : séchage, séchoirs solaires, tomate, gingembre, modélisation, modèles empiriques.

## Abstract

In this experimental study carried out on two plant matrices (*Lycopersicon esculentum* Mill and *Zingiber officinale*) using a ventilated oven, the goal is to monitor and model the drying kinetics of these two matrices according to two parameters (temperature and the drying time).

The results obtained showed that the drying time decreases with increasing temperature, in the case of tomato drying at 100 ° C took 6 hours. However, 5h and 30minutes were sufficient for drying ginger at 100 ° C.

After modeling kinetics using two empirical models, a correlation factor is varied between 0.95 and 0.99 was recorded.

