



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de**



**La Recherche Scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de : Génie Mécanique**

## **Mémoire**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Spécialité : Energie renouvelable en mécanique**

**Présenté par :**

**OUGGAD Nidhal**

**Intitulé :**

**Étude expérimentale des procédés de  
séchage des produits agricoles locaux**

**Soutenue le : 14/06/2026**

**Dr. BOUSBIA SALAH Seif eddine**

**Dr. BENHAMZA Abderrahman**

**Dr. BERKAN Houda**

**Encadreur**

**Président**

**Examineur**

**Année universitaire 2025/2026**

## ***Remerciements***

---

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, dont la miséricorde et la guidance infinies ont éclairé notre chemin tout au long de ce parcours universitaire, jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre estimé directeur de thèse, *Dr. BOUSBIA SALAH Seif eddine*, pour sa confiance et pour avoir accepté de la diriger. Ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et son soutien indéfectible ont été essentiels à la réussite de ce mémoire.

Nous exprimons également notre sincère gratitude à tous les membres du corps professoral du Département de génie mécanique de l'Université El Oued pour la qualité de l'enseignement reçu et leur dévouement, qui ont grandement enrichi notre expérience universitaire.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de quelque manière que ce soit, à la réalisation de cette thèse, que ce soit par leur aide, leurs encouragements ou leur présence.

## *Dédicace*

---

À ceux que Dieu a couronnés de dignité et de respect, à mon soutien et à ma fierté, mes chers parents ; que Dieu vous garde comme une couronne sur ma tête.

À la source de bénédiction et de tendresse, ma grand-mère bien-aimée, que Dieu vous accorde santé et bien-être.

À ceux qui ont partagé mon chemin à chaque étape, mes frères et sœurs, et à ma famille élargie, mes oncles et tantes maternels et paternels ; à vous, je vous offre tout mon amour et ma reconnaissance.

À celle qui a nourri mon enfance avec le plus grand dévouement, mon vertueux professeur, je vous exprime ma plus profonde gratitude.

Aux phares du savoir, mes estimés professeurs, et tout particulièrement à mon directeur de thèse pour ses précieux conseils et sa patience tout au long de la réalisation de ce travail.

À mes compagnons de route et aux souvenirs précieux, mes fidèles amis ; puissiez-vous toujours être un trésor pour moi.

À vous tous, je dédie le fruit de ce modeste effort.

## Abstract

This work represents a significant experimental contribution to the study of thermal performance enhancement in an indirect solar dryer and to the determination of the most suitable pretreatment method for local agricultural products in El Oued Province. The experimental investigations were conducted at the Faculty of Technology, Chahid Hamma Lakhdar University of El Oued.

The experimental results demonstrated that the addition of a thermal energy storage material increased the dryer temperature by 8.1 °C at the solar dryer outlet and by 6.8 °C inside the drying chamber. Furthermore, the experiments showed that blanching the samples in hot water at temperatures ranging from 90 to 100 °C reduced the drying time and provided higher processing efficiency, resulting in a weight loss of 71.4% for local potato slices.

The findings confirm the effectiveness of the proposed system in enhancing the performance of the solar dryer and identifying the most appropriate pretreatment method for local agricultural products through the use of solar energy and thermal energy storage.

**Keywords:** solar drying, indirect solar dryer, sample pretreatment, local agricultural product, thermal efficiency, thermal energy storage.

## المخلص:

يشكل هذا العمل مساهمةً تجريبيةً في دراسة تحسين الكفاءة الحرارية للمجفف الشمسي غير المباشر وتحديد أنسب طرق المعالجة الأولية للمنتجات الزراعية المحلية في ولاية الوادي. وقد أجريت التجارب بجامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي، بكلية التكنولوجيا، حيث أظهرت النتائج التجريبية ارتفاع درجة حرارة المجفف بعد إضافة مادة للتخزين الحراري بمقدار 8.1 °م عند مخرج المجفف الشمسي، وبمقدار 6.8 °م داخل غرفة التجفيف. كما أظهرت التجارب أن المعالجة الأولية للعينات بالسلق في الماء الساخن بدرجة

حرارة تتراوح بين 90 و 110 °م تسمح بتقليل زمن التجفيف وتحقيق كفاءة أعلى، حيث بلغت نسبة خسارة الوزن 71.4٪ عند تجفيف شرائح البطاطا المحلية.

وتؤكد هذه النتائج فعالية النظام المقترح في تحسين أداء المجفف الشمسي وتحديد أكثر طرق المعالجة الأولية ملاءمة للمنتجات الزراعية المحلية، من خلال الاستفادة من الطاقة الشمسية وتقنية تخزين الطاقة الحرارية.

**الكلمات المفتاحية:** التجفيف الشمسي، المجفف الشمسي غير المباشر، المعالجة الأولية للعينات، المنتجات الزراعية المحلية، الكفاءة الحرارية، التخزين الحراري.

## Résumé

Ce travail constitue une contribution expérimentale importante à l'étude de l'amélioration des performances thermiques d'un séchoir solaire indirect ainsi qu'à la détermination du traitement préliminaire le plus approprié pour les produits agricoles locaux de la wilaya d'El Oued. Les expériences ont été réalisées à l'Université Chahid Hamma Lakhdar d'El Oued, au sein de la Faculté de Technologie.

Les résultats expérimentaux ont montré une augmentation de la température du séchoir après l'ajout d'un matériau de stockage thermique, atteignant 8,1 °C à la sortie du séchoir solaire et 6,8 °C à l'intérieur de la chambre de séchage. Les essais ont également révélé que le prétraitement des échantillons par blanchiment dans de l'eau chaude à une température comprise entre 90 et 100 °C permet de réduire le temps de séchage et d'obtenir une meilleure efficacité, avec une perte de masse atteignant 71,4 % pour les tranches de pomme de terre locale.

Les résultats confirment ainsi l'efficacité du système proposé pour améliorer les performances du séchoir solaire et identifier le traitement préliminaire le plus adapté aux produits agricoles locaux grâce à l'utilisation de l'énergie solaire et du stockage thermique.

**Mots-clés :** séchage solaire, séchoir solaire indirect, prétraitement des échantillons, produit agricole local, efficacité thermique, stockage thermique.

## Liste des figures

---

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Séchoirs solaires.....                                                                                                               | 4  |
| Figure 2. Séchoirs solaires directs.....                                                                                                       | 5  |
| Figure 3. Séchoirs solaires directs.....                                                                                                       | 6  |
| Figure 4. Séchoirs solaires indirects.....                                                                                                     | 7  |
| Figure 5. Séchoirs solaires mixtes.....                                                                                                        | 8  |
| Figure 6. Séchoirs solaires hybrides.....                                                                                                      | 9  |
| Figure 7. Méthodes de prétraitement pour le séchage des produits alimentaires.....                                                             | 14 |
| Figure 8. Nettoyage et lavage .....                                                                                                            | 15 |
| Figure 9. Découpe et disposition des fruits à l'intérieur du séchoir solaire .....                                                             | 16 |
| Figure 10. Prétraitement cardiaque par chauffage de l'eau.....                                                                                 | 17 |
| Figure 11. Prétraitement du séchage des fruits. ....                                                                                           | 18 |
| Figure 12. Comparaison entre le prétraitement au soufre et sans soufre .....                                                                   | 18 |
| Figure 13. Tremper les tranches de pomme dans une solution d'acide citrique.....                                                               | 19 |
| Figure 14. Principe du séchage osmotique .....                                                                                                 | 20 |
| Figure 15. Diagramme de flux des étapes du prétraitement et du séchage osmotique.....                                                          | 20 |
| Figure 16. Schéma du prétraitement et du séchage hybride des pommes par ultrasons. ....                                                        | 21 |
| Figure 17. Etapes de prétraitement des produits alimentaires. ....                                                                             | 22 |
| Figure 18. Élimination de l'humidité superficielle des échantillons à l'aide d'un four à micro-ondes.....                                      | 23 |
| Figure 19. Carte de la province d'El Oued.....                                                                                                 | 24 |
| Figure 20. Le séchoir solaire utilisé dans l'expérience .....                                                                                  | 26 |
| Figure 21. Schéma du processus de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire                                                      | 28 |
| Figure 22. Matériau de stockage thermique .....                                                                                                | 29 |
| Figure 23. Ajout de matériau de stockage thermique à l'intérieur du capteur solaire .....                                                      | 30 |
| Figure 24. Les quatre échantillons lors de la procédure de prétraitement... ..                                                                 | 31 |
| Figure 25. Schéma du processus de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire.                                                     | 32 |
| Figure 26. Poids des échantillons après le prétraitement.....                                                                                  | 33 |
| Figure 27. Courbe montrant la variation du rayonnement solaire et de la température ambiante en fonction du temps... ..                        | 33 |
| Figure 28. Courbe montrant la variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire sans matériau de stockage thermique ..... | 35 |

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 29. Courbe montrant la variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire avec matériau de stockage thermique ..... | 36 |
| Figure 30. Évolution de T3 (sortie du capteur) : sans vs avec matériau de s : Stockage thermique.....                                          | 37 |
| Figure 31. Évolution de T4 (chambre de séchage) : sans vs avec matériau de stockage thermique .....                                            | 38 |
| Figure 32. Comparaison simultanée de T3 et T4 pour les deux configurations expérimentales .....                                                | 39 |
| Figure 33. Évolution de la teneur en eau M1 : Sel (NaCl).....                                                                                  | 42 |
| Figure 34. Évolution de la teneur en eau M2 : Acide ascorbique .....                                                                           | 43 |
| Figure 35. Évolution de la teneur en eau M3 : Blanchiment à l'eau chaude .....                                                                 | 44 |
| Figure 36. Évolution de la teneur en eau M4 : Rinçage à l'eau froide .....                                                                     | 45 |
| Figure 37. Comparaison des quatre courbes de séchage selon le prétraitement .....                                                              | 46 |

## Liste des tableaux

---

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1. Appareils utilisés pour les mesures. .... | 27 |
|------------------------------------------------------|----|

# Table des matières

---

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Remerciements.....</b>         |          |
| <b>Dédicace.....</b>              |          |
| <b>Abstract.....</b>              |          |
| <b>Liste des figures .....</b>    |          |
| <b>Liste tableaux .....</b>       |          |
| <b>Table des matières .....</b>   |          |
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>1</b> |

## **Chapitre I : Le séchage et les séchoirs solaires**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction.....                                      | 3  |
| I.2. Les principes de base de séchage.....                  | 3  |
| I.3. Facteurs qui influencent le séchage.....               | 3  |
| I. 4. Avantages et problèmes liés au séchage .....          | 4  |
| I.5. Types des séchoirs solaires .....                      | 5  |
| I.5.1. Classification selon le mode de chauffage.....       | 5  |
| I.5.2. Applications.....                                    | 10 |
| I.5.3. Classification par mode de circulation de l'air..... | 11 |
| I.5.3.1. Séchoirs actifs (convection forcée) .....          | 11 |
| I.5.3.2. Variantes technologiques spécifiques... ..         | 11 |
| I.6. Conclusion.....                                        | 12 |

## **Chapitre II : Techniques de prétraitement des produits agricoles avant le séchage solaire**

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II. 1.Introduction .....                                                                                        | 14 |
| II.2. Techniques de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire des produits agricoles locaux ..... | 14 |
| II.2.1. Nettoyage et lavage.....                                                                                | 15 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.2. Épluchage et découpage .....                                                                 | 16 |
| II.2.3. Blanchiment.....                                                                             | 17 |
| II.2.4. Prétraitements chimiques .....                                                               | 18 |
| II.2.5. Déshydratation osmotique.....                                                                | 20 |
| II.2.6. Techniques physiques modernes.....                                                           | 21 |
| II.2.7. Élimination de l'humidité superficielle .....                                                | 23 |
| II.3. Caractéristiques géographiques, climatiques et environnementales de la zone expérimentale..... | 24 |
| II.4. Conclusion.....                                                                                | 26 |

### **Chapitre III : Résultats de l'étude expérimentale**

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction .....                                                                                                             | 27 |
| III.2. Présentation du séchoir solaire.....                                                                                           | 27 |
| III.3. Appareils de mesures utilisées dans l'expérience.....                                                                          | 28 |
| III.4. Emplacement du thermocouple pour la mesure expérimentale.....                                                                  | 29 |
| III.5. Amélioration de l'efficacité thermique du séchoir solaire .....                                                                | 30 |
| III.6. Présentation des techniques de prétraitement des échantillons .....                                                            | 31 |
| III.7. Discussion et résultats.....                                                                                                   | 35 |
| III.7.1. Les conditions environnementales de l'expérience .....                                                                       | 35 |
| III.7.2. Variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire (Cas 1 : Pas de matériau de stockage thermique)...    | 36 |
| III.7.3. Variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire (Cas 2 : Avec de matériau de stockage thermique)..... | 37 |
| III.7.4. Analyse comparative des températures du séchoir solaire.....                                                                 | 38 |
| III.7.4.1. Comparaison de la température à la sortie du capteur solaire.....                                                          | 38 |
| III.7.4.1.2. Comparaison quantitative T3 .....                                                                                        | 39 |
| III.7.4.2. Comparaison de la température intérieure de la chambre de séchage (T4).....                                                | 39 |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.7.4.2.1. Comparaison quantitative T4.....                                                    | 40        |
| III.7.4.3. Vue d'ensemble Superposition des quatre courbes. ....                                 | 40        |
| III.7.4.3.1. Discussion comparative.....                                                         | 41        |
| III.7.5. Résultats des expériences le prétraitement des tranches de pommes de terre locales .... | 42        |
| III.7.5.1. Représentation graphique Courbe M1 Sel (NaCl) .....                                   | 43        |
| III.7.5.2. Représentation graphique Courbe M2 Acide ascorbique .....                             | 44        |
| III.7.5.3. Représentation graphique Courbe M3 Blanchiment à l'eau chaude .....                   | 45        |
| III.7.5.4. Représentation graphique Courbe M4 Rinçage à l'eau froide.....                        | 46        |
| III.7.5.5. Courbe de comparaison globale des prétraitements.....                                 | 47        |
| III.8. Conclusion.....                                                                           | 48        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                                                 | <b>49</b> |
| <b>Références</b>                                                                                |           |

# ***Introduction Générale***

## **Introduction Générale**

Le séchage solaire est considéré comme l'une des techniques les plus importantes de conservation des produits agricoles et alimentaires. Il constitue un moyen efficace et économique de prolonger la durée de conservation des produits tout en préservant leur qualité. Cette méthode repose sur l'utilisation de l'énergie solaire pour éliminer une partie de l'eau contenue dans les produits, ce qui réduit l'activité des micro-organismes et des agents responsables de leur détérioration. L'importance du séchage solaire se manifeste à travers les aspects suivants :

L'importance du séchage réside dans la réduction de la teneur en humidité des produits alimentaires à des niveaux qui limitent la croissance des micro-organismes et l'activité des enzymes responsables de leur détérioration.. Plus le taux d'humidité diminue, plus le risque de prolifération des bactéries et des champignons est faible, ce qui contribue à prolonger la durée de conservation des produits et à améliorer leur sécurité sanitaire. Les séchoirs solaires offrent également une meilleure protection que le séchage traditionnel à l'air libre, en réduisant l'exposition des produits à la poussière, aux insectes et à divers contaminants. [1]

Le séchage solaire constitue une solution efficace, économique et durable pour la conservation des produits agricoles et alimentaires, particulièrement dans les régions rurales et isolées dépourvues d'accès aux réseaux électriques. En réduisant le poids et le volume des produits, il facilite leur transport et leur stockage tout en diminuant les coûts de conservation. Basé sur l'utilisation d'une énergie gratuite et renouvelable, il ne nécessite ni combustibles fossiles ni équipements complexes, ce qui le rend particulièrement adapté aux régions fortement ensoleillées. De plus, les séchoirs solaires modernes, notamment indirects, permettent de préserver les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits en limitant les effets du rayonnement solaire direct, contribuant ainsi au maintien de leur couleur, de leur texture, de leur odeur et de certaines vitamines sensibles à la chaleur et à la lumière. Cette technologie favorise également la valorisation des produits locaux, la réduction des pertes après récolte et la protection de l'environnement. [1]

**Cette mémoire a pour objectif** d'améliorer l'efficacité thermique du séchoir solaire grâce à l'intégration de matériaux de stockage thermique, ainsi que de déterminer le prétraitement le plus adapté aux échantillons avant séchage, afin d'optimiser le procédé et la qualité du produit final.

La structure de ce mémoire se présente comme suit :

- **Introduction générale**, qui constitue une introduction et une présentation du cadre et des objectifs de notre mémoire.
- **Chapitre I** : Présentation du séchage et des séchoirs solaires, en mettant l'accent sur les principes fondamentaux du procédé de séchage ainsi que sur les différents types de séchoirs solaires et leurs caractéristiques de fonctionnement.
- **Chapitre II** : Étude des techniques de prétraitement des produits agricoles avant le séchage solaire, en présentant les principales méthodes utilisées afin d'améliorer la qualité du produit et d'optimiser le processus de séchage.
- **Chapitre III** : Présentation des résultats de l'étude expérimentale, incluant l'analyse des performances du séchoir solaire et l'évaluation de l'impact du stockage thermique et des prétraitements sur le produit traité.
- **Conclusion générale**, qui résume les principaux résultats et conclusions de ce travail.

# ***Chapitre I :***

## ***Le séchage et les séchoirs solaires***

## **I.1. Introduction**

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur. Plusieurs techniques sont possibles pour sécher et conserver les récoltes : le séchage sur champ au soleil, les cabines de déshydratation, l'ensilage pour les fourrages et le séchage en grange. Contrairement aux combustibles fossiles à l'avenir incertain, le soleil est une source d'énergie gratuite et inépuisable. Le séchage en grange permet d'obtenir des produits de qualité constante, en grandes quantités et affranchit l'agriculteur des contraintes météorologiques, pour un coût de fonctionnement modique. Il offre de nouveaux débouchés aux produits. Les utilisations sont multiples, il est possible d'y sécher fourrages, plantes aromatiques, graines, céréales, fruits et légumes. [2]

La technique de séchage traditionnelle, qui est généralement réalisée sur sol, est la plus utilisée dans les pays en voie de développement pour préserver les denrées alimentaires, telles que les céréales, les légumes, la viande et le poisson, etc. Dans cette méthode traditionnelle, le taux de séchage est contrôlé par des facteurs externes, tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative, et des facteurs internes [2]

## **I.2. Les principes de base de sechage**

- Phénomènes physiques : Deux transferts ont lieu à la fois lors du séchage :

Transfert de chaleur Apport d'énergie thermique de l'air vers le produit pour vaporiser l'eau.  
[3]

Transfert de masse L'eau migre de l'intérieur du produit vers sa surface, puis de la surface vers l'air ambiant. [3]

- Mesure de l'activité de l'eau ( $a_w$ ) : Le but, c'est de réduire l'activité de l'eau à moins de 0,5, ce qui empêche la croissance des micro-organismes microscopiques (bactéries, champignons) et freine les réactions enzymatiques de dégradation. [3]

## **I.3. Facteurs qui influencent le séchage**

Le rendement lors du séchage est influencé par des paramètres externes et internes :

- Paramètres externes (Air) : la température (le paramètre le plus important), la vitesse de l'air et la teneur relative en humidité. À mesure que l'air devient chaud et sec, il acquiert des propriétés absorbantes d'humidité accrues. [3]
- Paramètres internes (Produit) : la composition du produit, sa structure poreuse, la quantité d'humidité initiale qu'il contient, mais surtout l'épaisseur du matériau. Le mince matériau offre moins de résistance à la diffusion. [3]



Figure 1. Séchoirs solaires [4]

#### **I.4. Avantages et problèmes liés au séchage**

- Economie des pertes après la récolte : elle est nécessaire surtout aux pays en développement, où près de 30-40% de produits ne sont pas préservés en raison de la perte post-récolte. [3]
- Bénéfices liés à la logistique : Le produit séché perd ses propriétés massives, perdant jusqu'à 80% de sa masse originale, dont environ 5 fois moins qu'en état de fraîcheur. Le transport et stockage n'affecteront pas sa qualité. [3]
- Problème lié à la consommation d'énergie : Le séchage est un processus d'utilisation de beaucoup d'énergie (12 à 25 % de la consommation industrielle des pays développés), ce qui explique l'utilisation d'énergie solaire, étant non-exhaustible et gratuite. [3]

- **Disavantages :** L'utilisation d'un mauvais équipement de séchage peut causer perte en vitamines (A et C), arômes, colorants (matière brunie) et texture (durcissement). [3]

## **I.5. Les type des séchoirs solaires**

Les séchoirs solaires sont classés en plusieurs catégories selon leur conception, le mode de transfert de chaleur vers le produit et celui de circulation de l'air.

Voici les principaux types de séchoirs solaires identifiés dans les sources :

### **I.5.1. Classification selon le mode de chauffage**

- **Séchoirs solaires directs (DSD)**

Dans cette technique, le produit est placé sur des étagères situées dans un compartiment bien isolé avec une couverture faite de verre ou de matière plastique. La chaleur produite par l'irradiation du produit par les rayons solaires donne naissance à la chaleur par absorption. Malgré leur simplicité et coût abordable, ces séchoirs pourraient causer des dégradations des vitamines A et C en raison de l'exposition au soleil. [2]



Figure 2. Séchoirs solaires directs [5]



Figure 3. Séchoirs solaires directs [5]

- **Séchoirs solaires indirects (ISD) :**

Le produit est placé sur des plateaux dans une chambre de séchage opaque (à l'abri de la lumière). L'air est préalablement chauffé dans un capteur solaire séparé, puis dirigé vers la chambre de séchage. Ce mode préserve mieux la couleur, les arômes et les composés actifs, car le produit n'est pas exposé directement au soleil. [2]

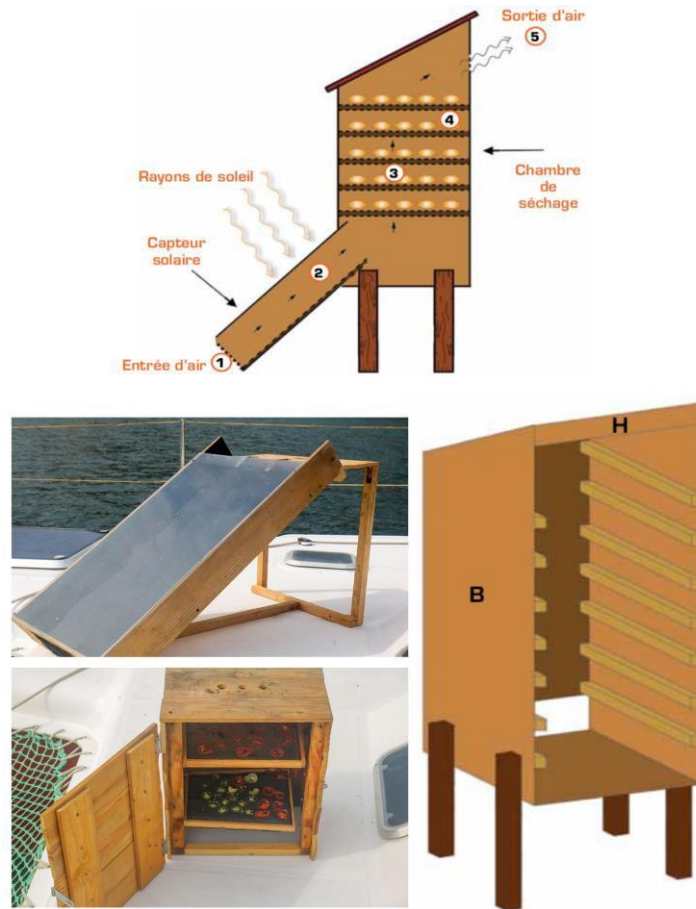


Figure 4. Séchoirs solaires indirects [6]

1- Entrée d'air (Entrée d'air): Il s'agit de l'entrée par laquelle l'air extérieur, qui est sec et frais, s'infiltré dans l'appareil.

2- Capteur solaire (Capteur solaire): Il s'agit de la surface inclinée et en verre de la machine. Elle se charge de collecter la lumière du soleil et la chaleur du vent qui passe au travers d'elle.

3- Chambre de séchage (Chambre de séchage): Il s'agit de la surface verticale principale de la machine où sont placés des objets secs. Du vent y circule.

4- Claies de séchage (Claies): C'est un plateau utilisé pour poser divers articles en vue de leur séchage. Elle est placée verticalement dans la machine.

5- Sortie d'air (Sortie d'air): Il s'agit de l'ouverture supérieure de la chambre de séchage. Elle fait ressortir le vent humide sorti de la chambre.

- **Séchoirs solaires mixtes (MSD) :**

Ces systèmes combinent les principes des modes direct et indirect. Le produit subit l'action simultanée du rayonnement direct, à travers une couverture transparente, et de l'air préchauffé provenant d'un capteur solaire. [2]

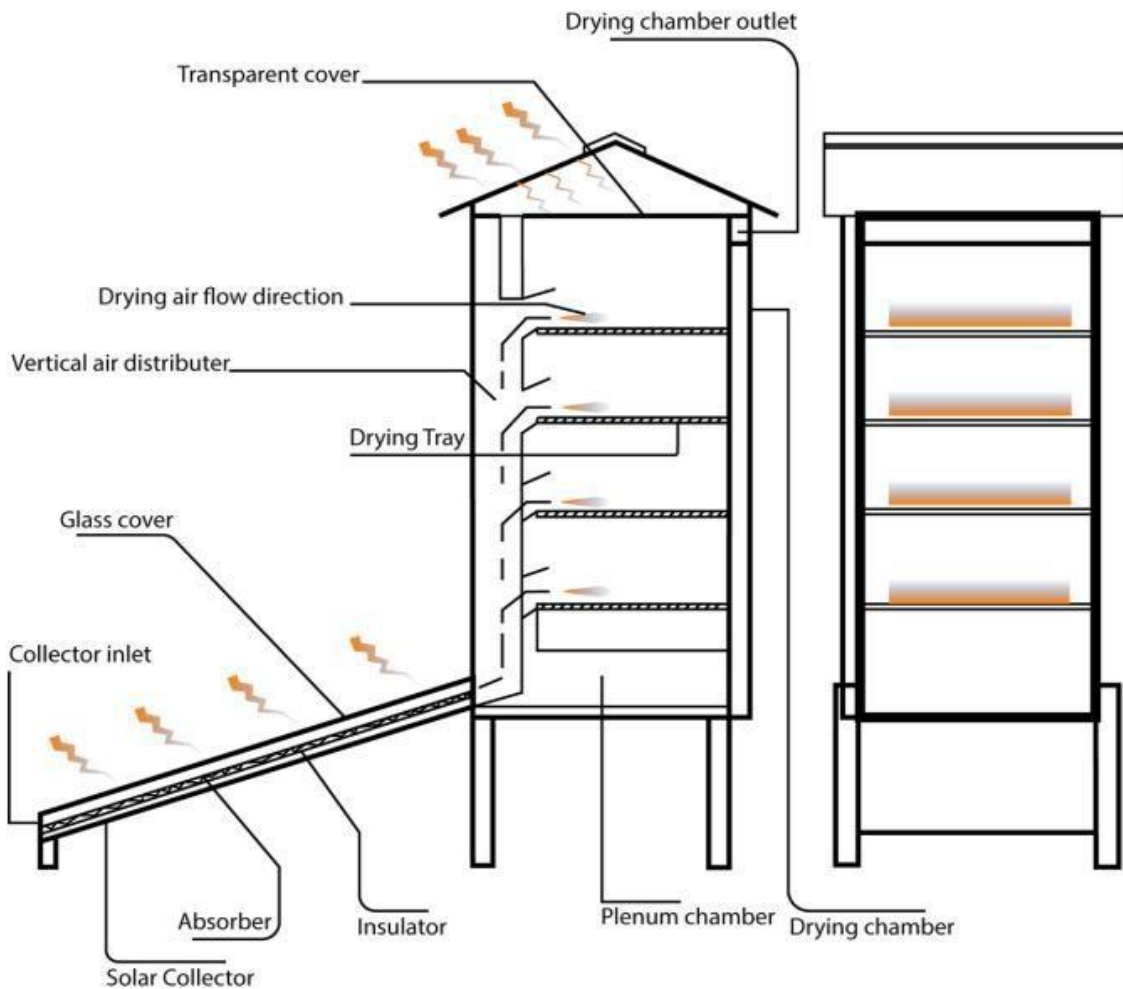


Figure 5. Séchoirs solaires mixtes [7]

Un séchoir solaire combiné se compose de deux unités principales intégrées : un capteur solaire et une chambre de séchage.

- **Séchoirs solaires hybrides (HSD) :**

Ils intègrent une source d'énergie d'appoint (biomasse, électricité, fioul ou chaleur résiduelle) en complément de l'énergie solaire. Cela permet un fonctionnement continu de jour comme de nuit, par mauvais temps, garantissant une meilleure productivité et un contrôle optimal du processus. [2]

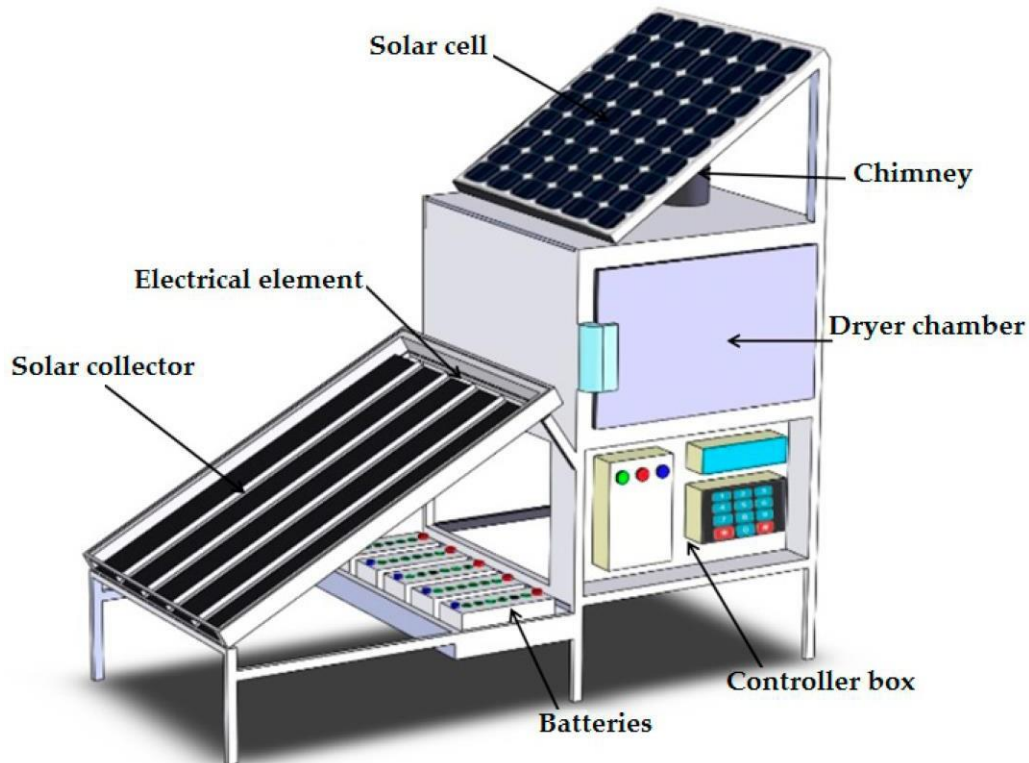


Figure 6. Séchoirs solaires hybrides [8]

**- Composants du système :**

Panneaux solaires : Convertissent la lumière du soleil en électricité pour alimenter les composants mécaniques et électroniques du système (ventilateurs, ordinateur, etc.).

Batteries : Stockent l'énergie électrique produite par les panneaux pour assurer le fonctionnement continu du système la nuit ou par temps nuageux.

Onduleur : Convertit le courant continu (CC) des batteries en courant alternatif (CA) pour alimenter les appareils nécessitant de l'électricité domestique.

Capteurs à tubes sous vide (ETC 1 et 2) : Tubes sous vide à haut rendement qui chauffent l'air ou un liquide grâce à la lumière du soleil.

Souffleurs (Souffleurs 1 et 2) : Assurent le séchage actif en propulsant l'air chaud dans la chambre de séchage pour une répartition homogène de la chaleur et une accélération du processus.

Chambre de séchage : Espace isolé où se déroule le séchage du produit.

Plateaux de séchage (Plateau 3) : Étagères sur lesquelles sont disposés les produits agricoles (ici, trois niveaux).

Gravier/Sable : Utilisé comme matériau de stockage thermique. Il absorbe la chaleur pendant la journée et la restitue la nuit afin de maintenir une température ambiante stable.

Cheminée : Permet à l'air humide de s'échapper par le haut de la chambre pour compléter le cycle d'échange de masse.

Système de contrôle (ordinateur portable) : Utilisé pour surveiller et enregistrer les données (température, humidité) et contrôler précisément la vitesse du ventilateur.

### **I.5.2. Applications**

Ce système avancé est utilisé dans les secteurs exigeant une grande précision et une production continue :

Industries agroalimentaires à grande échelle : Séchage de fruits (tels que dattes, figes, abricots) et de légumes en quantités commerciales, tout en préservant leurs valeurs nutritionnelles et leur couleur.

Plantes médicinales et aromatiques : Séchage d'herbes délicates nécessitant des températures très précises pour préserver leurs huiles essentielles et leurs propriétés thérapeutiques.

Recherche scientifique et universitaire : Comme mentionné dans votre note de service, ce type d'appareil est utilisé pour des études expérimentales visant à comprendre le comportement du séchage et à développer des modèles mathématiques pour améliorer l'efficacité énergétique.

Zones isolées : Idéal pour les zones sans accès à l'électricité (telles que les exploitations agricoles du désert de la vallée du Sud) car il fonctionne entièrement grâce aux énergies renouvelables.

Production de semences : Séchage des semences agricoles pour réduire leur taux d'humidité à un niveau optimal pour un stockage à long terme sans compromettre la germination.

En bref : Cet appareil n'est pas un simple séchoir ; c'est un système énergétique complet qui garantit une maîtrise totale des conditions de séchage pour produire des semences de qualité supérieure.

### **I.5.3. Classification par mode de circulation de l'air**

Séchoirs passifs (convection naturelle) : L'air circule uniquement grâce aux forces de flottabilité (gradient de température) ou à la pression du vent. Ils sont simples à concevoir, autonomes et adaptés aux petites exploitations rurales sans accès à l'électricité. [9]

#### **I.5.3.1. Séchoirs actifs (convection forcée) :**

La circulation de l'air est assurée par un ventilateur ou une soufflante motorisée, souvent alimentée par des panneaux photovoltaïques. Ils offrent des taux de séchage plus élevés et un contrôle plus précis des conditions internes. [9]

#### **I.5.3.2. Variantes technologiques spécifiques**

Séchoirs de type serre (Greenhouse dryers) : Ils utilisent l'effet de serre pour chauffer l'air à l'intérieur d'une grande structure. Ils sont adaptés aux grandes quantités de produits.

Séchoirs tunnels : Conçus pour des capacités importantes, ils utilisent souvent des capteurs solaires pour préchauffer l'air circulant dans un long tunnel de séchage.

Séchoirs avec stockage thermique : Pour pallier l'intermittence du soleil, certains séchoirs intègrent des lits de galets ou des matériaux à changement de phase (PCM) comme la paraffine. Ces matériaux stockent la chaleur durant la journée et la restituent après le coucher du soleil, ce qui prolonge le séchage de 3 à 6 heures. [9]

En comparaison, le séchage traditionnel au soleil consiste à étaler les produits à l'air libre. Bien que gratuit, ce mode est vulnérable aux poussières, insectes, rongeurs et intempéries, ce qui réduit considérablement la qualité du produit final [9]

## **I.6. Conclusion**

La dessiccation est une technique de préservation qui consiste à diminuer l'humidité des produits agricoles, afin d'étendre leur durée de stockage et ainsi minimiser les pertes après leur récolte. L'application de l'énergie solaire dans le séchage apporte une solution rentable et durable, au vu de la disponibilité d'une source d'énergie abondante et inépuisable. Les différentes sortes de séchoirs solaires ont diverses particularités pour convenir au séchage et permettre de bénéficier d'avantages supplémentaires en termes de qualité des produits et d'économie d'énergie.

# ***Chapitre II :***

## ***Techniques de prétraitement des produits agricoles avant le séchage solaire***

## II.1 Introduction

Les techniques de prétraitement (Pre-treatment) constituent une étape essentielle dans la chaîne des opérations de séchage solaire des produits agricoles. Elles jouent un rôle déterminant dans l'amélioration des transferts de chaleur et de masse, ainsi que dans la qualité finale du produit (couleur, texture, valeur nutritionnelle), tout en garantissant la sécurité sanitaire.

Plusieurs études ont montré que l'application de prétraitements appropriés permet de réduire le temps de séchage et d'améliorer l'efficacité énergétique du procédé [10]

Ces techniques varient selon la nature du produit (fruits, légumes, plantes aromatiques et médicinales), mais elles reposent sur un ensemble d'opérations fondamentales visant à optimiser les performances du séchage et à réduire les pertes post-récolte. [11]

## II.2. Techniques de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire des produits agricoles locaux

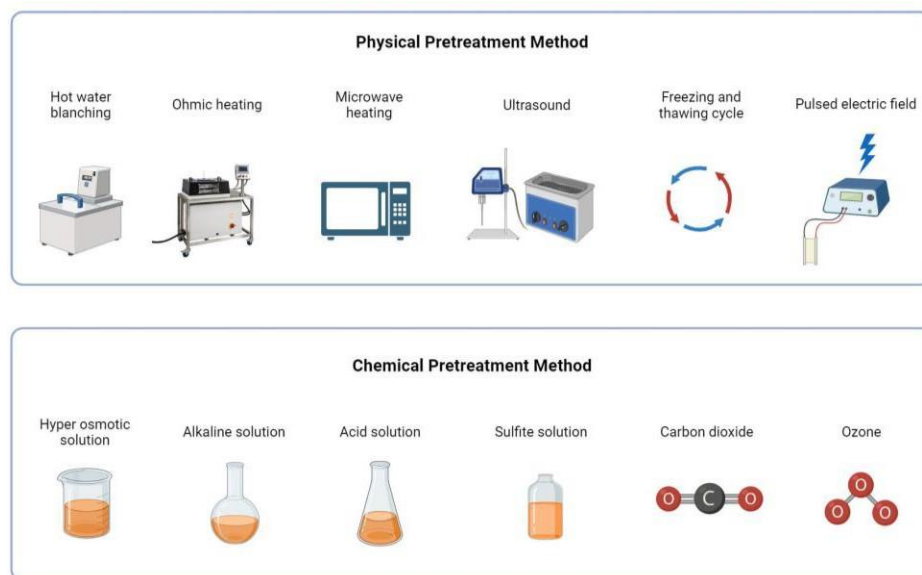


Figure 7. Méthodes de prétraitement pour le séchage des produits alimentaires [12]

### **II.2.1 Nettoyage et lavage**

Le nettoyage et le lavage représentent la première étape du prétraitement et visent à préparer la matière première pour les opérations ultérieures.



Figure 8. Nettoyage et lavage [13]

- **Objectifs principaux:**

- Élimination des poussières, impuretés et matières étrangères
- Élimination des résidus de pesticides et contaminants chimiques
- Réduction de la charge microbienne initiale

- **Méthodes d'application:**

- Lavage à l'eau courante
- Utilisation d'eau désinfectée (avec ajout contrôlé de chlore si nécessaire)

- **Effet sur le séchage:**

- Cette étape améliore la qualité sanitaire du produit et réduit les risques de contamination durant le séchage [10]

### II.2.2. Épluchage et découpage

Cette opération influence directement la cinétique de séchage.



Figure 9. Découpe et disposition des fruits à l'intérieur du séchoir solaire [14]

- **Opérations réalisées:**

- Élimination des pelures non souhaitées ou peu perméables
- Découpage en tranches ou en cubes de dimensions homogènes

- **Objectifs techniques:**

- Augmenter la surface d'échange
- Améliorer les transferts de chaleur et de masse

- **Effets:**

- Accélération du taux de séchage
- Amélioration de l'uniformité du séchage [15]

### II.2.3. Blanchiment (Blanching)

Le blanchiment est un prétraitement thermique de courte durée réalisé à l'eau chaude ou à la vapeur.



Figure 10. Prétraitement cardiaque par chauffage de l'eau [16]

- **Objectifs:**
  - Inactivation des enzymes responsables de la dégradation (brunissement enzymatique)
  - Réduction de la charge microbienne
  - Préservation de la couleur naturelle
- **Domaines d'application:**
  - Principalement utilisé pour les légumes (carottes, haricots, etc.)

- Effet sur le séchage:
  - Amélioration de la qualité finale
  - Facilitation de la diffusion de l'eau [17]

#### II.2.4. Prétraitement chimiques (Antioxydants)

Ces traitements visent à limiter les réactions indésirables pendant le séchage.



Figure 11. Prétraitement du séchage des fruits [18]



(a)



(b)

Figure 12. Comparaison entre le prétraitement au soufre (a) et sans soufre(b) [19]



Figure 13. Tremper les tranches de pomme dans une solution d'acide citrique [20]

- **Substances utilisées:**

- Acide ascorbique (vitamine C)
- Jus de citron (source naturelle d'acides)
- Dioxyde de soufre (applications industrielles)

- **Objectifs:**

- Inhibition des réactions d'oxydation
- Prévention du brunissement enzymatique
- Maintien de la qualité nutritionnelle

- **Effets:**

Amélioration des propriétés sensorielles et de la stabilité du [21]

### II.2.5. Déshydratation osmotique (Osmotic Dehydration)

Il s'agit d'un prétraitement visant à réduire la teneur en eau avant le séchage.

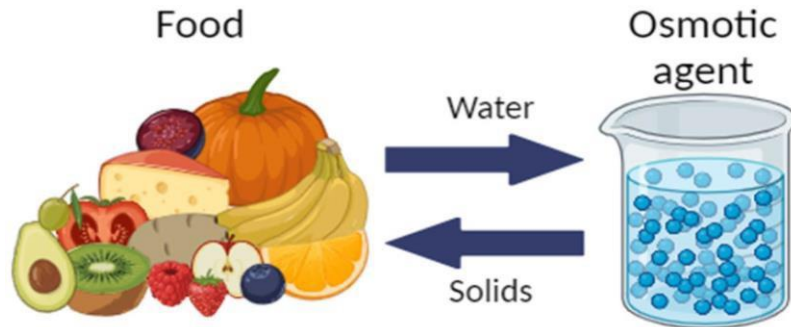


Figure 14. Principe du séchage osmotique [22]

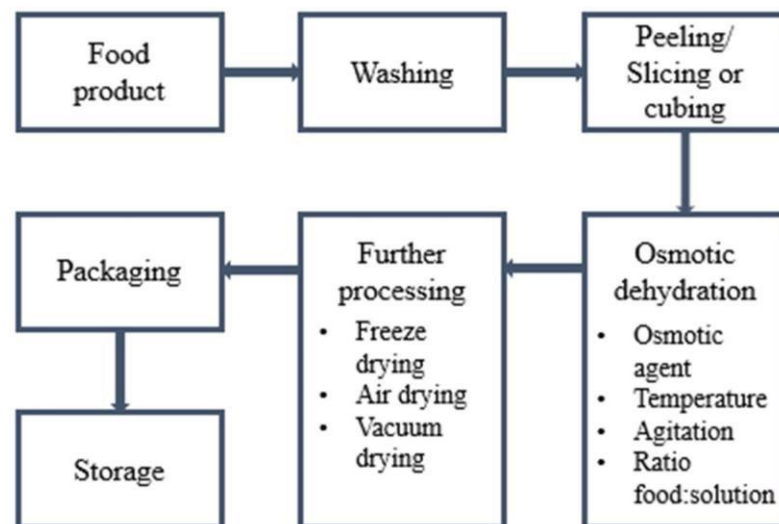


Figure 05. Diagramme de flux des étapes du prétraitement et du séchage osmotique [22]

- **Principe:**
  - Immersion du produit dans une solution concentrée (sucrée ou saline)
  - Migration de l'eau vers l'extérieur sous l'effet du gradient de concentration

- **Résultats:**
  - Réduction de l'humidité initiale
  - Amélioration des caractéristiques sensorielles
- **Effet sur le séchage:**
  - Diminution du temps de séchage
  - Réduction de la consommation énergétique [23]

### II.2.6. Techniques physiques modernes

Ces méthodes représentent une évolution récente dans le domaine du séchage.

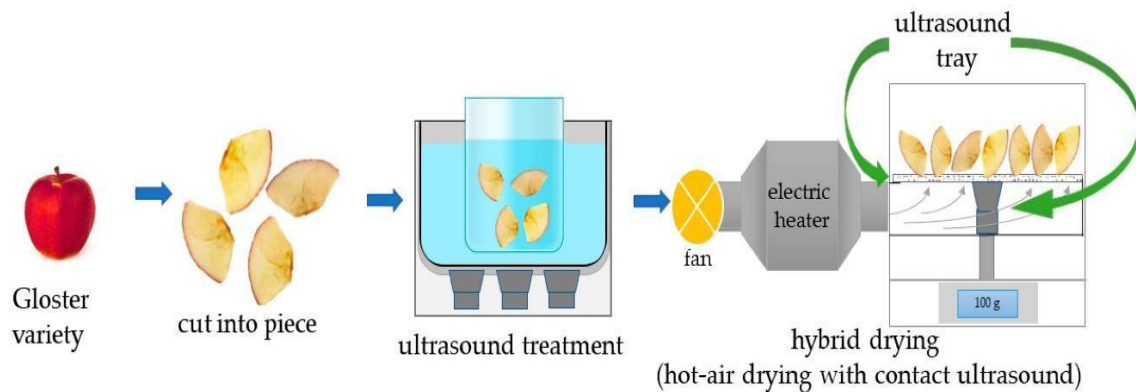


Figure 16. Shema du prétraitement et du sechage hybride des pommes par ultrasons [24]

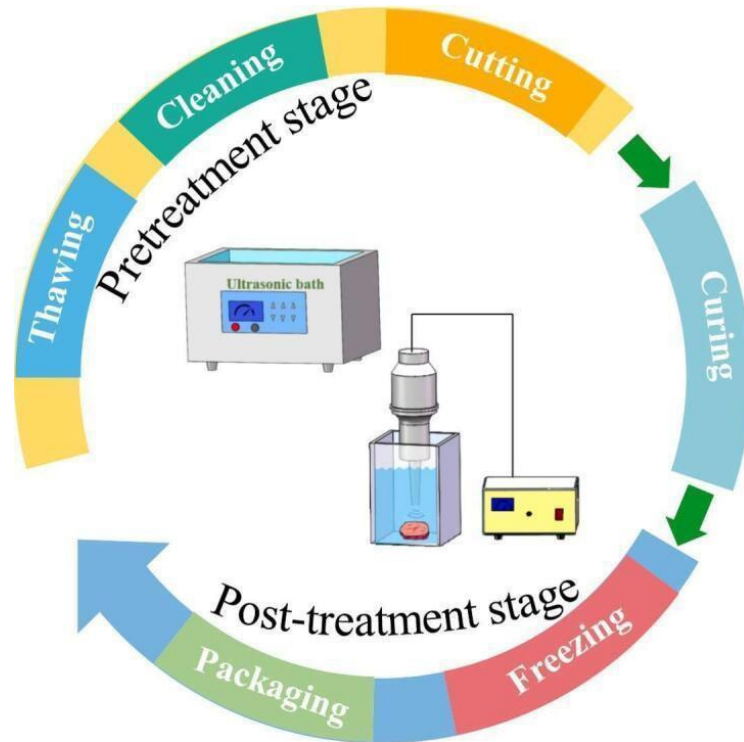


Figure 17. Etapes de prétraitement des produits alimentaires [25]

- **Principales techniques:**
  - Ultrasons
  - Micro-ondes
  - Champs électriques pulsés (PEF)
- **Mécanisme d'action:**
  - Désorganisation partielle des structures cellulaires
  - Augmentation de la perméabilité des tissus
- **Résultats:**
  - Accélération du transfert de masse
  - Amélioration de l'efficacité [26,27]

### II.2.7. Élimination de l'humidité superficielle

Étape complémentaire avant l'introduction dans le séchoir.

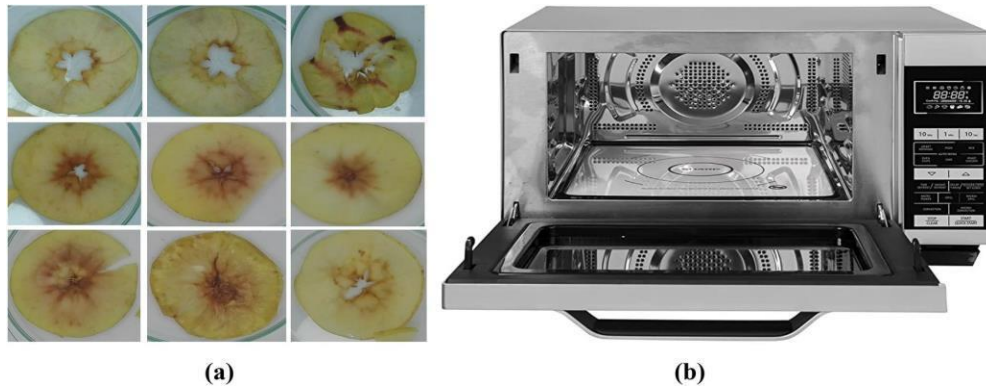


Figure 18. Élimination de l'humidité superficielle des échantillons à l'aide(a) d'un four à micro-ondes(b)

- **Méthodes:**

- Égouttage
- Pré-séchage à l'air

- **Objectifs:**

- Élimination de l'eau libre en surface
- Réduction du développement microbien initial [10]

### **II.3. Caractéristiques géographiques, climatiques et environnementales de la zone expérimentale**

La région d'Oued Souf (ou El Oued) revêt une importance stratégique et technique majeure pour les expériences et la mise en œuvre du séchage solaire en raison de ses caractéristiques environnementales uniques et de sa vocation agricole. [28]



Figure 19. Carte de la province d'El Oued [29]

Un soleil hors du commun Située en plein Sahara du Nord, Oued Souf profite d'un ensoleillement incroyable. On parle d'une moyenne de 277 heures de soleil par mois, avec des pointes à 358 heures en juillet ! À côté de ça, l'été apporte des températures dignes d'un four : il peut faire jusqu'à 45°C, ce qui accélère sacrément l'évaporation de l'eau qu'on veut éliminer des produits. [28]

Des conditions de séchage vraiment idéales À Oued Souf, l'air est tellement sec qu'il atteint parfois moins de 10 % d'humidité l'après-midi, surtout en été. Résultat : l'air absorbe beaucoup plus vite l'humidité des récoltes. Il faut aussi savoir que chaque année, le potentiel d'évaporation dépasse de loin la quantité de pluie : on atteint près de 2 245 mm d'évaporation annuelle, soit plus de 29 fois ce qu'il tombe en pluie. Évidemment, ça raccourcit sérieusement les temps de séchage par rapport aux endroits plus humides. [28]

La production à portée de main (et moins de pertes) Oued Souf, c'est un vrai centre de production agricole en plein désert. On y cultive beaucoup de dattes, mais aussi des légumes à grande échelle comme la pomme de terre et la tomate. Vu que les pertes après la récolte peuvent atteindre 30 à 40 % de la production, faire le séchage directement sur place change tout. Ça permet de traiter les produits, souvent très riches en eau (plus de 80 %), avant qu'ils ne s'abîment. [28]

Un vrai enjeu socio-économique Le séchage solaire sur place aide les agriculteurs à conserver leurs récoltes plus longtemps, à réduire le poids (un produit séché pèse environ six fois moins) et à mieux résister aux variations de prix lors des pics de production. En plus, l'énergie solaire, gratuite et abondante dans la région, rend la méthode bien plus économique que le séchage industriel reposant sur les énergies fossiles. Bref, Oued Souf, c'est une sorte de laboratoire à ciel ouvert. Les conditions de transfert de chaleur et de masse y sont parmi les meilleures au monde pour tester et valider les méthodes de séchage solaire. [28]

## **II.4. Conclusion**

Le prétraitement est une étape cruciale qui permet de renforcer la performance du séchage solaire des produits agricoles. Il permet en effet de diminuer le temps de séchage, d'optimiser les transferts de chaleur et de masse et d'assurer une qualité nutritionnelle et organoleptique supérieure aux produits. Ces divers types de prétraitements, soit physiques, soit thermiques, soit chimiques, soit osmotiques, aident à prévenir la perte post-récolte et favorisent ainsi la conservation des récoltes. En outre, l'exceptionnelle situation climatique de la région d'Oued Souf offre des conditions optimales pour le processus de séchage solaire des produits agricoles.

# ***Chapitre III :***

## ***Résultats de l'étude expérimentale***

### III.1. Introduction

L'expérience de séchage solaire de tranches de pommes de terre a été réalisée à la Faculté des sciences et de la technologie de l'Université Chahid Hamma Lakhdar d'El Oued en Algérie. Les essais ont été effectués à l'aide d'un séchoir solaire dont la source d'énergie thermique était le rayonnement solaire.

### III.2. Présentation du séchoir solaire sur lequel l'expérience a été réalisée

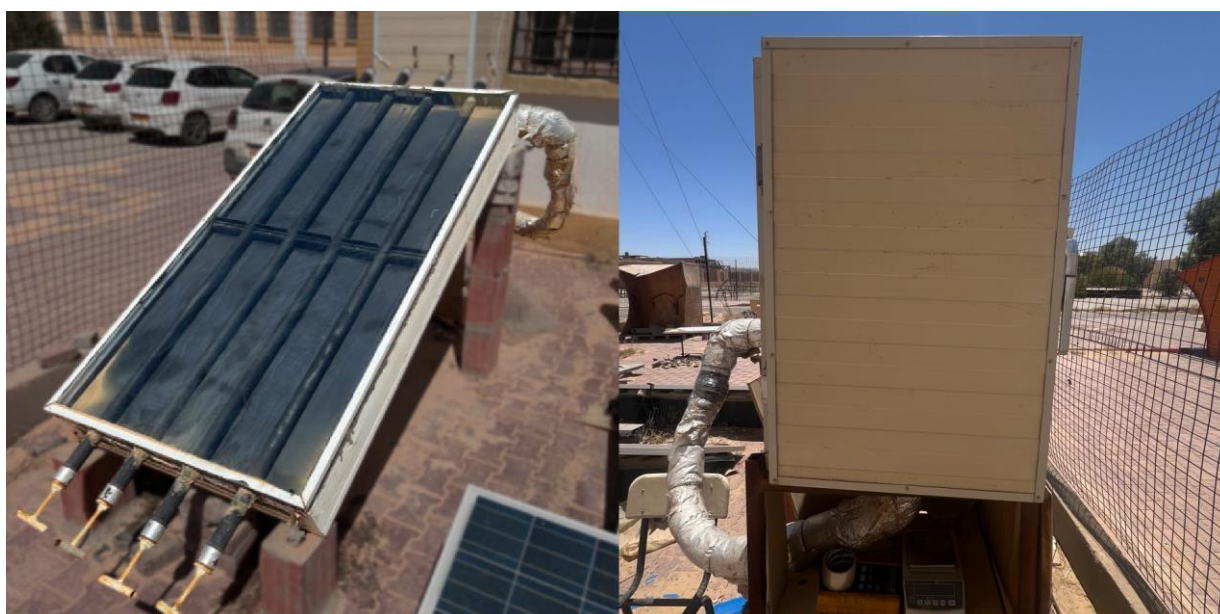


Figure 20. Le séchoir solaire utilisé dans l'expérience

Ce séchoir solaire indirect est composé de plusieurs parties :

- **Un capteur solaire** : est une couche de verre destinée à recevoir les rayons du soleil de l'environnement extérieur.
- **Les tubes de stockage des matériaux** : sont des tubes placés à l'intérieur de la couche d'eau de manière longitudinale afin d'augmenter l'efficacité thermique du séchoir solaire.
- **La chambre de séchage** : est la pièce vers laquelle se dirige la chaleur sortant du capteur solaire. On y place les denrées alimentaires à sécher.
- **Ventilateur d'extraction** : situé à l'intérieur de la chambre de séchage, il aide à aspirer l'air de la chambre de séchage vers l'environnement extérieur.

### III.3. Appareils de mesure utilisés dans l'expérience

Il existe de nombreux appareils utilisés pour la mesure afin d'étudier les changements pendant l'expérience

| NOM DE L'APPAREIL                 | LE RÔLE                                                                                                                                                           | L'IMAGE                                                                               |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Enregistreur de température       | utilisé pour mesurer et enregistrer simultanément les températures en plusieurs points du système de séchage solaire                                              |    |
| Balance électronique de précision | utilisée pour mesurer la masse des échantillons de pommes de terre avant, pendant et après le séchage                                                             |    |
| Rayonnement-mètre                 | utilisé dans les études de séchage solaire, les installations photovoltaïques et les recherches météorologiques afin d'évaluer l'énergie solaire disponible       |   |
| Thermocouple                      | Il permet de mesurer la température en différents points du système de séchage en transformant la différence de température en un signal électrique proportionnel |  |

Tableau 1. Appareils utilisés pour les mesures

### III.4. Emplacement du thermocouple pour la mesure expérimentale de la température dans différentes parties du séchoir solaire

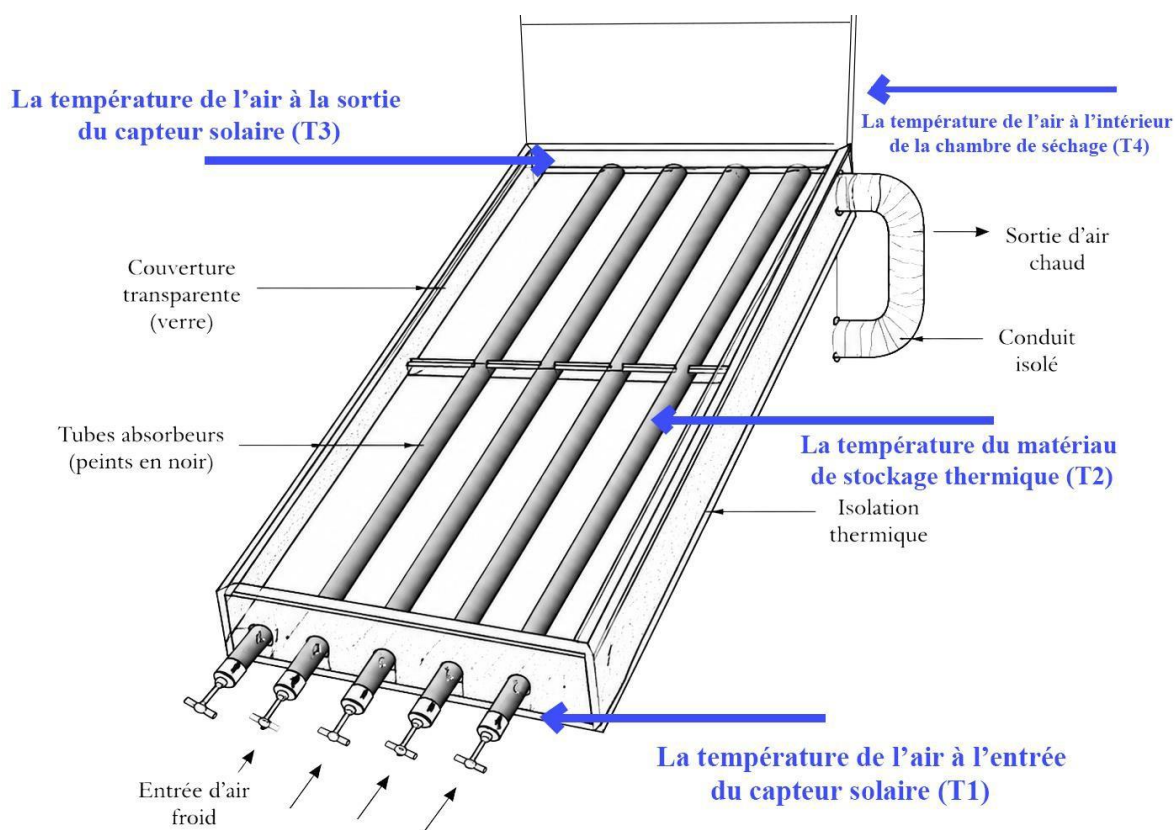


Figure 21. Schéma du processus de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire

Les extrémités des thermocouples sont d'abord connectées dans différentes parties du séchoir solaire (l'entrée, le milieu du séchoir, la sortie, la chambre de séchage), puis les couples thermiques sont reliés aux entrées de l'enregistreur de température. Après la mise en marche de l'appareil, les mesures sont enregistrées manuellement tout au long de la période de séchage, puis les données collectées sont transférées et exploitées pour analyser les performances thermiques ainsi que pour établir les courbes expérimentales.

### III.5. Amélioration de l'efficacité thermique du séchoir solaire

Afin d'améliorer les performances thermiques du système et d'accroître sa capacité de stockage de chaleur, une couche de gravier a été répartie à l'intérieur du séchoir solaire. Ce matériau agit comme un milieu de stockage thermique en accumulant l'énergie issue du rayonnement solaire puis en la restituant progressivement. Cela permet d'augmenter la

température interne du séchoir et de réduire les fluctuations thermiques durant l'opération de séchage.



Figure 22. Matériau de stockage thermique



Figure 23. Ajout de matériau de stockage thermique à l'intérieur du capteur solaire

### III.6. Présentation des techniques de prétraitement des échantillons

Des échantillons de pommes de terre locales d'un poids de 100 g par traitement ont été préparés. Ils ont été lavés et coupés en tranches d'une épaisseur de 0,5 centimètre de manière uniforme, puis les échantillons ont été immergés dans quatre récipients contenant chacun 5 litres de solution ou d'eau selon les traitements suivants :

- **prétraitement 1** : eau additionnée de sel (NaCl)
- **prétraitement 2** : eau additionnée d'acide ascorbique
- **prétraitement 3** : blanchiment dans l'eau chaude à une température de 90 °C - 100 °C
- **prétraitement 4** : rinçage à l'eau froide à une température de 4 °C

Les échantillons de pommes de terre ont été maintenus dans les différentes solutions pendant 5 à 7 minutes, puis retirés et égouttés avant d'être introduits dans le séchoir solaire.



Figure 24. Les quatre échantillons lors de la procédure de prétraitement.

## Schéma du processus de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire

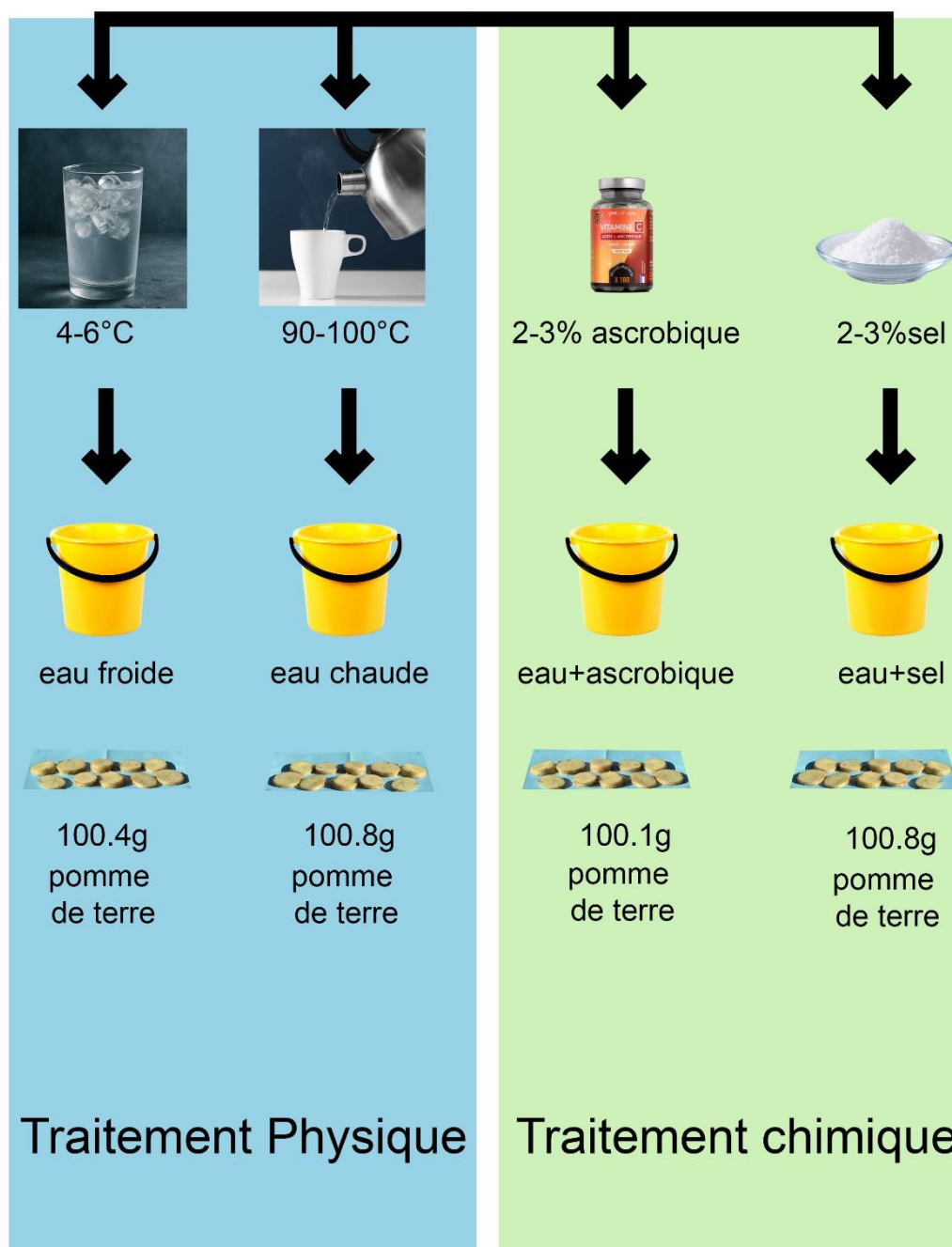


Figure 25. Schéma du processus de prétraitement des échantillons avant le séchage solaire



Figure 26. Poids des échantillons après le prétraitement.

## III.7. Discussion et résultats

### III.7.1. Les conditions environnementales de l'expérience

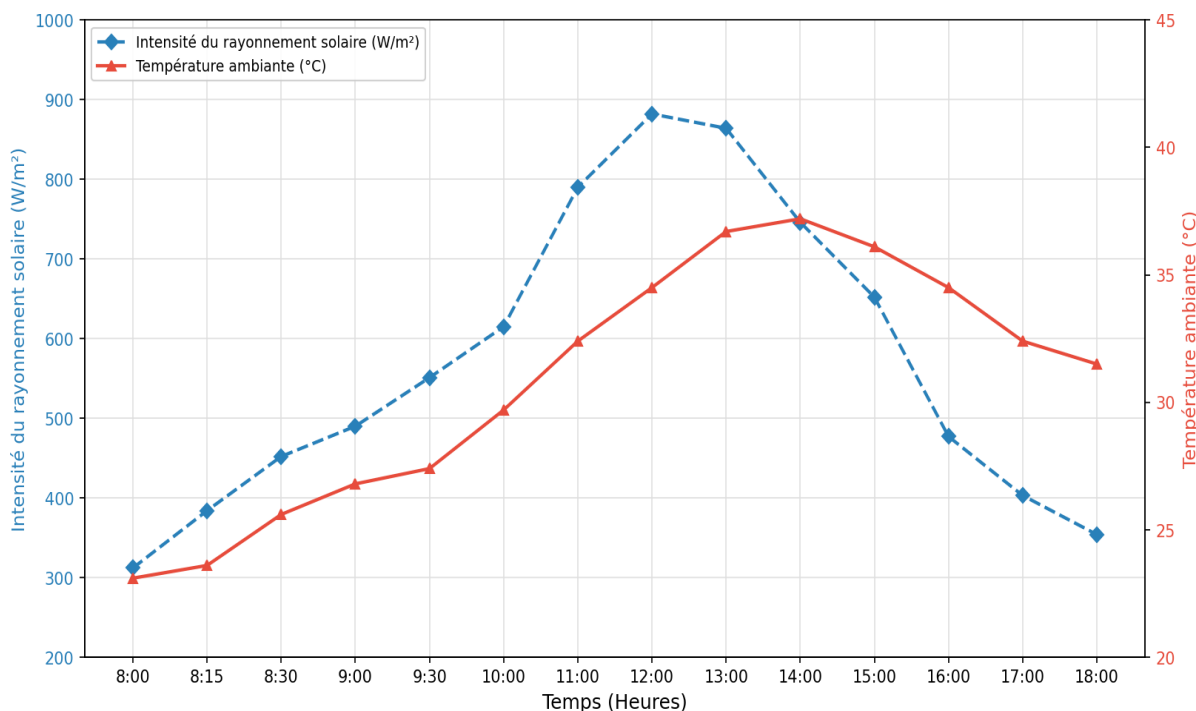


Figure 27. Courbe montrant la variation du rayonnement solaire et de la température ambiante en fonction du temps

Le graphique met en évidence l'interdépendance dynamique entre l'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante au cours de la journée (de 08h00 à 18h00) :

- L'intensité du rayonnement solaire (courbe discontinue bleue) :** Le flux solaire suit une allure sinusoïdale ascendante dès le début de la matinée, partant d'une valeur minimale d'environ 310 W/m² à 08h00 pour atteindre son pic d'irradiation sommital à 12h00, avec une valeur maximale proche de 880 W/m². Après midi, l'intensité décroît de manière progressive et prononcée pour se stabiliser autour de 350 W/m² à 18h00, sous l'effet du déclin solaire.
- La température ambiante (courbe continue rouge) :** La courbe thermique suit une trajectoire ascendante corrélée au rayonnement, tout en manifestant un phénomène physique de **déphasage temporel** quant à son point culminant. Débutant à environ 23,5°C à 08h00, la température s'élève régulièrement pour enregistrer sa valeur maximale d'environ 37,5°C à 14h00 (soit un décalage de deux heures après le pic

solaire). Ce comportement s'explique par l'inertie thermique de l'environnement et de l'atmosphère, qui emmagasinent l'énergie avant de la restituer.

Ces observations confirment une forte corrélation proportionnelle entre les entrées radiatives et les réponses thermiques du milieu, le rayonnement solaire s'affirmant comme le moteur cinétique principal des variations de la température ambiante tout au long de la journée

L'expérience a été répétée à plusieurs reprises en raison des conditions météorologiques susceptibles d'affecter la précision des résultats. En effet, la couverture nuageuse ainsi que les tempêtes de sable réduisent l'intensité du rayonnement solaire incident, ce qui diminue les performances du séchoir solaire indirect et entraîne une augmentation de la durée de séchage.

### III.7.2. Variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire

#### *(Cas 1 : Pas de matériau de stockage thermique)*

Dans l'expérience 1, nous effectuons des mesures des températures dans différentes parties du séchoir solaire sans ajouter de gravier, et nous avons obtenu cette courbe.

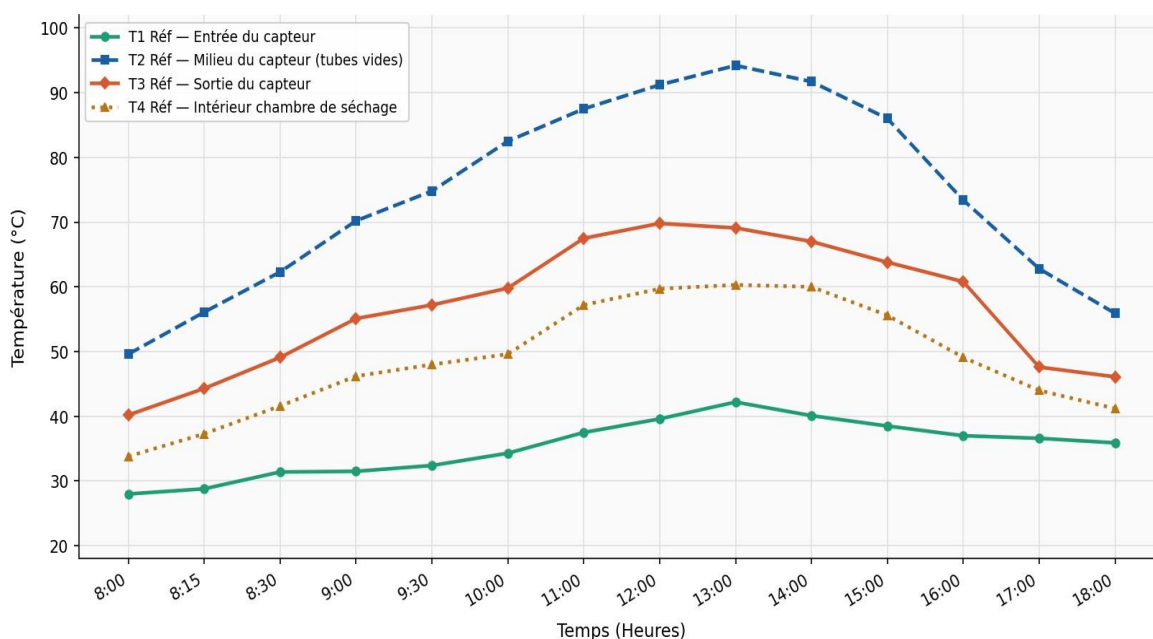


Figure 28. Courbe montrant la variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire sans matériau de stockage thermique.

### III.7.3. Variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire

#### (Cas 2 : Avec de matériau de stockage thermique)

Dans l'expérience 2, après l'ajout de la matière (le gravier), nous effectuons des mesures des températures dans différentes parties du séchoir solaire afin d'obtenir cette courbe.

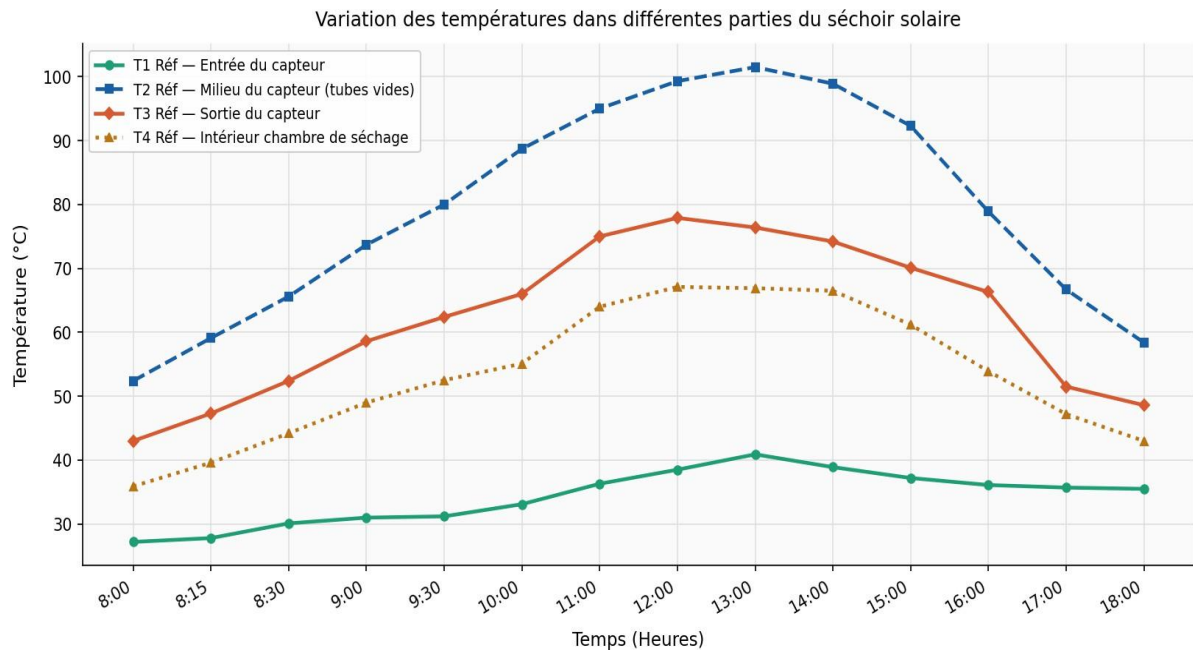


Figure 29. Courbe montrant la variation des températures dans différentes parties du séchoir solaire avec matériau de stockage thermique.

### III.7.4. Analyse comparative des températures du séchoir solaire

Expérience 1 (sans stockage) vs Expérience 2 (avec matériau de stockage thermique)

#### III.7.4.1. Comparaison de la température à la sortie du capteur solaire (T3)

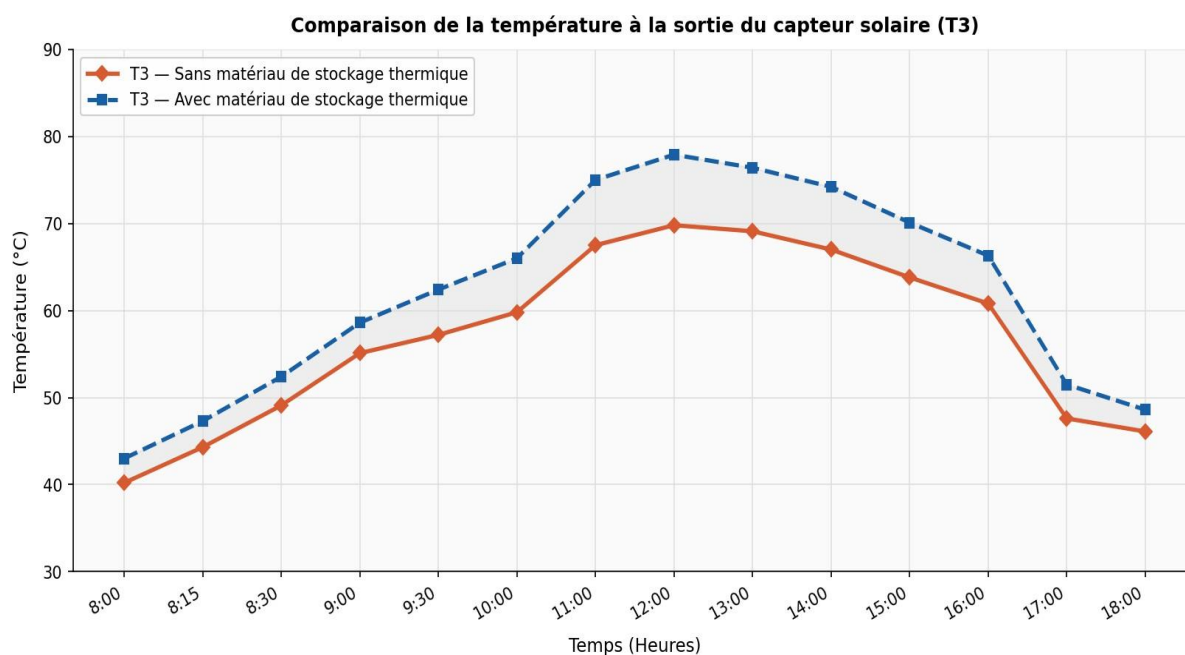


Figure 30. Évolution de T3 (sortie du capteur) : sans vs avec matériau de : Stockage thermique

Les deux courbes présentent une allure similaire : une montée progressive de la température entre 8h00 et 12h00–13h00, suivie d'une descente graduelle jusqu'à 18h00. Cette évolution est directement corrélée au rayonnement solaire disponible tout au long de la journée.

Dans le cas sans matériau de stockage thermique, T3 atteint un maximum de 69,8°C à 12h00, à la même heure que la configuration avec matériau de stockage présente un pic plus élevé de 77,9°C. L'écart entre les deux courbes est particulièrement visible entre 9h00 et 15h00, période de fort ensoleillement.

La présence du matériau de stockage thermique dans les tubes du capteur modifie les échanges thermiques : la chaleur absorbée est progressivement restituée au fluide caloporteur, augmentant ainsi la température à la sortie du capteur.

### III.7.4.1.2. Comparaison quantitative T3

- Température minimale : 40,2°C (sans stockage) contre 43,0°C (avec stockage), soit +2,8°C dès le matin.
- Température maximale : 69,8°C (sans stockage) contre 77,9°C (avec stockage), soit un gain de +8,1°C au pic.
- Amplitude journalière : 29,6°C (sans stockage) contre 34,9°C (avec stockage), indiquant une plus grande dynamique thermique avec le matériau de stockage.

### III.7.4.2. Comparaison de la température intérieure de la chambre de séchage (T4)

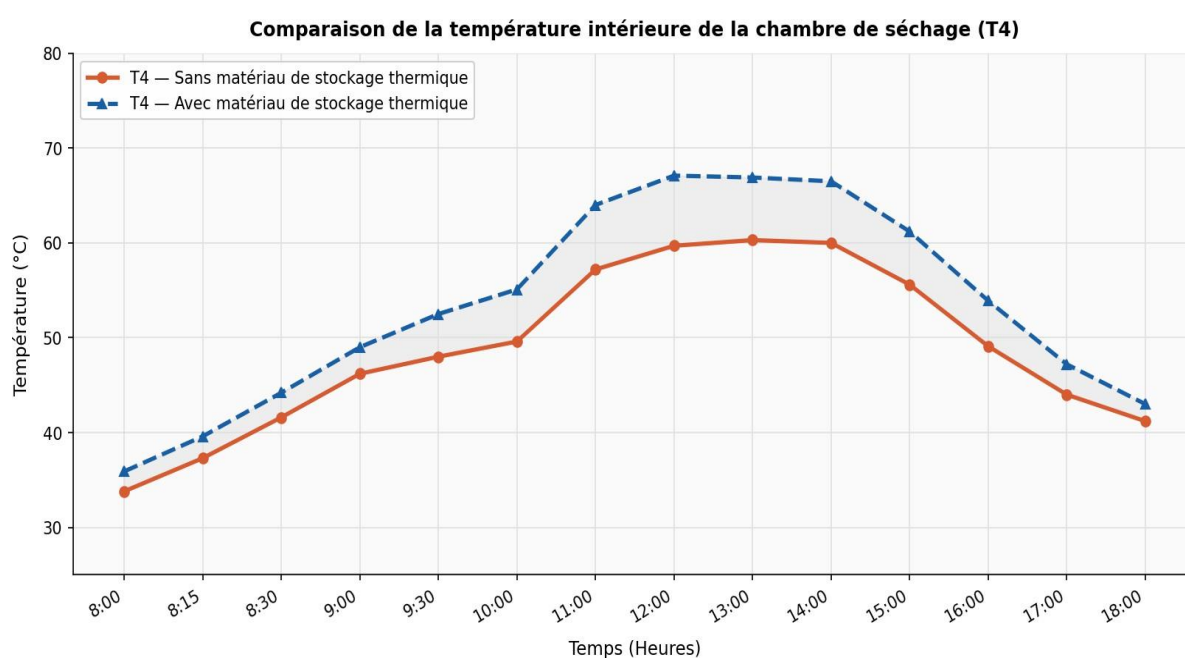


Figure 31. Évolution de T4 (chambre de séchage) : sans vs avec matériau de stockage thermique

La température intérieure de la chambre de séchage suit également une tendance unimodale, avec un maximum atteint en milieu de journée. Cette température est directement influencée par la chaleur apportée via le capteur solaire.

Avec le matériau de stockage thermique, T4 atteint 67,1°C à 12h00, contre 60,3°C à 13h00 sans stockage. On remarque aussi que la descente en fin d'après-midi est plus lente avec stockage, confirmant que le matériau continue à restituer de l'énergie après le pic solaire c'est l'effet de « tampon thermique ».

Ce comportement est particulièrement favorable au processus de séchage, car il permet de maintenir une température suffisamment élevée dans la chambre même lorsque le rayonnement solaire commence à diminuer.

### III.7.4.2.1. Comparaison quantitative T4

- Température maximale : 60,3°C (sans stockage) contre 67,1°C (avec stockage), soit un gain de +6,8°C.
- Pic atteint plus tôt avec stockage (12h00 vs 13h00), ce qui allonge la durée d'exposition à haute température.
- Températures plus élevées en fin de journée (16h00–18h00) avec stockage, grâce à la restitution différée de l'énergie accumulée.

### III.7.4.3. Vue d'ensemble Superposition des quatre courbes

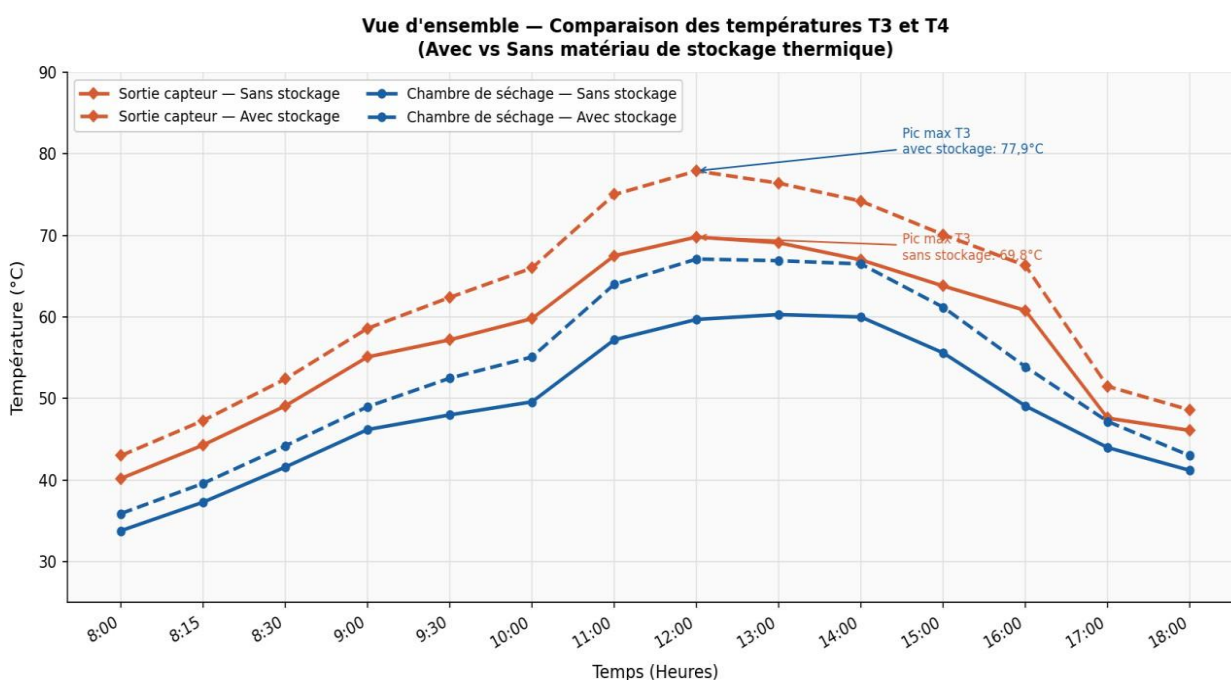


Figure 32. Comparaison simultanée de T3 et T4 pour les deux configurations expérimentales

Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité thermique du séchoir solaire ont été analysés en tenant compte des conditions environnementales lors de la réalisation de l'expérience, ainsi que des mesures de l'intensité du rayonnement solaire et de la température.

Les résultats mettent en évidence une variation significative des performances thermiques du système suite à l'intégration d'une unité de stockage thermique, comparativement au mode de fonctionnement conventionnel en continu. L'analyse comparative des indicateurs thermiques mesurés à la sortie du capteur (T3) et dans la chambre de séchage (T4) se résume comme suit :

- **Températures minimales** : Une élévation des températures minimales est enregistrée lors de l'utilisation de la technique de stockage thermique. En effet, la température minimale à la sortie du capteur (T3) est passée de 40,2°C à 43,0°C, tandis que la chambre de séchage (T4) a connu une augmentation similaire, grimpant de 33,8°C à 35,9°C. Cette hausse est attribuée à la capacité du système à retenir la chaleur résiduelle et à limiter les pertes thermiques durant les périodes de faible rayonnement solaire.
- **Températures maximales** : Le processus de stockage thermique a permis d'améliorer substantiellement l'efficacité d'absorption. La température maximale à la sortie du capteur (T3) a progressé de 69,8°C à 77,9°C à 12h00. Cet impact positif s'est répercuté sur la chambre de séchage (T4), qui a atteint son pic thermique à 67,1°C à 12h00, contre 60,3°C à 13h00 en mode classique. Cela témoigne d'une accélération et d'une stabilisation de la réponse thermique du dispositif.
- **Amplitude thermique** : En raison des écarts marqués entre les valeurs minimales et maximales, une augmentation de l'amplitude thermique est observée en configuration avec stockage. Le gradient thermique s'est élargi pour atteindre 34,9°C à la sortie du capteur (contre 29,6°C sans stockage) et 31,2°C au sein de la chambre de séchage (contre 26,5°C sans stockage).
- **Gain thermique moyen réalisé** : Les indicateurs d'évaluation finaux confirment la haute efficacité du mécanisme de stockage thermique. Un gain thermique moyen de +8,1°C a été généré à la sortie du capteur (T3), accompagné d'un gain moyen prometteur de +6,8°C à l'intérieur de la chambre de séchage (T4) par rapport au fonctionnement traditionnel. Ces résultats valident l'efficacité du système de stockage proposé pour optimiser les performances thermiques globales et améliorer la régularité du processus de séchage.

### **III.7.4.3.1. Discussion comparative**

La superposition des quatre courbes met en évidence deux niveaux de températures distincts : T3 (sortie capteur) est systématiquement supérieure à T4 (chambre de séchage), ce qui s'explique par les pertes thermiques inévitables entre la sortie du capteur et l'intérieur de la chambre.

Pour les deux variables (T3 et T4), la configuration avec matériau de stockage thermique présente des températures constamment plus élevées sur toute la plage horaire. Cela démontre que le matériau de stockage joue un double rôle : absorbeur de chaleur en période de fort rayonnement et source de chaleur différée en période de faible ensoleillement.

L'écart entre les deux expériences est maximal entre 10h00 et 14h00, ce qui correspond à la période de pic solaire. En dehors de cette fenêtre, les températures tendent à converger, notamment en début et en fin de journée.

Les résultats expérimentaux montrent clairement que l'intégration d'un matériau de stockage thermique dans le capteur solaire améliore significativement les performances thermiques du séchoir :

- Gain de +8,1°C sur la température de sortie du capteur (T3) au pic journalier.
- Gain de +6,8°C sur la température intérieure de la chambre de séchage (T4).
- Pic thermique atteint plus tôt dans la journée, maximisant la durée de séchage à haute température.
- Effet de tampon thermique en fin de journée, prolongeant les conditions favorables au séchage.

La configuration avec matériau de stockage thermique est thermiquement supérieure à celle sans stockage. Elle permet d'obtenir des températures de séchage plus élevées, un pic plus précoce et une meilleure stabilité thermique en fin de journée. Son utilisation est donc fortement recommandée pour optimiser l'efficacité du séchoir solaire et réduire la durée de séchage des produits

### **III.7.5. Résultats des expériences le prétraitement des tranches de pommes de terre locales**

Cette étude analyse l'effet de quatre prétraitements appliqués aux échantillons avant leur séchage dans un séchoir solaire. Les mesures ont été effectuées de 8 :00 h à 18 :00 h. Quatre conditions ont été comparées :

- M1 Sel (NaCl) (traitement chimique)

- M2 Acide ascorbique (traitement chimique)
- M3 Blanchiment à l'eau chaude (traitement physique)
- M4 Rinçage à l'eau froide (traitement physique)

### III.7.5.1. Représentation graphique Courbe M1 Sel (NaCl)

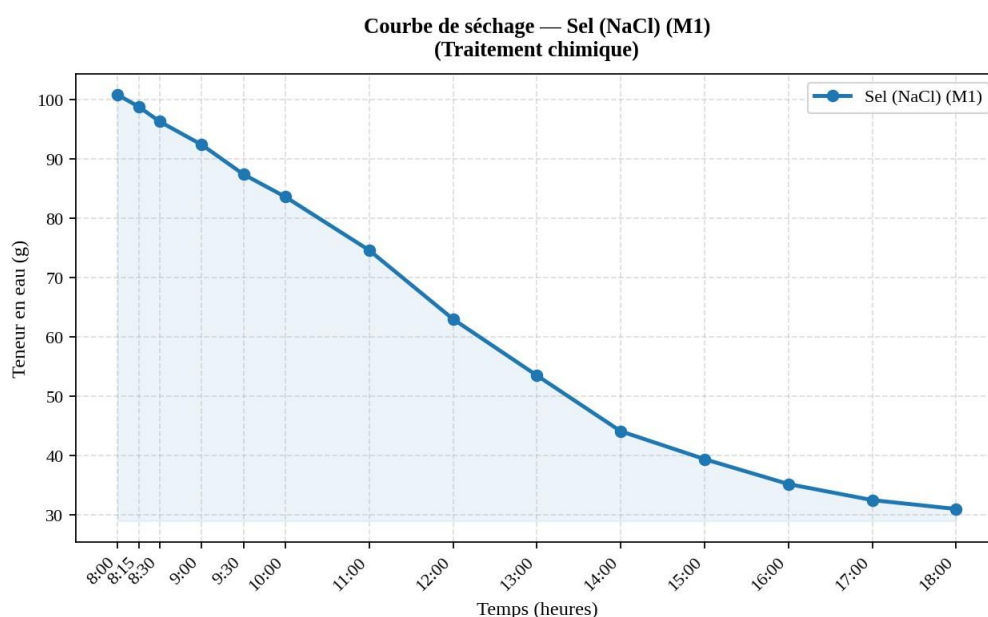


Figure 33 .Évolution de la teneur en eau M1 : Sel (NaCl)

La courbe M1 représente les échantillons traités au sel (NaCl) avant le séchage. Le sel agit par osmose en attirant l'eau vers la surface de l'échantillon avant même le début du séchage thermique. La teneur en eau initiale est de 100,8 g et atteint 31,0 g à 18 :00 h, soit une perte totale de 69,8 g.

On distingue deux phases principales :

- Phase osmotique active (8h 13h) : Chute rapide de 100,8 g à 53,5 g, soit 47,3 g perdus. L'effet osmotique du sel extrait l'eau cellulaire et accélère le séchage en phase initiale.
- Phase de ralentissement (13h 18h) : Perte d'environ 22,5 g supplémentaires jusqu'à la stabilisation à 31,0 g.

Le sel modifie la pression osmotique du milieu cellulaire et peut altérer les propriétés organoleptiques (goût) du produit fini, ce qui constitue une limite de cette méthode.

#### Résultats clés:

- Teneur en eau initiale : 100,8 g
- Teneur en eau finale : 31,0 g
- Perte totale: 69,8 g

### III.7.5.2. Représentation graphique Courbe M2 Acide ascorbique

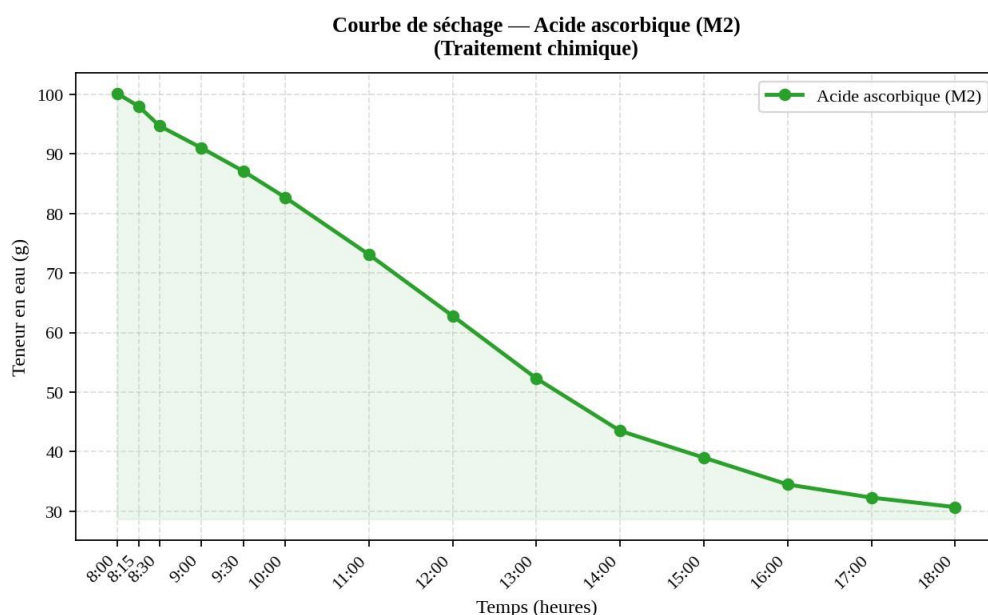


Figure 34 .Évolution de la teneur en eau M2 : Acide ascorbique

La courbe M2 correspond aux échantillons traités à l'acide ascorbique (vitamine C), un antioxydant utilisé pour prévenir le brunissement enzymatique. La teneur en eau passe de 100,1 g à 30,7 g, une perte totale de 69,4 g.

La cinétique de séchage est régulière et progressive :

- Phase active (8h–13h) : Diminution d'environ 47,8 g, suivant la montée en température de la chambre de séchage.
- Phase de stabilisation (13h–18h) : Ralentissement du séchage avec une perte d'environ 21,6 g supplémentaires.

L'acide ascorbique forme une légère barrière de surface sans modifier significativement la structure cellulaire. La cinétique est comparable à M1, mais la qualité du produit fini est améliorée (conservation de la couleur et des vitamines).

#### Résultats clés:

- Teneur en eau initiale: 100,1 g
- Teneur en eau finale: 30,7 g
- Perte totale: 69,4 g

### III.7.5.3. Représentation graphique Courbe M3 Blanchiment à l'eau chaude

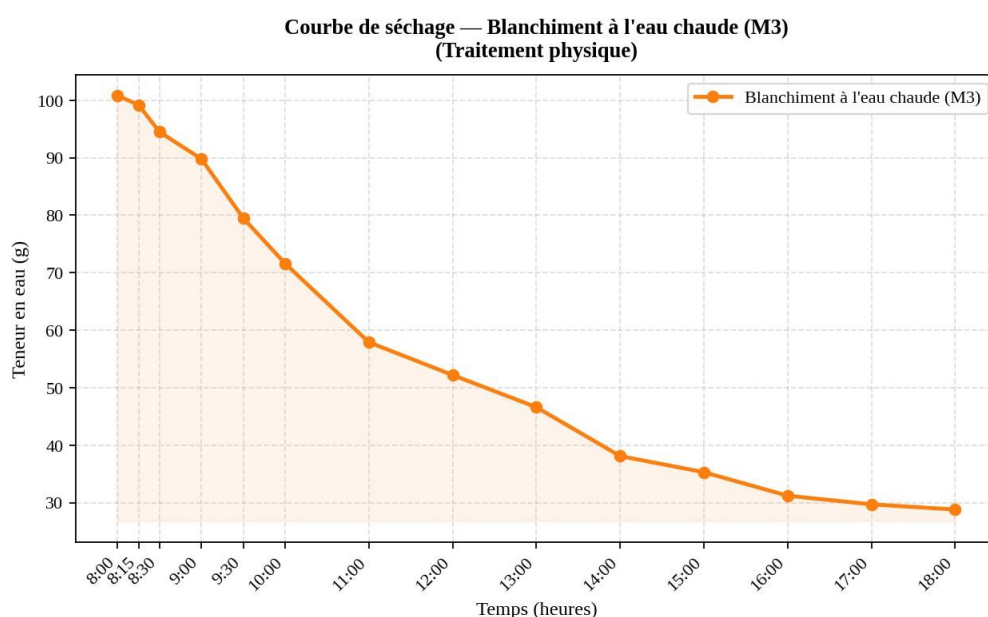


Figure 35. Évolution de la teneur en eau M3 : Blanchiment à l'eau chaude

La courbe M3 est celle des échantillons blanchis à l'eau chaude. Ce prétraitement thermique provoque une dénaturation partielle des protéines membranaires, augmentant la perméabilité cellulaire. La teneur en eau passe de 100,8 g à 28,8 g la valeur finale la plus basse de toutes les conditions.

- Phase très rapide (8h 11h) : Perte de 42,9 g en seulement 3 heures, grâce à la perméabilité accrue des membranes.
- Phase modérée (11h 18h) : Poursuite du séchage jusqu'à 28,8 g en fin de journée.

Le blanchiment à l'eau chaude inactive également les enzymes responsables du brunissement (polyphénol-oxydase), ce qui améliore à la fois la vitesse de séchage et la qualité du produit final.

#### Résultats clés:

- Teneur en eau initiale : 100,8 g
- Teneur en eau finale : 28,8 g (valeur minimale)
- Perte totale: 72,0 g

### III.7.5.4. Représentation graphique Courbe M4 Rinçage à l'eau froide

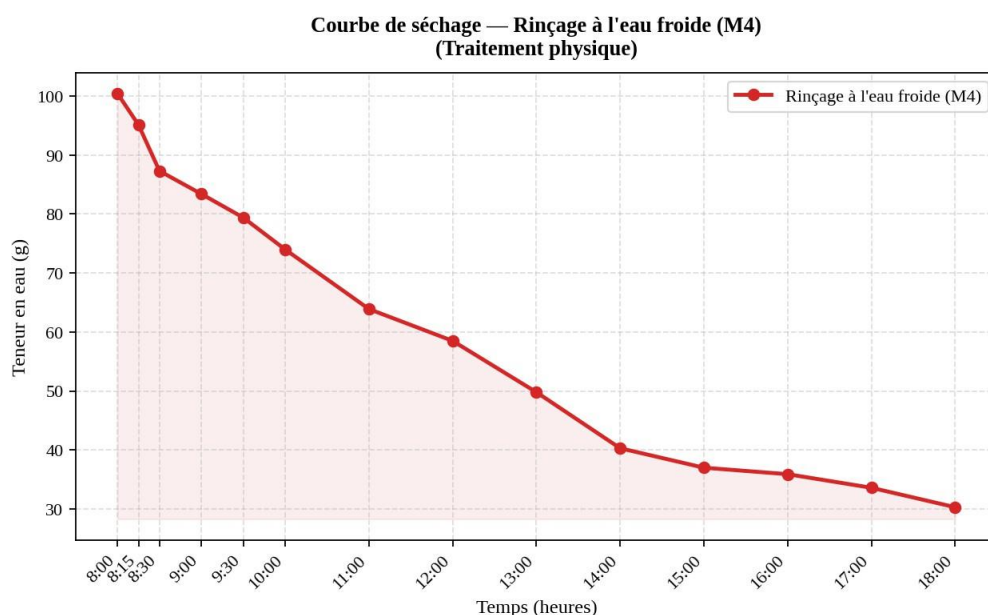


Figure 36. Évolution de la teneur en eau M4 : Rinçage à l'eau froide

La courbe M4 représente les échantillons soumis à un simple rinçage à l'eau froide avant séchage. Ce prétraitement minimal n'altère pas la structure cellulaire mais élimine les impuretés de surface. La teneur en eau passe de 100,4 g à 30,3 g.

- Phase active (8h 13h) : Décroissance régulière de 100,4 g à 49,8 g, soit 50,6 g perdus.
- Phase lente (13h 18h) : Ralentissement progressif, perte d'environ 19,5 g supplémentaires.

La cinétique de séchage est la plus lente parmi les quatre prétraitements, ce qui confirme que le rinçage à l'eau froide n'apporte aucun avantage particulier pour accélérer le transfert de masse.

#### Résultats clés:

- Teneur en eau initiale : 100,4 g
- Teneur en eau finale : 30,3 g
- Perte totale : 70,1 g

## III.7.5.5. Courbe de comparaison globale Comparaison des prétraitements

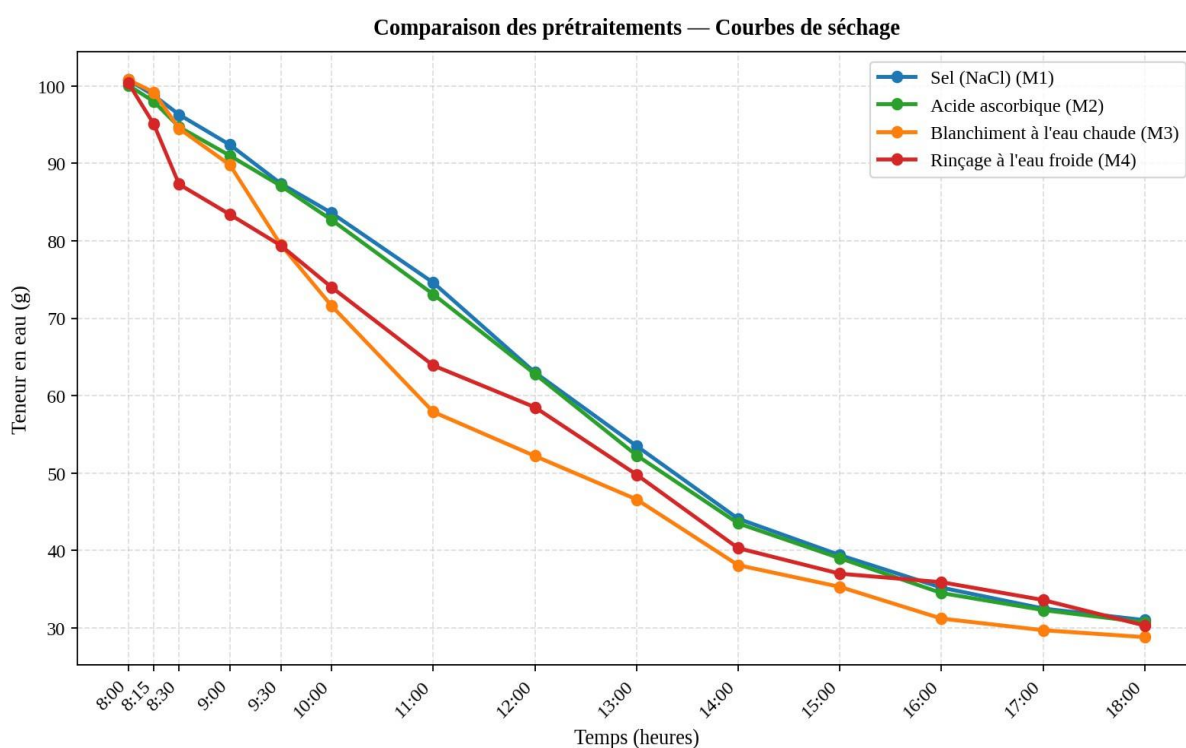


Figure 37. Comparaison des quatre courbes de séchage selon le prétraitement

L'examen des courbes de séchage globales met en évidence l'influence significative des différents prétraitements sur la vitesse de désorption de l'eau et le comportement cinétique des échantillons au cours du temps :

- Le blanchiment à l'eau chaude (M3) :** Ce prétraitement présente l'efficacité la plus remarquable à partir de 9h30. Sa courbe s'affaisse de manière prononcée, montrant une chute rapide et continue du contenu en eau pour atteindre la valeur résiduelle la plus faible en fin de processus (28,8 g à 18h00). Cela s'explique par la dégradation thermique des membranes cellulaires due à la chaleur, ce qui a grandement facilité la migration de l'humidité interne vers l'extérieur.
- Le rinçage à l'eau froide (M4) :** Ce procédé se distingue par une cinétique initiale extrêmement rapide en tout début de cycle (entre 8h00 et 8h30), où sa courbe chute brusquement en dessous de toutes les autres. Cependant, après cette phase flash initiale, la vitesse de séchage ralentit considérablement, adoptant une pente beaucoup plus douce. À partir de 16h00, sa courbe croise celles des autres traitements pour finir par afficher la perte la plus lente en fin de journée.
- Le traitement au sel / NaCl (M1) et à l'acide ascorbique (M2) :** Ces deux courbes suivent une allure presque identique et superposée tout au long du cycle de séchage. Ils

affichent une cinétique modérée et régulière. Bien que le sel (**M1**) montre une résistance légèrement plus élevée à l'évaporation en milieu de journée (courbe supérieure entre 10h00 et 14h00) en raison de la rétention osmotique, les deux courbes convergent vers une teneur en eau finale quasi similaire à 18h00 (environ 30,7 g - 31,0 g).

En conclusion, bien que tous les prétraitements convergent vers des teneurs en eau finales relativement proches en fin de manipulation (18h00), le blanchiment à l'eau chaude (**M3**) demeure le traitement le plus performant sur le plan de la dynamique globale de séchage, tandis que le rinçage à l'eau froide (**M4**) perd son avantage initial pour devenir le plus limitant en fin de processus.

Les courbes M1 et M2 présentent des profils très proches tout au long de la journée, ce qui indique que ces deux prétraitements ont des effets similaires sur la cinétique de séchage. La courbe M3 (blanchiment à l'eau chaude) se détache nettement avec la chute la plus rapide et la teneur finale la plus basse. La courbe M4 (rinçage à l'eau froide) représente le comportement de référence sans modification structurelle notable.

Le blanchiment à l'eau chaude (M3) est le prétraitement le plus efficace pour le séchage solaire :

- Cinétique la plus rapide dès les premières heures.
- Teneur en eau finale la plus basse (28,8 g).
- Inactivation des enzymes de brunissement → meilleure qualité du produit.
- Méthode simple et économique, adaptable à l'échelle industrielle.

Le sel (NaCl) (M1) est une bonne alternative grâce à l'effet osmotique, mais modifie le goût. L'acide ascorbique (M2) est préférable lorsque la préservation des propriétés nutritionnelles est prioritaire. Le rinçage à l'eau froide (M4) reste le prétraitement le moins efficace du point de vue cinétique. En conclusion, pour optimiser la durée et l'efficacité du séchage solaire, le blanchiment à l'eau chaude (M3) est le prétraitement recommandé.

### **III.8. Conclusion**

Ce chapitre a permis de présenter et d'analyser les principaux résultats obtenus au cours de l'étude expérimentale du séchage solaire. L'influence des différents prétraitements ainsi que l'effet de l'intégration des matériaux de stockage thermique ont été évalués en termes de performance de séchage, de stabilité thermique et de qualité du produit final. Les résultats montrent clairement l'intérêt des solutions proposées pour améliorer l'efficacité globale du procédé de séchage solaire.

# ***Conclusion générale***

## **Conclusion générale**

Ce mémoire constitue une étude expérimentale visant à améliorer l'efficacité thermique du séchage solaire indirect, ainsi qu'à évaluer l'effet de certaines techniques de prétraitement sur les performances de séchage des produits agricoles locaux de la wilaya d'El Oued. Les essais expérimentaux ont été réalisés au sein de la Faculté de Technologie de l'Université d'El Oued (Echahid Hamma Lakhdar).

Les résultats expérimentaux ont montré l'importance de l'intégration de matériaux de stockage thermique dans l'amélioration des performances du système, permettant une augmentation des températures de  $+8,1^{\circ}\text{C}$  à la sortie du capteur solaire et de  $+6,8^{\circ}\text{C}$  à l'intérieur de la chambre de séchage, ce qui a conduit à une meilleure stabilité thermique et à une réduction de l'impact des variations du rayonnement solaire.

L'étude a également montré que le blanchiment à l'eau chaude ( $90-100^{\circ}\text{C}$ ) constitue le prétraitement le plus efficace par rapport aux autres méthodes, en accélérant la cinétique de séchage, en réduisant la durée du procédé et en améliorant le transfert de matière, avec une perte de masse de 71,4% pour les rondelles de pommes de terre étudiées.

En conclusion, les résultats de ce mémoire confirment l'efficacité de l'approche expérimentale adoptée pour améliorer les performances du système de séchage solaire étudié, et mettent en évidence le rôle du stockage thermique et des prétraitements dans l'optimisation des conditions de séchage et de la qualité du produit final.

# *Références*

---

## Références

---

1. Warda, Belachi. "Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires." Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie 149 (2009).
2. BEN SAHA, Abdelhamid, and S. E. D. D. I. K. I. Bousmaha. ETUDE COMPARATIVE DES PROCEDES DE SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRE SOUS CLIMAT DE LA REGION DE GHARDAÏA. Diss. 0101, جامعة غرداية.
3. Boussalia, A. "'Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux'". Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Climatique, Alger 7 (2010).
4. Ravali. (2023, August 24). *Solar drying: An ancient solution to save crops*. Eruvaaka
5. Du Soleil Dans Nos Assiettes. (s.d.). *Séchoir DSDNA*. Consulté le 7 juin 2026
6. Low-tech Lab. (s.d.). *Séchoir solaire indirect*. Wiki Low-tech Lab. Consulté le 7 juin 2026
7. Schematic diagram showing the dryer with air distribution system. Source: Sileshi et al. (2022)
8. Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., Azaizia, Z., & Guizani, A. (2021). *Thermodynamic evaluation of the forced convective hybrid-solar dryer during drying process of rosemary (Rosmarinus officinalis L.) leaves*
9. Tahar, B. M. (2019). *Doctorat en sciences: Génie Mécanique* (Doctoral dissertation, Université de Biskra)
10. .Rahman, M. Shafiur (2009). Food Properties Handbook. CRC Press.
11. Mujumdar, Arun S. (2014). Handbook of Industrial Drying. CRC Press.
12. Thomas, J. (2025, January 4). *Keep your fruits and vegetables truly clean*. Herbal Strategi
13. Parmar, N. (2016, October 13). *Information about food safety: What's safe & what's not in India*.

14. Shutterstock. (n.d.). *Dried apples cellulose* [Search results]. Shutterstock. Retrieved June 7, 2026
15. Lewicki, Pawel P. (2006). Trends in Food Science & Technology.
16. Health Canada. (2026, March 25). *How to blanch vegetables*. Canada's Food Guide.
17. Fellows, Peter J. (2017). Food Processing Technology: Principles and Practice.
18. Healthy Canning. (n.d.). *Fruit drying pre-treatments*. Healthy Canning. Retrieved June 7, 2026
19. Holar. (2020). *Make food last longer: Top 7 kitchen ingredients to preserve foods*. Holar Taiwan Kitchenware & Houseware Expert Supplier.
20. Nascimento, M. M., Silva, A. P., Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2024). *Pretreatments applied before drying: Effects on food quality, processing efficiency, and sustainability-A review*.
21. Barbosa-Cánovas, Gustavo V. (1996). Dehydration of Foods. Springer.
22. Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2025). *Hybrid drying method: Influence of pre-treatment and process conditions of ultrasound-assisted drying on apple quality*.
23. Torreggiani, Danilo (1993). Food Research International.
24. Li, B., Zhong, M., Sun, Y., Liang, Q., Shen, L., Qayum, A., ... & Ren, X. (2024). Recent advancements in the utilization of ultrasonic technology for the curing of processed meat products: A comprehensive review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 103, 106796.
25. Euronics. (n.d.). *Sharp R861SLM 25 litres combination microwave – Silver*. Euronics. Retrieved June 7, 2026,
26. Fernandes, F. A. N. et al. (2008). Drying Technology. Ratti, Cristina (2001). Journal of Food Engineering
27. MEISSA, Brahim. L'eau et l'espace agraire dans l'Oued Souf : cas de l'ancienne palmeraie. Diss. UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA, 2016
28. Gaba, E. (2009, November). *Algeria 39 Wilaya locator map-2009.svg* [Map]. Wikimedia Commons.