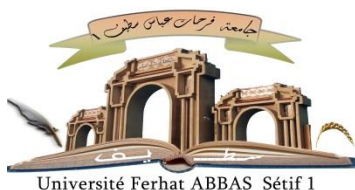


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DES SCIENCES

## THESE

Présentée au Département de Physique

Pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT EN SCIENCES

Option: Physique Médicale

Par

**BENAIDJA Asma**

## THÈME

**Dosimétrie par thermoluminescence et études des effets de l'irradiation sur la matière biologique : cas du traitement de la pomme de terre de reproduction**

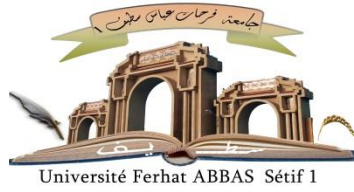
Soutenu le 14/05/2024 devant le Jury:

MAUCHE Djamel	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
KHARFI Fayçal	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de Thèse
SEGHOOR Abdeslam	Professeur	Centre de Formation et d'Appui à la Sécurité Nucléaire (CSN), Alger	Examineur
SOUICI Mounir	Maitre de conference A	Univ. Constantine 3	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DES SCIENCES

## **THESE**

Présentée au Département de Physique

Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Option: Physique Médicale

Par

**BENAIDJA Asma**

## **THÈME**

**Dosimétrie par thermoluminescence et études des effets de l'irradiation sur la matière biologique : cas du traitement de la pomme de terre de reproduction**

Soutenue le 14/05/2024 devant le Jury:

MAUCHE Djamel	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
KHARFI Fayçal	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de Thèse
SEGHOOR Abdeslam	Professeur	Centre de Formation et d'Appui à la Sécurité Nucléaire (CSN), Alger	Examineur
SOUICI Mounir	Maitre de conference A	Univ. Constantine 3	Examineur

# ***Remerciements***

*Je remercie DIEU le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage nécessaires pour mener a bien ce modeste travail*

*J'exprime mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Professeur KHARFI Fayçal pour sa guidance, ses orientations, son soutien, et ses précieux conseils qui m'ont été inestimables tout au long de ce travail de thèse. Mes remerciements vont aussi à Mrs Yefsah Rabah et Mansouri Belkacem du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger pour leur contribution efficace dans la réalisation de ce travail. Un grand merci à Mr Laouar Salim du Département d'Agronomie de l'université Sétif1 pour son aide précieuse dans les essais sur terrain.*

*Mes remerciements vont aux président, Pr. Maouche Djamel, et membres du jury, Pr. Seghour Abdesselem et Dr. Souici Mounir, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.*

*Mes chaleureux remerciements envers ma famille pour la compréhension et le soutien indefectibles tout au long de mon parcours.*

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1:</b> les composants principaux des aliments.....	3
<b>Tableau 2:</b> les différents sels minéraux.....	4
<b>Tableau 3 :</b> les différents types de glucides.....	6
<b>Tableau 4 :</b> les différents types de lipides.....	7
<b>Tableau 5:</b> les différents types de vitamines.....	8
<b>Tableau 6 :</b> Energie nécessaire pour les différentes transformations alimentaire .....	30
<b>Tableau 7:</b> les doses nécessaires pour tuer les microorganismes.....	40
<b>Tableau 8:</b> Diverses applications de l'irradiation et les doses correspondantes.....	44
<b>Tableau 9 :</b> les principaux dommages après l'irradiation $\gamma$ .....	47
<b>Tableau 10:</b> les sensibilités des vitamines aux rayonnements ionisants .....	55
<b>Tableau 11:</b> Méthodes de détection des aliments irradiés .....	55
<b>Tableau 12 :</b> Absorbance et concentration des tubercules parents de classe G0 .....	106
<b>Tableau 13 :</b> Absorbance et concentration des tubercules parents de classe A.....	107
<b>Tableau 14 :</b> Absorbance et concentration des tubercules récoltés (tubercule parent G0).....	107
<b>Tableau 15 :</b> Absorbance et concentration des tubercules récoltés (tubercule parent A).....	107
<b>Tableau 16 :</b> Les principales caractéristiques du lecteur Riso OSL/TL utilisé .....	117
<b>Tableau 17 :</b> Les conditions de lecture du signal TL .....	119

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : La conservation des aliments par rayonnement .....	20
<b>Figure 2</b> : La chaîne de traitements des aliments par rayonnement .....	24
<b>Figure 3</b> : Le symbole utilisé pour indiquer qu'un aliment a été traité avec des rayonnements ionisants .....	35
<b>Figure 4</b> : la radiolyse de l'eau .....	50
<b>Figure 5</b> : Un Spectre ESR .....	72
<b>Figure 6</b> : Courbe TL du quartz séparé du poivre noir non irradié montrant le fond (en bas) et courbes TL du quartz séparé du poivre noir irradié après exposition à des doses de rayons X de 10, 20, 40, 70, 100, 150, 200 et 1000 Gy .....	76
<b>Figure 7</b> : Effet de la dose de rayonnement sur la viscosité apparente.....	79
<b>Figure 8</b> : Test des comètes .....	82
<b>Figure 9</b> : Caractéristiques morphologiques de la pomme de terre.....	87
<b>Figure 10</b> : Les stades de développement des plantes de pommes de terre tout au long de la saison .....	88
<b>Figure 11</b> : Des échantillons des deux variétés utilisées.....	89
<b>Figure 12</b> : l'irradiateur gamma .....	90
<b>Figure 13</b> : Préparation du sol.....	91
<b>Figure 14</b> : la plantation des tubercules de pommes de terre.....	93
<b>Figure 15</b> : Un prélèvement pendant la croissance de pommes de terre.....	94
<b>Figure 16</b> : La vitesse de croissance de la Spunta G0 .....	95
<b>Figure 17</b> : La vitesse de croissance de la Spunta A.....	96
<b>Figure 18</b> : La vitesse de croissance de la Désirée G0.....	96
<b>Figure 19</b> : La vitesse de croissance de la Désirée A.....	97
<b>Figure 20</b> : La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : SPUNTA G0 .....	98
<b>Figure 21</b> : La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : SPUNTA A .....	98
<b>Figure 22</b> : La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : DESIREE G0 .....	99
<b>Figure 23</b> : La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : DESIREE A.....	99
<b>Figure 24</b> : Prélèvement après 60j : DESIREE G0 .....	100
<b>Figure 25</b> : Prélèvement après 80j : DESIREE G0 .....	100
<b>Figure 26</b> : Prélèvement après 60j : SPUNTA G0 .....	101
<b>Figure 27</b> : Prélèvement après 80j : SPUNTA G0 .....	101
<b>Figure 28</b> : Spectrophotomètre.....	102
<b>Figure 29</b> : Principe de fonctionnement d'un Spectrophotomètre.....	102
<b>Figure 30</b> : Evaporation de l'alcool à 80°C.....	104

<b>Figure 31:</b> la coloration selon la concentration du glucose dans la solution à analyser .....	105
<b>Figure 32:</b> l'absorbance en fonction de la concentration en glucose .....	106
<b>Figure 33:</b> Concentration en sucres totaux des SPUNTA et DESIREE (G0) irradiés et non plantés mesurée juste après la récolte des plantés .....	108
<b>Figure 34 :</b> Concentration en sucre des SPUNTA et DESIREE (A) irradiés et non plantés mesurée juste après la récolte des plantés.....	109
<b>Figure 35:</b> Concentration en sucre dans les SPUNTA et DESIREE irradiés et plantés après récolte .....	109
<b>Figure 36:</b> Tubercules de pomme de terre irradiés.....	114
<b>Figure 37:</b> La séparation de la phase organique et la phase minérale.....	115
<b>Figure 38:</b> Description du lecteur Riso OSL/TL .....	116
<b>Figure 39 :</b> Courbe TL des minéraux silicatés séparés de pommes de terre non irradiées montrant le fond et les courbes TL de pommes de terre irradiées après exposition à 10, 20, 30, 50, 150, 1 000 et 1 500 Gy autour de l'irradiateur gamma .....	120
<b>Figure 40:</b> La courbe de dépendance TL-Dose .....	121

## **Table des Matières**

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### **Chapitre I : Conservation et traitement des produits agricoles par l'irradiation au rayonnement ionisant**

<b>1. Introduction</b> .....	4
<b>2. La composition des produits agricole</b> .....	4
2.1 L'eau .....	5
2.2 Les sels minéraux .....	5
2.3 Les glucides .....	6
2.4 Les protéines .....	7
2.5 Les lipides.....	8
2.6 Les vitamines.....	9
<b>3. La détérioration des produits agricole</b> .....	10
<b>4. La conservation des produits agricoles</b> .....	11
4.1 La conservation par séparation et élimination d'eau.....	12
4.1.1 Le séchage.....	12
4.1.2 La lyophilisation.....	12
4.1.3 Fumage ou la fumaison.....	13
4.2 Conservation par la chaleur « thermique ».....	13
4.2.1 La pasteurisation.....	13
4.2.2 La stérilisation .....	13
4.3 La conservation par le froid.....	14
4.3.1 Réfrigération.....	14

4.3.2	Congélation.....	14
4.3.3	La surgélation .....	14
4.4	La conservation par l'ajout d'un agent conservateur.....	15
4.4.1	Le salage.....	15
4.4.2	Le sucrage .....	15
4.4.3	Antioxydants .....	15
4.4.4	Acidification .....	16
4.5	La fermentation.....	16
4.6	La conservation sous atmosphère contrôlé.....	16
4.6.1	La conservation des aliments sous vide.....	16
4.6.2	La conservation des aliments en atmosphère modifiée.....	17
4.7	La conservation par ultrasons.....	17
4.8	La conservation par les champs électriques pulsés.....	18
4.9	La conservation par irradiation.....	19
4.9.1	Conservation par radiation non ionisante.....	20
4.9.2	Conservation par radiation ionisante.....	22
4.9.3	L'irradiation ionisante des produits alimentaires.....	26
<b>5.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>30</b>

## **Chapitre II: Effets de l'irradiation sur la matière biologique : cas des produits agricoles**

<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>32</b>
<b>2.</b>	<b>Historique et législations du traitement des aliments par l'irradiation.....</b>	<b>32</b>
2.1	Réglementation internationale.....	32



2.2	Réglementation algérienne .....	36
<b>3.</b>	<b>Effets biologiques de l'irradiation sur les aliments</b> .....	<b>37</b>
3.1	Les effets de l'irradiation sur les micro-organismes .....	38
3.1.1	Les bactéries .....	40
3.1.2	Les virus .....	41
3.1.3	Les insectes .....	41
3.2	Les effets biologiques de l'irradiation sur les composants des aliments .....	48
3.2.1	Effet sur les glucides.....	53
3.2.2	Effet sur les lipides.....	53
3.2.3	Effets sur les protéines.....	54
3.2.4	Effet sur les vitamines.....	55
3.2.5	Effet sur les sels minéraux.....	58
3.3	Effets mutagènes de l'irradiation sur les aliments.....	59
<b>4.</b>	<b>Sécurité des aliments traités par irradiation ionisante</b> .....	<b>62</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>64</b>

### **Chapitre III: Méthodes d'identification de l'irradiation**

<b>1.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>66</b>
<b>2.</b>	<b>Méthodes d'identification de l'irradiation</b> .....	<b>66</b>
2.1	Méthodes physiques.....	70
2.1.1	Identification de l'irradiation par spectroscopie par résonance de spin électronique .....	70
2.1.2	Identification de l'irradiation par la luminescence.....	74
2.1.3	Identification de l'irradiation des aliments par la mesure d'impédance électrique .....	79

2.1.4	Identification de l'irradiation des aliments par la mesure de la viscosité.....	79
2.2	Méthodes chimiques.....	80
2.2.1	Hydrocarbures.....	80
2.2.2	Alkylcyclobutanones.....	81
2.3	Méthodes biologiques .....	81
2.3.1	Électrophorèse sur agarose de l'ADN mitochondrial.....	81
2.3.2	Le test des comètes.....	82
2.3.3	Détection immunologique des bases d'ADN modifiées.....	83
2.3.4	Changement de la charge microbienne .....	84
3.	<b>Conclusion</b> .....	84

## **Chapitre IV: Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction**

1.	<b>Introduction</b> .....	85
2.	<b>Etude de l'effet de l'irradiation par rayonnements gamma sur le comportement physiologique des plants de pommes de terre</b> .....	88
2.1	Matériel et méthodes.....	88
2.1.1	Sélection des échantillons.....	88
2.1.2	Irradiation des semences.....	90
2.1.3	Préparation du sol de culture .....	91
2.1.4	Plantation.....	92
2.2	<b>Le suivi du comportement physiologique des plants de pomme de terre</b> .....	93
3.	<b>Dosage des sucres totaux</b> .....	101
3.1	Principe de la spectrophotométrie.....	102

3.2	Protocol expérimental.....	103
3.3	La courbe d'étalonnage .....	105
3.4	Discussions.....	106
<b>4.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>110</b>

## **Chapitre V : Identification de l'irradiation gamma de la pomme de terre par thermoluminescence**

<b>1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>112</b>
<b>2.</b>	<b>Identification des irradiations par thermoluminescence.....</b>	<b>113</b>
<b>3.</b>	<b>Protocol expérimental .....</b>	<b>113</b>
3.1	Irradiation des échantillons de pomme de terre .....	113
3.2	Séparation de la phase minérale.....	114
3.3	Lecture des signaux de thermoluminescence.....	116
<b>4.</b>	<b>Résultats et discussions .....</b>	<b>119</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>121</b>
	<b>Conclusions.....</b>	<b>123</b>

# **Introduction Générale**

## Introduction

L'objectif principal du traitement des aliments est de prolonger leur durée de conservation tout en préservant leur qualité, leur sécurité et leur valeur nutritive. Cette pratique a évolué au fil du temps pour répondre aux besoins croissants de stockage, de transport et de disponibilité alimentaire, ainsi que pour minimiser les pertes alimentaires. L'histoire de la conservation des aliments est riche et diversifiée, marquée par différentes méthodes développées à travers les siècles. Au fil des millénaires, les humains ont découvert de nombreuses autres méthodes de conservation de leurs aliments, notamment la salaison, la cuisson, le fumage, la mise en conserve, la congélation et l'utilisation de conservateurs chimiques. L'ajout le plus récent à cette liste est le traitement par l'irradiation des denrées alimentaires, qui signifie leur exposition à des doses soigneusement sélectionnées de rayonnements ionisants.

L'irradiation des produits agricoles est une méthode de traitement qui utilise des rayonnements ionisants tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons pour détruire les micro-organismes, les insectes et les parasites présents sur les aliments. Cette technologie contribue à prolonger la durée de conservation des produits alimentaires, à améliorer leur sécurité microbiologique et à réduire les pertes alimentaires. Les effets des rayonnements ionisants sont connus pratiquement depuis leur découverte, c'est-à-dire autour des années 1900. Cependant, les recherches toxicologiques n'ont pu être menées que depuis les années 1960. La recherche et les applications pratiques au cours de plusieurs décennies montrent que l'irradiation retarde l'adultération des aliments et réduit leur infestation par des insectes ou la contamination par des micro-organismes, notamment les agents responsables des toxi-infections alimentaires.

L'irradiation par le rayonnement ionisant ne s'est pas arrêtée au seul objectif de conservation des aliments et produits de l'agriculture mais n'en est pris à la mutagenèse en s'attaquant l'ADN végétale pour développer des variétés de plus en plus résistantes aux maladies et problèmes du stress hydrique connus dans certaines régions de notre planète.

Le traitement des aliments par irradiation ionisante implique l'application contrôlée de l'énergie provenant de rayonnements ionisants tels que les rayons gamma, les électrons et les rayons X pour la conservation des produits alimentaires. Les rayons gamma et les rayons X

## Introduction générale

---

sont des rayonnements de courte longueur d'onde qui font partie du spectre électromagnétique. Les rayons gamma sont émis par des sources radio-isotopiques tels que le Cobalt 60 et le Césium 137, tandis que les électrons et les rayons X ont générés par des installations électriques qui s'appellent des accélérateurs de particules. Ces rayonnements ont le pouvoir de pénétrer profondément dans les matières alimentaires et provoquer les effets souhaités. En effet, l'interaction des radiations et des produits radiolytiques de l'eau avec l'ADN altère la capacité de reproduction des micro-organismes et des insectes ainsi que la capacité de germination de certains produits agricoles (**Diehl, J.F, 2018**)

Par l'utilisation d'un rayonnement ionisant, la conservation et le traitement des aliments et produits agricoles par l'irradiation a suscité une certaine réticence par les consommateurs qui sont de plus en plus préoccupés par les dangers liés à l'alimentation, parfois à tort et parfois à raison. Il est ici à signaler que le procédé de traitement des aliments par irradiation est reconnu par l'organisation d'agriculture et aliments (**FAO**) et l'organisation mondiale de la santé (**OMS**) depuis le début des années 1980. Plusieurs études et recherches, ont été menées sur ce procédé et ses effets sur les aliments. Ainsi, plusieurs méthodes et techniques ont été développées pour l'identification de l'irradiation et ce, pour lutter contre dissimulation ou déclaration frauduleuse. La thermoluminescence (TL) est la méthode utilisée dans ce travail pour l'identification de l'irradiation. En effet, la TL induite suite à une irradiation des minéraux silicatés présents dans les aliments est une technique efficace pour identifier les produits alimentaires irradiés.

En raison de ses avantages pour le traitement et la préservation à long terme des aliments et notamment des semences, l'irradiation a été appliquée à de nombreux produits agricoles à des diverses fins, comme les pommes de terre, les épices, les fruits et les fruits de mer. Le principal objectif de ce travail de thèse est le traitement par irradiation de la pomme de terre de reproduction pour une éventuelle amélioration de sa conservation et son rendement après une nouvelle implantation. Nous nous sommes aussi intéressés à l'identification de l'irradiation par la méthode de thermoluminescence pour la lutte contre toute déclaration frauduleuse ou dissimulation du recours à un tel procédé.

Ce manuscrit est subdivisé en deux parties, la première comporte trois chapitres théoriques et la deuxième partie expérimentale contient deux chapitres. Le premier chapitre consiste en un exposé des principales méthodes de conservation et de traitement des produits agricoles dont la technique de l'irradiation ionisante. Le deuxième chapitre traite les effets

## Introduction générale

---

biologiques de l'irradiation sur les aliments ainsi que la salubrité et la qualité alimentaire des produits traités par ce procédé. Le troisième chapitre présente les méthodes d'identification de l'irradiation avec un focus sur la méthode de thermoluminescence utilisée dans le cadre de ce projet de thèse. Le chapitre quatre est réservé à la présentation de nos résultats concernant le traitement par l'irradiation de la pomme de terre de reproduction, l'étude des effets des rayonnements gamma sur le comportement physiologique des plants de pommes de terre et le dosage des sucres totaux. Le dernier chapitre est consacré à l'identification de l'irradiation de la pomme de terre par méthode de thermoluminescence. Et enfin, une conclusion générale sur les travaux réalisés et résultats obtenus.

# **Partie**

# **Théorique**



# **Chapitre I**

**Conservation et traitement des produits  
agricoles par l'irradiation au  
rayonnement ionisant**

## 1 Introduction

La sécurité alimentaire est un concept qui vise à garantir que les aliments que nous consommons sont sûrs, sains et de qualité. Elle englobe toutes les mesures prises pour prévenir les risques liés à la contamination des aliments, tels que les maladies d'origine alimentaire, les intoxications ou les allergies. Pour assurer la sécurité alimentaire, plusieurs acteurs interviennent à différents niveaux. Les gouvernements établissent des réglementations et des normes en matière d'hygiène alimentaire, de traçabilité des produits et de contrôle des contaminants. Les producteurs agricoles et les transformateurs alimentaires doivent respecter ces normes et mettre en place des bonnes pratiques de production et de transformation.

Donc la sécurité alimentaire est un enjeu majeur pour assurer notre bien-être et notre santé. Elle repose sur la collaboration de tous les acteurs de la chaîne alimentaire, depuis la production jusqu'à la consommation.

## 2 La composition des produits agricoles

Un aliment est un produit d'origine animale ou végétale qui contient des substances dont notre corps a besoin pour se nourrir. Ces substances sont l'eau, les sels minéraux, les vitamines, les protéines, les glucides et les lipides. Chaque type d'aliment est composé de différents ingrédients alimentaires: glucides, lipides, fibres, vitamines, qui font que chaque type d'aliment est différent. Les groupes d'aliments se caractérisent par leur apport nutritionnel majeur (**Fellows, 2000**). Le tableau 1 regroupe les principaux composants des aliments.

**Tableau 1: les composants principaux des aliments**

Groupe d'aliments	Constituants alimentaires caractéristiques	Autres apports
Viandes, Poissons, Œufs	Protides	Lipides, Fer
Produits laitiers	Calcium, vitamines liposolubles	Lipides, protides
Matières grasses	Lipides, vitamines liposolubles	
Céréales et féculents	Glucides complexes (amidon)	
Fruits et légumes	Eau, fibres	Glucides, minéraux, vitamines

## Chapitre I Conservation et traitement des produits agricoles par l'irradiation au rayonnement ionisant

		hydrosolubles
Boissons	Eau	Variables selon la boisson (sucre, alcool, caféine, theanine...)
Produits sucrés	Glucides simples (glucose) ou diholoside (saccharose)	

On distingue deux types de nutriments : les micros et les macronutriments, les glucides, les protéines et les lipides sont classées comme des macro- nutriments alors que les sels minéraux, les vitamines et les autres composants qui se trouvent de l'ordre de faible pourcentage et qui sont nécessaires pour notre santé. D'un point de vue nutritionnel, la connaissance de la composition des aliments et de leurs composants est très importante pour assurer l'équilibre alimentaire. De même, d'un point de vue technologique, la connaissance de la composition des aliments permet un meilleur ajustement des conditions de transformation et de traitements aux sensibilités des composants, par exemple plusieurs vitamines sont très sensibles à la chaleur (Nout et al., 2003)

### 2.1 L'eau

L'eau est la seule boisson nécessaire à la vie. Il est contenu dans les aliments et les boissons et représente 80 % du poids corporel, il est donc nécessaire de compenser les pertes liées à la transpiration, la respiration et la digestion. C'est une source importante de sels minéraux et assure le transport des substances dans l'organisme.

### 2.2 Les sels minéraux

Substances minérales, comme le calcium ou le magnésium, qui n'apportent pas d'énergie, mais qui jouent un rôle important dans la constitution des tissus, le fonctionnement nerveux et musculaire et la production des hormones. Le tableau 2, regroupe les sels minéraux nécessaires dans notre alimentation.

**Tableau 2: les différents sels minéraux**

Les sels minéraux	
<b>Le potassium</b>	aide les nerfs et les muscles à fonctionner correctement

<b>Le calcium</b>	permet le bon fonctionnement des os, des dents, de la coagulation, de la pression sanguine, de la contraction musculaire.
<b>Le magnésium</b>	améliore l'équilibre nerveux, psychique et émotionnel. Il relaxe les muscles et régule le rythme cardiaque
<b>Le phosphore</b>	est l'un des constituants des membranes cellulaires. Il participe à la croissance des tissus et à leur régénérescence, à la formation et au maintien de la santé des os et des dents
<b>Le soufre</b>	favorise la formation des protéines (insuline, héparine), de sucres complexes, de vitamines (B1, B8). Il est présent au niveau des ongles et des cheveux, de la peau et des cellules, de l'os où il favorise l'assimilation du calcium, du phosphore et du magnésium. Il prévient le vieillissement et neutralise des composés toxiques
<b>Le chlore</b>	est un minéral qui joue un rôle essentiel dans la répartition de l'eau dans l'organisme en association avec le sodium et le potassium
<b>L'iode</b>	assure un bon fonctionnement de la thyroïde et, durant la grossesse, un bon développement du cerveau du fœtus
<b>Le fluor</b>	protège les dents et surtout l'émail dentaire. Il renforce également la structure osseuse
<b>Le manganèse</b>	participe au métabolisme des sucres et à la synthèse des graisses, du cholestérol en particulier. Il est indirectement impliqué dans la formation des hormones sexuelles et contribue à la formation du squelette et du tissu conjonctif. Il participe à l'élimination des radicaux libres
<b>Le zinc</b>	est un cofacteur d'enzymes antioxydants qui luttent contre les radicaux libres produits en période de stress. Il a un rôle dans le cerveau et aurait une relation avec la maladie d'Alzheimer. Il renforce l'immunité, intervient dans la formation de l'os, les fonctions de reproduction
<b>Le cuivre</b>	intervient dans la formation du collagène et de l'hémoglobine, ainsi que dans les mécanismes de l'immunité
<b>Le sélénium</b>	est un antioxydant

### 2.3 Les glucides

Les glucides, ou hydrates de carbone, substances énergétiques que l'on trouve principalement dans les aliments végétaux tels que les fruits, les légumes, les céréales, les légumineuses ainsi dans les produits laitiers, sont la source principale des activités cérébrales et musculaires. Les glucides se présentent sous différentes formes, notamment les glucides simples et les glucides complexes. Les glucides simples, également appelés sucres simples, sont rapidement digérés et fournissent une énergie instantanée. Ils se trouvent dans les aliments tels que les fruits et le miel. Les glucides complexes, également appelés amidons, prennent plus de temps à digérer et fournissent une énergie plus durable. Ils se trouvent dans des aliments comme les céréales complètes, les pâtes, le riz, les pommes de terre et les légumineuses. Le tableau 3 regroupe les différents types de glucides.

**Tableau 3 : les différents types de glucides**

les glucides simples	
<b>Glucose</b>	c'est le principal sucre utilisé par le corps comme source d'énergie.
<b>Fructose</b>	se trouve naturellement dans les fruits et est souvent utilisé comme édulcorant.
<b>Saccharose</b>	également connu sous le nom de sucre de table, il est composé de glucose et de fructose et est couramment utilisé pour sucrer les aliments.
les glucides complexes	
<b>Amidon</b>	se trouve dans les céréales (comme le blé, le riz, l'avoine), les pommes de terre, les légumineuses (comme les haricots, les lentilles) et certains légumes.
<b>Fibres</b>	bien que les fibres ne soient pas digérées par le corps, elles sont un type de glucide complexe important pour la santé digestive. Les sources de fibres comprennent les fruits, les légumes, les céréales complètes et les légumineuses.

Il est important de noter que les aliments contiennent souvent une combinaison de glucides simples et complexes. Par exemple, les fruits contiennent à la fois du fructose (glucide simple) et des fibres (glucide complexe).

## 2.4 Les protéines

Les protides, ou protéines, sont nécessaires aux fonctions vitales. Ce sont des composés azotés qui contiennent des acides aminés. Ces acides, principalement présents dans les muscles, sont au fondement de tous les processus vitaux, assurant le transport et le stockage des substances nutritives. Il est important de veiller à ce qu'ils soient en quantité suffisante dans l'organisme afin d'éviter les troubles qui peuvent découler de leur carence (obésité, diabète, cholestérol...). Leur stock se renouvelle en permanence et nécessite des apports journaliers. En se dégradant, ils donnent de l'urée et de l'acide urique, éliminés dans les urines. Ils ont un rôle biologique (hormones, anticorps) et plastique (structure osseuse, musculaire, cutanée). Parmi les acides aminés, une dizaine doit être fournie par l'alimentation car l'organisme ne peut en faire la synthèse. Il existe des protéines animales (viandes, poissons, laitages) qui apportent plus d'acides aminés et des protéines végétales (légumineuses et céréales).

## 2.5 Les lipides

Les lipides sont une classe de molécules organiques qui jouent un rôle essentiel dans notre organisme. Ils sont composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et peuvent être trouvés dans des aliments tels que les huiles, les graisses, les avocats, les noix et les poissons gras.

Les lipides sont une source d'énergie importante, fournissant plus de deux fois la quantité d'énergie que les glucides et les protéines. Ils sont également nécessaires à de nombreuses fonctions biologiques, y compris la construction des membranes cellulaires, l'absorption des vitamines liposolubles (comme les vitamines A, D, E et K), la production d'hormones et la protection des organes internes. Il existe différents types de lipides, notamment les acides gras, les triglycérides, les phospholipides et les stéroïdes. Le tableau 4 regroupe les différents types de lipides.

**Tableau 4: les différents types de lipides**

les lipides	
<b>Les acides gras</b>	sont les composants de base des lipides et peuvent être saturés (sans doubles liaisons) ou insaturés (avec des doubles liaisons).

<b>Les triglycérides</b>	sont la forme de stockage des lipides dans notre corps,
<b>les phospholipides</b>	Sont importants pour la structure des membranes cellulaires
<b>Les stéroïdes</b>	comme le cholestérol, jouent un rôle dans la production d'hormones et la digestion des graisses.

## 2.6 Les vitamines

Les vitamines n'ont pas de valeur énergétique, mais leur apport alimentaire est indispensable car elles ne sont pas fabriquées par l'organisme et leur carence provoque des déséquilibres importants. Elles servent de régulateur à toutes petites doses. Certaines sont détruites par la chaleur, l'alimentation doit donc comprendre des légumes et des fruits crus. Le tableau 5 regroupe les différents types de vitamines et leurs importances.

**Tableau 5: les différents types de vitamines**

<b>les vitamines liposolubles</b>	
<b>La vitamine A</b>	permet la croissance, lutte contre l'infection, forme le pigment rétinien, nourrit les muqueuses, joue un rôle dans le développement de l'embryon.
<b>La vitamine D</b>	est nécessaire à la croissance, sa carence entraîne le rachitisme
<b>La vitamine E</b>	élabore la prothrombine qui intervient dans la coagulation sanguine
<b>Les vitamines hydrosolubles</b>	
<b>La vitamine B1</b>	intervient dans la croissance et dans les influx nerveux. Sa carence entraîne un dysfonctionnement des nerfs périphériques, une hypertrophie cardiaque, une atonie du tube digestif
<b>La vitamine B2</b>	ou riboflavine, joue un rôle dans le métabolisme de l'énergie
<b>La vitamine</b>	indispensables à la santé des os, des dents, des cheveux, des ongles ou

<b>B3</b>	de la peau
<b>La vitamine B5</b>	ou acide pantothénique, permet l'utilisation de l'énergie des aliments, la synthèse des neurotransmetteurs, de l'hémoglobine, des hormones stéroïdiennes
<b>La vitamine B6</b>	pyridoxine, intervient dans la fabrication des neurotransmetteurs et des globules rouges ; elle transforme le glycogène en glucose
<b>La vitamine B8</b>	appelée encore biotine, joue un rôle important dans la production d'énergie à partir des nutriments, ainsi que dans la synthèse des acides gras et des acides aminés. Sa carence entraîne des problèmes de peau, une chute de cheveux, des crampes musculaires
<b>La vitamine B9</b>	ou acide folique, intervient dans la synthèse des neuromédiateurs, la formation des globules, la production des cellules. Elle a un rôle fondamental chez la femme enceinte dans la croissance et le développement du fœtus.
<b>La vitamine B12</b>	a un rôle dans l'élaboration des globules rouges, du tissu osseux et de l'entretien des cellules nerveuses. Elle guérit l'anémie pernicieuse
<b>La vitamine C</b>	est indispensable aux oxydations. Elle est détruite par la cuisson

### 3 La détérioration des produits agricoles

La détérioration ou la dégradation des aliments est un processus naturel qui se produit lorsque les aliments sont exposés à des conditions défavorables, telles que la chaleur, l'humidité, l'air, la lumière et les micro-organismes. Ce processus peut entraîner des changements indésirables tels que la décomposition, la fermentation, la moisissure et la prolifération de bactéries. Il existe plusieurs facteurs qui contribuent à la détérioration des aliments. Les principaux facteurs comprennent :

- **Les micro-organismes** : les bactéries, les levures et les moisissures sont des micro-organismes qui se trouvent naturellement dans l'environnement. Lorsque les aliments



sont exposés à des conditions favorables, ces micro-organismes se multiplient rapidement et provoquent la détérioration des aliments.

- **L'oxydation** : l'oxygène présent dans l'air peut réagir avec les composants des aliments, ce qui peut entraîner une détérioration de leur goût, de leur couleur et de leur texture.
- **La lumière** : l'exposition à la lumière peut provoquer des changements chimiques dans les aliments, en particulier dans les vitamines et les pigments, ce qui peut entraîner une perte de valeur nutritive et une détérioration de la qualité.
- **La température** : une température élevée peut accélérer la croissance des micro-organismes, tandis qu'une température basse peut ralentir leur croissance. Il est donc important de stocker les aliments à des températures appropriées pour prévenir la détérioration.

#### 4 La conservation des produits agricoles

La sécurité alimentaire est un sujet de plus en plus important. L'une des raisons est l'émergence de nouveaux types de bactéries nocives ou formes évolutives de bactéries plus anciennes qui peuvent provoquer une maladie grave. Le but est comment lutter au mieux contre les maladies d'origine alimentaire qui encouragent l'utilisation de diverses technologies susceptibles d'améliorer la sécurité alimentaire.

Aujourd'hui, La conservation des aliments est un ensemble de techniques concentrées sur le développement non seulement de produits microbiologiquement sûrs avec une longue durée de conservation, mais en même temps, des produits aux propriétés fraîches et de haute qualité en termes d'odeur, de goût, de saveur et de texture (**Bermúdez-Aguirre et al., 2011**).

Au cours de la dernière décennie, Il est constaté une demande croissante de produits alimentaires frais et nutritifs avec des attributs organoleptiques élevés, une sécurité améliorée et une durée de conservation prolongée. L'inactivation microbienne non thermique a été un sujet de recherche majeur dans ce domaine. Certaines autres technologies étudiées sont la haute pression hydrostatique (HHP), le champ électrique pulsé (PEF), l'irradiation ionisante et la décontamination ultraviolette (UV) (**Junqueira-Gonçalves et al., 2011**).

Les objectifs de l'industrie alimentaire aujourd'hui, comme par le passé, sont les suivants :

- Prolonger la salubrité des aliments (durée de conservation) avec des techniques de conservation qui limitent les changements microbiologiques ou biochimiques pour laisser du temps pour la distribution, la vente et le stockage à domicile.
- Augmenter la variété alimentaire en offrant une variété attrayante de saveurs, de couleurs, d'arômes et de textures dans les aliments (qualités gustatives, organoleptiques ou sensorielles) ; Un objectif connexe est de changer l'apparence d'un aliment pour permettre une transformation ultérieure (par exemple, moudre le grain en farine).
- Apporte les nutriments nécessaires à la santé (appelés qualité nutritionnelle des aliments).
- Générer des revenus pour les entreprises de production.

Au cours du processus de la conservation, les activités chimiques, physiques et biologiques, qui détériorent les aliments, sont considérablement réduites ; donc prolonger la durée de conservation des produits alimentaires (**Ahmed et al., 2016**).

Voici quelques méthodes couramment utilisées pour conserver les aliments :

#### **4.1 La conservation par séparation et élimination d'eau**

##### **4.1.1 Le séchage**

La conservation des aliments par séchage est une méthode traditionnelle et efficace pour prolonger leur durée de conservation. Elle consiste à éliminer l'humidité présente dans les aliments, ce qui réduit la croissance des microorganismes responsables de la détérioration. Le séchage peut être réalisé de différentes manières, notamment par exposition à l'air chaud, au soleil, par déshydratation osmotique ou par l'utilisation de déshydrateurs électriques. Le but est de réduire la teneur en eau des aliments à un niveau où les microorganismes ne peuvent plus se développer. Lors du processus de séchage, l'eau contenue dans les aliments s'évapore, ce qui permet de préserver les aliments pendant une longue période. Cela est dû au fait que les microorganismes ont besoin d'eau pour se développer et se multiplier. En éliminant l'eau, on réduit leur capacité à se développer.

Le séchage des aliments présente plusieurs avantages. Il permet de conserver les aliments sans l'utilisation de produits chimiques, tout en préservant leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques. De plus, les aliments séchés sont généralement légers et faciles à stocker, ce qui les rend pratiques pour le transport et le stockage à long terme (**Ahmed et al., 2016**).

### 4.1.2 La lyophilisation

Le principe de cette technique est de congeler un aliment puis de le placer sous vide. L'eau qui le contient passe donc rapidement de l'état solide à l'état gazeux (c'est la sublimation). Ce processus d'élimination rapide de l'eau (beaucoup plus rapide que le séchage ou la déshydratation) permet une bonne conservation du goût, de l'arôme et de la qualité nutritionnelle. Et comme il n'y a plus d'eau, il n'y a pas de croissance bactérienne. Après réhydratation, le produit retrouve quasiment sa texture d'origine. Cependant, cette méthode est plus coûteuse que le séchage ou la déshydratation. Il est utilisé spécifiquement pour faire de la nourriture pour les astronautes.

### 4.1.3 Fumage ou la fumaison

Le fumage est basé sur la soumission d'un produit alimentaire aux effets de composés gazeux dégagés lors de la combustion des végétaux. Le fumage joue un rôle dans l'aromatisation et/ou la coloration. Elle s'applique principalement aux produits carnés où le séchage après fumage permet de conserver la viande et le poisson par l'action conjuguée de la déshydratation et du désinfectant contenu dans la fumée.

## 4.2 Conservation par la chaleur « thermique »

Le traitement thermique des aliments est la technique de conservation à long terme la plus importante. Son objectif est la destruction ou l'inhibition complète ou partielle des enzymes et des micro-organismes dont la présence ou la croissance peuvent altérer l'aliment en question ou le rendre impropre à la consommation humaine.

### 4.2.1 La pasteurisation

Cette technique consiste à chauffer le produit à une température légèrement inférieure à 100°C (généralement 70 à 80°C selon les bactéries) suivi d'un refroidissement rapide du produit. La température élevée tue une grande partie des bactéries. Cependant, il y en a encore qui ont résisté sous forme de spores. Ne pas chauffer à une température trop élevée ne modifie pas la qualité de l'arôme et de la saveur du produit, et ne dénature pas complètement les protéines présentes dans le produit. Enfin, il est important de réfrigérer (à environ 4°C) le produit pasteurisé pour éviter la multiplication de bactéries qui autrement ne seraient pas tuées. Par conséquent, la pasteurisation n'élimine pas tous les germes mais permet tout de même de conserver les aliments plus longtemps. Par conséquent, ce dernier a une date de péremption.

#### 4.2.2 La stérilisation

La stérilisation est une technique permettant d'éliminer toute forme de micro-organismes vivants, y compris les spores, en utilisant des températures supérieures à 100°C (120°C en moyenne). Ces températures sont beaucoup plus élevées que la pasteurisation, et la valeur nutritionnelle et la saveur du produit peuvent donc être altérées. Par conséquent, il est important de choisir une méthode de manipulation appropriée en fonction des sensibilités du produit. Puisqu'un aliment stérile ne contient pas de germes, il n'a pas de date limite de consommation mais a une date de péremption optimale (mois à années). Passée cette date, le produit ne présente plus de danger pour le consommateur, mais la qualité gustative et nutritionnelle n'est plus garantie (Toledo, 2007).

Le traitement à ultra haute température UHT qui est une stérilisation, est un mode de conservation qui consiste à chauffer immédiatement le produit à très haute température (typiquement 140 à 150°C) pendant 1 à 5 secondes, puis à refroidir rapidement le produit. Ce processus tue tous les micro-organismes. Le temps de traitement est court, il ne peut donc que légèrement modifier le goût et la valeur nutritionnelle du produit.

#### 4.3 La conservation par le froid

La conservation par le froid est un traitement qui peut ralentir, voire stopper, la croissance et l'activité microbienne, et conserver les aliments plus ou moins longtemps.

##### 4.3.1 Réfrigération

La réfrigération est l'une des méthodes les plus courantes pour conserver les aliments périssables. Elle consiste à stocker les aliments à des températures basses, généralement entre 0 et 4 degrés Celsius, pour ralentir la croissance des micro-organismes responsables de la détérioration des aliments. Il est important de régler le réfrigérateur à la bonne température et de veiller à ce que les aliments soient correctement emballés pour éviter la contamination croisée.

##### 4.3.2 Congélation

La congélation consiste à abaisser la température des aliments en dessous de 0 degré Celsius pour arrêter la croissance des micro-organismes. La congélation prolonge considérablement la durée de conservation des aliments, mais il est important de s'assurer que les aliments sont correctement emballés pour éviter la formation de cristaux de glace et la dégradation de la qualité.

### 4.3.3 La surgélation

La surgélation est similaire à la congélation. Cependant, la température des aliments est abaissée très rapidement jusqu'à  $-18^{\circ}\text{C}$  en tout point. Tout dépend de la vitesse de cristallisation de l'eau. Lors de la solidification, la température baisse assez lentement, de sorte que le processus de cristallisation se déroule lentement. L'eau contenue dans les cellules forme alors de gros cristaux capables de perturber les membranes cellulaires, entraînant des changements de texture et de saveur. En revanche, la chute rapide de température lors de la congélation ne permet que la formation de petits cristaux dans la cellule. En conséquence, ceux-ci ne sont pas détruits, donc la texture et la saveur sont préservées.

## 4.4 La conservation par l'ajout d'un agent conservateur

Les conservateurs sont des substances qui limitent, ralentissent ou stoppent la croissance des microorganismes (bactéries, levures, moisissures) présents ou entrant dans l'aliment et préviennent donc l'altération des produits ou les intoxications alimentaires.

Ils sont employés entre autres dans les aliments cuits, le fromage, les jus de fruits et les margarines.

### 4.4.1 Le salage

Le salage est une des méthodes traditionnelles de conservation des aliments qui utilisent du sel pour empêcher la croissance des micro-organismes. Cette méthode est couramment utilisée pour la conservation de la viande et du poisson. Le but de ce traitement est d'appliquer du sel directement à la surface de l'aliment (salage à sec) ou en immergeant le produit dans une solution de saumure (trempage en saumure). Cette technique est principalement utilisée en fromagerie, en charcuterie et pour conserver certaines espèces de poissons (hareng, saumon...) ou d'aliments végétaux (condiments).

### 4.4.2 Le sucrage

Le sucre est un excellent conservateur en raison de son excellente absorption d'eau. Le rôle du sucre est le même que celui du sel, sauf qu'il n'est efficace qu'à des concentrations très élevées (65-67 %), la concentration du sucre ne peut se faire que lorsqu'il fait chaud car l'aliment doit perdre une partie de son eau par évaporation encore chaude. Les sucres dissous se lient aux molécules d'eau et les rendent indisponibles pour la croissance microbienne.

### 4.4.3 Antioxydants

Les antioxydants sont des molécules qui aident à protéger les aliments contre les réactions d'oxydation qui accélèrent le vieillissement. Il peut s'agir d'altérations dues à l'oxygène de l'air, à la lumière, aux traces de métaux ou à certaines enzymes par exemple les gallates sont ajoutés principalement aux huiles végétales et à la margarine pour les empêcher de rancir et pour préserver leur goût.

### 4.4.4 Acidification

L'acidification consiste à ajouter un acide organique (comme l'acide acétique) ou un ingrédient acide (comme le citron) à un aliment qui est initialement peu acide. Ils doivent être ajoutés dans des proportions bien déterminées pour que le pH du produit fini soit inférieur à 4,5.

## 4.5 La fermentation

Lors de la fermentation, grâce à l'action de micro-organismes dans un milieu anaérobie (sans oxygène), les sucres (principalement végétaux) sont transformés en acides (acide lactique). L'acide lactique, lorsque sa concentration dépasse 0,7 %, a un effet conservateur et inhibe ou inactive toutes les bactéries. Parfois, des cultures pures de bactéries lactiques sont utilisées pour la fermentation, mais le plus souvent, la fermentation se fait naturellement en raison de la microflore présente sur le fruit ou le légume lui-même. Les aliments fermentés doivent être conservés à 0-5°C.

## 4.6 La conservation sous atmosphère contrôlée

La conservation sous atmosphère contrôlée (CAC) est une technique de conservation des aliments qui consiste à modifier l'environnement gazeux dans lequel les aliments sont stockés afin de prolonger leur durée de conservation. La CAC est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie alimentaire, tels que la viande, les fruits et légumes, les produits laitiers et les produits de boulangerie. Elle est également utilisée dans les supermarchés pour prolonger la durée de conservation des aliments frais.

### 4.6.1 La conservation des aliments sous vide

La conservation sous vide est une méthode moderne et efficace pour prolonger leur durée de conservation. Elle consiste à emballer les aliments dans des sacs hermétiques, puis à enlever l'air à l'intérieur du sac à l'aide d'une machine à mise sous vide. Cela crée un environnement

anaérobie (sans air) qui empêche la croissance des microorganismes responsables de la détérioration. Lorsque les aliments sont placés sous vide, l'oxygène est éliminé, ce qui ralentit le processus d'oxydation et prévient la dégradation des nutriments, des saveurs et des textures. De plus, l'absence d'air limite la prolifération des bactéries, des moisissures et des levures, ce qui permet de conserver les aliments plus longtemps. La conservation sous vide peut être utilisée pour une grande variété d'aliments, tels que les viandes, les poissons, les légumes, les fruits, les produits laitiers et même les plats cuisinés. Elle permet de conserver la fraîcheur et les qualités nutritives des aliments, tout en évitant les pertes de saveur et de texture.

#### **4.6.2 La conservation des aliments en atmosphère modifiée**

La conservation des aliments en atmosphère modifiée (AM) est une méthode qui consiste à modifier l'environnement gazeux autour des aliments pour prolonger leur durée de conservation. Cette technique vise à ralentir la croissance des micro-organismes responsables de la détérioration des aliments, ainsi qu'à préserver leur qualité nutritionnelle et organoleptique. L'AM repose sur le principe de contrôler les niveaux d'oxygène, de dioxyde de carbone et d'humidité autour des aliments. Les emballages utilisés dans cette méthode sont conçus pour maintenir un équilibre spécifique de ces gaz, ce qui permet de préserver les caractéristiques des aliments tout en inhibant la croissance des micro-organismes. L'oxygène est généralement réduit dans les emballages d'AM pour ralentir l'oxydation des aliments, qui est responsable de leur détérioration. En diminuant la quantité d'oxygène, on peut également réduire la croissance des micro-organismes aérobies qui nécessitent de l'oxygène pour se développer. Le dioxyde de carbone est souvent augmenté dans les emballages d'AM. Il a des propriétés antimicrobiennes et inhibe la croissance des micro-organismes en acidifiant l'environnement. De plus, l'augmentation du dioxyde de carbone peut également ralentir la dégradation enzymatique des aliments. L'humidité est également un paramètre important à contrôler dans l'AM. Une humidité excessive peut favoriser la croissance de moisissures et de bactéries, tandis qu'une humidité insuffisante peut entraîner la déshydratation des aliments. Le contrôle de l'humidité dans les emballages d'AM permet de maintenir les aliments dans des conditions optimales.

Il est important de noter que l'AM ne détruit pas les micro-organismes présents dans les aliments, mais elle ralentit leur croissance. Par conséquent, il est essentiel de respecter les bonnes pratiques d'hygiène alimentaire, de stocker les aliments à des températures appropriées et de les consommer dans les délais recommandés pour garantir leur sécurité.

#### 4.7 La conservation par ultrasons

La conservation des aliments par ultrasons est une méthode émergente qui utilise des ondes sonores à haute fréquence pour prolonger la durée de conservation des aliments. Les ultrasons peuvent être utilisés de différentes manières pour cette application, notamment pour le nettoyage, la désinfection et la détection des défauts. Lorsqu'ils sont utilisés pour la conservation des aliments, les ultrasons peuvent avoir plusieurs effets bénéfiques. Ils peuvent aider à détruire les micro-organismes présents dans les aliments, tels que les bactéries, les levures et les moisissures, en perturbant leurs membranes cellulaires. Cela permet de prolonger la durée de conservation des aliments en réduisant la croissance des micro-organismes responsables de leur détérioration. Les ultrasons peuvent également contribuer à l'extraction de composés bioactifs présents dans les aliments, tels que les antioxydants, les vitamines et les enzymes. Cela peut aider à préserver la qualité nutritionnelle des aliments tout en prolongeant leur durée de conservation. En outre, les ultrasons peuvent être utilisés pour améliorer la texture des aliments. Ils peuvent aider à émulsionner les matières grasses, à disperser les particules et à faciliter la pénétration des marinades ou des agents de conservation dans les aliments. Cependant, il convient de noter que la conservation des aliments par ultrasons est une technologie relativement nouvelle et encore en développement. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer pleinement son efficacité, ses effets sur la qualité des aliments et sa faisabilité à grande échelle. Il est donc important de suivre les recommandations officielles en matière de conservation des aliments et de respecter les bonnes pratiques d'hygiène alimentaire pour garantir leur sécurité (**Bermúdez-Aguirre et al., 2011**).

#### 4.8 La conservation par les champs électriques pulsés

La conservation par les champs électriques pulsés (CEP) est une méthode de traitement des aliments qui utilise des impulsions électriques de courte durée et de haute intensité pour détruire les micro-organismes présents dans les aliments. Cette méthode vise à prolonger la durée de conservation des aliments en réduisant la population de micro-organismes responsables de la détérioration. Lorsque les aliments sont exposés à des champs électriques pulsés, cela crée des variations rapides de tension qui peuvent perturber les membranes cellulaires des micro-organismes. Ces perturbations peuvent entraîner des fuites d'ions et des ruptures de la membrane, ce qui conduit à la mort des micro-organismes. Les champs électriques pulsés peuvent également induire des changements dans les activités enzymatiques



---

et métaboliques des micro-organismes, contribuant ainsi à leur destruction. La conservation par les champs électriques pulsés présente plusieurs avantages. Elle permet de détruire les micro-organismes sans utiliser de produits chimiques, ce qui en fait une méthode naturelle et respectueuse de l'environnement. De plus, cette méthode peut préserver la qualité nutritionnelle, la texture et la saveur des aliments, tout en prolongeant leur durée de conservation. Cette méthode est particulièrement efficace pour les aliments liquides ou semi-liquides, tels que les jus de fruits, les produits laitiers, les soupes, les sauces, etc. Cependant, son efficacité peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque aliment et des micro-organismes ciblés. Il est important de noter que cette technique est une technologie émergente et que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer pleinement son efficacité, son impact sur la qualité des aliments et son application à grande échelle. Des études sont en cours pour déterminer les paramètres optimaux de traitement, tels que l'intensité, la durée et la fréquence des impulsions électriques, en fonction des différents types d'aliments et de micro-organismes (**conservation des aliments, 2019**).

#### 4.9 La conservation par irradiation

Les traitements des produits alimentaires par rayonnements est une technique qui améliore la sécurité et prolonge la durée de conservation des aliments en éliminant ou en réduisant les parasites et les micro-organismes. Comme pour la pasteurisation du lait, et la fabrication de conserves pour les légumes et les fruits, les radiations pourraient rendre les aliments plus sûrs pour les consommateurs. Le processus d'irradiation aide également à réduire les insectes, les parasites et les bactéries responsables de la détérioration. Il a acquis une importance en tant que procédure d'hygiène alimentaire de qualité supérieure grâce à l'élimination et à la réduction des micro-organismes nocifs ainsi que des populations bactériennes.

Il existe deux types de procédés d'irradiation qui sont utilisés pour la conservation et traitement des aliments : Irradiation non ionisante et irradiation ionisante (voir la figure 1).

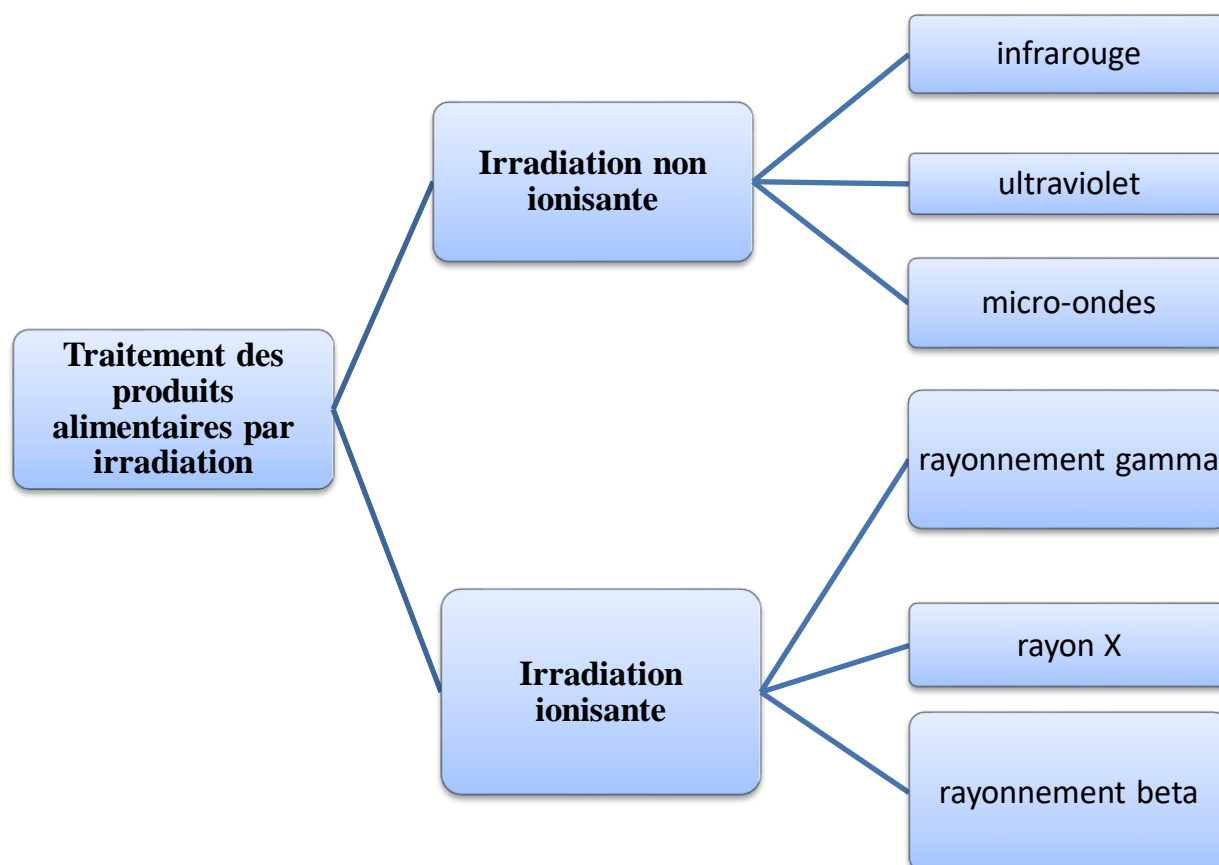


Figure 1 : La conservation des aliments par rayonnement

#### 4.9.1 Conservation par radiation non ionisante

Le rayonnement non ionisant fait référence à tout type de radiation électromagnétique qui ne fournit pas suffisamment d'énergie pour ioniser efficacement les atomes ou les molécules, ce qui signifie que l'électron ne peut pas être retiré d'un atome ou d'une molécule (Erkmen and Bozoglu, 2016).

##### 4.9.1.1 La conservation aux infrarouges

Le rayonnement aux infrarouges (IR) est un rayonnement électromagnétique dont le spectre se situe en-dessous de  $1000\mu\text{m}$ . Les applications industrielles utilisent un spectre de  $0,76$  à  $10\mu\text{m}$ . Quand l'aliment absorbe le rayonnement IR, il subit une agitation moléculaire et s'échauffe : lorsque l'onde électromagnétique frappe la molécule, il y a augmentation des vibrations moléculaires puis l'énergie mécanique est restituée sous forme de chaleur lorsque la molécule tend à revenir à son état vibratoire initial. Les molécules d'eau, les groupes fonctionnels des molécules organiques des aliments présentent des vibrations moléculaires

très importantes. De nombreuses applications existent et sont en voie de développement dans les industries agro-alimentaires, telles la pasteurisation de dérivés laitiers, lait, crème, jus de fruits, la stérilisation des dérivés céréaliers préemballés : viennoiseries, produits de biscuiterie et pâtisserie. Les traitements thermiques de surface tels que braisage, dorage, gratinage, ayant pour but d'améliorer les qualités organoleptiques (aspect, saveurs) se font en IR moyens ; le traitement est court et s'intègre en continu dans une chaîne de fabrication. Les IR sont aussi utilisés pour la torréfaction des grains et le séchage préliminaire de certains produits céréaliers. Les IR sont des traitements d'utilisation facile, performants, appelés à une application croissante compte-tenu de l'évolution des produits céréaliers et des plats cuisinés auxquels ils confèrent de meilleures qualités organoleptiques associées à une garantie hygiénique (Mattick, 1950).

#### *4.9.1.2 La conservation des aliments par les rayons ultraviolets*

La conservation des aliments par les rayons ultraviolets (UV) est une méthode utilisée pour prolonger la durée de conservation des aliments en utilisant des rayons UV pour détruire les micro-organismes présents dans les aliments. Les rayons UV-C, qui ont une longueur d'onde de 200 à 280 nanomètres, sont les plus couramment utilisés car ils ont une action germicide efficace. Lorsque les aliments sont exposés aux rayons UV-C, ceux-ci pénètrent dans les cellules des micro-organismes et altèrent leur ADN et leur ARN, ce qui perturbe leur fonctionnement et entraîne leur destruction. Les rayons UV-C peuvent détruire les bactéries, les virus, les levures, les moisissures et autres micro-organismes présents sur les surfaces des aliments. La conservation des aliments par les UV présente plusieurs avantages. Elle permet de détruire les micro-organismes sans l'utilisation de produits chimiques, ce qui en fait une méthode respectueuse de l'environnement. De plus, cette méthode n'a pas d'effet sur les caractéristiques sensorielles des aliments, comme la couleur, la texture et la saveur.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation des rayons UV pour la conservation des aliments présente certaines limites. Les rayons UV-C ont une faible capacité de pénétration, ce qui signifie qu'ils sont efficaces pour traiter les surfaces des aliments, mais moins efficaces pour traiter les aliments à l'intérieur des emballages ou des contenants opaques. De plus, l'exposition prolongée aux rayons UV peut altérer la qualité nutritionnelle des aliments et causer des dommages aux emballages en plastique.

Il est également essentiel de prendre en compte les réglementations et les normes de sécurité alimentaire lors de l'utilisation des rayons UV pour la conservation des aliments. Les doses d'irradiation appropriées doivent être déterminées pour assurer la destruction efficace des

micro-organismes tout en minimisant les risques pour la santé et la qualité des aliments (Erkmen et Bozoglu, 2016).

#### **4.9.1.3 La conservation par les micro-ondes**

Le traitement des fruits épluchés par des UHF (ultra hautes fréquences) donne de très bons résultats (à court terme et après entreposage) : il inactive les enzymes et conserve les propriétés organoleptiques et nutritionnelles.

#### **4.9.2 Conservation par radiation ionisante**

La conservation par irradiation est une méthode de conservation des aliments qui utilise des rayonnements ionisants, tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons, pour détruire les micro-organismes et les insectes présents dans les aliments (Kalyani and Manjula, 2014). Cette méthode vise à prolonger la durée de conservation des aliments en inhibant la croissance des micro-organismes responsables de la détérioration et en réduisant la population d'insectes nuisibles (Andrews et al., 1998).

Lorsque les aliments sont irradiés, les rayonnements ionisants pénètrent dans les cellules des micro-organismes et endommagent leur ADN, ce qui perturbe leur fonctionnement et entraîne leur mort. De plus, l'irradiation peut également inhiber la germination des graines et la maturation des fruits, ce qui contribue à prolonger leur durée de conservation. La conservation par irradiation présente plusieurs avantages (Mostafavi et al., 2010). Elle permet de détruire les micro-organismes et les insectes sans l'utilisation de produits chimiques. De plus, cette méthode peut préserver la qualité nutritionnelle, la texture et la saveur des aliments, tout en prolongeant leur durée de conservation. Certains consommateurs peuvent être préoccupés par les effets potentiels des rayonnements ionisants sur la santé et la qualité des aliments. Par conséquent, des réglementations strictes et des contrôles de sécurité sont en place pour garantir que les aliments irradiés respectent les normes de sécurité alimentaire.

Il est également important de souligner que le traitement des aliments par n'importe quelle méthode ne peut pas compenser une mauvaise hygiène alimentaire ou des conditions de stockage inappropriées. Elle doit être utilisée en complément d'autres bonnes pratiques d'hygiène alimentaire pour garantir la sécurité des aliments.

##### **4.9.2.1 Sources de rayonnements ionisants**

Il existe deux classes de rayonnements ionisants : électromagnétiques et particuliers. Ce sont des rayons émis spontanément par les radionucléides  $^{60}\text{Co}$  ou  $^{137}\text{Cs}$ , les rayons X qui sont des ondes électromagnétiques émises par les couches électroniques profondes des atomes, et

faisceaux d'électron d'énergie de 10 MeV (B.Kalyani, 2014). En raison de leur plus grande capacité de pénétration, les rayons gamma et les rayons X peuvent être utilisés pour le traitement de produits relativement épais ou denses. Dans les situations où seule une pénétration peu profonde est nécessaire, les faisceaux d'électrons à haute énergie sont plus recommandés. La figure 2 montre la chaîne de traitements des aliments par rayonnement ionisant.





**Figure 2 : La chaîne de traitements des aliments par rayonnement**

#### **4.9.2.1.1 Rayonnement gamma**

En général, les rayons gamma utilisés dans le traitement des aliments sont obtenus à partir des sources de radionucléides de  $^{60}\text{Co}$ . Ce type de rayonnement est essentiellement monoénergétique (le  $^{60}\text{Co}$  émet simultanément deux photons par désintégration avec des énergies de 1,17 et 1,33 MeV). La conservation des produits alimentaires par rayons gamma est une méthode qui utilise des rayonnements ionisants pour tuer les micro-organismes présents dans les aliments et prolonger leur durée de conservation. Les rayons gamma sont capables de pénétrer profondément dans les aliments et de détruire les bactéries, les virus et les parasites présents, tout en préservant les qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments. Cette méthode est couramment utilisée pour la stérilisation des aliments, en particulier des produits surgelés, des épices, des herbes et des ingrédients utilisés dans l'industrie alimentaire. Les aliments traités par rayons gamma sont considérés comme sûrs pour la consommation, à condition de respecter les normes et les réglementations en vigueur.

#### **4.9.2.1.2 Rayonnement X**

La conservation des aliments par rayons X n'est pas une méthode couramment utilisée. Bien que les rayons X puissent également détruire les micro-organismes, leur utilisation dans la conservation des aliments présente plusieurs défis techniques et réglementaires. Les rayons X

ont une pénétration plus faible que les rayons gamma, ce qui rend difficile l'irradiation uniforme des aliments de grande taille (Y Aikawa, 2000). De plus, les rayons X peuvent altérer la qualité des aliments en provoquant des changements dans leur structure et leur composition. En raison de ces limitations ainsi que le principal inconvénient de l'application des rayons X dans la conservation des aliments est le manque d'efficacité et donc le coût élevé de leur production. Car seuls 1 à 2 % de l'énergie utilisée sont utilisés pour la production de radiations X, ce type de rayonnement ionisants n'est pas une méthode couramment utilisée pour la conservation des aliments (B.Kalyani, 2014).

#### 4.9.2.1.3 Les électrons

La conservation des aliments par les électrons est une méthode utilisant des faisceaux d'électrons pour éliminer les micro-organismes présents dans les aliments et prolonger leur durée de conservation. Les électrons, généralement émis par des accélérateurs, sont dirigés vers les aliments pour détruire les bactéries, les virus et les parasites. Cette méthode est utilisée pour la désinfection des aliments, en particulier des produits frais tels que les fruits, les légumes et les viandes. Les électrons ont une pénétration limitée, ce qui permet de cibler efficacement les micro-organismes sans nuire aux qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments. De plus, cette méthode ne laisse pas de résidus radioactifs dans les aliments traités. La conservation des aliments par les électrons est considérée comme une méthode sûre et efficace, et elle est réglementée par des normes strictes pour garantir la sécurité des consommateurs (Jasem Al-fawwaz, 2012).

Chaque type d'appareillage présente des avantages et des inconvénients spécifiques en termes de coûts, de capacité de traitement, de pénétration des rayonnements et de sécurité. Le choix de l'appareillage dépend souvent de facteurs tels que le type d'aliment à traiter, les exigences réglementaires et les conditions de traitement spécifiques. Il est important de noter que l'utilisation de l'appareillage d'irradiation des aliments est réglementée et contrôlée pour garantir la sécurité alimentaire et la protection de la santé publique.

#### 4.9.3 L'irradiation ionisante des produits alimentaires

Les techniques d'irradiation ont l'avantage de pouvoir traiter le produit en surface et en volume (Farkas, 1998). Les radiations ionisantes agissent en perturbant les cycles de reproduction des microorganismes pathogènes en détruisant les cycles d'ADN/ARN. Ainsi, elles prolongent la durée de conservation des aliments et réduisent la contamination microbienne. Le traitement des aliments par irradiation détruit la plupart des microorganismes

pathogènes, mais ne conduit pas à la stérilisation des aliments. Les consommateurs doivent également veiller à une bonne conservation des aliments irradiés, en les réfrigérant et en les manipulant de manière hygiénique, ainsi qu'à une cuisson adéquate pour réduire le risque de microorganismes potentiellement nocifs. Les aliments irradiés conservent leur qualité et leur valeur nutritive. Ainsi, l'irradiation des aliments prolonge leur durée de conservation tout en maintenant leur qualité optimale pendant de plus longues périodes. Même si des pertes nutritionnelles peuvent se produire en raison de l'irradiation, elles sont négligeables (**Ganguly et al., 2012**).

Pour chaque application de l'irradiation des produits alimentaires, il existe une dose minimale en dessous de laquelle le résultat visé n'est pas atteint.

#### **4.9.3.1 L'irradiation des produits végétaux**

L'irradiation des produits végétaux est une technique utilisée pour prolonger la durée de conservation, améliorer la sécurité alimentaire et réduire les pertes post-récolte. Voici quelques points importants à savoir sur l'irradiation des produits végétaux :

- Élimination des insectes et des parasites : L'irradiation des produits végétaux peut être utilisée pour éliminer les insectes, les parasites et les larves qui peuvent être présents dans les fruits, les légumes, les céréales, les noix et autres produits végétaux. Cela permet de prévenir les infestations et de réduire les pertes causées par ces organismes nuisibles.
- Inhibition de la maturation et de la germination : L'irradiation peut être utilisée pour inhiber la maturation des fruits et légumes, ce qui permet de prolonger leur durée de conservation. Elle peut également être utilisée pour empêcher la germination des tubercules et des bulbes, tels que les pommes de terre et les oignons, afin de prévenir la croissance de germes indésirables.
- Aider à réduire la présence de maladies et de pathogènes, tels que les bactéries et les virus. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire en réduisant les risques d'infections alimentaires.
- Conservation des nutriments : L'irradiation des produits végétaux est conçue pour minimiser les pertes nutritionnelles. Cependant, certaines vitamines sensibles peuvent être légèrement affectées par le processus d'irradiation. Cela dit, les avantages de la conservation des aliments par irradiation sont généralement considérés comme supérieurs aux pertes nutritionnelles minimales.



L'irradiation des produits végétaux est réglementée par des normes et des réglementations strictes dans de nombreux pays pour garantir la sécurité des consommateurs. Les produits végétaux irradiés doivent être étiquetés de manière appropriée pour informer les consommateurs de leur traitement.

Les produits végétaux qui peuvent être conservés par irradiation comprennent :

- Fruits frais : Les fruits frais tels que les fraises, les cerises, les oranges et les mangues peuvent être irradiés pour prolonger leur durée de conservation et réduire la présence de microorganismes pathogènes.
- Légumes frais : Les légumes frais tels que les pommes de terre, les carottes, les tomates et les oignons peuvent également être irradiés pour ralentir leur maturation et prolonger leur durée de conservation.
- Herbes et épices : Les herbes et épices sont souvent irradiées pour éliminer les microorganismes, les insectes et les moisissures présents. Cela permet de maintenir leur qualité et leur saveur pendant une période plus longue.
- Céréales et produits céréaliers : Les céréales, les farines, les pâtes et les produits de boulangerie à base de céréales peuvent être irradiés pour éliminer les insectes et les microorganismes, tout en préservant leur qualité et leur valeur nutritive.
- Légumineuses : Les légumineuses telles que les haricots, les lentilles et les pois peuvent être irradiées pour réduire la présence de microorganismes et prolonger leur durée de conservation.

#### **4.9.3.2 L'irradiation des produits animaux**

La contamination des aliments, en particulier ceux d'origine animale, par des microorganismes, notamment des bactéries pathogènes non sporulantes, des helminthes parasites et des protozoaires, est un énorme problème de santé publique et une cause importante de souffrance humaine dans le monde entier. Les microorganismes pathogènes sont souvent présents dans certains ingrédients alimentaires également.

L'irradiation des produits d'origine animale est une technique qui peut être utilisée pour améliorer la sécurité alimentaire et prolonger la durée de conservation de ces produits. Voici quelques points importants à savoir sur l'irradiation des produits d'origine animale :

- Réduction des microorganismes pathogènes : L'irradiation des produits d'origine animale peut aider à réduire la présence de microorganismes pathogènes tels que les bactéries, les parasites et les virus. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire en réduisant les risques d'infections d'origine alimentaire.
- Contrôle des parasites : L'irradiation peut être utilisée pour éliminer les parasites présents dans les produits d'origine animale, tels que les helminthes parasites. Cela permet de réduire les risques pour la santé humaine associés à la consommation de produits infectés par des parasites.
- Prolongation de la durée de conservation : L'irradiation des produits d'origine animale peut aider à prolonger leur durée de conservation en inhibant la croissance des microorganismes responsables de la détérioration des aliments. Cela permet de réduire les pertes et de maintenir la qualité des produits plus longtemps.
- Maintien de la qualité et de la valeur nutritive : L'irradiation des produits d'origine animale est conçue pour minimiser les pertes de qualité et de valeur nutritive. Cependant, certaines vitamines et nutriments sensibles peuvent être légèrement affectés par le processus d'irradiation. Cependant, les avantages en termes de sécurité alimentaire et de prolongation de la durée de conservation sont généralement considérés comme supérieurs aux pertes nutritionnelles minimales.

L'irradiation des produits d'origine animale est réglementée par des normes et des réglementations strictes dans de nombreux pays pour garantir la sécurité des consommateurs. Les produits d'origine animale irradiés doivent être étiquetés de manière appropriée pour informer les consommateurs de leur traitement.

Les produits d'origine animale qui peuvent être conservés par irradiation comprennent :

1. Viande : La viande, qu'il s'agisse de bœuf, de volaille ou d'autres types de viande, peut être irradiée pour réduire la présence de microorganismes pathogènes tels que Salmonella, E. coli et Campylobacterie. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire et prolonger la durée de conservation de la viande.

- Volaille : La volaille, y compris le poulet et la dinde, peut être irradiée pour réduire les risques liés à la présence de Salmonella et d'autres bactéries pathogènes. Cela aide à prévenir les infections d'origine alimentaire causées par la consommation de volaille contaminée.

- Poissons et fruits de mer : Les poissons et les fruits de mer peuvent également être irradiés pour réduire les risques liés à la présence de bactéries, de parasites et de virus. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire et à prolonger la durée de conservation des produits de la mer.
- Œufs : Les œufs peuvent être irradiés pour réduire la présence de Salmonella et d'autres bactéries pathogènes. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire et à prolonger la durée de conservation des œufs.
- Produits laitiers : Certains produits laitiers tels que le lait, le fromage et le beurre peuvent être irradiés pour réduire la présence de microorganismes pathogènes et prolonger leur durée de conservation.

## 5 Conclusion

En conclusion, les méthodes de traitement des aliments jouent un rôle crucial dans la préservation de la qualité, de la sécurité et de la durée de conservation des produits alimentaires. Les différentes techniques de conservation offrent des options variées pour répondre aux besoins spécifiques de chaque type d'aliment. Ces techniques couramment utilisées pour ralentir la croissance des microorganismes et prolonger la durée de conservation des aliments périssables. Elles préservent la fraîcheur et la texture des aliments, tout en préservant une grande partie de leur valeur nutritive. Chaque méthode de conservation a ses avantages et ses limites, et le choix de la méthode dépend de nombreux facteurs tels que le type d'aliment, les contraintes de stockage, les réglementations et les préférences des consommateurs.

L'irradiation des aliments présente plusieurs avantages en tant que méthode de conservation :

- L'irradiation des aliments permet de réduire considérablement la présence de microorganismes pathogènes tels que Salmonella, E. coli et Campylobacter, ainsi que de parasites et de moisissures. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire en réduisant les risques d'infections d'origine alimentaire.
- Contrairement à d'autres méthodes de conservation, l'irradiation des aliments n'affecte généralement pas de manière significative la teneur en nutriments des aliments. Cela permet de préserver la valeur nutritive des aliments traités.
- En prolongeant la durée de conservation des aliments, l'irradiation contribue à réduire les pertes alimentaires en évitant le gaspillage des produits périssables et en permettant leur distribution sur de plus longues distances.

- L'irradiation des aliments est un processus relativement simple et efficace. Une fois les aliments correctement préparés et emballés, ils sont exposés à des rayonnements ionisants pour un temps déterminé, sans nécessiter de produits chimiques ou de traitements complexes.
- L'irradiation des aliments peut être utilisée pour traiter une variété d'aliments, qu'il s'agisse de fruits, de légumes, de viandes, de poissons, de produits laitiers, de céréales, etc. Elle peut être appliquée à des produits frais, surgelés ou transformés. D'après le tableau 6, l'irradiation des aliments est la méthode la plus économique par rapport aux autres techniques de conservation car elle nécessite également beaucoup moins d'énergie (Fred van et al, 1987).

**Tableau 6 : Energie nécessaire pour les différentes transformations alimentaire**

Processus	Energie nécessaire en kJ.kg <sup>-1</sup>
Pasteurisation par irradiation <b>2,5kGy</b>	<b>21</b>
Stérilisation par irradiation <b>30kGy</b>	<b>157</b>
Stockage au froid 0°C pendant 10 jours	<b>396</b>
Stérilisation par chaleur	<b>918</b>
Stockage congelé - 25 °C pendant 3,5 semaines	<b>5149</b>
Congélation rapide 4 à -23 °C	<b>7552</b>

Cependant, il est important de noter que l'irradiation des aliments est réglementée et nécessite une surveillance et des contrôles appropriés pour garantir la sécurité et la qualité des produits traités. Les produits irradiés doivent être étiquetés de manière appropriée pour informer les consommateurs.

## **Chapitre I                    Conservation et traitement des produits agricoles par l'irradiation au rayonnement ionisant**

---

En résumé, l'irradiation des aliments offre une méthode efficace pour améliorer la sécurité alimentaire, prolonger la durée de conservation des aliments, réduire les pertes alimentaires et préserver la valeur nutritive des produits.

# **Chapitre II**

**Effets de l'irradiation sur la matière  
biologique : cas des produits agricoles**

### **1 Introduction**

L'irradiation des aliments est une méthode de traitement physique des aliments (la viande, la volaille et les fruits de mer.....) avec des rayonnements ionisants à haute énergie dans le but de prolonger la durée de conservation et de prévenir les maladies d'origine alimentaire. L'irradiation y parvient en tuant les micro-organismes, les virus, les bactéries ou les insectes ; empêcher les pommes de terre, les oignons et l'ail de germer, et de ralentir le processus de maturation et de vieillissement des légumes. L'irradiation des aliments, lorsqu'elle est effectuée dans des conditions de bonnes pratiques d'utilisation, est une méthode de préparation des aliments efficace et efficiente qui est considérée comme sûre sur la base du large éventail de preuves scientifiques disponibles (**Fellows, P., 2000**).

### **2 Historique et législations du traitement des aliments par l'irradiation**

#### **2.1 Réglementation internationale**

L'irradiation des aliments a été proposée comme technique pour détruire les micro-organismes dans les aliments peu après que Roentgen ait découvert les rayons X en 1895 et que Becquerel ait découvert la radioactivité en 1896. Lorsque les scientifiques ont commencé à expérimenter avec des matériaux radioactifs, une utilisation pratique de l'irradiation pour détruire le parasite *Trichinella spiralis* dans la viande a été brevetée par Schwartz en 1921 aux états unis (**Roxane L, 2003**). En 1930, les Français ont breveté l'utilisation de l'irradiation des aliments à l'aide de rayons X pour détruire les bactéries pathogènes. Immédiatement après la Seconde Guerre mondiale, des sources améliorées de rayonnements ionisants sont devenues disponibles et une large gamme de produits alimentaires ont été soumis à une exposition à court terme à l'irradiation et se sont révélés conservables. En Angleterre, des travaux de recherches sur l'irradiation des aliments ont commencé en 1948 et, au milieu des années 1950 (**Fellows P, 2000**). En 1953-1954, avec le programme du président Eisenhower « utilisation de l'énergie atomique pour la paix », les U.S ont relancé l'intérêt vers le traitement des aliments par irradiation.

Le bacon était le premier aliment au monde approuvé pour être irradié, approuvé en 1963 pour des niveaux de dose stérilisante de 45 kGy. La même année, la Food and Drug Administration des États-Unis (USFDA) a également accordé l'autorisation d'irradier le blé

pour la désinfestation par les insectes et les pommes de terre pour inhiber la germination. Entre 1963 et 1980, de nombreux projets ont été entrepris à travers le monde pour établir l'efficacité du traitement par irradiation, la salubrité des aliments irradiés et l'application des rayonnements ionisants. Celles-ci comprenaient l'utilisation de l'irradiation pour réduire l'utilisation de certains additifs alimentaires pouvant présenter des risques pour la santé, tels que les nitrites et les fumigants. L'approbation par l'USFDA pour l'utilisation des rayonnements ionisants sur les produits alimentaires aux États-Unis a été lente à se développer. Le Congrès américain a officiellement classé l'irradiation comme un additif alimentaire en vertu de la loi sur les aliments, les médicaments et les cosmétiques de 1958. Par la suite, tout produit alimentaire subissant un traitement par irradiation devait être testé pour sa salubrité. En 1980, l'USFDA et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) des Nations Unies ont accepté les aliments irradiés avec une dose moyenne aussi élevée que 10 kGy comme ne présentant aucun danger toxicologique et n'introduisant pas de problèmes nutritionnels ou microbiologiques particuliers et donc "sûrs pour la consommation humaine" (**W H O, 1994 ; Arvanitoyannis et al , 2010**) . Cette déclaration a permis de modifier la nécessité des tests de salubrité uniquement pour les produits exposés à des doses supérieures à 10 kGy et ont conclu que les produits alimentaires irradiés à des doses inférieures à **10kGy** ne sont pas toxiques et que leur valeur nutritionnelle est comparable à celle obtenue avec d'autres méthodes de traitements (**OMS, 1989**).

En 1983, la Commission du Codex Alimentarius a adopté une "Norme générale révisée pour les aliments irradiés" et un "Code d'usages international recommandé pour l'exploitation des installations radiologiques utilisées pour le traitement des aliments", qui incorporaient les principales conclusions de la réunion conjointe FAO/IAEA de 1980 avec la Comité d'experts de l'OMS sur la salubrité des aliments irradiés.

En 1999, le groupe de la FAO, l'AIEA et le WHO a reconnu que l'utilisation des doses supérieures à 10kGy pour le traitement de la viande ne cause pas de problème de santé (**Aikawa Y, 2000**)

En irradiant les aliments, on obtient les mêmes avantages que si on les avait chauffés, réfrigérés, congelés ou traités avec des produits chimiques, mais sans modifier leur température ni produire de résidus. La technique de l'irradiation permet d'éviter l'altération



des aliments et aide à lutter contre les insectes ravageurs et micro-organismes pathogènes d'origine alimentaire sans modifier le goût ni l'odeur de manière notable.

Aujourd'hui, après des années de recherche et de travaux d'élaboration de normes nationales et internationales, plus de 60 pays disposent d'une réglementation autorisant l'irradiation d'un ou plusieurs produits alimentaires. L'irradiation détruit les bactéries pathogènes et limite les risques de maladies d'origine alimentaire. L'irradiation ne stérilise pas les aliments. Ceux-ci doivent encore être traités ou cuits correctement mais sont « propres » et ne s'altèrent pas, ce qui permet de les conserver plus longtemps et de garantir un plus haut niveau de sûreté et de qualité. L'irradiation est en outre une méthode viable de lutte contre les ravageurs, car elle assure la sécurité phytosanitaire des produits frais commercialisés en empêchant les insectes et autres ravageurs de se développer et de se reproduire. De ce fait, c'est cette capacité de lutter contre les ravageurs, notamment ceux qui exigent des mesures de quarantaine, qui a poussé de nombreux pays à utiliser les techniques d'irradiation.

La réglementation de l'irradiation des aliments varie d'un pays à l'autre, mais elle est généralement basée sur les recommandations et les normes établies par des organisations internationales telles que l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) , l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et le Codex Alimentarius.

Quelques aspects couramment réglementés dans la pratique de l'irradiation des aliments :

- **Autorisation et licence :** Les installations d'irradiation des aliments doivent obtenir une autorisation et une licence des autorités compétentes avant de pouvoir exercer leurs activités. Cela implique une évaluation approfondie des installations, des procédures de traitement et des dispositifs de sécurité.
- **Dosage d'irradiation :** Les réglementations fixent des limites spécifiques pour la dose d'irradiation que les aliments peuvent recevoir. Cela garantit que les aliments sont traités de manière sûre et efficace, sans compromettre leur qualité ou leur sécurité.

- **Étiquetage** : Les produits alimentaires irradiés doivent être clairement étiquetés pour informer les consommateurs de leur statut irradié. Les étiquettes doivent être précises, lisibles et conformes aux exigences réglementaires spécifiques.



**Figure 3: Le symbole utilisé pour indiquer qu'un aliment a été traité avec des rayonnements ionisants**

- **Analyse et contrôle de la qualité** : Les installations d'irradiation des aliments doivent mettre en place des systèmes de contrôle de la qualité pour s'assurer que les procédures de traitement sont correctement suivies et que les produits irradiés répondent aux normes de sécurité alimentaire.
- **Surveillance et inspection** : Les autorités réglementaires effectuent régulièrement des inspections et des audits des installations d'irradiation des aliments pour vérifier la conformité aux réglementations et aux normes établies.
- **Documentation et tenue des registres** : Les installations d'irradiation des aliments doivent tenir des registres détaillés de leurs activités, y compris les doses d'irradiation appliquées, les produits traités et les résultats des contrôles de qualité. Cette documentation permet de retracer et de vérifier les processus de traitement.

Aux côtés de la FAO, l'AIEA cherche à renforcer les capacités nationales des États Membres d'appliquer les techniques d'irradiation à des fins de sécurité sanitaire et de qualité des aliments. Les deux organisations collaborent en outre étroitement avec le secrétariat de la

Convention internationale pour la protection des végétaux et la Commission du Codex pour harmoniser les normes d'irradiation à l'échelle mondiale.

### **2.2 Réglementation algérienne**

Le décret présidentiel n° 05-118 du 2 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 11 avril 2005 relatif à l'ionisation des denrées alimentaires a pour objet de fixer les règles de traitement, de contrôle et de commerce des denrées alimentaires traitées par ionisation. Il s'applique aux opérations de traitement, d'emballage, d'étiquetage, d'importation, d'exportation, d'entreposage, de stockage et de commercialisation des denrées alimentaires ionisées.

Ce décret autorise l'irradiation de toute substance brute ou traitée en produit fini ou semi-fini, destinée à la consommation humaine, et toute autre substance entrant dans le processus de fabrication, de transformation ou de traitement de l'aliment, par tout rayonnement électromagnétique ou corpusculaire pouvant provoquer des ionisations soit directement, soit indirectement dans la matière qui lui est exposée. Les produits cosmétiques, les tabacs et les médicaments sont exclus.

Cette irradiation doit être effectuée par des installations d'irradiation agréées, enregistrées et autorisées par les autorités compétentes pour le traitement à l'aide des rayonnements ionisants des produits alimentaires. Seuls sont autorisés les traitements par des rayonnements ionisants émis par : les sources de  $^{60}\text{Co}$ , les sources de  $^{137}\text{Cs}$ , les appareils générateurs de faisceaux d'électrons d'énergie ne dépassant pas 10 MeV, les appareils générateurs de rayons X d'énergie ne dépassant pas 5 MeV.

Pour la dose globale moyenne absorbée tolérée est de 10 kGy. Ainsi que les doses absorbées relatives à chaque type de denrées seront fixées par arrêté conjoint du ministre chargé de l'agriculture et du ministre chargé du commerce. Toute installation d'irradiation doit répondre aux exigences de protection radiologique et faire l'objet d'une autorisation délivrée par le commissariat à l'énergie atomique conformément aux procédures en vigueur. L'ionisation de denrées alimentaires par des installations d'irradiation ne peuvent être affectées que par des personnes ayant suivi une formation qualifiante, reconnue par les services compétents du commissariat à l'énergie atomique. Les denrées alimentaires devant

subir un traitement par irradiation doivent être saines et propres à la consommation. Cette exigence est certifiée par les organismes habilités à cet effet. L'emballage des produits alimentaires destinés à l'ionisation doit être approprié à ce traitement et doit permettre d'éviter la ré-infestation et la recontamination ainsi que tout autre dommage susceptible de survenir durant l'entreposage et le transport.

A l'exception des denrées alimentaires dont la teneur en eau est faible (céréales, légumineuses, aliments déshydratés et produits analogues) qui ont été ionisées afin d'empêcher leur infestation par les insectes, aucun aliment ionisé ne doit être soumis à une seconde ionisation. Une denrée alimentaire n'est pas considérée comme ayant été soumise à une seconde ionisation lorsque :

- l'aliment préparé à partir de produits déjà ionisés à de faibles doses, inférieures à 1kGy, est soumis à un traitement par ionisation ayant une autre fonction technologique. Il est procédé à l'ionisation d'une denrée alimentaire qui contient un ingrédient ionisé en proportion inférieure à 5%.
- la dose totale de rayonnements ionisants nécessaire pour obtenir l'effet souhaité est appliquée à l'aliment en plusieurs étapes, dans le cadre d'un traitement ayant une fonction technologique donnée. La dose globale moyenne cumulative absorbée ne doit pas dépasser 10 kGy à la suite de l'ionisation (**Journal officiel, 2005**).

### **3 Effets de l'irradiation sur les aliments**

Les effets des rayonnements ionisants sur les aliments peuvent être influencés par différents facteurs :

- Type de rayonnement : différents types de RI, tels que les rayons gamma, les rayons X et les faisceaux d'électrons, peuvent avoir des effets différents sur les aliments. La pénétration et l'énergie du rayonnement peuvent varier, ce qui peut influencer la manière d'interaction des microorganismes avec les RI.

- Dose d'irradiation : La dose d'irradiation appliquée aux aliments est un paramètre clé qui peut influencer les effets biologiques. Une dose d'irradiation plus élevée peut entraîner une inactivation plus efficace des microorganismes, mais peut également causer des effets indésirables sur les caractéristiques physiques et sensorielles des aliments.
- Type d'aliment et objectif de traitement : Les différents types d'aliments peuvent réagir différemment aux rayonnements ionisants en raison de leur composition et de leur structure. Certains aliments peuvent être très sensibles aux rayonnements et d'autres peuvent être plus résistants. Par exemple, les aliments riches en lipides peuvent être plus sensibles à l'oxydation induite par les rayonnements.
- Composition chimique des aliments : La composition chimique des aliments, y compris la présence de composés tels que les antioxydants, les pigments, les vitamines et les enzymes, peut influencer les effets biologiques des rayonnements. Certains de ces composés peuvent réagir avec les radicaux libres générés par les rayonnements et conduire à des effets indésirables.
- Conditions de stockage : Les conditions de stockage des aliments après l'irradiation, telles que la température, l'humidité et l'emballage, peuvent également affecter les effets biologiques. La croissance des microorganismes survivants peuvent être favorisée par des conditions de stockage inappropriées qui altère la qualité des aliments traités par RI.
- Sensibilité des microorganismes : Différents micro-organismes peuvent avoir une sensibilité variable aux rayonnements ionisants. Certains microorganismes ont une résistance très élevée aux RI qui nécessite des doses d'irradiation plus fortes pour une inactivation efficace.

Pour garantir une inactivation efficace des microorganismes tout en préservant la qualité et la sécurité des aliments traités, il est important de prendre en considération ces facteurs lors de l'application de l'irradiation des aliments.

### **3.1 Les effets de l'irradiation sur les micro-organismes**

Les rayonnements ionisants peuvent avoir des effets destructeurs sur les micro-organismes présents dans les produits alimentaires. Les RI utilisés dans l'irradiation des aliments peuvent avoir des effets sur les aliments, en particulier sur les microorganismes, les enzymes et les cellules présents dans les aliments.

L'objectif principal du traitement des aliments par l'irradiation ionisante est l'amélioration de la sécurité alimentaire en réduisant les risques de maladies d'origine alimentaire causées par des micro-organismes pathogènes tels que les bactéries, les virus, les parasites et les moisissures.

Voici quelques objectifs de l'application des RI sur les aliments :

- Inactivation des microorganismes : Les RI peuvent tuer ou inactiver les micro-organismes pathogènes tels que les bactéries, les virus, les parasites et les moisissures présents dans les aliments. Cela contribue à améliorer la sécurité alimentaire en réduisant les risques d'infections d'origine alimentaire.
- Ralentissement de la croissance des microorganismes : Les RI peuvent ralentir la croissance des microorganismes responsables de la détérioration et de la pourriture des produits alimentaires qui permet de prolonger la période de conservation des aliments en maintenant leur qualité nutritionnelle et leur fraîcheur pendant une durée plus longue.
- Contrôle des insectes et parasites : le traitement des aliments par l'irradiation ionisante peut être utilisée pour éliminer ou contrôler les insectes et les parasites présents dans certains produits alimentaires, tels que les fruits, les céréales et les épices qui aide à la

prévention contre les infestations et à garantir la qualité des aliments (**Robichaud et al, 2020**).

- Réduction de la contamination croisée : l'irradiation des aliments réduire la contamination croisée entre les aliments, en éliminant les micro-organismes présents sur les surfaces des aliments ou dans l'environnement de leur production. Cela aide à maintenir leur sécurité alimentaire tout au long de la chaîne alimentaire.
- Amélioration de l'hygiène alimentaire : l'irradiation des aliments peut être utilisée pour traiter les aliments destinés à des populations sensibles, telles que les personnes âgées, les nourrissons et les patients souffrants de l'immunodépression. Cela réduit le risque de contamination alimentaire grave pour ces groupes vulnérables.

La sensibilité des micro-organismes aux rayonnements ionisants dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de micro-organisme, sa phase de croissance, sa résistance naturelle et les conditions environnementales. Certains micro-organismes sont plus sensibles aux rayonnements que d'autres. En général, les bactéries à Gram positif sont plus sensibles aux rayonnements que les bactéries à Gram négatif. Les virus et les spores bactériennes sont également plus résistants et peuvent nécessiter des doses de rayonnement plus élevées pour être détruits.

La sensibilité des micro-organismes aux rayonnements peut également varier en fonction de leur phase de croissance. Les micro-organismes en phase de croissance exponentielle sont généralement plus sensibles aux RI que ceux en phase de dormance ou en phase stationnaire.

La sensibilité des micro-organismes aux rayonnements peut être influencer par les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité et la présence d'oxygène, par exemple, les micro-organismes présents dans des environnements froids ou humides peuvent être plus sensibles aux rayonnements que ceux dans des environnements chauds et secs (**Mostafavi et al., 2010**).

### **3.1.1 Les bactéries**

L'irradiation ionisante a un effet sur les bactéries en endommageant leur ADN et leur ARN, ce qui cause une perturbation de leur fonctionnement et entraîne leur destruction. Lorsque les bactéries sont exposées à des doses appropriées et précises de RI, tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons, leur matériel génétique subit des cassures et des altérations, ce qui entraîne leur incapacité à se reproduire et à survivre. Le traitement par irradiation ionisante peut être utilisé pour la destruction des différents types de bactéries, y compris les bactéries pathogènes responsables de maladies d'origine alimentaire, telles que Salmonella, Escherichia coli (E. coli) et Listeria monocytogenes. Les doses d'irradiation nécessaires pour avoir un effet destructif sur ces bactéries peuvent varier, mais elles sont généralement assez forte pour garantir leur élimination complète ( **A. Fink et al,1994**).

### **3.1.2 Les virus**

Le traitement des produits alimentaires par les rayonnements ionisants peut avoir un effet destructeur sur les virus présents dans les aliments. Lorsque les virus sont exposés à des doses appropriées de RI tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons, leur matériel génétique est endommagé, ce qui les empêche de se reproduire et de causer des infections. Cela peut contribuer à améliorer la sécurité alimentaire en réduisant le risque de maladies d'origine alimentaire (**Margaret P, 2005 ;Abouzeid et al., 2003**). les virus sont généralement plus résistants aux RI par rapport aux autres types de micro-organismes (**Mostafavi et al., 2009**).

### **3.1.3 Les insectes**

L'irradiation ionisante des aliments peut tuer et éliminer les insectes présents dans les produits alimentaires. Lorsque les insectes sont traités par des doses spécifiques de rayonnements ionisants tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons, leur matériel génétique est endommagé, ce qui perturbe leur développement, leur reproduction et leur survie. L'irradiation est particulièrement efficace pour détruire les insectes à tous les stades de développement, y compris les œufs, les larves, les nymphes et les adultes. Elle perturbe leur métabolisme, leur croissance et leur reproduction, ce qui entraîne leur



élimination ( **Patterson M, 2005**). Tableau 7 illustre les dose nécessaires pour tuer les microorganismes.

**Tableau 7: les dose nécessaires pour tuer les microorganismes**

<b>Micro-organisme</b>	<b>Dose en kGy</b>
<b>Cellule animale</b>	0.001 - 0.01
<b>Insect</b>	0.01 - 1.00
<b>Vibrion</b>	0.03 - 0.12
<b>Yersinia enterocolitica</b>	0.04 - 0.21
<b>Campylobactériose</b>	0.08 - 0.16
<b>Aeromonas hydrophile</b>	0.14 - 0.19
<b>Bacillus cereus</b>	0.17 - 1.60
<b>Listeria</b>	0.20 - 1.00
<b>Staphylococcus aureus</b>	0.26 - 0.60
<b>Escherichia coli</b>	0.30 - 0.55
<b>Lactobacille</b>	0.30 - 0.90
<b>Salmonella</b>	0.31 - 1.30
<b>Cellule bactérienne</b>	0.50 - 10.00
<b>Clostridium perfringens</b>	0.59 - 0.83
<b>Clostridium sporogenes</b>	1.50 - 2.20
<b>Moisissures et levures</b>	1.00 - 3.00
<b>Virus</b>	10.00 - 20.00
<b>Spores bactériennes</b>	10.00 - 50.00

Le mécanisme d'inactivation microbienne par irradiation peut être expliqué dans les points suivants :

- Dommages de l'ADN : L'irradiation provoque des ruptures de brins d'ADN dans les cellules microbiennes. Ces dommages peuvent empêcher la réplication de l'ADN et la synthèse des protéines, entraînant la mort des microorganismes.

- **Formation de radicaux libres :** L'irradiation génère des radicaux libres dans les cellules microbiennes. Ces radicaux libres réagissent avec les composants cellulaires tels que les protéines, les lipides et les acides nucléiques, entraînant des dommages supplémentaires et perturbant les fonctions essentielles des cellules.
- **Altération des membranes cellulaires :** Les rayonnements ionisants peuvent altérer la structure et la fonction des membranes cellulaires des microorganismes. Cela peut entraîner une perméabilité accrue de la membrane, une fuite de composants cellulaires essentiels et une perte de la capacité de maintenir l'équilibre osmotique, conduisant finalement à la mort cellulaire.
- **Inhibition de la division cellulaire :** L'irradiation peut inhiber la division cellulaire des microorganismes en perturbant les processus de division et de croissance. Cela ralentit la croissance des microorganismes, réduisant ainsi leur capacité à proliférer et à causer des maladies ou la détérioration des aliments.

L'efficacité de l'inactivation microbienne par irradiation dépend de plusieurs facteurs, tels que la dose d'irradiation appliquée, le type de microorganismes présents, la composition des aliments et les conditions de stockage. Une dose d'irradiation adéquate doit être déterminée pour assurer une inactivation efficace des microorganismes tout en préservant la qualité des aliments traités.

L'utilisation des rayonnements ionisants en vue d'assurer la sécurité et la qualité est une des applications efficaces qui ont lieu de nos jours dans l'industrie alimentaire, dans la section suivante, on cite quelques applications :

- **Inhibition de la germination**

A faibles doses, l'irradiation inhibe la germination des pommes de terre, des oignons et de l'ail, du gingembre et des châtaignes. La dose nécessaire pour empêcher les pommes de terre et l'igname de germer est de 0,08-0,14 kGy, pour le gingembre, les doses correspondantes sont de 0,04-0,10 kGy, 0,03-0,12 kGy pour les oignons, l'échalote et l'ail et d' pour les châtaignes environ 0,20 kGy. La dose exacte et précise dépend dans chaque cas de la variété

du produit et leurs caractéristiques. Par exemple, l'irradiation industrielle est pratiquée depuis 1973 au Japon, pays où les inhibiteurs chimiques de la germination sont interdits. L'irradiation est efficace pour l'inhibition prolongée de la germination et pour la conservation des qualités de l'oignon et de l'ail pendant leur stockage (Murezdi P, 2009 ; Aparna M et al, 2012)

- **Désinsectisation**

L'irradiation à doses relativement faibles (ne dépassant pas 0,50 kGy) détruit ou stérilise tous les stades de développement des insectes ravageurs qu'on trouve couramment dans les céréales, y compris les œufs pondus à l'intérieur de la graine.

Les fruits séchés, les légumes et les fruits sont sensibles à l'attaque des insectes et pour certains d'entre eux, spécialement les fruits, seule une irradiation assure une désinfestation efficace à la différence de tout autre procédé physico-chimique. L'irradiation à raison de 0,2-0,7 kGy de produit convenablement conditionné empêche la réinfestation ce qui permet d'éliminer le problème des insectes dans les fruits et les légumes desséchés et dans les fruits. La même technique permettrait de diminuer sensiblement les pertes de poisson séché, source importante de protéines dans le monde. La mouche des fruits, par exemple, et même le charançon qui pénètre profondément à l'intérieur des graines de fruits, peuvent être détruits par l'irradiation. La désinfestation est pratiquée aussi pour le traitement des céréales importées (Mostafavi et al.,2009).

- **Allongement de la durée de conservation des denrées périssables**

L'une des principales applications de traitement des produits alimentaires par irradiation consiste à la destruction des micro-organismes qui provoquent l'altération des produits. La dose nécessaire pour limiter la prolifération de ces micro-organismes ou pour les éliminer dépend de leurs sensibilités et leurs quantités dans d'aliment à traiter. Pour de nombreux fruits et légumes, la viande, la volaille, le poisson et les fruits de mer, la durée de conservation peut être considérablement longue. La plupart des agents d'altération sont détruits à des doses inférieures à 5 kGy. Divers fruits frais, notamment les fraises, les mangues et les papayes, ont ainsi été irradiés et commercialisés avec succès. Pour les fruits qui sont sensibles aux fortes doses, on peut associer un traitement thermique modéré (immersion dans l'eau chaude), une irradiation à faible dose et un conditionnement convenable (Kalyani and Manjula, 2014a).

- **Retardement de la maturation et du vieillissement des fruits et légumes**

L'exposition à de faibles doses de rayonnement retarde la maturation et le vieillissement de certains fruits et légumes, donc une plus grande durée de conservation. L'importance et même le sens des modifications ainsi obtenues dépendent de la dose et de l'état de maturation au moment du traitement. Des doses de 0,3-1,0 kGy permettent d'obtenir une augmentation mesurable de la durée de conservation. La maturation des champignons et de l'asperge peut être arrêtée après la récolte en appliquant un traitement par irradiation à des doses comprises entre 1,0 et 1,5 kGy.

- **Destruction des parasites**

L'irradiation inactive certains parasites responsables de maladies d'origine alimentaire. Le parasite responsable de la trichinose, *Trichinella spiralis*, que l'on trouve dans la viande est inactivé par irradiation à une dose d'au moins 0,15 kGy. D'autres parasites comme le ténia du bœuf (ténia inerme), le protozoaire et divers parasites qui infectent les poissons, sont rendus non infectieux par irradiation à faible dose.

Les maladies d'origine alimentaire provoquées par les micro-organismes constituent un problème de gravité croissante pour l'industrie de transformation alimentaire et d'industrie de la restauration. L'irradiation des aliments a une implication potentielle importante dans la décontamination des aliments en vue de prévenir les maladies d'origine alimentaire. L'irradiation pourrait jouer dans le traitement des aliments solides d'origine animale et des denrées alimentaires desséchées un rôle aussi important que le traitement thermique (pasteurisation) dans le traitement du lait liquide et des jus de fruits.

La dose relativement faible nécessaire pour détruire les bactéries pathogènes non sporulées qu'on trouve dans les aliments, par exemple *Salmonella*, *Campylobacter*, *Listeria* et *Yersinia*, fait de cette technique un moyen très efficace pour prévenir les graves problèmes de santé publique provoqués par ces micro-organismes. De très nombreuses observations montrent que l'irradiation pratiquée dans les conditions industrielles normales, à une dose qui n'entraîne pas de transformation inacceptable du produit alimentaire, élimine les bactéries pathogènes non sporogènes présentes dans la viande rouge, la volaille et le poisson. La distribution de ces produits se fait à la fois à l'état frais et à l'état congelé mais, dans certains pays, l'irradiation des produits congelés soit plus facile à mettre en œuvre. Une dose de 2-7 kGy suffit à

neutraliser les agents pathogènes présents dans la viande, la volaille, les œufs cuits durs hachés, les crevettes, sans entraîner de transformations inacceptables du produit.

L'irradiation ionisante a un grand intérêt dans la limitation de la contamination microbienne des ingrédients alimentaires secs, ce qui améliore l'innocuité et l'aptitude au stockage des aliments qui en contiennent. Très souvent, les épices, les assaisonnements végétaux desséchés, les herbes aromatiques, l'amidon, les concentrés protéiques et les préparations enzymatiques commerciales qu'on utilise dans l'industrie alimentaire sont fortement contaminés par des agents d'altération et des agents pathogènes : un traitement par irradiation à la dose de 3-10 kGy capable d'assurer la décontamination sans avoir d'effets indésirables sur la saveur, la texture ou d'autres propriétés du produits irradié. Selon le type d'aliment et la dose d'irradiation, le traitement par rayonnement ionisant peut avoir plusieurs applications utiles comme résumés dans le tableau suivant (Erkmen et Bozoglu, 2016; Kalyani and Manjula, 2014b ; OMS, 1989). Le tableau suivant montre les diverses applications de l'irradiation et les doses correspondantes.

**Tableau 8: Diverses applications de l'irradiation et les doses correspondantes en kGy**

Classe	Produit	Objectif	Dose minimale	Dose maximale
<b>Classe1</b>	Bulbes, tubercules de tiges et de racines	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inhiber la germination</li> </ul>	0.02	0.2
<b>Classe 2</b>	Fruits et légumes frais	<ul style="list-style-type: none"> <li>Retarder la maturation</li> </ul>	0.2	1
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Désinfestation des insectes</li> </ul>	0.2	1
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Extension de la durée de conservation</li> </ul>	1	2.5
<b>Classe 3</b>	Céréales et leurs produits moulus, légumineuses et leurs produits moulus, fruits à	<ul style="list-style-type: none"> <li>Désinfestation des insectes</li> </ul>	0.25	1
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction de la charge microbienne</li> </ul>	1.5	5

	coque, graines oléagineuses, fruits secs et leurs produits			
<b>Classe 4</b>	Poissons, aquaculture, fruits de mer et leurs produits (frais ou congelés) et crustacés	• Élimination des micro-organismes pathogènes	1	7
		• Extension de la durée de préservation	1	3
		• Contrôle des parasites	0.3	2
<b>Classe 5</b>	Viande et produits carnés, y compris volaille (fraîche et congelée) et œufs	• Élimination des micro-organismes pathogènes	1	7
		• Prolongation de la durée de conservation	1	3
		• Contrôle des parasites	0.3	2
<b>Classe 6</b>	Légumes secs, assaisonnements, épices, condiments, herbes sèches et leurs produits, thé. Café, cacao et produits végétaux	• Décontamination microbienne	6	14
		• Désinfestation des insectes	0.3	1
<b>Classe 7</b>	Aliments secs d'origine animale et leurs produits	• Désinfestation des insectes	0.3	1
		• Élimination des micro-organismes pathogènes	2	7

<b>Classe 8</b>	Aliments rations militaires, aliments spatiaux, aliments prêts à manger, prêts à cuisiner/aliments peu transformés	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des microorganismes</li> <li>• Stérilisation</li> </ul>	2  5	10  25
-----------------	--	--	------------	--------------

### 3.2 Les effets de l'irradiation sur les composants des aliments

En général, les réactions chimiques induites par l'irradiation dans les composants alimentaires dépendent de nombreuses variables. Les plus importantes sont les conditions de traitement par irradiation comme la dose absorbée, débit de dose et type d'installation et source de rayonnement, présence ou absence d'oxygène et température, ainsi que la composition de l'aliment et son état physique (congelé ou frais, solide, liquide ou en poudre) peuvent influencer également sur les réactions induites par le traitement par RI. Les réactions chimiques et les produits générés à partir des principaux composants alimentaires tels que les graisses, les protéines, les glucides et les vitamines sont décrits dans les sections suivantes.

Dans une cellule, le rayonnement ionisant va arracher des électrons aux macromolécules biologiques (protéines, lipides, ADN) induisant ainsi des lésions : c'est l'effet direct des rayonnements ionisants. Il existe également un effet indirect des RI où les électrons sont alors arrachés à des molécules d'eau (radiolyse de l'eau). Environ 80 % du volume du noyau est constitué d'eau, l'énergie absorbée par les molécules d'eau représente la part la plus importante de l'énergie absorbée par la cellule. Sous l'influence des RI, les électrons éjectés lors de l'ionisation de la molécule d'eau se décomposent en électrons libres aqueux et en différentes espèces réactives de l'oxygène ROS (reactive oxygen species), dont les radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\bullet$ ) et le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), les ROS diffusent et réagissent avec les macromolécules, entraînant leur modification chimique. Cet effet indirect des RI est modulé par les systèmes de détoxification endogènes et/ou inductibles des radicaux libres que

constituent les enzymes anti-oxydantes (superoxyde dismutase, catalase, glutathione peroxydase...) et les piègeurs de radicaux (thiorédoxine, glutathion, vitamine C et E...).

Les effets directs et indirects des RI peuvent affecter toutes les molécules et tous les composants de la cellule. Par exemple, la molécule d'ADN, en raison de son importance biologique, les lésions radio-induites peuvent être de différentes natures :

- ruptures de chaînes : cassures simple et double brin (CSB et CDB) ; ce sont des lésions prédominantes ;
- modifications chimiques des bases et des sucres ;
- pontages intra ou inter-chaînes.

Le tableau suivant résume les différents types les plus fréquentes de dommages :

**Tableau9 : les principaux dommages après l'irradiation  $\gamma$**

Type de dommage	Nombre de dommage par Gy et par cellule
Cassure simple brin	500 à 1000
Cassure double brin	40
Lésions de bases	800 à 2000
Lésions de sucres	800 à 1600
Pontage ADN-ADN	30
Pontage ADN-protéine	150

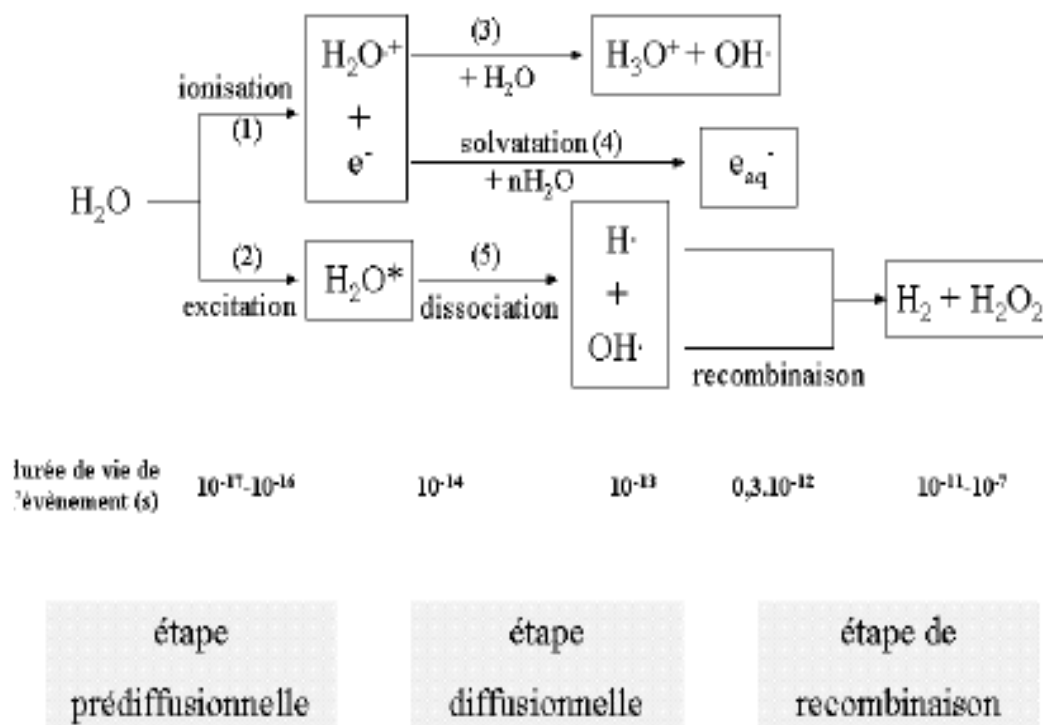
L'irradiation des aliments peut générer des radiolyses, qui sont des réactions chimiques qui se produisent lorsque les aliments sont traités par les RI tels que les rayons gamma, les rayons X ou les faisceaux d'électrons. Ces réactions chimiques sont principalement dues à la rupture des liaisons chimiques dans les molécules alimentaires.

Lorsque les aliments sont irradiés, les rayonnements ionisants peuvent interagir avec les molécules présentes dans les aliments, provoquant des ruptures de liaisons chimiques. Cela peut conduire à arracher des électrons aux molécules alimentaires et à la formation de radicaux libres, qui sont des espèces chimiques très réactives et instables. Par exemple, suite



à l'irradiation gamma de l'eau, les produits initiaux sont un électron et un cation radicalaire de l'eau (équation 1 dans la figure 4). Ce dernier se dissocie rapidement en un proton et un radical hydroxyle (Equation 2 dans la figure 4).

Les RI interagissent avec l'eau par deux phénomènes soit d'ionisation, soit d'excitation électronique selon leur énergie. Les espèces générées par la radiolyse de l'eau ne sont pas stables et vont donc se transformer en espèces plus stables. Ces radicaux produits par ionisation et excitation peuvent se recombiner, une grande partie étant reconvertie en eau, ou diffuser dans la solution. Ainsi que ces radicaux libres peuvent aussi réagir avec d'autres molécules présentes dans les aliments, entraînant une série de réactions chimiques ( figure 4).



**Figure 4 : la radiolyse de l'eau**

Les molécules d'eau ionisées se dissocient, engendrant une molécule d'eau cationique et un électron. L'eau cationique est un acide fort qui perd rapidement un proton au profit de l'eau environnante, formant un radical  $OH^\cdot$  (Equation 3 dans la figure 4). Les électrons arrachés possèdent quant à eux une énergie cinétique initiale suffisante pour parcourir de grandes

distances. Ils perdent progressivement cette énergie par collision jusqu'à être suffisamment ralentis pour être « piégés » par les molécules d'eau et deviennent des électrons hydratés  $e_{aq}^-$  (Equation 4 dans la figure 4).

Les molécules d'eau excitées par un rayonnement ionisant (2 dans la figure 4) peuvent soit perdre leur énergie d'excitation (chaleur et vibration) et retomber ainsi à leur état d'énergie fondamental, soit se dissocier et donner deux radicaux  $\cdot OH$  et  $H\cdot$  (Equation 5 dans la figure 4). Le résultat global de la radiolyse de l'eau est donc l'apparition d'espèces radicalaires et moléculaires distribuées de façon homogène dans le milieu, quelques nanosecondes après le passage du rayonnement (**Gillard, 2006**). Les radiolyses peuvent avoir des effets sur les aliments, tels que des modifications de la composition chimique, de la texture, de la couleur, du goût et de la valeur nutritionnelle.

Les effets indésirables de la création des radiolyses sont cités comme suit :

- Oxydation des lipides : Les radicaux libres générés par la radiolyse peuvent réagir avec les lipides présents dans les aliments, entraînant leur oxydation. Cela peut provoquer des changements de goût, une détérioration de la qualité et une diminution de la durée de conservation des aliments contenant des graisses ou des huiles.
- Formation de composés volatils : La radiolyse peut également provoquer la formation de composés volatils dans les aliments. Ces composés volatils peuvent influencer l'arôme des aliments et affecter leur qualité sensorielle.
- Modification de la structure des protéines : Les rayonnements ionisants peuvent également provoquer des modifications de la structure des protéines présentes dans les aliments, ce qui peut affecter leur fonctionnalité et leur digestibilité.
- Altération des vitamines : Certains nutriments, tels que les vitamines, peuvent être sensibles à la radiolyse. Des études ont montré que certaines vitamines, comme la vitamine C et la vitamine B1, peuvent être partiellement dégradées lors de l'irradiation

des aliments. Cependant, d'autres vitamines, comme la vitamine A et la vitamine E, sont plus résistantes à la radiolyse.

Les radiolyses générées par l'irradiation des aliments sont contrôlées en utilisant des doses appropriées de rayonnements ionisants. Les réglementations et les normes de sécurité alimentaire spécifient les doses maximales autorisées pour l'irradiation des aliments afin de minimiser les effets indésirables sur la qualité des aliments.

De même, les radiations ionisantes peuvent interagir avec l'ADN qui est une cible cellulaire critique des RI et causer des dommages ayant des conséquences létales (mort cellulaire suite au blocage de la réplication) ou pro-mutagènes (lésions non-réparées induisant des erreurs de réplication) pour la cellule. Les RI tels que les rayons  $\gamma$ , agissent sur l'ADN en solution aqueuse diluée essentiellement par effet indirect, c'est-à-dire par l'intermédiaire des radicaux libres produits par la radiolyse de l'eau. En milieu oxygéné et aux doses précises, les dommages à l'ADN sont dus principalement aux radicaux hydroxyles. Bien que 80 % des radicaux  $\text{OH}^\cdot$  réagissent avec l'ADN sur les doubles liaisons des bases, une petite partie de ces radicaux va réagir avec les sucres, formant ainsi des radicaux sucre. plusieurs lésions peuvent être détectées dans l'ADN exposé à l'irradiation ionisante : des altérations et pertes de bases, des modifications de sucres, des coupures de chaînes simple brin (CSB) ou double brin (CDB) et des pontages avec des protéines. Le nombre et la distribution de ces dommages ne sont pas aléatoires mais dépendent du rayonnement, de la structure de l'ADN (simple, double, ..... ) et de certains paramètres tels que la température.

Une dose de 1 Gy est suffisante pour induire un nombre important de dommages de l'ADN, de différentes natures, et capables de perturber le fonctionnement normal de la cellule. Heureusement, les cellules ont un ensemble de mécanismes qui leur permettant de réagir de manière adaptée à la présence de dommages radio-induits. La réponse cellulaire aux RI implique notamment la mise en œuvre de mécanismes de réparation, la régulation de la prolifération cellulaire (et/ou le déclenchement de la mort cellulaire programmée. Il existe des points de décision mis en œuvre après une irradiation, en fonction du type cellulaire, de l'avancée dans le cycle cellulaire, de l'importance des dommages radio-induits et des conditions environnementales. La mise en place de ces différentes réponses implique de nombreuses voies de signalisation intracellulaire.

### **3.2.1 Effet sur les glucides**

Les glucides constituent la principale base énergétique du corps vivant. Lorsqu'ils sont soumis à des radiations, les glucides complexes se décomposent en sucres plus simples, tandis que les monosaccharides se décomposent en sucres, acides et cétones. Ce sont les mêmes composés produits par hydrolyse conventionnelle. Par conséquent, les doses de rayonnement faibles et moyennes ont peu d'effet sur la valeur nutritionnelle des glucides. Cependant, des doses élevées de rayonnement peuvent endommager le matériau fibreux des parois cellulaires végétales, entraînant une détérioration de la texture et une perte de qualité (**Mostafavi et al., 2010**). L'utilisation de l'irradiation gamma (jusqu'à 6,2 kGy/h) sur l'amidon présent dans de maïs, de blé, de riz ou de pomme de terre a entraîné la production d'aldéhydes tels que le malonaldéhyde, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde, l'acide formique et le peroxyde d'hydrogène comme produits radiolytiques majeurs. Des études récentes ont montré que des solutions de fructose, glucose, saccharose et amidon traitées par rayonnements gamma (à 3 kGy à 5°C) produisent du malonaldéhyde. Mais l'accumulation d'aldéhydes qui se forment après irradiation des jus de fruits a été réduite en diminuant la présence d'oxygène et en utilisant de basses températures. En général, l'irradiation transforme les mono et polysaccharides, mais le traitement thermique peut produire davantage de transformations (**Mostafavi et al., 2012**). L'amidon irradié se décompose en dextrine, maltose et glucose, ce qui entraîne la viscosité des polysaccharides en solution. Les glucides présents dans les ingrédients alimentaires sont beaucoup moins dégradés que lorsqu'ils sont irradiés sous leur forme pure (**World Health Organization, 1994**) .

### **3.2.2 Effet sur les lipides**

Les lipides sont des graisses et des huiles constituées des mêmes éléments (carbone, hydrogène et oxygène) que les glucides. Aux doses faibles et modérées, l'effet de l'irradiation ionisante sur le contenu nutritionnel des lipides est minime. De plus, tels dosages n'induiront pas la formation de cycles aromatiques ou hétérocycliques, ni la condensation de cycles aromatiques. Cependant, le traitement des lipides par l'irradiation à fortes doses, notamment en présence d'oxygène, peut conduire à la formation d'hydroperoxyde liquide. Alors que bien qu'elles ne soient pas nécessairement dangereuses, ces substances ont souvent des odeurs et

des goûts indésirables. Les acides gras insaturés sont plus susceptibles de rancir. L'oxydation des lipides peut être réduite de manière considérable en congelant et/ou en éliminant l'oxygène avant l'irradiation (**Mostafavi et al, 2010**). Il a été démontré qu'en raison des radicaux libres formés lors d'un traitement par l'irradiation, cela augmente l'oxydation des lipides. L'effet chimique est plus important dans les aliments à plus forte teneur en matières grasses, état physique (liquide ou solide), présence d'antioxydants, conditions environnementales (lumière, chaleur, oxygène, humidité, pH), traitement par irradiation, type de stockage (vide, air) gaz modifié, etc.), conditions de stockage (durée, température, etc.) et une teneur élevée en acides gras insaturés. L'utilisation de basses températures, la présence d'oxygène, d'antioxydants et un emballage approprié réduisent très bien l'oxydation des lipides. Les phytostérols (y compris les stérols et les stanols), présents naturellement dans les céréales, les noix, les fruits et les légumes, sont structurellement similaires au cholestérol. Ces composés peuvent être oxydés par le traitement par irradiation et donner de l'oxyphytostérol (**Mostafavi et al., 2012; SCF, 2003**).

### **3.2.3 Effets sur les protéines**

Les protéines et autres composés azotés sont sensibles aux effets de l'irradiation ionisante dans les produits alimentaires. Les produits des acides aminés, des peptides et des protéines irradiés sont le  $\text{NH}_2$ , le  $\text{H}_2$ , le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{H}_2\text{S}$ , les amides et les carbonyles. Les radicaux libres réagissant avec les protéines peuvent provoquer une rupture des chaînes protéiques ou des changements dans la structure conformationnelle des protéines. Ces ruptures ou modifications seraient mortels pour l'organisme vivant mais elles n'affectent pas la qualité nutritionnelle des aliments. Les faibles doses d'irradiation sont capables de provoquer un déroulement moléculaire, une coagulation, un dépliage, un clivage moléculaire et une division des acides aminés. Les principaux effets se produisent autour des liaisons sulfuriques et des liaisons hydrogène. À une dose de 10 kGy, les acides aminés libres totaux peuvent augmenter dans les aliments. L'exposition de l'aliment aux rayonnements ionisants peut provoquer le dépliement de la molécule protéique et conduire à la formation d'un nombre de sites de réaction plus important. L'irradiation affecte également les propriétés fonctionnelles des protéines. Dans le cas des œufs, les doses nécessaires pour une réduction efficace des Salmonelles provoquent des effets secondaires indésirables, tels que la perte de viscosité

dans le blanc d'œuf et les saveurs désagréables du jaune. L'irradiation des œufs avec 6 kGy montre un état aqueux léger, qui peut être dû à la destruction de l'ovomucine (le composé principal responsable à l'épaississant de l'albumine d'œuf). Le temps de coagulation de la caséine dans le lait augmente après le traitement du lait par irradiation. L'irradiation à des doses élevées peut produire une saveur et des arômes désagréables dûs à la formation de composés de benzène, de phénols et de soufre. Ces changements de goût ressemblent à la saveur brûlée du lait. L'irradiation du fromage à une dose de 1 à 2 kGy est suffisante pour réduire les agents pathogènes alimentaires et n'altère pas la qualité de l'arôme (**Erkmen et Bozoglu, 2016**). Les recherches montrent que l'irradiation des protéines peut induire des réactions chimiques qui dépendent de la structure de la protéine, de son état (naturel ou modifié), de son état physique, de sa composition en acides aminés, de la présence d'autres substances. Les changements les plus importants comprennent la dissociation, l'agglomération, la réticulation et l'oxydation. Par exemple, l'irradiation gamma des noisettes à 10 kGy induit l'agrégation et la dénaturation des protéines. En outre, la diminution de l'activité de la pectinase (l'enzyme la plus sensible à l'irradiation) à 20 kGy variait entre 20 % et 50 %. En effet, des doses faibles et modérées n'ont provoqué qu'une faible dégradation des protéines alimentaires en fraction de protéines et d'acides aminés de poids moléculaire inférieur. Des expériences ont montré que ces traitements provoquent moins de réactions chimiques que la stérilisation à la vapeur (**Mostafavi et al, 2012 ; Gillard, 2005**).

### **3.2.4 Effet sur les vitamines**

L'irradiation peut modifier la teneur en plusieurs vitamines (A, B1, C et E étant les plus sensibles) des aliments, principalement en raison des radicaux libres générés par le traitement par l'irradiation. ces réactions conduisent à une conversion partielle de l'acide ascorbique en acide déhydroascorbique, qui contribuent tous deux à l'activité globale de la vitamine C. L'irradiation réduit généralement la teneur en vitamine C des aliments d'origine végétale, bien que l'augmentation de ce composé soit également causée par l'irradiation de certains fruits. La réduction de la vitamine C est généralement faible (<10 %) avec une irradiation à faible dose (<1 kGy) et peut être observée immédiatement après l'irradiation. La réduction est également affectée par la température et l'exposition à l'oxygène. Dans les aliments végétaux

à faible teneur en vitamine C, de faibles doses d'irradiation peuvent entraîner une perte totale de vitamine C, c'est le cas des concombres. Certaines pommes et nectarines sont traitées à 0,075 et 0,3kGy. Mais surtout dans les légumes frais, la teneur en vitamine C est restée stable et inchangée à 1 kGy ou moins, comme pour le litchi, certaines mandarines, la papaye, certaines mangues, les kakis et certains légumes peu transformés. La perte de vitamine C augmentait à mesure que la dose de rayonnement augmentait. À des doses de rayonnement comprises entre 1 et 6 kGy, les fruits comme les jujubes et les châtaignes peuvent perdre 18 à 47 % de leur teneur en vitamine C (**Anuradha Prakash et al, 2019**). Les effets de l'irradiation sur la vitamine E sont moins perceptibles, peut-être parce que la quantité de cette vitamine présente dans la plupart des fruits et légumes est très faible. la vitamine E est très sensible à l'énergie d'ionisation et cette sensibilité dépend de la température, de l'oxygène, de la dose de rayonnement et du type de produit (**Magda S, 2009**). Les doses d'irradiation inférieures à 1 kGy n'ont pas des effets sur les niveaux d' $\alpha$ -tocophérol, à quelques exceptions comme les tomates, qui peuvent perdre jusqu'à 40 % de leur teneur en tocophérol à une dose de 1 kGy. Une autre exception concerne les mandarines, qui perdent une petite quantité d' $\alpha$ -tocophérol immédiatement après l'irradiation (0,15, 0,4 et 1 kGy). Les épinards ont perdu 10% de leur teneur en tocophérol à la dose de 2 kGy. La réduction du tocophérol induite par l'irradiation ionisante s'explique par les réactions des radicaux radio-induits avec le tocophérol. Selon de nombreuses études réalisées sur la viande, la thiamine est très sensible à l'irradiation (**Magda S, 2009**).

Le traitement des légumineux (pois chiches, haricots et lentilles) par une irradiation à faible dose (0,25 à 1 kGy) augmente la teneur en thiamine et en riboflavine. Une augmentation de la teneur en riboflavine avec une irradiation à faible dose (0,75 kGy) a également été observée dans la papaye. Cependant, des doses de rayonnement élevées (5 et 10 kGy) peuvent causer des modifications significatives des concentrations de thiamine et de riboflavine dans les haricots. Dans les jujubes, une irradiation de 0,5 à 5 kGy a réduit significativement les niveaux d'acide pantothénique (6 à 11 %), de pyridoxine (2,5 à 27 %), de thiamine (21 à 63 %) et d'acide folique (6 à 28 %). %, tandis que la biotine et la riboflavine ont légèrement diminué (10 %). Or, dans les feuilles de jujubier, la niacine, de la thiamine et la riboflavine ne sont pas modifiée par l'irradiation à des doses de 2,5 à 12,5 kGy. Les noix de pécan ont été traitées par rayonnements gamma et évaluées pour déterminer les modifications dans la teneur

en vitamine E et les propriétés organoleptiques. L'irradiation à 1 et 3 kGy n'a entraîné aucun changement dans la teneur en cette vitamine mesurée en équivalents d' $\alpha$ -tocophérol par méthode colorimétrique. L'irradiation à 1 kGy ne produisait aucun changement significatif dans les propriétés d'apparence, d'arôme, de texture et de saveur. La teneur en vitamine E des noix de pécan irradiées est restée stable (Vinod et al, 2023).

Dans certains cas, une combinaison d'irradiation et de cuisson peut réduire les pertes, car le temps de cuisson de certains aliments peut être considérablement plus court après irradiation ; par exemple, les haricots rouges retiennent davantage de riboflavine, d'acide nicotinique et de thiamine après irradiation à 10 kGy suivie d'une cuisson. La combinaison de basses températures et de conditions anaérobies peut clairement protéger la thiamine et la vitamine E, qui peuvent être affectées. Aucune transformation n'a été démontrée pour la riboflavine, la vitamine B6, la vitamine B12 et la niacine après irradiation gamma jusqu'à 5 kGy dans le blé, le maïs, les pois chiches (Mostafavi et al., 2012).

Cela indique que le type d'aliment végétal influe sur la sensibilité des vitamines à l'irradiation et les effets varient considérablement d'une vitamine à l'autre et éventuellement d'un aliment à l'autre. Les différentes sensibilités des vitamines alimentaires aux rayonnements ionisants sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 10: les sensibilités des vitamines aux rayonnements ionisants (Dionísio et al, 2009)**

Sensibilité élevée	Sensibilité moyenne	Sensibilité faible
<ul style="list-style-type: none"><li>• A (rétinol)</li><li>• B1 (thiamine)</li><li>• C (acide ascorbique + déhydroascorbique )</li><li>• E (a-tocophérole )</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• K (dans les viandes)</li><li>• b-carotène</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Acide folique</li><li>• Acide (pantothenique)</li><li>• B2 (riboflavine)</li><li>• B3 (niacine)</li><li>• B6 (pyridoxine)</li><li>• B10 (biotine)</li><li>• B12 (cobalamine)</li><li>• D</li><li>• K (dans les végétaux)</li></ul>



### **3.2.5 Effet sur les sels minéraux**

L'irradiation des aliments peut avoir des effets sur les sels minéraux qui y sont présents. Les sels minéraux, tels que le calcium, le fer, le zinc et le potassium, sont essentiels pour le fonctionnement normal du corps humain. Cet effet de l'irradiation sur les sels minéraux dépend de divers facteurs, tels que le type d'aliment, la dose d'irradiation, la durée d'exposition, etc. Certaines études suggèrent que l'irradiation peut entraîner une diminution des sels minéraux dans certains aliments, tandis que d'autres recherches indiquent que l'impact sur les sels minéraux est minime (**Mostafavi et al., 2012**).

En résumé, les produits de décomposition formés lorsque les aliments sont exposés à des rayonnements ionisants sont appelés produits radiolytiques. Ces produits sont présents en très petites quantités et n'existent pas dans les aliments en quantités mesurables. Les principaux composants alimentaires : eau, protéines, lipides (graisses) et glucides (amidon, sucres et cellulose) sont susceptibles d'interagir par des substances radioalytiques. Les graisses sont les plus vulnérables à la dégradation et à l'oxydation des radicaux libres. Les produits identifiables proviennent principalement de la fragmentation de molécules plus grosses ou de la combinaison de petits fragments produits par la décomposition de molécules plus petites (**Fink et al., 1994**).

### **3.3 Effets mutagènes de l'irradiation sur les aliments**

L'irradiation des produits alimentaires est l'application de rayonnements ionisants sur les aliments pour améliorer la sécurité alimentaire et prolonger la durée de conservation des produits alimentaires en inactivant les micro-organismes et les insectes, en retardant la maturation et la germination des tubercules, etc. Le RI utilisé à cette fin interagit avec les atomes et les molécules des aliments et les micro-organismes qui sont des contaminants alimentaires, tels que les bactéries, les levures, les champignons et les moisissures, induisant des changements chimiques et biologiques. Les changements résultants lors de l'irradiation des produits alimentaires sont généralement acceptables en terme d'apparence et d'effets nutritionnels.

Le principe de base de l'irradiation des aliments réside dans la génération d'espèces réactives telles que les électrons hydratés et les radicaux libres formés lorsque rayonnement bombardent les molécules d'eau. L'interaction de ces espèces réactives avec des micro-organismes pathogènes entraîne des résultats positifs de l'irradiation des aliments qui est la décontamination microbienne, alors que, autres réactions chimiques sont également initiées, qui peuvent donner lieu à plusieurs produits chimiques et entraîner des résultats négatifs et également modifier certaines propriétés des aliments traités par irradiation. Les produits chimiques radio-induits dépendent de la composition de l'aliment. Par exemple, le formaldéhyde et le malondialdéhyde sont deux des aldéhydes les plus courants dans les aliments. Ils sont formés comme sous-produit de l'irradiation des jus de fruits, et des hydrocarbures tels que le pentadécane, l'hexadécane et l'heptadécane se forment lors de l'irradiation des saucisses (**Youbi I, 2022**).

Les techniques de création des mutations sur les aliments par irradiation sont exploitées pour créer des nouvelles variétés de plantes avec des caractéristiques améliorées. L'amélioration de la production agricole, quelle que soit la méthode utilisée, est basée essentiellement sur l'exploitation raisonnée des variations héréditaires produites au sein des espèces. La possibilité de produire expérimentalement des variations héréditaires constitue donc un fait d'une grande importance: la mutagenèse artificielle apporte en effet, théoriquement l'obtention des variantes génétiques nécessaires pour améliorer les plantes cultivées et les adapter aux conditions toujours plus strictes posées par les exigences de l'homme (**Bilquez, 1961**). Depuis des années, l'AIEA et la FAO, cherchent à aider le monde à augmenter et améliorer leur production alimentaire et à la rendre plus sûre. Ses compétences sont mises à contribution pour accroître la production agricole dans le monde entier grâce à l'utilisation de procédés nucléaires en sélection végétale et en phytogénétique (qui est une branche de la biologie végétale qui étudie les processus génétiques impliqués dans le développement et l'évolution des plantes. Outre qu'ils contribuent à fournir des aliments dont on a le plus grand besoin, ces produits représentent pour les agriculteurs et les consommateurs des intérêts économiques qui se chiffrent en millions de dollars, en particulier dans les pays en développement en raison de leur large consommation. Dans la partie suivante, quelques exemples des pays et leurs expériences dans l'amélioration végétale par la mutagenèse à l'aide de l'irradiation

- Les graines des variétés mutantes de lin « Linola » produites au Canada, qui est un des principaux pays producteurs, ont une teneur réduite en acide linoléique et une teneur accrue en acide linoléique si bien que leur huile est similaire à l'huile de tournesol classique et est donc propre à la consommation humaine. Le lin de type Linola représente environ 10 % du lin cultivé au Canada.
- En Égypte, trois variétés mutantes de sésame à excellent rendement résistant aux maladies et aux insectes offrent une rentabilité économique accrue en comparaison aux variétés normales.
- L'aliment le plus connu en Italie, les pâtes, sont faites à partir de variétés mutantes de blé dur qui rapportent chaque année des dizaines de millions de dollars à l'agriculture italienne.
- En Turquie, une variété mutante de pois chiche ayant un rendement potentiel et une teneur protéique très élevée, plus précoce et résistant a été mise sur le marché avec succès.
- Aux États-Unis, la variété de pamplemousse « Rio Star », reconnaissable à sa chair rouge vif, représente aujourd'hui 75 % de la production nationale de ce fruit, qui est une activité extrêmement bénéfique.
- En Chine, plus de 638 variétés mutantes représentant 42 espèces végétales avaient été mises sur le marché et étaient cultivées en 2005. Un gain économique d'environ 420 millions de dollars par an résulte à l'accroissement de la production des céréales.
- Les variétés indiennes mutantes d'arachide de type « TAG » caractérisent par une précoce maturité, une croissance élevée des gousses et de bien meilleurs taux de récolte, et les ventes nationales totales s'élèvent à 132 000 tonnes.
- Dans les Andes péruviennes, des variétés plus robustes d'orge qui sont cultivées jusqu'à 5 000 mètres d'altitude donnent un rendement énorme d'environ 1 200 kg à l'hectare qui représente un gain d'environ 9 millions de dollars par an.
- La mise sur le marché de la variété ghanéenne de manioc « Tek Bankye », qui présente des propriétés de cuisson améliorées, a été très bien accueillie. Autres essais sont en cours pour l'obtention d'autres variétés de manioc plus productives, plus résistantes aux maladies et ayant une teneur en amidon plus élevée.

- Au Pakistan, une variété mutante donnant des récoltes plus importantes et de meilleure qualité a permis de quadrupler la production de coton dans quelques années qui ont suivi sa mise sur le marché (1983–1992) et représente aujourd'hui 70 % du coton cultivé. Sa contribution à l'économie s'élève à 20 millions de dollars par an. (AIEA, 2009).

### **4 Sécurité des aliments traités par irradiation ionisante**

L'irradiation peut réduire le risque d'intoxication alimentaire, contrôler la détérioration des aliments et prolonger la durée de conservation des aliments sans affecter la santé et avec des effets acceptables sur la qualité nutritionnelle ou organoleptique. Ce point de vue a été approuvé par des organisations internationales telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le Codex Alimentarius. Pour l'irradiation de n'importe quel aliment, la dose minimale absorbée doit être suffisante pour atteindre l'objectif technologique visé et la dose maximale absorbée doit être inférieure à la dose qui pourrait affecter leur sécurité. Les aliments irradiés ne doivent pas être confondus avec les aliments susceptibles d'être contaminés par les radiations d'un accident nucléaire. Les aliments traités par l'exposition à une source de rayonnement ionisant ne devient pas radioactif par eux-même et peuvent être consommés sans danger, à condition que le traitement par irradiation soit effectué de telle sorte que l'aliment n'entre jamais en contact avec la source de rayonnement ionisant, effectué dans des conditions contrôlées à l'aide d'une source approuvée et dans des locaux d'irradiation agréés. La quantité d'énergie utilisée pour irradier efficacement les aliments est faible par rapport à la cuisson (Diehl, 2018). L'irradiation des aliments consiste à exposer les aliments à une dose soigneusement contrôlée de rayonnement ionisant afin, entre autres, de contrôler les agents pathogènes d'origine alimentaire, de réduire la charge microbienne et l'infestation d'insectes, d'inhiber la germination des plantes-racines et de prolonger la durée de vie des produits périssables (SCF, 2003). Il est inacceptable de traiter par irradiation une denrée alimentaire impropre ou contaminée ou périmée pour la rendre propre à la consommation. L'irradiation des aliments peut jouer un rôle important lorsque les contrôles préalables ne sont pas suffisamment capables de fournir le niveau de qualité microbiologique requis. Il peut offrir un outil pour la décontamination des aliments contre la charge microbienne et pour contrôler plus

largement l'infestation par les ravageurs des aliments et des produits d'origine végétale (**Nout et al., 2003**). La mondialisation accrue du commerce a augmenté la probabilité que des espèces envahissantes soient introduites dans de nouveaux pays et le changement climatique a augmenté la probabilité que des espèces envahissantes survivent dans ces nouveaux environnements. L'irradiation peut empêcher la reproduction des insectes et de leurs larves et peut ainsi être un outil efficace contre les risques phytosanitaires (**Farkas, 2011**). En 1986, le comité scientifique de l'alimentation humaine s'est prononcé sur l'irradiation des aliments que sur la base de toutes les preuves alors disponibles examinées, le Comité pourrait recommander que, dans le cadre d'une évaluation globale de la salubrité des aliments irradiés uniquement pour les doses d'irradiation et les classes d'aliments spécifiques devraient être approuvées qui ont été indiquées comme appropriées, non seulement du strict point de vue toxicologique, mais aussi d'un point de vue chimique, microbiologique, nutritionnel et technologique. Le Comité a répertorié plusieurs classes d'aliments et les doses de rayonnement correspondantes qui lui sont soumises comme acceptables du point de vue de la santé publique. Le Comité estimait que l'importance pour la santé de tout changement susceptible de se produire dans les aliments énumérés au niveau de rayonnement indiqué doses n'est pas différente de l'importance sanitaire des modifications induites par le traitement thermique. Le Comité n'a vu aucune objection à l'examen d'une extension de la liste à d'autres demandes à condition que des informations soient données pour évaluation selon les critères pris en compte dans le rapport SCF de 1986 (**SCF,1998**).

Actuellement, la stérilisation par rayonnements des produits agricoles et alimentaires est pratiquée dans plus de 60 pays. Selon la FAO, plus de 200 000 tonnes de produits irradiés sont produites annuellement rien qu'en Europe. Pour de nombreux types de produits, les modes optimaux de stérilisation par rayonnement ont été déterminés, des études à long terme sur leur adéquation et leur innocuité ont été réalisées et un équipement de rayonnement adéquat a été créé. La décontamination des épices, des herbes et des condiments reste la plus grande application de l'irradiation. Ces dernières années, le marché de la viande fraîche et transformée irradiée s'est solidement établi dans plusieurs pays, dont la Chine et les États-Unis. Au moins 10 pays ont récemment établi des accords bilatéraux pour le commerce de fruits et légumes frais irradiés par irradiation phytosanitaire. Les volumes de produits frais irradiés dépassent désormais 20 000 t par an (**Ifst, 2022**) La sécurité des aliments irradiés est

contrôlée en réalisant des études d'alimentation. Ces études déterminent le niveau « sans effet » le plus élevé pour un additif (dans ce cas, la dose de rayonnement ionisant), ainsi que des informations sur l'exposition et l'utilisation. L'irradiation est maintenant largement reconnue comme méthode éprouvée et efficace de traitement après récolte pour réduire la contamination bactérienne, ralentir l'altération et maintenir la qualité des aliments, empêcher la germination et la maturation précoce et sert de traitement phytosanitaire contre les insectes ravageurs des fruits et légumes. L'aspect sanitaire (non tératogène, mutagène et toxique) des produits irradiés a été largement étudié. Des études d'alimentation multigénérationnelles n'ont montré aucune confirmation des effets toxiques chez les mammifères dus à la consommation d'aliments traités par les rayonnements ionisants. Cela signifie que des études réalisées sur des animaux sur plusieurs générations ont montré que la valeur nutritionnelle est essentiellement inchangée et qu'il est totalement sûr de consommer des aliments irradiés. L'irradiation des aliments ne fournit aucune preuve d'une menace accrue de formation de mycotoxines dans les aliments irradiés. Ceux-ci ne représentent donc rien dangers spécifiques associés à la production de mycotoxines.

### **5 Conclusion**

Le traitement des aliments par irradiation ou par n'importe quelle méthode, entraîne certaines modifications dans la nature du produit traité qui peuvent avoir des conséquences pour le consommateur, mais il est certain que ces aliments traités sont sains et que leur consommation, dans le cadre du régime alimentaire, est entièrement dénuée d'effets nocifs.

L'irradiation, seule ou associée à d'autres traitements, présente des avantages uniques sur les méthodes classiques comme la possibilité de traiter l'aliment après l'emballage, ce qui permet d'éviter la contamination par des germes provenant de denrées alimentaires non traitées ainsi la prolongation de leur durée de préservation à l'état frais, sans perte appréciable de qualité nutritionnelle, et en vue économique, l'irradiation possède un intérêt considérable parce que l'utilisation de cette technique de traitements des aliments est peu coûteuse et exigeant peu d'énergie, par rapport aux autres techniques connues. Les effets des rayonnements sur les aliments peuvent être bénéfiques ou néfastes, en fonction de la dose et de la durée de l'exposition. Les rayonnements ionisants, tels que les rayons gamma, les rayons X et les betas, sont utilisés pour divers traitements sur une large gamme d'aliments, ce qui

permet de prolonger leur durée de conservation en éliminant les micro-organismes pathogènes. Cependant, une exposition excessive aux rayonnements peut entraîner des dommages sur les tissus cellulaires et altérer les propriétés nutritionnelles des aliments. Il est donc essentiel de contrôler et de surveiller rigoureusement l'utilisation des rayonnements dans le traitement des aliments, afin de garantir la sécurité alimentaire en préservant la qualité nutritionnelle des produits. En conclusion, l'irradiation provoque certains changements qui peuvent altérer la composition chimique et la valeur nutritionnelle des aliments. En général, les traitements des aliments à faible dose n'ont pas entraîné de changements significatifs dans la composition des produits irradiés.

# **Chapitre III**

## **Méthodes d'identification de l'irradiation**



## 1. Introduction

Aujourd'hui, l'irradiation ionisante est devenue l'une des techniques les plus utilisées avec succès pour les divers traitements des aliments avec une interruption minimale des propriétés fonctionnelles, nutritionnelles et sensorielles des denrées alimentaires. Ce traitement des aliments implique l'application contrôlée de l'énergie provenant de rayonnements ionisants tels que les rayons gamma, les rayons X et les faisceaux d'électrons pour la conservation des aliments. L'irradiation préserve les aliments par la perturbation des processus biologiques responsable de la dégradation de la qualité des aliments. Les règlements de l'irradiation des produits alimentaires de la FDA (Food and Drug Administration) des États-Unis réglementent tous les aspects du traitement par irradiation ionisante, comme la dose d'irradiation, le type de produit et l'étiquetage qui est devenu obligatoire sur tous les produits irradiés qui sont portés le symbole de rayonnement internationalement reconnu « radura ». L'irradiation, comme d'autres techniques de traitements, entraîne des modifications physico-chimiques des produits alimentaires. Le rayonnement ionisant interagit avec l'eau et d'autres molécules biologiques dans un système alimentaire et donc forme divers produits radiolytiques, qui agissent généralement comme des agents oxydants et peuvent provoquer plusieurs changements dans la structure moléculaire de la matière organique. Les radiations causent également des dommages au niveau des molécules d'ADN, de sorte que les cellules vivantes telles que celles des micro-organismes, des insectes et des gamètes ne peuvent pas se reproduire, ce qui entraîne un effet conservateur. Un contrôle adéquat du traitement des aliments par irradiation ionisante est nécessaire et obligatoire pour faciliter la manipulation commerciale internationale des aliments irradiés et pour améliorer la confiance, le choix et la sécurité des consommateurs.

## 1. Méthodes d'identification de l'irradiation

Depuis les années 1980, des efforts de recherche considérables ont été consacrés à la mise au point de méthodes d'identification des aliments irradiés. Avec les progrès de la commercialisation du procédé, l'intensification du commerce international des aliments irradiés, les différentes réglementations relatives à l'utilisation de cette technologie dans de nombreux pays et la demande des consommateurs pour un étiquetage clair des aliments

irradiés, le besoin de tests pour déterminer de manière fiable l'état d'irradiation d'une grande variété d'aliments pouvant être appliqués à l'aliment lui-même est devenu important (**Stevenson et al, 1995**). Les techniques de dosimétrie sont désormais suffisamment établies dans le domaine du traitement par l'irradiation ionisante des aliments pour constituer l'un des moyens de contrôle qualité les plus fiables. L'objectif principal de la dosimétrie est de déterminer la quantité de dose absorbée,  $D$ , à des points d'intérêt dans un milieu absorbant donné. L'identification post-irradiation et l'estimation de la dose sont nécessaires pour évaluer les effets induits par les radiations. La détection de la transformation des aliments par irradiation est essentielle à la mise en œuvre du contrôle qualité à tous les niveaux. La méthode de détection idéale devrait mesurer l'effet spécifique du rayonnement, qui est proportionnel à la dose et indépendant des paramètres et facteurs de traitement et des conditions de stockage ou du temps entre le traitement par rayonnement et l'analyse de l'aliment irradié. La détection des produits alimentaires irradiés repose principalement sur des méthodes chimiques et biologiques comme la formation de radicaux libres, la radiolyse des lipides, la modification des acides aminés, l'altération des molécules de l'ADN, la modification au niveau des glucides, la libération du gaz d'hydrogène, l'altération de la charge microbienne ou par d'autres méthodes physiques qui reposent sur la mesure des radicaux libres ou les électrons piégés générés sous l'effets du rayonnement ionisant dans les solides (**Chauhan et al, 2009**). La détection des produits alimentaires irradiés donc repose sur des critères physiques, chimiques, et les changements biologiques et microbiologiques dans ces aliments au cours de leurs traitements par irradiation. Ces méthode de détection doivent être idéales de tel sort que le test doit être spécifique au traitement par rayonnement ionisant et non influencé par d'autres processus ou stockage, précis et reproductible, avoir une limite de détection inférieure à la dose minimale susceptible d'être appliquée à l'aliment, applicable à une gamme de produits, rapide et facile à réaliser et capable de fournir une estimation de la dose de l'irradiation. En pratique, il est difficile de satisfaire toutes les exigences d'une méthode parfaite et aucune procédure générale applicable à tous les aliments n'est encore disponible. Par conséquent, une série de tests basés sur les modifications physiques, chimiques, microbiologiques et biologiques des aliments irradiés ont été développés pour se compléter et renforcer la probabilité de détection. Le

tableau suivant regroupe ces méthodes de détection de l'irradiation ainsi que les gammes de produits alimentaires correspondantes (Stevenson et al , 1995).

**Tableau 11: Méthodes de détection des aliments irradiés**

Méthode de détection	Produits alimentaires
Détection des aliments contenant de la graisse par analyse chromatographique en phase gazeuse des hydrocarbures	Poulet, bœuf, avocats, mangues, papayes, camembert
Détection des aliments contenant de la graisse par la chromatographie des alkylcyclobutanones en phase gazeuse à l'aide d'un spectromètre de masse	Poulet et œuf entier liquide
Détection des aliments contenant de l'os par la spectroscopie par résonance de spin électronique	Poulet, poisson, cuisses de grenouilles
Détection des aliments irradiés contenant de la cellulose par la spectroscopie par résonance de spin électronique	Paprika en poudre, coques de pistaches, fraises
Détection des aliments irradiés par la photoluminescence	Herbes et épices, crustacés
Détection des aliments irradiés par la chimoluminescence	Epices et lait en poudre
Détection des aliments irradiés par la mesure de l'impédance électrique	Pomme de terre, légumes et fruits
Détection des aliments irradiés par la mesure de la viscosité	Poivres noirs et blancs, cannelle
Détection des aliments irradiés par l'essai des comètes	Poulet, porc, cellules végétales, graines
Détection des aliments irradiés par ADN mitochondriale	Poulet et bœuf

Les méthodes physiques qui ont le plus grand champ d'application sont la spectroscopie par résonance de spin électronique (ESR), la thermoluminescence (TL), la formation d'hydrocarbures volatils à longue chaîne et de 2-alkylcyclobutanones. L'utilité de ces méthodes pour l'identification d'une gamme d'aliments irradiés a été évaluée dans un certain nombre d'essais, suite aux bons résultats obtenus lors de ces tests, cinq méthodes standards ont été soumises au Comité européen de normalisation (CEN) pour examen. Il s'agit de la méthode TL pour détecter les aliments irradiés contenant des matériaux silicatés, de deux méthodes ESR, une pour détecter les aliments irradiés contenant des os et l'autre pour identifier les aliments irradiés contenant de la cellulose et de deux méthodes à l'alkylcyclobutanone pour identifier les aliments irradiés contenant de la graisse. A l'exception du test comètes de l'ADN, les autres méthodes qui ont fait l'objet d'essais interlaboratoires sont soit limitées dans leur champ d'application (viscosimétrie, impédance), soit non spécifiques au traitement par irradiation. Néanmoins, les méthodes microbiologiques sont utiles comme méthodes de dépistage et elles fournissent également des informations sur la qualité hygiénique des aliments avant leur traitement par rayonnements ionisants (**Stevensan et al , 1995**).

### 2.1 Méthodes physiques

Les interactions des rayonnements ionisants avec la matière se traduit dans le cas de tissus ou d'organismes vivants par des effets biologiques qu'il est facile de constater et qui sont relativement bien connus ; de même l'action primaire des rayonnements sur la matière est connue, mais la chaîne reliant l'action primaire et les effets biologiques finaux est, assez mal connue. L'action des RI sur un matériau quelconque se traduit par deux phénomènes: l'ionisation ou l'excitation. Dans le processus de l'ionisation, une molécule perd un électron et devient une molécule positive et l'électron négatif est éjecté, il devient une molécule négative. La molécule qui a perdu un électron possède alors un électron non apparié et constitue donc un radical libre ; ce radical est très réactif chimiquement et provoque dans la matière une chaîne de réactions ou de dissociations moléculaires faisant apparaître de nouveaux radicaux libres. Environ la moitié de l'énergie perdue par le rayonnement incident dans la matière se traduit par des excitations atomiques ou moléculaires et ces énergies sont parfois suffisantes pour rompre des liaisons à l'intérieur d'une molécule. Dans ce cas, la

molécule est fragmentée en deux radicaux, qui peuvent alors se recombinaison ou provoquer d'autres réactions chimiques. La connaissance des radicaux libres, qui se forment dans un corps organique irradié possède un grand intérêt pour expliquer les effets biologiques différents avec la nature du rayonnement pour une même énergie absorbée (**Thomet et al., 1967**).

Il existe un certain nombre de méthodes permettant d'identifier toute une gamme d'aliments irradiés.

### **2.1.1 Identification de l'irradiation par spectroscopie par résonance de spin électronique**

L'effet prépondérant de l'application du rayonnement ionisant sur les produits alimentaires est la production de radicaux libres dont le nombre est proportionnel à la dose reçue. Un moyen de choix pour mesurer leur quantité au sein de la matière irradiée est la résonance paramagnétique électronique. La résonance de spin électronique (en anglais Electron Spin Resonance d'où l'abréviation ESR), aussi appelée résonance paramagnétique électronique (RPE), découverte en 1945 par Zavoisky, est aujourd'hui une méthode classique d'analyse de la structure de la matière, utilisée couramment en physique du solide, en chimie moléculaire, en biologie et en cristallographie. Le principe de la résonance paramagnétique électronique est commun à toutes les autres formes de spectroscopie et se base sur l'interaction entre la matière et le rayonnement ionisant. La RPE a plusieurs applications dans les divers domaines de sciences (physique, chimie, géologie, biologie et biochimie). Ses applications s'étendent également au domaine de la médecine, ce qui en fait un outil spécifique à la mise en évidence des espèces radicalaires et paramagnétiques dans diverses matrices. La technique de la résonance paramagnétique électronique (RPE) qui permet, avec une bonne sensibilité de reconnaître et de quantifier les radicaux libres produits par les rayonnements ionisants dans un milieu, est donc une méthode très intéressante dans le domaine de l'étude du mécanisme de l'action des rayonnements ionisants sur les aliments et utilisée comme méthode d'identification des denrées alimentaires irradiées comme la viande et les arêtes de poisson, les fruits et produits d'origine végétale, les fruits de mer, etc. L'électron peut être représenté schématiquement par une sphère chargée négativement et animée d'un mouvement de

rotation sur elle-même. Cette auto-rotation, appelée spin de l'électron, entraîne la production d'un moment magnétique  $\mu$  dont l'orientation dépendra du sens de la rotation. A ce moment magnétique de spin s'ajoute un moment magnétique orbital, lié au mouvement de l'électron autour du noyau de l'atome chargé positivement, et le moment magnétique global de l'électron dépend donc de l'intensité de l'ensemble du moment de spin et le moment orbital. Cependant, dans de nombreux cas, le moment magnétique orbital est identiquement nul et le moment global de l'électron sera alors égal au moment de spin seul. Lorsqu'un atome, un ion ou une molécule possède un nombre pair d'électrons et qu'ils sont tous appariés en doublets associant deux électrons de spins opposés, son moment magnétique total est nul. Si on place un échantillon dans un champ magnétique externe, seul un faible moment magnétique induit est observé. Une telle substance est appelée substance *diamagnétique*. D'un autre côté, lorsqu'un atome, un ion ou une molécule comportant soit un nombre impair d'électrons, soit un nombre pair d'électrons qui ne sont pas tous appariés en doublets, le moment magnétique total dans ce cas n'est plus nul en raison de la présence d'électrons célibataires. Une telle substance est appelée *paramagnétique*. Les espèces paramagnétiques sont minoritaires dans la nature par rapport aux espèces diamagnétiques, mais elles restent assez nombreuses. Les principaux sont les radicaux libres, les ions des séries de transition, les métaux et les centres-pièges générés par l'irradiation.

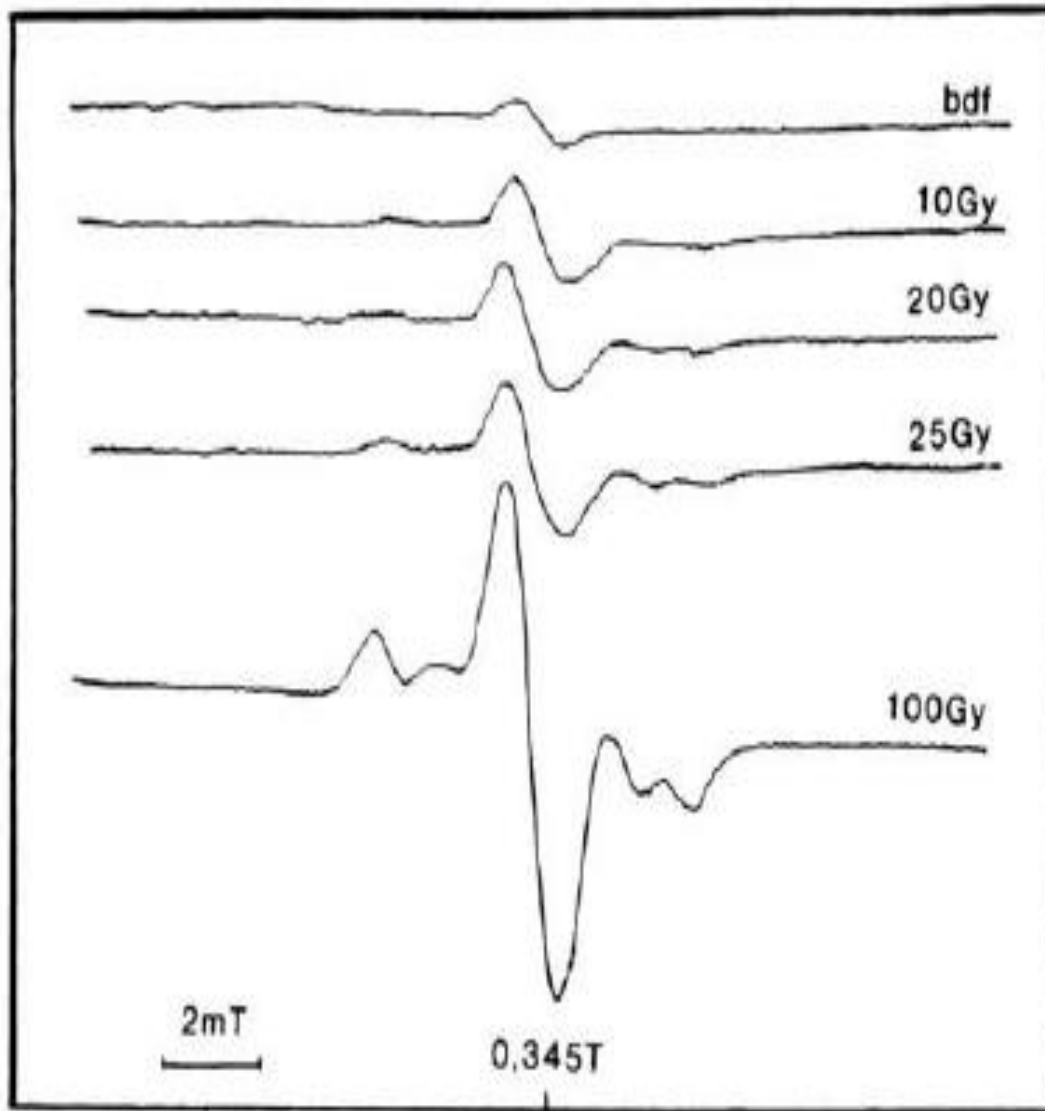
L'accumulation des électrons piégés dans certains défauts des minéraux pouvait être une fonction de la dose totale de radiation à laquelle ces cristaux ont été exposés (**Bahain, 1993**). Dans un champ magnétique homogène et constant, le moment magnétique d'un électron libre tourne avec un mouvement de précession autour d'un axe parallèle à ce champ et sa composante suivant cette direction peut prendre deux valeurs différentes correspondant aux valeurs du spin  $\pm 1/2$ . Le principe consiste à induire une transition entre ces deux niveaux énergétiques à l'aide d'une onde hyperfréquence. La condition de résonance de l'ensemble onde-électron induisant la transition d'un état à l'autre se traduira par une absorption d'énergie par le système molécule-électron au détriment de l'onde (**Thomet et al., 1967**).

Cette spectroscopie est une technique très sensible permettant d'identifier des espèces paramagnétiques. Elle permet aussi d'obtenir des informations sur l'environnement moléculaire des espèces radicalaires étudiées. Le principe de l'ESR est basé sur la théorie quantique et la détection des sites actifs paramagnétiques à longue durée de vie des radicaux

libres produits par l'irradiation dans les complexes organiques et inorganiques possédant un ion de métal de transition. Dans les radicaux libres et dans d'autres espèces paramagnétiques, les électrons non appariés sont piégés à différents défauts du réseau cristallin. Les autres électrons peuvent être piégés par les anions des radicaux anioniques qui forment les cristaux avec des électrons paramagnétiques non appariés. Ces électrons piégés peuvent exister à l'état natif et, en présence d'un champ magnétique, les moments magnétiques de ces électrons s'aligneront soit parallèles ou antiparallèles au champ magnétique. Ces deux configurations sont d'énergie inégale et différente et l'électron peut être excité d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie supérieur par absorption d'énergie micro-onde. L'électron possède un spin dont le moment cinétique conduit au moment magnétique. Par conséquent, les charges négatives sur l'électron tournent et constituent un courant électrique circulaire (**Chauhan et al., 2009**). Ce courant induit un champ magnétique, faisant subir à l'électron un couple tendant à aligner le moment magnétique avec le champ. La spectroscopie par RPE permet l'identification, la quantification et la localisation des corps paramagnétiques dans la matière. Ces derniers sont caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs électrons non appariés. Le principe de la RPE fondé, d'un point de vue quantique, sur l'existence de deux orientations opposées du spin électronique. En l'absence de champ magnétique, l'électron libre possède l'une ou l'autre des orientations; les deux situations sont iso énergétiques. En présence d'un champ magnétique externe la dégénérescence est levée; l'état correspondant à l'orientation parallèle du spin avec le champ magnétique est plus stable que celui correspondant à l'orientation antiparallèle. La transition entre ces deux états est effectuée par un champ électromagnétique hyperfréquence appliqué perpendiculairement au champ magnétique. La condition de résonance est remplie lorsque l'énergie des microondes est égale à la différence énergétique entre les deux états électroniques. L'absorption ou l'émission énergétique exprime la différence de population entre les deux niveaux énergétiques, dont le rapport à l'équilibre thermique est déterminé par la distribution de Boltzmann. La courbe d'absorption correspond à l'évolution dans un champ magnétique croissant, de l'intensité de l'énergie absorbée à une fréquence donnée. L'expression "spectre RPE" correspond à la dérivée en fonction du champ magnétique de cette courbe d'absorption.

Un tel spectre est caractérisé par plusieurs paramètres tels que la forme, la largeur, l'intensité, la valeur du facteur de LANDE et la constante de structure hyperfine. Dans certaines

conditions dépendant de la nature de l'échantillon, l'intensité du spectre, proportionnelle au nombre de radicaux résonnants, est également proportionnelle à l'énergie absorbée, donc à la dose (Kamenopoulou et al. 1988). La Figure 5 illustre un Spectre ESR.



**Figure 5: Un Spectre ESR**

L'ESR est devenu de plus en plus connue dans le monde entier, en raison de sa nature de contrôle non destructif, de sa spécificité, de sa rapidité et de sa simplicité pour détecter les radicaux dans les aliments traités par irradiation. L'ESR est appliquée pour détecter la



présence de radicaux libres produits par les rayonnements dans les os depuis le milieu des années 1950. La détection du traitement par irradiation par cette méthode est difficile dans les aliments à forte teneur en eau car les radicaux libres produits pendant le processus d'irradiation disparaissent très rapidement. Dans les aliments contenant des os, des graines, des coquilles, etc., ayant une teneur en eau réduite, les radicaux libres restent suffisamment stables et peuvent être facilement détectés par ESR (**Chauhan et al., 2009**).

### 2.1.2 Identification de l'irradiation par la luminescence

Le terme luminescence s'applique à l'émission de lumière à partir de solides irradiés sur la base de l'effet qu'une petite partie de l'énergie du rayonnement absorbée, stockée est émise sous forme de lumière. L'intensité de la lumière émise peut être mesurée et détectée par un détecteur à luminescence photostimulée (PSL) ou à thermoluminescence (TL) sous forme de comptage de photons.

Les méthodes de luminescence photostimulée (PSL) et de thermoluminescence (TL) ont été initialement développées pour la détection de certains aliments irradiés comme les herbes et les épices, mais ensuite leurs applications ont été étendues à d'autres catégories de produits alimentaires (**Sanderson et al., 2008**). Cette méthode s'avère adaptée aux produits alimentaires tels que les herbes, les épices, les bulbes, les tubercules, les légumes, les céréales, crustacés et les fruits contenant des minéraux silicatés (**Ramli et al., 2012**). La luminescence est l'énergie émise par un matériau sous forme de lumière, après absorption de l'énergie d'une source excitatrice qui provoque la montée d'un électron de son niveau d'énergie fondamental à un autre correspondant à une énergie plus grande (niveau excité). La lumière émise, lorsque l'électron revient à son niveau d'énergie fondamental, peut être classée selon un temps caractéristique,  $\tau$ , entre l'absorption de l'énergie excitatrice et l'émission de lumière. Si ce temps est inférieur à  $10^{-8}$  secondes, la luminescence est appelée fluorescence. La lumière est émise avec une longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde de la lumière absorbée en raison de la dispersion d'énergie par la molécule. Si le temps entre l'absorption et l'émission est supérieur à  $10^{-4}$  sec, la luminescence est alors appelée phosphorescence. Le processus de phosphorescence s'explique par la présence d'un niveau métastable, entre le niveau fondamental et le niveau excité, qui agit comme un piège pour l'électron. Si la transition qui a lieu à une température  $T$  et à la différence d'énergie  $E$ , entre les niveaux excité et métastable,

est beaucoup plus grande que  $kT$ , l'électron a une forte probabilité de rester piégé pendant très longtemps. Les principales techniques dosimétriques de luminescence sont :

- la radio-thermoluminescence (RTL) ou thermoluminescence (TL) qui consiste en une émission transitoire de lumière à partir d'un matériau irradié lorsqu'il est chauffé ;
- la radio-photoluminescence (RPL) qui est basée sur l'émission de la lumière à partir d'un matériau exposé au rayonnement par excitation avec de la lumière ultraviolette ;
- radio-lyoluminescence (RLL) qui consiste en une émission transitoire de lumière provenant d'un solide irradié lors de sa dissolution dans l'eau ou dans un autre solvant (Furetta, 2003).

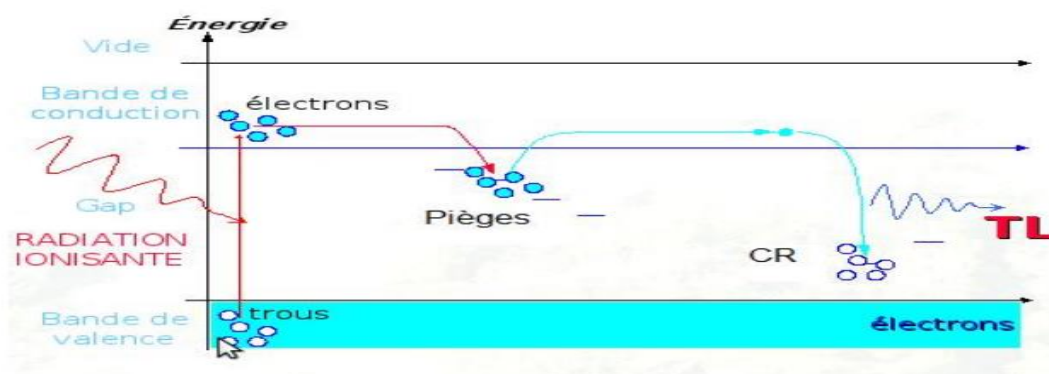
La luminescence est un véritable phénomène, qui a trouvé une applicabilité en tant que méthode de détection de l'irradiation de produits alimentaires. Elle peut provenir de la stimulation, soit thermique, soit optique, de minéraux préalablement exposés aux RI. Pendant l'exposition, l'énergie du rayonnement est accumulée et stockée dans le réseau cristallin sous la forme d'électrons qui ont été piégés aux endroits défectueux du réseau. Lors de la stimulation, la charge piégée est libérée et, par conséquent, le signal de luminescence devient nul. La luminescence induite par les rayonnements doit être distinguée des autres phénomènes de luminescence tels que la photoluminescence, la phosphorescence et d'autres qui ne dépendent pas de la dose et ne sont donc pas pertinents pour les applications dosimétriques.

#### 2.1.2.1 La Thermoluminescence (TL)

le phénomène de luminescence stimulée par la chaleur ou TL a été rapporté pour la première fois par Boyle en 1664 (kharfi et al,2018).

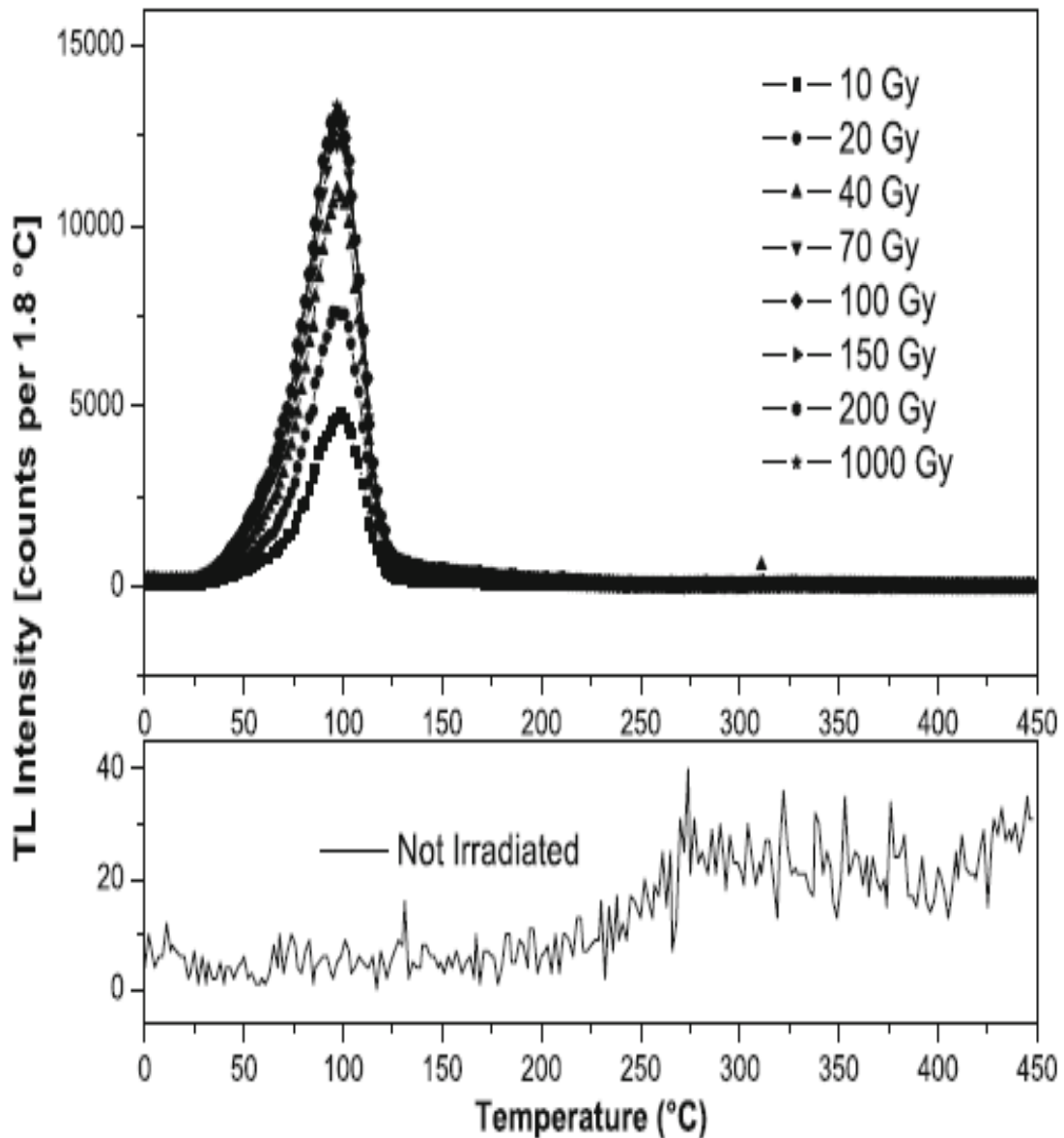
Le terme thermoluminescence TL s'applique à l'émission de la lumière à partir de matériaux irradiés, sur la base de l'effet selon lequel une petite partie de l'énergie de rayonnement absorbée stockée est émise sous forme de lumière lorsqu'elle est chauffée. Lorsqu'une substance présentant un TL est exposée à un rayonnement ionisant, des paires d'électrons-trous sont créés et peuvent se déplacer librement dans la bande de conduction et de valence, et certains électrons ou trous peuvent être piégés sur certains sites actifs du matériau. Ces pièges sont fournis par des défauts de réseau ou des impuretés, la fixation entre la bande de

conduction et la bande de valence est énergétiquement métastable. Ces porteurs de charge peuvent être à nouveau capturés par des pièges ou se recombiner dans le centre de luminescence. Ils restent dans cet état jusqu'à ce qu'ils acquièrent suffisamment d'énergie thermique pour s'échapper. Lorsqu'un matériau est chauffé, des électrons sont libérés du piège et de la lumière est émise lorsqu'ils se recombinent avec des trous. L'intensité de la lumière émise peut être mesurée en fonction de la température, qui est détectée par un détecteur sous la forme d'une courbe caractéristique de la substance analysée (Chauhan et al., 2009). La figure suivante explique le principe de la thermoluminescence.



Les lecteurs TL comprennent un banc chauffant sur lequel on place les échantillons à examiner, et un compteur de photons sensible ou des tubes photomultiplicateurs pour mesurer et amplifier la lumière TL émise. L'intensité de la lumière émise dépend de la température et est enregistrée sous forme de courbe. La 1<sup>ère</sup> courbe de luminescence est comparée à une 2<sup>ème</sup> courbe de luminescence obtenue par une 2<sup>ème</sup> mesure de thermoluminescence des minéraux isolés après leur exposition à une dose de rayonnements donnée. Cette étape de normalisation prend en compte les différences de la composition minérale. La comparaison de la taille et de la forme des 2 courbes obtenus (courbe du nombre de photons en fonction de la température) révèle si l'échantillon à partir duquel les particules minérales ont été isolées a été irradié ou non. Le rapport de leur TL, qui est le rapport des intensités TL intégrées de la courbe 1 à la courbe 2 de la figure 6, donc l'aire 1 divisée par l'aire 2, et évaluée sur un intervalle de température défini, est généralement supérieure à 0,5 pour les échantillons exposés aux rayonnements et généralement inférieure à 0,1 pour les échantillons non irradiés. Une condition préalable au calcul du rapport de leur TL est que la surface 2 évaluée

sur l'intervalle de température donné soit 10 fois supérieure au niveau de l'intensité TL intégré minimum détectable (Pinnioja, 1998 ; Chauhan et al., 2009) .



**Figure 6: Courbe TL du quartz séparé du poivre noir non irradié montrant le fond (en bas) et courbes TL du quartz séparé du poivre noir irradié après exposition à des doses de rayons X de 10, 20, 40, 70, 100, 150, 200 et 1000 Gy (kharfi et al,2018)**

### 2.1.2.2 La photoluminescence PL

Cette technique est similaire à la thermoluminescence, sauf qu'elle repose sur l'utilisation de la lumière plutôt que la chaleur pour libérer l'énergie piégée tout en conservant la sensibilité et la spécificité inhérentes aux méthodes de luminescence. La méthode PL peut être appliquée pour détecter l'irradiation de tous les produits alimentaires contenant des débris minéraux, en particulier des minéraux silicatés et des matériaux bioinorganiques tels que la calcite, provenant de coquilles ou d'exosquelettes, ou l'hydroxyapatite provenant d'os ou de dents. Ces matériaux sont caractérisés par leur stock de l'énergie dans des porteurs de charge piégés dans des sites structuraux interstitiels ou d'impuretés, et lorsqu'ils sont exposés aux rayonnements ionisants, la stimulation optique des minéraux libère des porteurs de charge. Dans la technique de la PL, les échantillons entiers ou un mélange de matériaux organiques et inorganiques peuvent être utilisés. Cette méthode a été supposée pour résoudre les limites pratiques de la technique TL. Certains composants des aliments traités par irradiation ionisante stockent l'énergie après l'exposition aux RI en piégeant les porteurs de charge au niveau des sites structuraux, interstitiels ou d'impuretés dans un milieu diélectrique (**Ramli et al., 2012**).

### 2.1.2.3 La radio-lyoluminescence (RLL) ou La Chimoluminescence (CL)

La CL ou RLL est l'émission ou la production de la lumière suite à une réaction chimique. Le produit formé lors de cette réaction chimique se trouve dans un état électronique excité. Deux configurations peuvent conduire alors à l'émission de lumière :

- le produit formé retourne à son état fondamental accompagné de l'émission d'un photon. C'est la chimiluminescence directe.
- le produit formé dans état excité transfère son énergie à une autre espèce qui est à son tour excitée et émet un photon. C'est la chimiluminescence indirecte (**Jonathan et al., 2015**).

Cette technique est très analogue à la méthode de la thermoluminescence. Elle fait appel à l'émission de la lumière lors de la dissolution d'une substance solide dans un milieu liquide. Dans ce phénomène, l'émission d'un rayonnement électromagnétique sous forme de lumière a lieu lorsque l'énergie piégée est libérée en ajoutant des produits chimiques. Il s'agit donc d'un

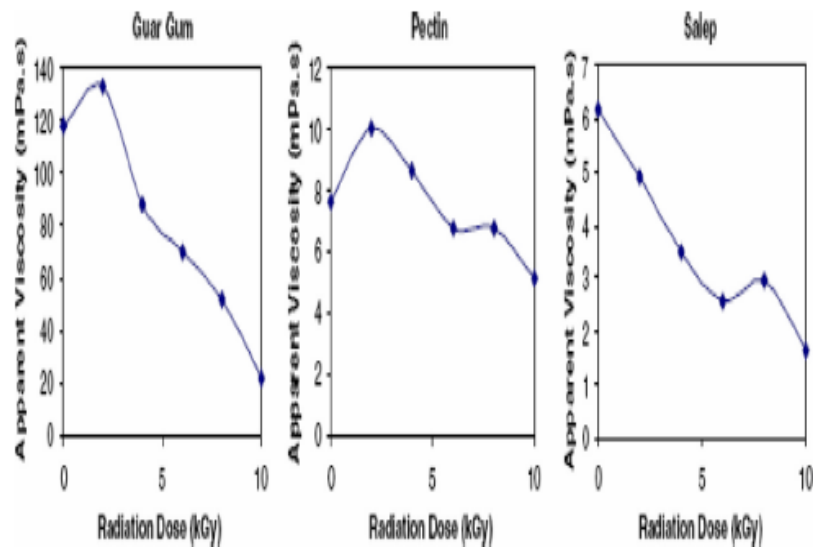
effet chimique. Les produits traités par irradiation ionisante sont dissoutes dans certains solvants tels que les halogénures alcalins dans l'eau ou des composés organiques comme les sucres, les acides aminés, etc., entraînant une émission de lumière (**Chauhan et al., 2009**).

### 2.1.3 Identification de l'irradiation des aliments par la mesure d'impédance électrique

Les tissus vivants ont des membranes qui possèdent une perméabilité sélective au transport des ions. Les propriétés de ces membranes peuvent être modifiées en variant la concentration en ions. Ce principe physique est exploité pour la détection de l'irradiation des échantillons alimentaires. Des expériences en appliquant ce phénomène sont effectuées par des mesures d'impédance pour des échantillons de pommes de terre traités par irradiation à l'aide d'électrodes en faisant passer un courant alternatif, la conductivité des pommes de terre irradiées était supérieure à celle des pommes de terre non irradiées. Cette technique de détection est appliquée pour mesurer l'impédance pour l'identification des poissons irradiés.

### 2.1.4 Identification de l'irradiation des aliments par la mesure de la viscosité

La viscosité des aliments dépend largement de la teneur et de la structure des polysaccharides, protéines, etc., qui peuvent être altérés par l'exposition aux rayonnements ionisants. Les modifications induites par l'irradiation dans ces molécules sont principalement des ruptures de chaîne ou des hydrolyses, qui entraînent des changements au niveau de la viscosité dus à une réticulation accrue ou à une diminution de la longueur de la chaîne. Le taux de ces modifications dépend de la valeur de la dose d'irradiation, de la température, de la teneur en eau et des conditions de stockage. La viscosité des homogénats et des suspensions de matières biologiques à analyser dans des solvants comme l'eau dépend du degré de pénétration du solvant dans les cellules, ainsi que l'irradiation peut influencer la perméabilité de la paroi cellulaire. Dans certains matériaux, la viscosité augmente après irradiation, alors que dans d'autres elle diminue. La figure 7 représente les effet de la dose de rayonnement sur la viscosité apparente (**Chauhan et al., 2009**).



**Figure 7: Effet de la dose de rayonnement sur la viscosité apparente (Chauhan et al., 2009).**

## 2.2 Méthodes chimiques

Les modifications chimiques spécifiques produites par les interactions des radiations avec les aliments contenant de la graisse peuvent être identifiées par deux méthodes : l'analyse chromatographique en phase gazeuse des hydrocarbures et la spectrométrie de masse des 2-alkylcyclobutanones. Tous deux sont basés sur la mesure des produits radiolytiques formés à partir de lipides (EFSA, 2011).

### 2.2.1 Hydrocarbures

Cette méthode est basée sur la détection de certains hydrocarbures radiolytiques. Dans les fractions d'acide gras des triglycérides, les liaisons chimiques peuvent se rompre pendant le traitement d'un aliment par rayonnement ionisant, entraînant la formation d'hydrocarbures. Ainsi, le profil des hydrocarbures créés par les RI peut être prédit en fonction de la composition en acides gras de l'aliment analysé. Grâce à la séparation par chromatographie en phase gazeuse de la fraction d'hydrocarbures et à sa détection par spectrométrie de masse, un échantillon alimentaire donné peut être identifié comme étant irradié si le profil complet attendu des hydrocarbures est détecté. Le traitement par RI pourrait être identifié par la détection d'hydrocarbures radiolytiques dans une variété d'aliments gras, comme les noix de

cajou, le soja, les crevettes séchées et la viande de bœuf, le poulet et le jambon cru (AFSA, 2011).

### 2.2.2 Alkylcyclobutanones

Cette méthode chimique est utilisée pour identifier les 2-alkylcyclobutanones (2-ACB) dans les denrées alimentaires traitées par irradiation contenant de la graisse. La formation de ces composés a été rapportée pour la première fois par Letellie et Nawar en 1972 qui ont proposé que les 2-ACB résultent du clivage de la liaison acyle oxygène dans les triglycérides et possèdent le même nombre d'atomes de carbone comme acide gras parent avec le groupe alkyle situé en position 2 du cycle.

Ainsi, si la composition en acides gras de l'aliment est connue, les 2-ACB produits lors d'une exposition aux rayonnements peuvent être prédits dans une certaine mesure. Ces composés peuvent être séparés par chromatographie en phase gazeuse et détectés à l'aide d'un spectromètre de masse (AFSA, 2011).

## 2.3 Méthodes biologiques

Certaines méthodes, appelées « méthodes de dépistage », sont utilisées uniquement pour indiquer un traitement de transformation, éventuellement un traitement par rayonnements ionisants. Ces méthodes incluent la détermination du rapport entre la quantité des micro-organismes vivants et morts ou la présence des ruptures des brins d'ADN.

### 2.3.1 Électrophorèse sur agarose de l'ADN mitochondrial

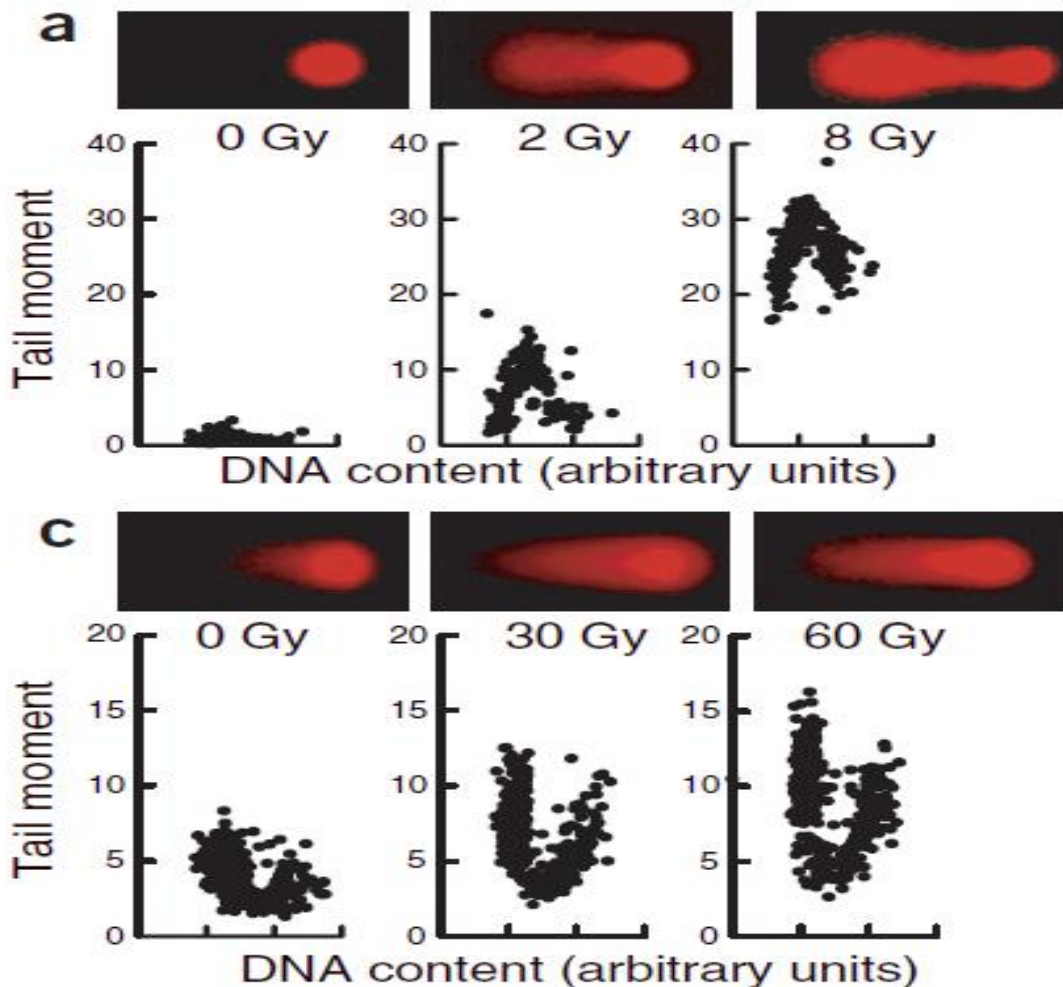
L'identification des cassures des molécules d'ADN spécifiquement causées par l'exposition aux radiations a été étudiée par l'isolement de l'ADN irradié à partir de cellules présentant une rupture enzymatique de l'ADN. L'ADN mitochondrial (ADNm) étant protégé des réactions enzymatiques dues à la présence de parois mitochondriales, il n'est pas protégé contre les rayonnements ionisants. Par conséquent, il est supposé que les ruptures de l'ADNm sont spécifiques aux RI. Dans les aliments d'origine animale, l'ADNm est caractérisée par leur faible poids moléculaire et se présente normalement sous des formes super-enroulées. Sous l'action de l'irradiation, les formes super-enroulées se détendent en



ADN circulaire puis en ADN linéaire. Ces trois formes peuvent être facilement séparées par électrophorèse sur gel d'agarose. Dans les aliments d'origine animale, le pourcentage d'ADN super-enroulé était considérablement réduit lors d'une irradiation de 2 à 4 kGy, tandis que le pourcentage d'ADNm circulaire et linéaire augmentait. Dans les aliments non irradiés, ADNm super-enroulé reste parfaitement stable pendant un stockage de 25 jours à 4 °C ainsi que lors de changements brusques de température (congélation à -20 °C et décongélation à 20 °C). Le test ADNm a également été utilisé pour identifier les pommes de terre irradiées entre 1 et 4 kGy. L'analyse des aliments d'origine végétale est réalisée par électrophorèse pulsée en raison qu'ils possèdent un ADN de poids moléculaire élevé par comparaison avec les produits animaux. L'inconvénient majeur de cette technique d'identification de l'irradiation dans les aliments est que l'extraction de l'ADN qui est très compliquée et prend beaucoup du temps (**Chauhan et al., 2009**).

### 2.3.2 Le test des comètes

Le test des comètes, ou Comet assay en anglais, encore appelé "single cell gel electrophoresis assay" (SCGE) ou "microgel electrophoresis assay" (MGE) mesure les cassures de brin d'ADN dans des cellules individuelles. Elle consiste à déterminer les dommages de l'ADN dans des cellules individuelles incluses dans un gel d'agarose et lysées dans des conditions légèrement alcalines permettant un déroulement partiel de l'ADN. Après neutralisation, les cellules étaient colorées à l'acridine orange et les dommages de l'ADN étaient quantifiés en mesurant le rapport de la fluorescence verte (indiquant l'ADN double brin) et de la fluorescence rouge (révélant l'ADN simple brin). Lors de l'électrophorèse, les molécules d'ADN étant chargées négativement, les fragments cassés ou relaxés vont davantage migrer vers l'anode et former ainsi une image ressemblant fortement à des comètes. Le test des comètes est capable de détecter les effets des agents alkylants, des substances intercalantes et des produits induisant un stress oxydant. L'essai des comètes est exploité dans de très nombreuses études dans de nombreux domaines par exemple dans les études des effets des radiations sur la majorité des aliments soit d'origine végétale ou animale ainsi dans la toxicologie génétique et les études des systèmes de réparation de l'ADN, etc... (**Olive and Banáth, 2006; Cerda et al., 1997**).



**Figure 8: Test des comètes**

### 2.3.3 Détection immunologique des bases d'ADN modifiées

Les molécules de l'ADN comporte plusieurs types de bases telles que l'adénine, la thymine, etc. sous l'action d'un traitement par irradiation, une certaine proportion des bases de thymine est convertie en dihydrothymidine (DiHT), cette conversion due à cause de sa réaction avec les produits radiolytiques des molécules d'eau dans des conditions anoxiques. Le DiHT peut être utilisé comme marqueur interne potentiel pour la détection d'un traitement par rayonnement. Il est fabriqué par exemple un anticorps monoclonal contre le DiHT pour son isolement qui est utilisé pour détecter les crevettes irradiées à 2 kGy. L'avantage de cette technique de détection des aliments est qu'elle ne nécessite pas d'extraire des molécules de l'ADN avant l'analyse (Chauhan et al., 2009).

### 2.3.4 Changement de la charge microbienne

Généralement, tous les types de transformation des aliments, y compris le traitement par l'irradiation ionisante, provoquent la destruction ou la modification de la charge microbienne. Sur la base de ces changements, un certain nombre de chercheurs ont suggéré d'utiliser le déplacement de la charge microflore comme méthode de test simple pour déterminer si un traitement par irradiation a été appliqué sur un aliment donné. Les premières études ont été menées sur les fruits et légumes, en mettant l'accent principalement sur les bactéries à Gram négatif, car elles sont plus sensibles aux RI que les autres types de bactéries. Par exemple, la microflore de la viande de volaille crue présentait un profil microbiologique caractéristique avec un nombre assez élevé de bactéries à Gram négatif. Cependant, la flore qui se développe sur un poulet cru après l'exposition aux RI à la dose de 2,5 kGy est majoritairement constituée de bactéries Gram-positives et de levures.

Une modification dans la charge microbienne de fraises, la *Pseudomonas* de la population totale  $10^5$  à  $10^6$  unités formant colonie (UFC)/g présentes dans un échantillon avant l'irradiation a été complètement éliminé après un traitement par irradiation à une dose de 2 kGy. Cette technique de détection des aliments irradiés présente certaines limites, car la charge microbienne du produit dépend de plusieurs paramètres tels que la région de culture, les conditions post-récolte, la transformation, etc (**Chauhan et al., 2009**).

## 3 Conclusion

Les méthodes de l'identification de l'irradiation des aliments sont toujours en développement. Idéalement, ces méthodes devraient être simples, précises, faciles à mettre en œuvre, rapides et peu coûteuses. Il est reconnu que la disponibilité de telles méthodes de détection renforcerait la procédure réglementaire standard ce qui contribuerait à l'établissement d'un système de contrôle législatif et renforcerait la confiance des consommateurs dans ces réglementations et leur acceptation des aliments irradiés.

Différents aliments varient dans leur composition chimique, leurs attributs physiques et leur qualité. Le choix d'une méthode de détection appropriée dépend généralement du type d'aliment, de la dose utilisée pour l'irradiation, du degré de précision requis et du coût. Il est nécessaire d'appliquer une combinaison de ces méthodes analytiques ce qui rend possible de

résoudre ces problèmes, à la fois d'un point de vue scientifique et des points de vue pratique. Il est difficile pratiquement de satisfaire à toutes les exigences d'une méthode idéale et aucune procédure générale applicable à tous les produits alimentaires n'est encore disponible. Par conséquent, plusieurs tests et essais basés sur les modifications physiques, les changements chimiques, microbiologiques et biologiques des aliments traités par irradiation ionisante ont été développés pour améliorer et renforcer la probabilité de détection. Les techniques les plus étudiées et qui, à ce jour, semblent avoir le plus grand champ d'application comprennent la spectroscopie par résonance de spin électronique (ESR), la thermoluminescence (TL) et la formation d'hydrocarbures volatils à longue chaîne et de 2-alkylcyclobutanones. L'utilité de ces procédures pour l'identification d'une large gamme d'aliments irradiés a été évaluée suite aux résultats positifs obtenus lors de plusieurs études. En résumé Il s'agit de la méthode TL pour détecter les aliments irradiés contenant des matériaux silicatés, de deux techniques de l'ESR, une pour détecter les aliments irradiés contenant des os et une pour identifier ceux qui contenant de la cellulose, ainsi que des méthodes aux hydrocarbures et à la 2-alkylcyclobutanone pour la détection les aliments irradiés contenant de la graisses (**Stevensan et al , 1995**).

# **Partie expérimentale**

# **Chapitre IV**

**Traitement par l'irradiation gamma de  
la pomme de terre de reproduction**

### 1. Introduction

Au cours des quatre dernières décennies, le traitement par irradiation est apparu comme une technique robuste et très puissante pouvant être utilisée pour induire des mutations chez les plantes, permettant la production de variétés de meilleure qualité avec des rendements plus élevés et une meilleure résistance face au stress hydrique. Dans le domaine des cultures et des maladies des plantes, l'irradiation s'est avérée extrêmement utile. En effet, l'irradiation peut contribuer à améliorer les cultivars de plantes à multiplication végétative. Le rapport de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) décrit également la terminologie utilisée pour chaque traitement par irradiation (FAO/AIEA, 2003 ; AIEA, 2018). Les pommes de terre sont des cultures à multiplication végétative. Les variétés de pommes de terre sont traditionnellement préservées sous forme de véritables clones en plantant successivement des tubercules. L'irradiation peut jouer un rôle majeur dans l'amélioration de la durée de conservation et des caractéristiques qualitatives des tubercules de pomme de terre grâce à ses effets sur leurs propriétés physiques, chimiques et physiologiques (Al-Safadi et al., 2000 ; Baskaran, 2007 ; Afrasiab et Iqbal, 2010 ; Ghosh et Das, 2014 ; Mahto et Das, 2015 ; Muley et al., 2019). Les tubercules étudiés font partie des deux variétés, Spunta et Désirée de deux classes la G<sub>0</sub> qui est préparée par culture in vitro en laboratoire et la classe A qui est prélevée parmi des tubercules sélectionnés et stockés afin d'être utilisés pour une multiplication ultérieure en les plantant dans le sol de la manière conventionnelle pour la production de plants de pommes de terre. L'irradiation des cultures de pommes de terre et leur multiplication ultérieure par la production de macrotubercules par les deux méthodes permettent ainsi un procédé de production de variantes des cultivars améliorés.

La pomme de terre est une plante d'un grand intérêt pour l'alimentation humaine. Dans un premier temps, nous aborderons brièvement la pomme de terre, notamment son histoire, ses caractéristiques, ses exigences écologiques, les techniques de culture ainsi son importance économique, alimentaire et industrielle dans le monde et en Algérie en particulier. La pomme de terre, *Solanum tuberosum* de la famille des solanacées, est une plante originaire d'Amérique du Sud, cultivée principalement pour ses tubercules riches en amidon, utilisés comme produits alimentaires pour l'homme et dans l'industrie de l'amidonnerie (à base d'amidon). Cultivée depuis l'antiquité par les peuples des Andes, appelés « papa » par les

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

---

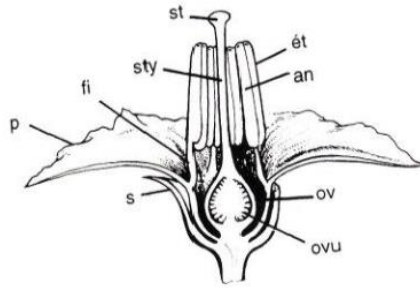
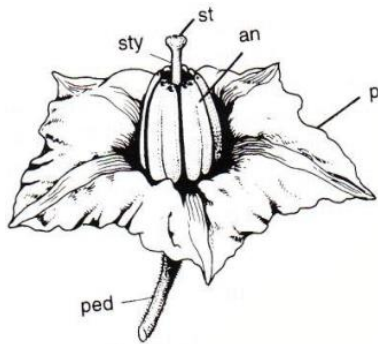
Espagnols, la pomme de terre a été introduite en Europe à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle, mais son développement n'a commencé qu'au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Ce n'est qu'en 1716 qu'on l'appelle "pomme de terre". Le genre *Solanum tuberosum* compte environ 1 000 espèces, dont 200 environ sont tubéreuses. L'espèce cultivée, *Solanum tuberosum*, serait une sous-espèce dérivant de *Solanum tuberosum andigena*. Les différentes espèces et variétés de pommes de terre se différencient par leurs caractéristiques botaniques, les différentes parties de la plante de la PT sont : les tiges aériennes dont le nombre peut varier de 01 à 10 tiges, ce nombre dépend du calibre du plante, son âge physiologique et des conditions de conservation et de germination, les feuilles qui sont alternées et disposées en spirale; la différence d'aspect et de coloration permet de caractériser leurs variétés, les fleurs sont disposées sur une inflorescence en cyme bipare, peut comporter 08 à 10 fleurs, fixées en général au sommet de la tige, elles peuvent être blanches, bleutées, violacées et rouge-violacées ; la coloration des fleurs est en correspondance avec la variété. Ces fleurs donnent des fruits en forme de baie contenant des graines ; mais souvent stériles. La partie souterraine qui comporte les racines, Les tiges souterraines et le tubercule. Elle représente la partie la plus intéressante de la plante car on y trouve les tubercules qui donnent la valeur nutritionnelle à la pomme de terre. Le cycle végétatif de la pomme de terre comprend quatre stades qui sont le stade de germination, de développement végétatif, de la tubérisation et la maturation des tubercules et de sénescence de la plante. La culture de la pomme de terre est faite en plusieurs étapes : la préparation du sol, fertilisation, plantation, irrigation, et enfin la récolte et la conservation (figure 09).

Le cycle des variétés les plus cultivées est environ de 03 à 04 mois selon la variété. La maturité est indiquée par le jaunissement des feuilles inférieures, dessèchement des tiges et la fermeté de la peau de tubercule. Pour assurer une meilleure conservation, seuls les tubercules non blessés sont à conserver. Les conditions idéales de conservation traditionnelle sont: une température entre 02 à 04°C pour la pomme de terre de semences, 04 à 08°C pour la pomme de terre de consommation, et une humidité relative : 90 à 95% tout en évitant l'accumulation de CO<sub>2</sub> par ventilation (figure 10).



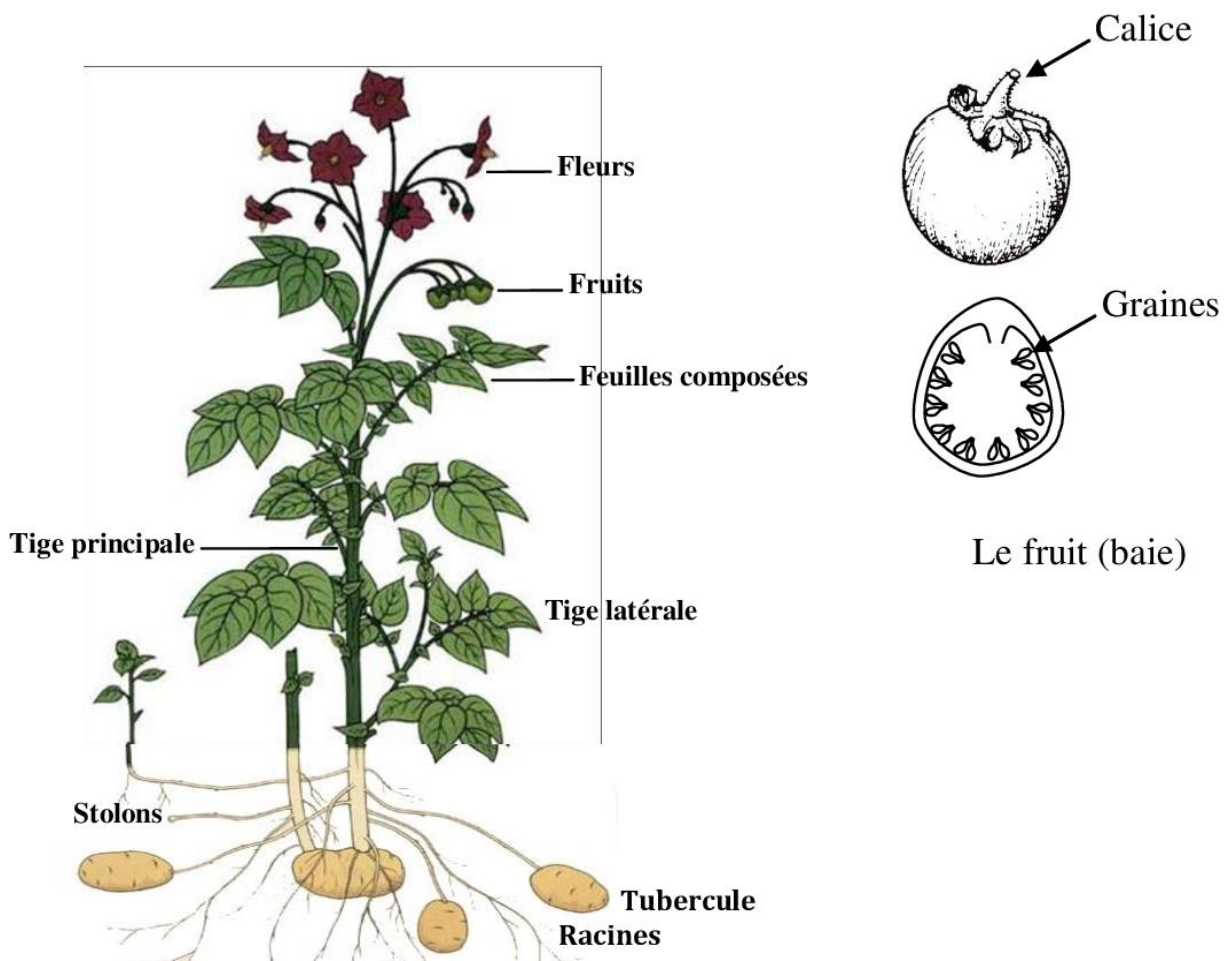
**Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction**

---

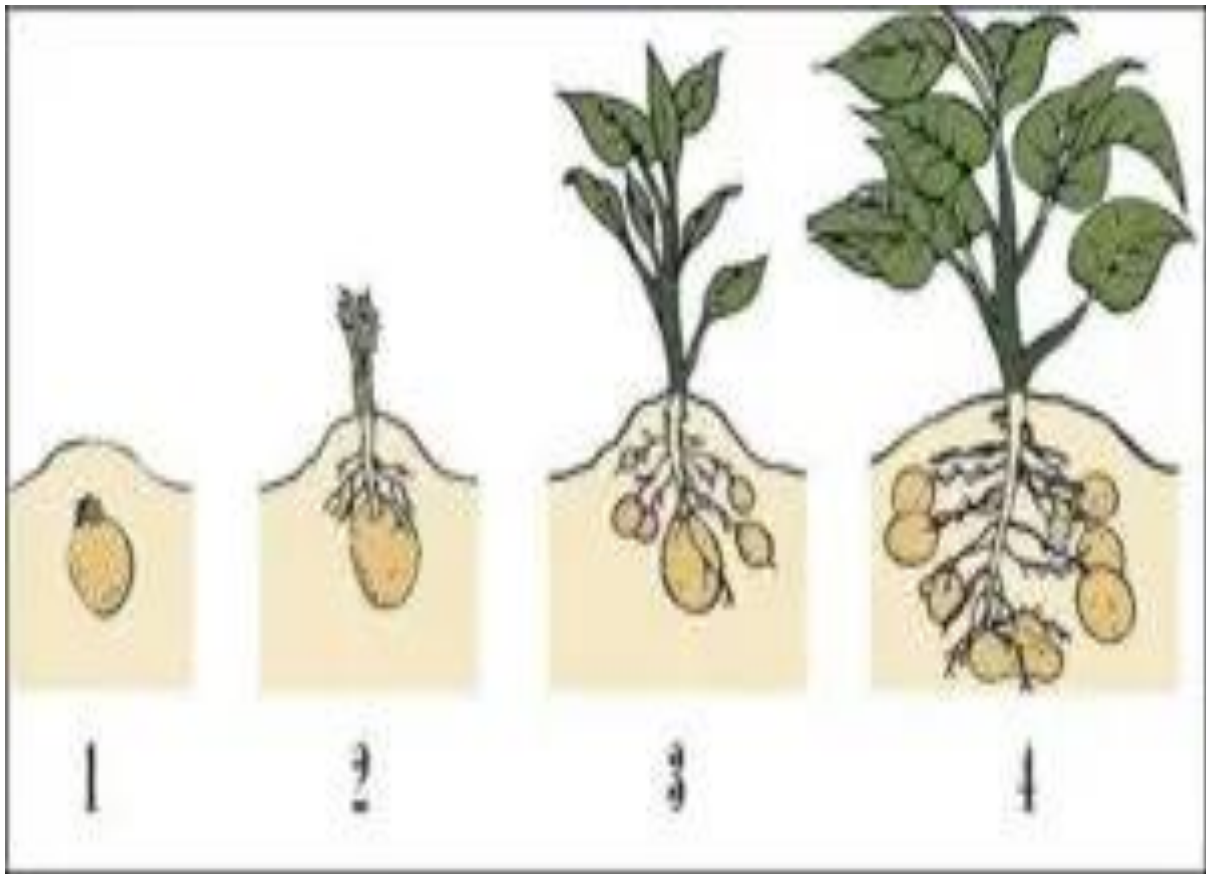


s : sépale  
 p: pétale  
 st : stigmate  
 sty : style  
 ét : étamine  
 ov : ovule  
 an : anthère

La fleur



**Figure 9: Caractéristiques morphologiques de la pomme de terre**



**Figure 10: Les stades de développement des plantes de pommes de terre tout au long de la saison**

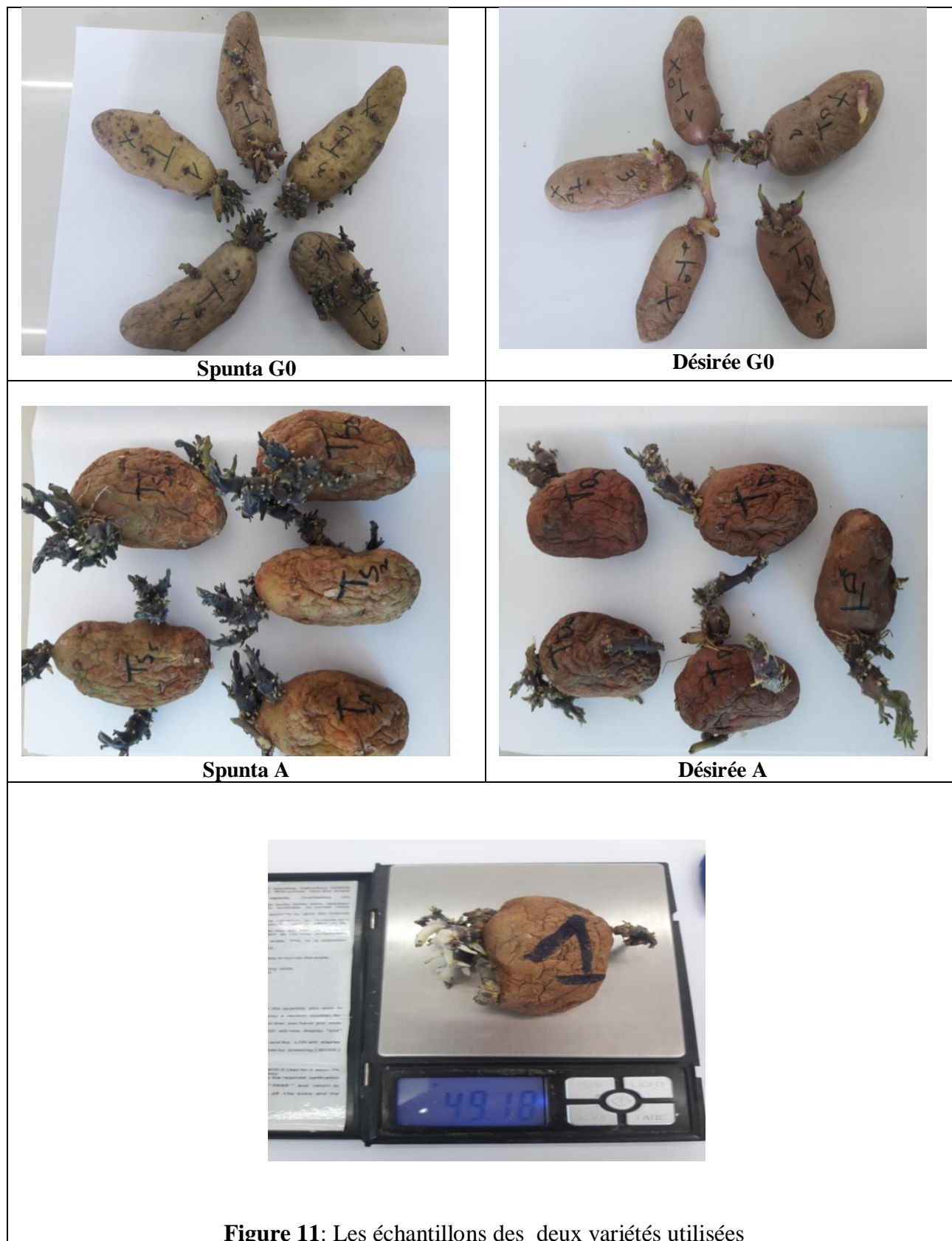
## **2 Etude des effets de l'irradiation par rayonnement gamma sur le comportement physiologique des plants de pomme de terre**

### **2.1 Matériel et méthodes**

#### **2.1.1 Sélection des échantillons**

Les semences de pomme de terre utilisées sont de deux variétés Spunta et Désirée, de deux classes  $G_0$  et A, sélectionnées d'une manière qu'elles sont presque du même calibre et ne présentent aucune blessure.

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction



**Figure 11:** Les échantillons des deux variétés utilisées

### 2.1.2 Irradiation des semences

L'installation de l'irradiateur Gamma utilisé est constituée de trois sources cylindriques  $^{60}\text{Co}$  ORIS-COP4. Elles sont disposées verticalement dans un rack électrique en acier inoxydable. Les sources ont une longueur de 384 mm et un diamètre de 26,6 mm. L'activité initiale de la source était de 3 599 kCi le 8 octobre 2002. L'activité lors de l'irradiation des pommes de terre le 15 octobre 2019, était d'environ 381 Ci. Le débit de dose mesuré était de 3,22 Gy/min. La dosimétrie Fricke est utilisée pour l'étalonnage et la mesure du débit de dose au sein du CRNA, Centre de Recherche Nucléaire d'Alger ( Figure 12).

Les sous-groupes de tubercules Désirée et Spunta ont été irradiés à différentes doses de 10, 25, 35, 45, 65, 75, 85, 100 et 150 Gy.

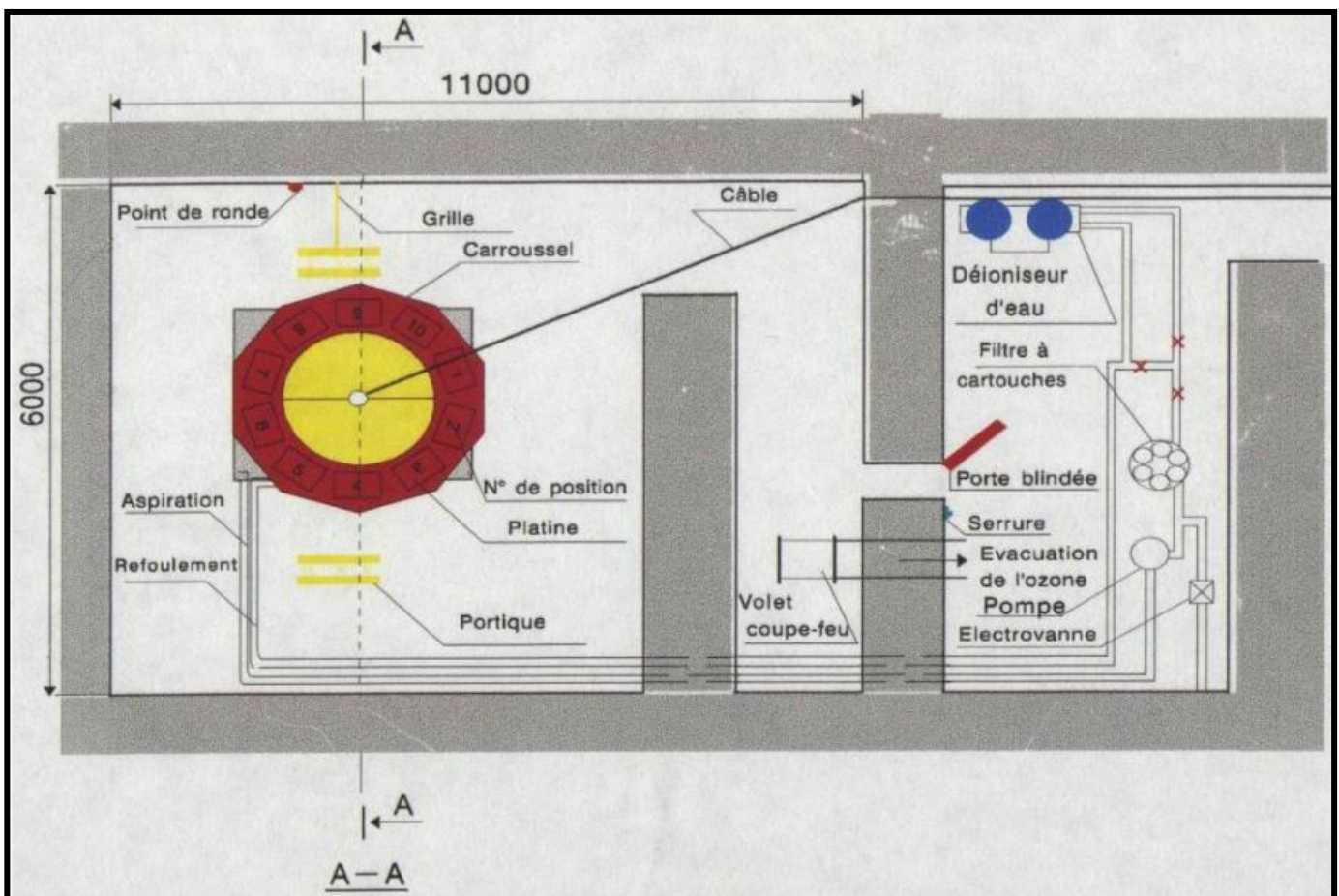


Figure 12: l'irradiateur gamma

### 2.1.3 Préparation du sol de culture

Dans cette étude, un sol humifère expérimental a été utilisé. La composition la plus courante est du sable avec de l'argile et du limon. Ce type de sol est adapté à la culture de pommes de terre (Tantowijoyo et De Fliert, 2006). La préparation du sol consiste notamment à assurer un bon contact entre la plante de la pomme de terre (les tubercules) et le sol. L'apparition ou la levée ainsi que le développement du système racinaire seront généralement retardés si le sol est mal préparé. Le sol utilisé dans nos expériences est bien tamisé ce qui favorise leur aération et assure des conditions favorables à un bon développement racinaire. La pomme de terre est très exigeante en fumure organique et pour éviter les risques de carence, la fumure organique est complétée en ajoutant de la terre fertile. Un pré-arrosage avec l'engrais basique NPK (15.15.15) est effectué tout au long de la période de croissance. L'arrosage est effectué avec de l'eau deux fois par semaine. Pendant la culture, l'entretien du sol et des cultures est assuré par le désherbage, l'épandage de fumier mélangé à de l'urée, le traitement des plantes avec des fongicides et des insecticides, ainsi que le traitement des moisissures.



Figure 13: Préparation du sol

**2.1.4 La Plantation**

La plantation a été faite le 05 Novembre 2019 dans des sachets en plastiques, la pomme de terre est cultivée dans une serre agricole qui se situe au sein de l'université de Sétif 1. L'irrigation est effectuée avec de l'eau deux fois par semaine (Figure14).



**Figure 14: la plantation des tubercules de pommes de terre**

### 2.2 Le suivi du comportement physiologique des plants de pomme de terre

Les plantes de pomme de terre comprennent les parties suivantes : feuilles, tiges, racines et tubercules. Dans notre étude, après la plantation, l'effet de l'irradiation à faible dose sur des tubercules de semence sélectionnés a été analysé en termes de certaines caractéristiques physiologiques de la plante au cours de sa croissance. Les critères considérés sont la hauteur de la tige, la longueur des racines, le temps de levé et le taux de croissance.

Deux prélèvements ont été effectués pendant la durée de la croissance des plantes de pommes de terre, après 60 jours et 80 jours de la plantation (Figure 15)





Figure 15: Un prélèvement pendant la croissance de pommes de terre

Les figures 16, 17, 18 et 19 montrent l'analyse de la vitesse de croissance des plantes de pomme de terre.

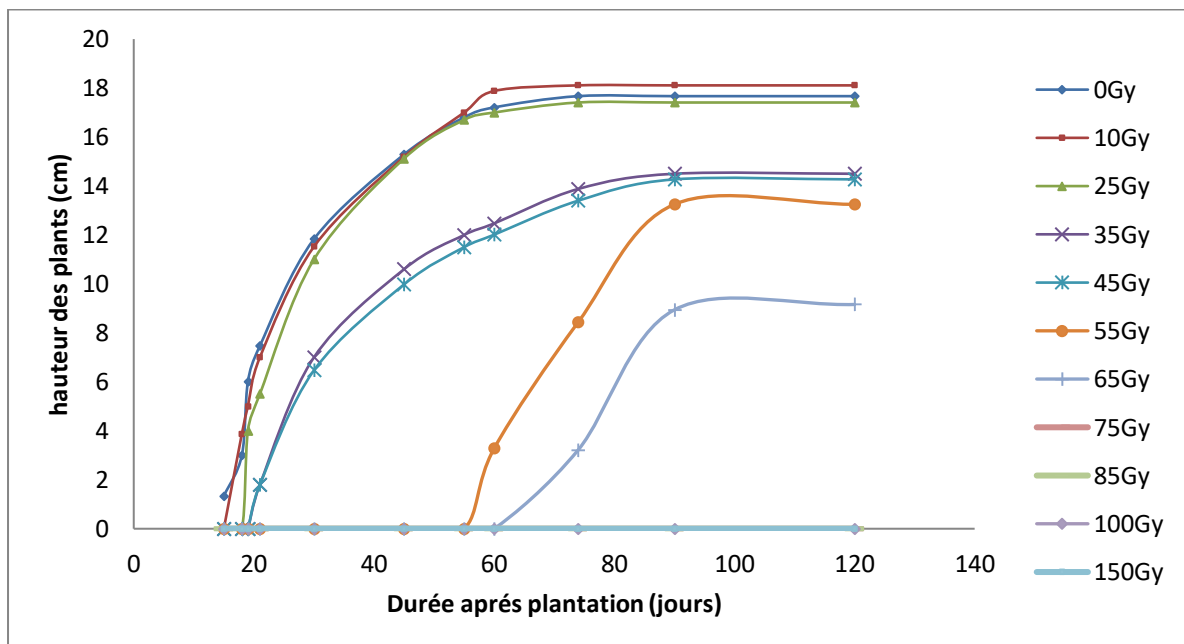


Figure 16: La vitesse de croissance de la Spunta G0



## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

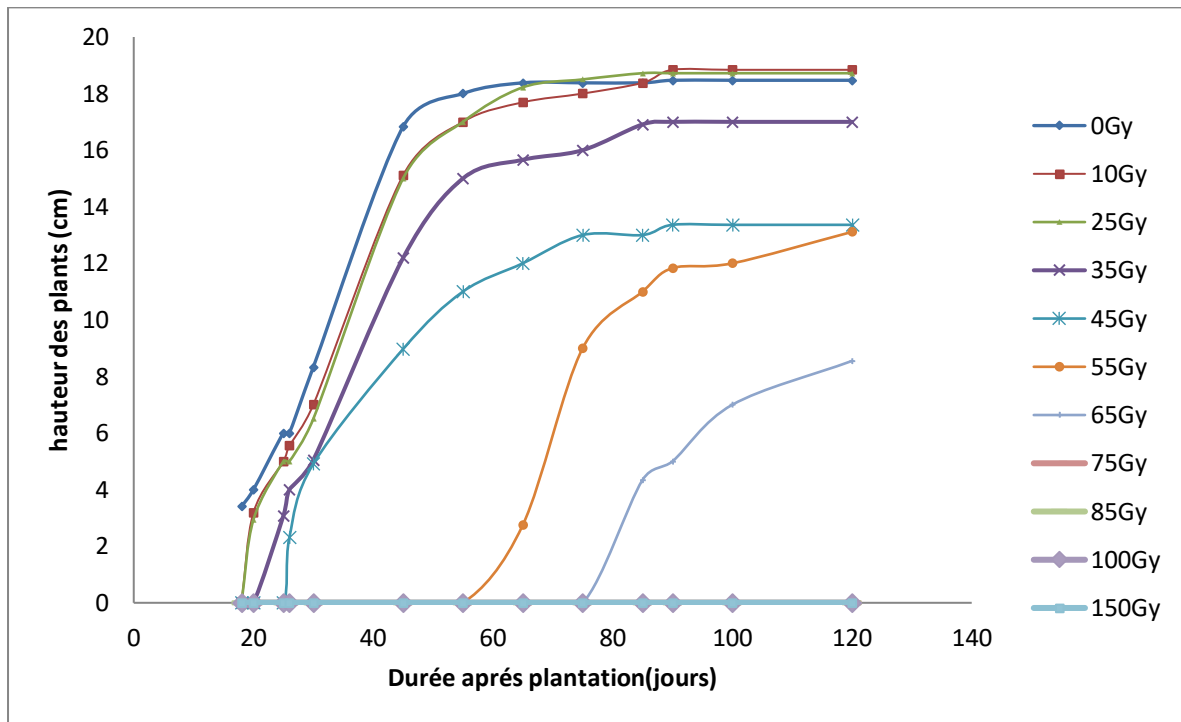


Figure 17: La vitesse de croissance de la Spunta A

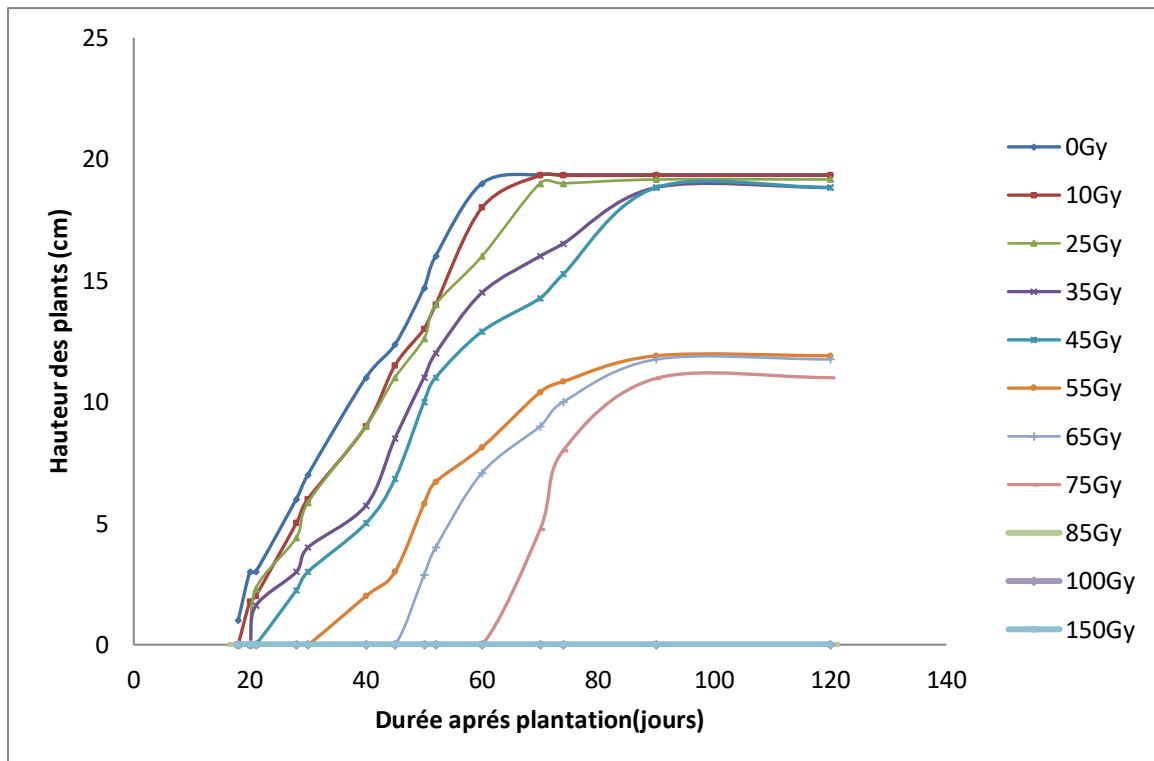


Figure 18: La vitesse de croissance de la Désirée G<sub>0</sub>

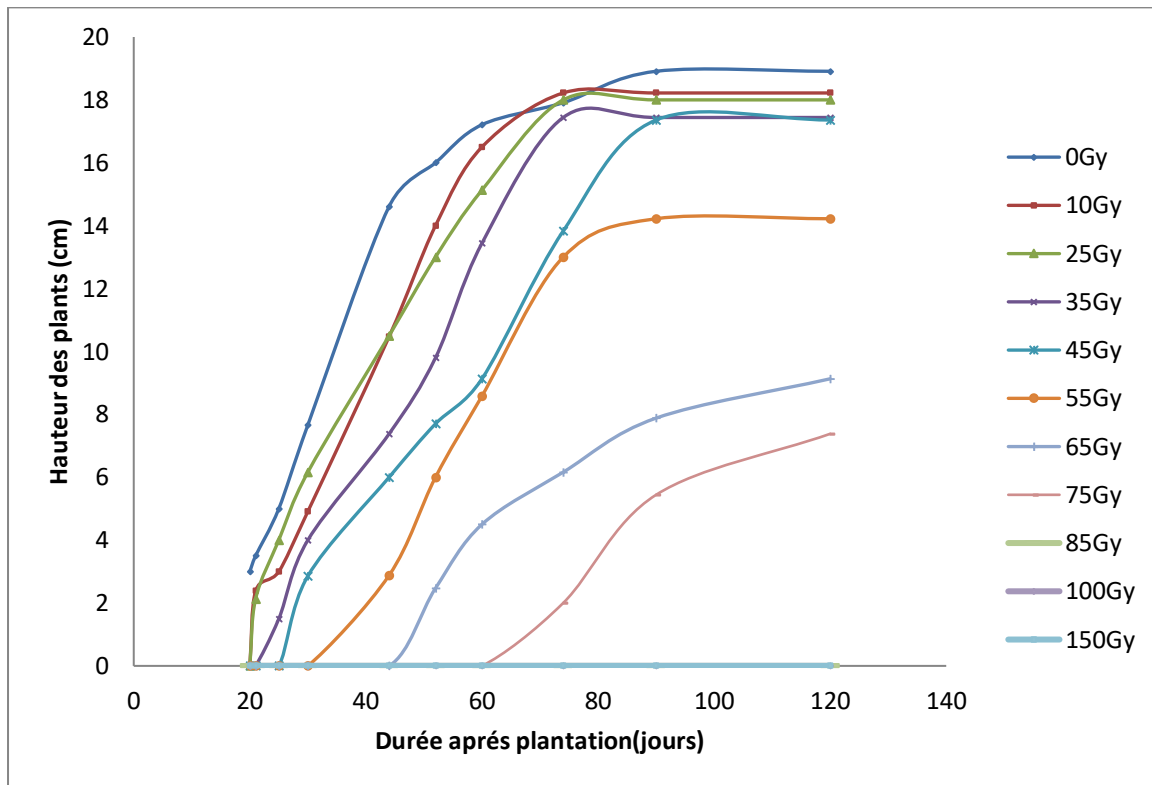
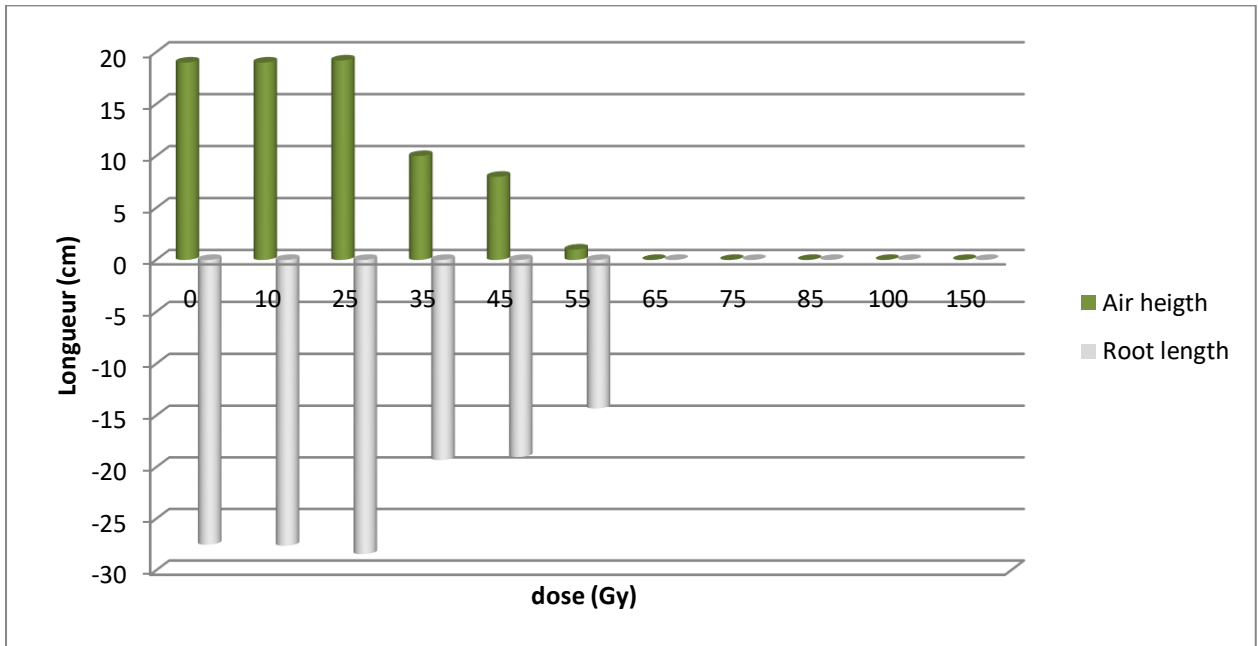


Figure 19: La vitesse de croissance de la Désirée A

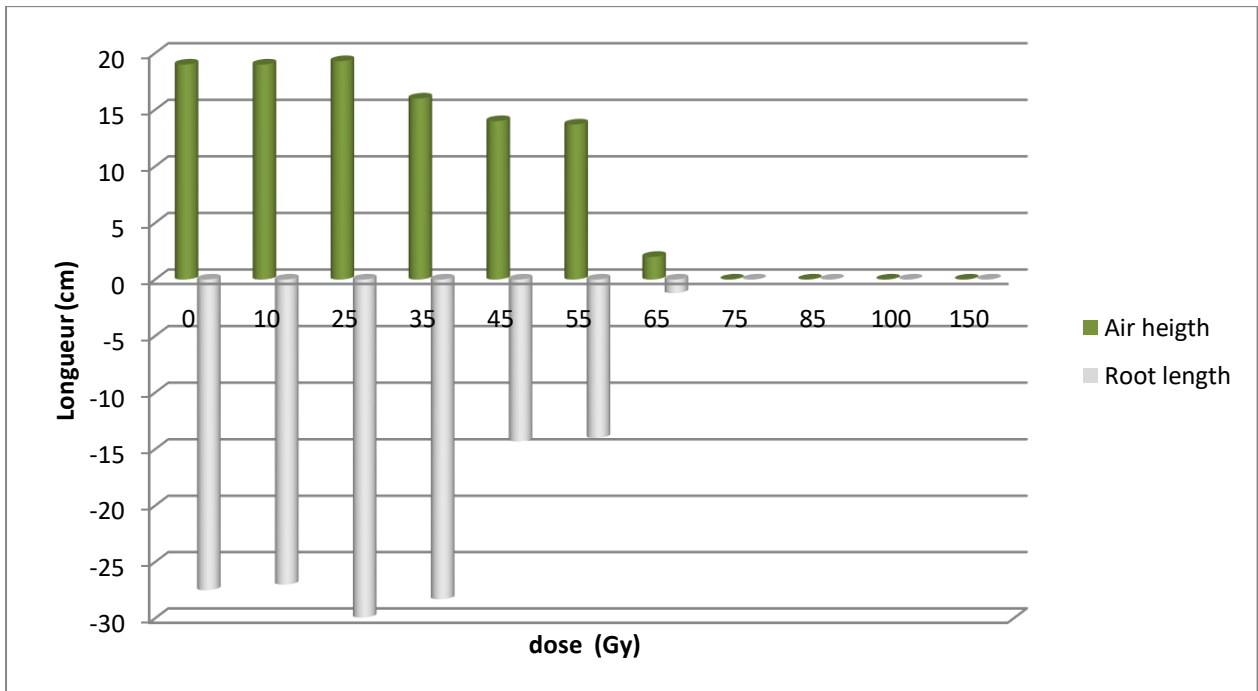
Les résultats obtenus montrent que l'irradiation a retardé l'émergence des plants de pomme de terre pour les doses supérieures à 25Gy pour les deux variétés. Ces figures montrent que le délai d'émergence commence à être significatif à partir d'une dose d'environ 45 Gy pour les deux variétés de pommes de terre. Les doses 65 et 85 Gy sont mortelles pour les tubercules SPUNTA et DESIRÉE tubercules, respectivement.

Les figures 20, 21, 22 et 23 montrent la hauteur de la tige et la longueur des racines de SPUNTA et Désirée, après 60 et 80 jours après la plantation.

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction



**Figure 20:** La longueur des tiges et racines après 60j de la plantation : SPUNTA G<sub>0</sub>



**Figure 21:** La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : SPUNTA G<sub>0</sub>

Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

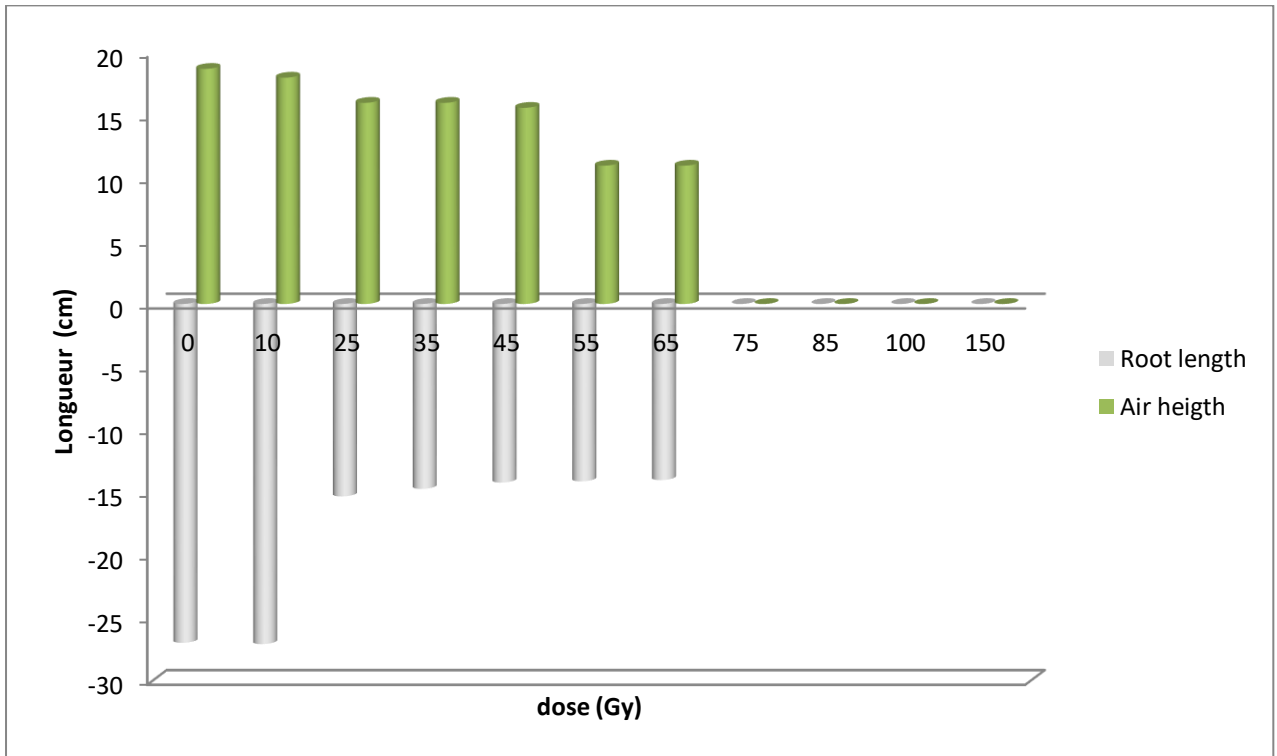


Figure 22: La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : DESIREE G<sub>0</sub>

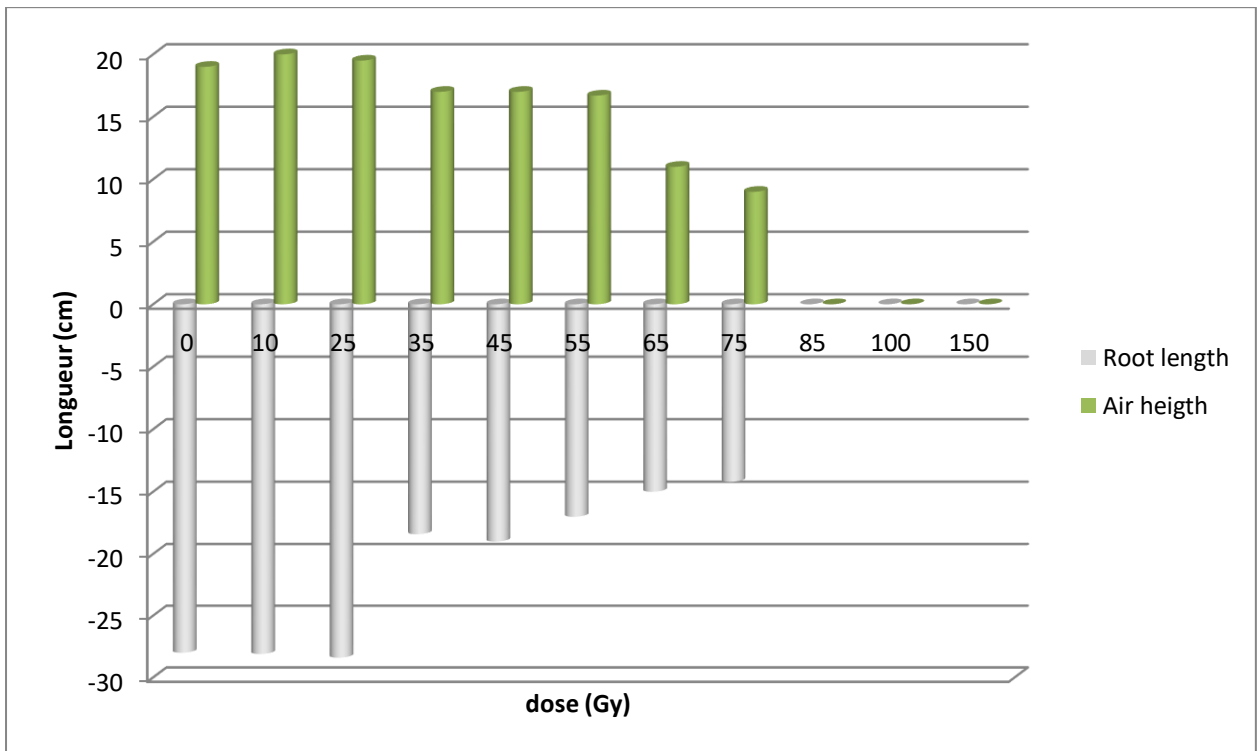


Figure 23: La longueur des tiges et racines après 80j de la plantation : DESIREE A

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

---

Les résultats obtenus à première vue montrent clairement que la croissance des tiges est corrélée à la croissance des racines. La partie racinaire des plantes est d'une importance vitale pour leur survie, leur croissance et leur fonctionnement global. On remarque que la dose optimale correspondante d'un système racinaire plus important est 25Gy pour les deux variétés traitées. Les racines des plantes absorbent l'eau et les nutriments essentiels du sol, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, nécessaires à leur croissance et à leur développement. Sans un système racinaire efficace, les plantes ne pourraient pas obtenir les ressources dont elles ont besoin pour survivre. De plus, les plants stockent des réserves de nutriments et d'eau dans leurs racines. Ces réserves peuvent être utilisées pendant les périodes de stress environnemental, telles que la sécheresse ou les conditions défavorables de croissance. Il est très important de mentionner que l'analyse du poids des tubercules à la période de prélèvement ci-dessus (60 et 80 jours) a montré que les tubercules irradiés par une dose de 10 Gy étaient 15 à 30 % plus lourds que les tubercules non irradiés, ce qui indique une meilleure productivité (Figure 24, 25, 26, 27).



**Figure 24: Prélèvement après 60j : DESIREE G0**



Figure 25: Prélèvement après 80j : DESIREE G<sub>0</sub>



Figure 26: Prélèvement après 60j : SPUNTA G<sub>0</sub>



Figure 27: Prélèvement après 80j : SPUNTA G<sub>0</sub>

### 3 Dosage des sucres totaux

La pomme de terre est aliment agricole riche en sucres totaux (17-19%), principalement en l'amidon qui constitue 17% du poids total de la matière fraîche et notamment par le saccharose et des monosaccharides réducteurs. Ces deux dernières composantes donnent le goût sucré à cet aliment végétal. L'estimation du taux de ces sucres dans les tubercules de la pomme de terre permet de rendre compte de la qualité nutritionnelle de ce produit alimentaire.

La spectrophotométrie est une technique analytique qui permet la détermination avec précision l'absorbance d'un produit chimique en solution, c'est-à-dire sa capacité à absorber la lumière qui le traverse. L'absorbance d'un produit chimique dépend de la nature et de la concentration de la substance ainsi que de la longueur d'onde à laquelle elle est étudiée.

### 3.1 Principe de la spectrophotométrie

Un spectrophotomètre mesure l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée. Lorsqu'un faisceau de lumière de longueur d'onde définie traverse une solution à analyser, l'intensité lumineuse absorbée par la solution est proportionnelle à la concentration de la substance absorbante.



Figure 28: Un Spectrophotomètre

Dans la pratique, l'appareil réalise une mesure de l'intensité de la lumière après son passage au travers d'une cuve contenant la solution à analyser (Figure 28, 29).

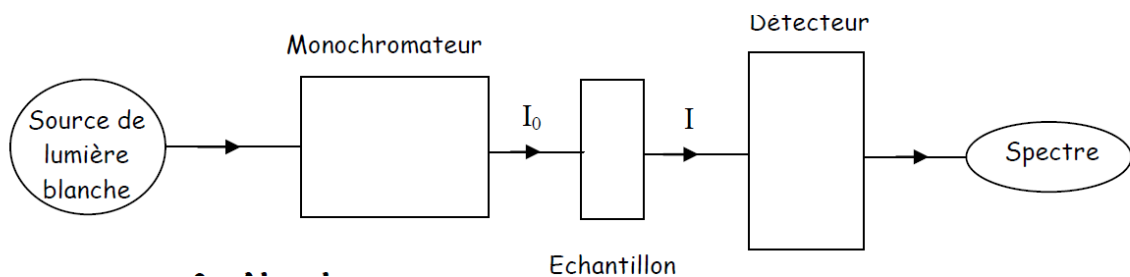


Figure 29: Principe de fonctionnement d'un Spectrophotomètre



## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

---

L'intensité de la lumière monochromatique émise ( $I_0$ ) est connue. À partir de la mesure de l'intensité de la lumière transmise ( $I$ ), l'appareil donne l'absorbance ( $A$ ) selon la formule suivante :

$$A = \log(I_0/I)$$

La loi de **Beer-Lambert** est valable pour une lumière monochromatique donnée de longueur d'onde  $\lambda$ , une concentration faible sinon  $A = f(c)$  n'est plus respectée, une solution limpide et les molécules de la substance à étudier sont stables en solution sous l'effet de l'irradiation.

D'après la loi de **Beer-Lambert** l'absorbance est proportionnelle à la concentration d'une solution. Une mesure de l'absorbance peut donc permettre de remonter à la concentration d'une solution d'intérêt. Elle peut du même coup permettre de suivre la cinétique d'une réaction chimique.

### 3.2 Protocole expérimental

Cette technique d'analyse repose sur le fait que les sucres solubles totaux (tels que le saccharose, le glucose, le fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode au **phénol** (Dubois M *et al*, 1956).

Le protocole expérimental suivant est résumé dans les étapes suivantes :

1. On place dans des tubes à essais 100 mg de matière fraîche de nos échantillons de pomme de terre, on ajoute 3 ml d'**éthanol** à 80% pour faire l'extraction des sucres.
2. à température ambiante, on garde les tubes à essais à l'obscurité pendant 48h.
3. Pour faire évaporer l'alcool, les tubes sont placés dans une étuve à 80°C (Figure30).



**Figure 30: Evaporation de l'alcool à 80°C.**

4. Pour avoir la solution à analyser, dans chaque tube on ajoute 20ml d'eau distillée à l'extrait résultant après l'évaporation de l'alcool.
5. Dans des tubes à essais vides, on met 2ml de la solution à analyser, on ajoute 1ml de phénol à 5% (le phénol est dilué dans de l'eau distillée); on ajoute rapidement un volume de 5ml de l'acide sulfurique concentré à 96% tout en évitant de verser de l'acide contre les parois du tube. On obtient, une solution de couleur jaune orange à la surface.
6. Pour homogénéiser la couleur de la solution on passe à l'agitation au vortex.
7. On laisse les tubes pendant 10mn et on les place au bain-marie pour 10 à 20mn à une température de 30°C (La couleur de la réaction est stable pendant plusieurs heures).

8. On obtient plusieurs degrés de la couleur jaune orange selon la concentration du glucose dans la solution à analyser (Figure 31).



**Figure 31: la coloration selon la concentration du glucose dans la solution à analyser.**

Les mesures d'absorbances sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-VIS à une longueur d'ondes de 485 nm (valeur de la longueur d'onde pour laquelle l'absorbance de la solution de glucose est maximale).

### **3.3 La courbe d'étalonnage**

La gamme d'étalonnage se fait avec des solutions de concentration données en glucose entre 0 et 300 mg/L. Les concentrations choisies sont présentées dans la figure ci-dessous.

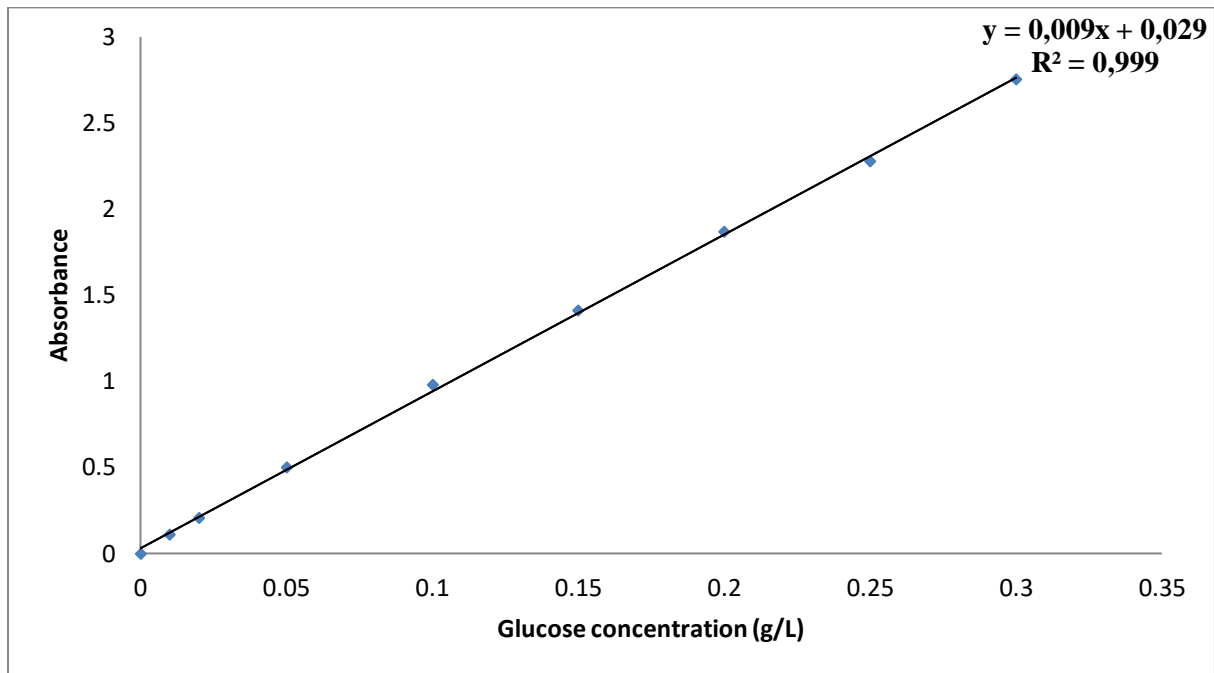


Figure 32: l'absorbance en fonction de la concentration en glucose

### 3.4 Résultats et discussion

Les résultats obtenus par l'analyse par la spectrophotométrie, et grâce aux courbes d'étalonnage, on résume les taux en sucres obtenus dans les tableaux ci-dessous

Tableau 12 : absorbance et concentration des tubercules parents de classe G<sub>0</sub>

DOSE en Gy	DESIREE		SPUNTA	
	ABSORBANCE	CONCENTRATION	ABSORBANCE	CONCENTRATION
0	0,825	<b>0,0869</b>	0,725	<b>0,076</b>
10	0,918	<b>0,097</b>	0,814	<b>0,0857</b>
25	0,962	<b>0,1018</b>	0,883	<b>0,0932</b>
35	1,122	<b>0,1192</b>	0,931	<b>0,0984</b>
45	1,216	<b>0,1295</b>	0,941	<b>0,0995</b>
55	1,402	<b>0,1498</b>	0,967	<b>0,1024</b>
65	1,414	<b>0,1511</b>	1,365	<b>0,1457</b>
75	1,634	<b>0,1751</b>	1,462	<b>0,1563</b>
85	1,745	<b>0,1872</b>	1,481	<b>0,1584</b>
100	1,766	<b>0,1894</b>	1,519	<b>0,1625</b>
150	1,755	<b>0,1882</b>	1,567	<b>0,1678</b>

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

**Tableau 13 : absorbance et concentration des tubercules parents de classe A**

DOSE	DESIREE		SPUNTA	
	ABSORBANCE	CONCENTRATION	ABSORBANCE	CONCENTRATION
<b>0</b>	0,819	<b>0,0862</b>	0,722	<b>0,0756</b>
<b>10</b>	0,912	<b>0,0964</b>	0,811	<b>0,0853</b>
<b>25</b>	0,961	<b>0,1017</b>	0,878	<b>0,0927</b>
<b>35</b>	1,119	<b>0,1189</b>	0,921	<b>0,0973</b>
<b>45</b>	1,214	<b>0,1293</b>	0,929	<b>0,0982</b>
<b>55</b>	1,402	<b>0,1498</b>	0,959	<b>0,1015</b>
<b>65</b>	1,414	<b>0,1511</b>	1,352	<b>0,1443</b>
<b>75</b>	1,633	<b>0,1749</b>	1,453	<b>0,1553</b>
<b>85</b>	1,745	<b>0,1872</b>	1,481	<b>0,1585</b>
<b>100</b>	1,763	<b>0,1891</b>	1,509	<b>0,1614</b>
<b>150</b>	1,762	<b>0,189</b>	1,551	<b>0,166</b>

**Tableau 14 : absorbance et concentration des tubercules récoltés (tubercule parent G<sub>0</sub>)**

DOSE	DESIREE		SPUNTA	
	ABSORBANCE	CONCENTRATION	ABSORBANCE	CONCENTRATION
<b>0</b>	1,725	<b>0,185</b>	1,715	<b>0,1839</b>
<b>10</b>	1,718	<b>0,1842</b>	1,714	<b>0,1838</b>
<b>25</b>	1,722	<b>0,1846</b>	1,683	<b>0,1804</b>
<b>35</b>	1,622	<b>0,1737</b>	1,620	<b>0,1735</b>
<b>45</b>	1,616	<b>0,1731</b>	1,598	<b>0,1711</b>
<b>55</b>	1,612	<b>0,1727</b>	1,599	<b>0,1712</b>

**Tableau 15 : absorbance et concentration des tubercules récoltés (tubercule parent A)**

DOSE	DESIREE		SPUNTA	
	ABSORBANCE	CONCENTRATION	ABSORBANCE	CONCENTRATION
<b>0</b>	1,727	<b>0,1852</b>	1,713	<b>0,1837</b>
<b>10</b>	1,711	<b>0,1834</b>	1,708	<b>0,1831</b>
<b>25</b>	1,718	<b>0,1842</b>	1,700	<b>0,1823</b>
<b>35</b>	1,626	<b>0,1742</b>	1,601	<b>0,1715</b>
<b>45</b>	1,619	<b>0,1734</b>	1,593	<b>0,1706</b>
<b>55</b>	1,621	<b>0,1736</b>	1,595	<b>0,1708</b>

## Chapitre IV Traitement par l'irradiation gamma de la pomme de terre de reproduction

La concentration en sucres totaux (pourcentage en poids) a également été étudiée pour les cas de tubercules irradiés et non plantés, ainsi que pour ceux récoltés. Les résultats montrent que la concentration en sucre des tubercules non plantés a augmenté proportionnellement à la dose d'irradiation pour les deux variétés de pommes de terre et leurs générations. A l'inverse, la concentration en sucre des tubercules récoltés s'est avérée constante quelle que soit la dose des tubercules de semence initialement plantés (parents).

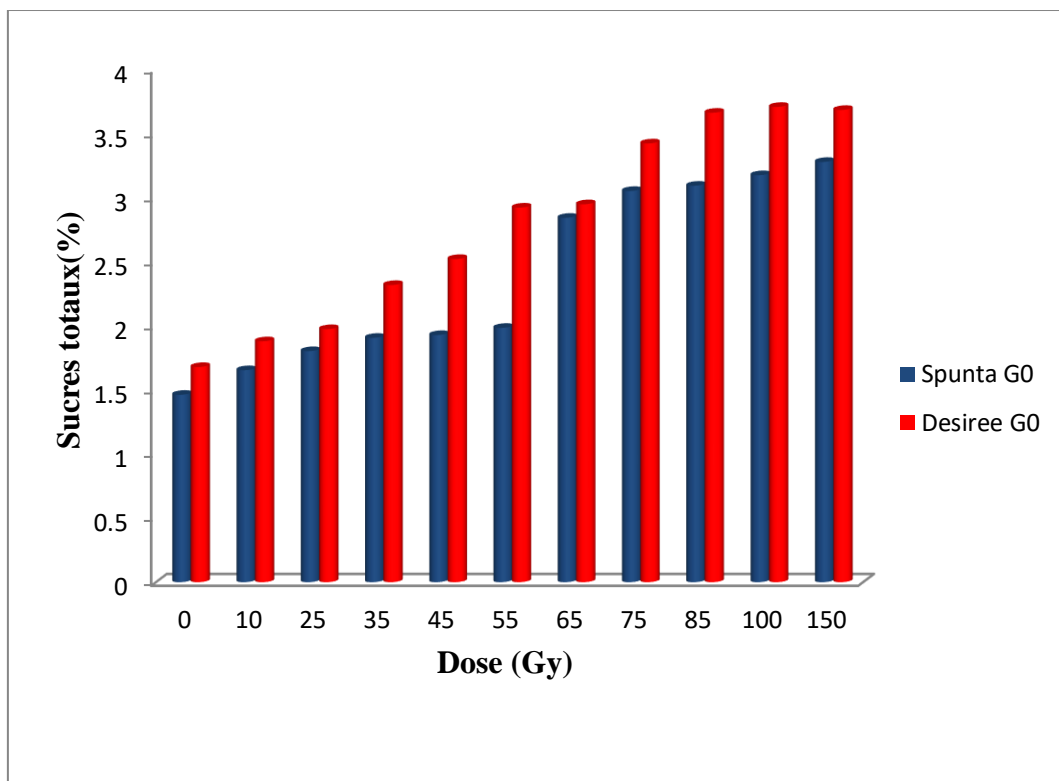


Figure 33: Concentration en sucres totaux des SPUNTA et DESIREE (G0) après 15 mois de l'irradiation

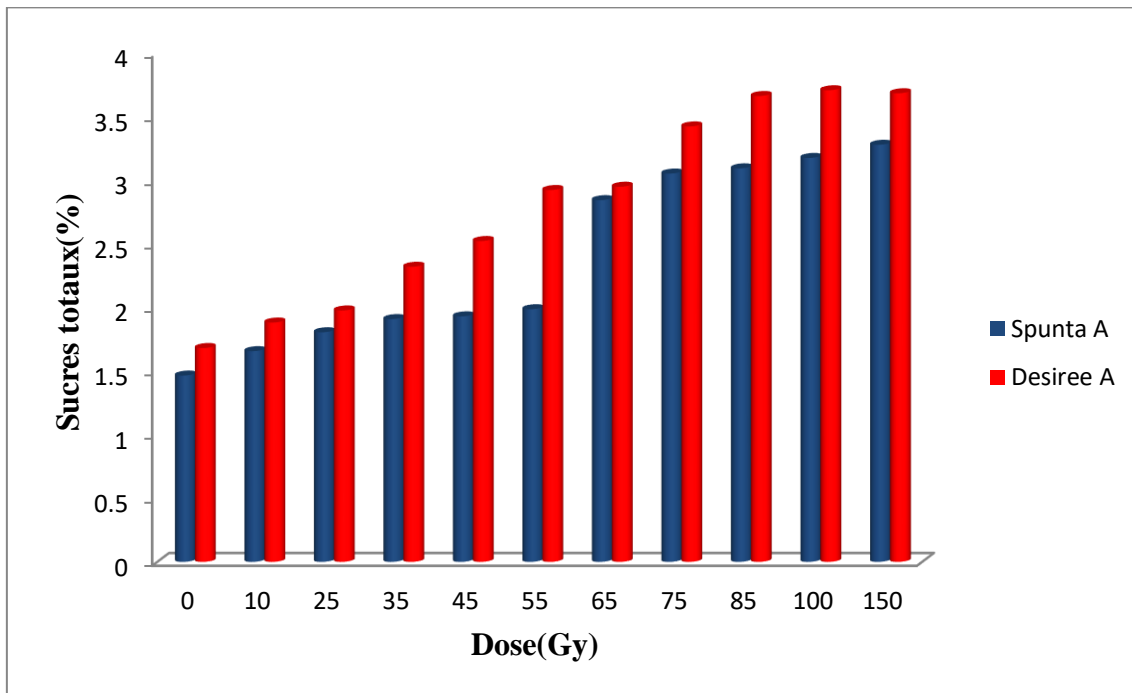


Figure 34 : Concentration en sucres totaux des SPUNTA et DESIREE (A) après 15 mois de l'irradiation

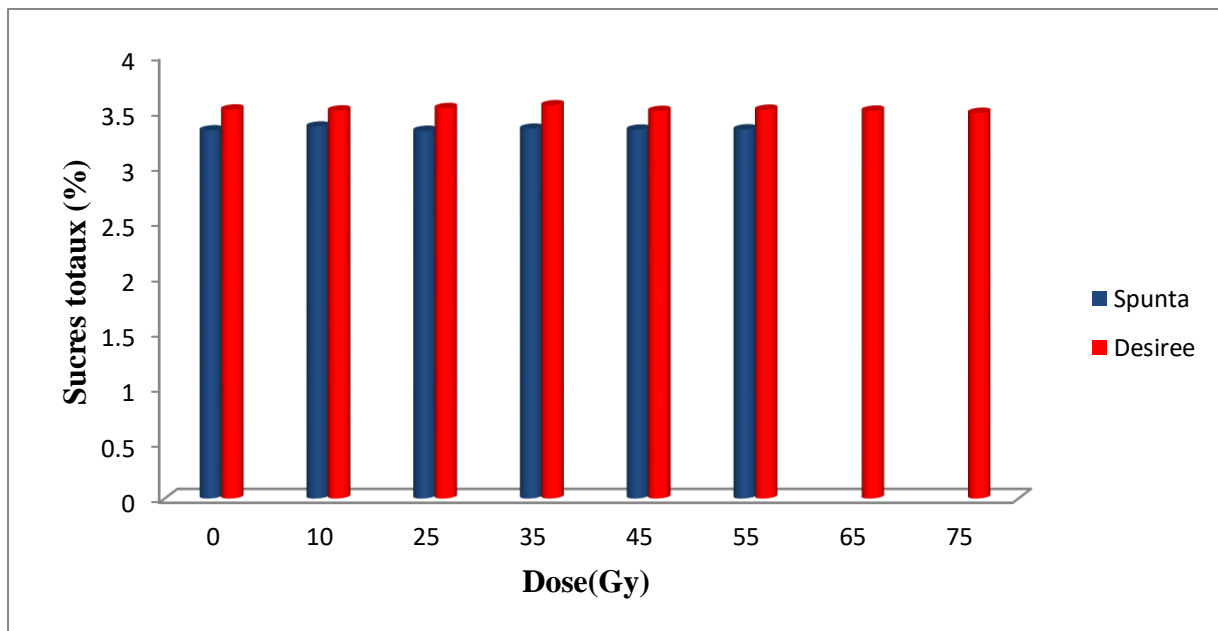


Figure 35: Concentration en sucre dans les SPUNTA et DESIREE irradiés et plantés après récolte

## **4 Conclusion**

Cette étude a indiqué qu'une irradiation relativement tardive, trois semaines seulement avant la plantation, avec une faible dose de 10 Gy, améliore considérablement le rendement des tubercules de semence en augmentant le poids des tubercules de 15 à 30 % sans aucun impact anormal sur la croissance morphologique des plantes de pomme de terre.

À partir des résultats décrits ci-dessus, les principales conclusions peuvent être discutées comme suit. L'irradiation a prolongé le temps entre la plantation et la levée et a réduit la hauteur de la tige et la longueur des racines par rapport aux doses seuils de 25 Gy pour SPUNTA et 45 Gy pour DESIREE. Dans les conditions normales de culture considérées, le nombre de feuilles et de branches a été significativement augmenté pour une dose de 10 Gy. Aucune capacité de levée ne s'est produite à 65 Gy et 85 Gy et à des doses plus élevées pour les tubercules de semence SPUNTA et DESIREE, respectivement. Un rayonnement de 10 à 25 Gy a favorisé la formation de tubercules et a augmenté le nombre et le diamètre moyens des tubercules par plante. Nos résultats sont globalement en bon accord avec ceux présentés dans l'étude de Cheng et al. (**Cheng et al., 2010**).

La concentration en glucides **totaux** a été mesurée dans tous les cas en même temps juste après la récolte, même pour les tubercules **de pomme de terre** stockés non irradiés **dans des conditions ambiantes**. La teneur en sucres totaux (glucides totaux) a augmenté de manière significative en fonction de la dose (0-150 Gy) de ~1,5% à ~3,5% pour les tubercules de semence irradiés mais non plantés stockés pendant toute la période de **stock** alors **qu'elle s'est avérée constante** (~3,5%) pour les tubercules récoltés produits par les tubercules de semence irradiés.

Ces résultats signifient que le **traitement par** irradiation à faibles doses (inférieures aux doses létales de 65 et 85 Gy) n'a aucun effet sur la production de sucre et le métabolisme de transformation dans la plante de la pomme de terre par rapport à la plante du tubercule de semence non irradié et planté.

Pour les tubercules de semence non plantés, la concentration en sucres a augmenté pour une dose plus élevée, ce qui peut être dû à l'utilisation des sucres comme substrat pour la



respiration et pour lutter contre les effets de l'irradiation, car ces tubercules ont germé et ont donc pu utiliser les sucres en excès pour production d'énergie pendant la germination avec un taux de respiration plus élevé. Rezaee et al, démontrent dans leur étude qu'une irradiation précoce et tardive des tubercules de pomme de terre après la récolte n'a pas le même effet sur l'accumulation de sucre dans les tubercules. Cette étude indique également que l'accumulation totale de sucre est influencée par la dose, comme nous le démontrons dans notre étude. Un effet inverse a été observé sur le sucre non réducteur en raison d'une irradiation très tardive. Nos résultats concordent avec ceux rapportés dans cette étude (**Rezaee et al., 2013**). Cette étude indique également qu'une irradiation tardive avec de faibles doses inférieures à 25 Gy augmente significativement le nombre de feuilles (+~75%) et la capacité de croissance en termes de nombre et de poids des tubercules (10Gy).

# **Chapitre V**

**Identification de l'irradiation gamma de  
la pomme de terre par  
thermoluminescence**

## 1. Introduction

Une faible dose de rayonnements ionisants permet aux produits alimentaires, les épices, les graines, les fruits et les légumes de rester frais pendant une longue durée de conservation avant arrivée au consommateur. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), contribuent aux progrès dans les applications de l'irradiation alimentaire et phytosanitaire, afin d'aider à simplifier et améliorer les processus destinés à la lutte contre les ravageurs. Les deux organisations collaborent avec la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) et la Commission du Codex Alimentarius pour harmoniser les normes d'irradiation à l'échelle mondiale. Le traitement des produits alimentaires par l'irradiation ionisante est une application effectuée après la récolte qui utilise des rayonnements ionisants produits par une source, comme le cobalt 60, le Césium 137, ou générés par des accélérateurs, faisceau d'électron ou rayon X. Il est garanti que les RI sont inoffensifs pour les denrées alimentaires, mais pas pour les microorganismes ou les ravageurs invasifs. En irradiant les aliments, on obtient les mêmes avantages que si on utilise une autre technique traditionnelle de conservation, par exemple, si on les avait chauffés, réfrigérés, congelés ou traités avec des produits chimiques, mais sans modifier leurs caractéristiques. La technique de traitement par irradiation permet d'éviter tout type d'altération des produits alimentaires et aide à détruire les insectes ravageurs et micro-organismes pathogènes d'origine alimentaire sans changement concernant du goût, d'odeur et de la valeur nutritionnelle de manière notable.

Aujourd'hui, après des années de travaux de recherche, plusieurs pays disposent des réglementations autorisant le traitement par l'irradiation ionisante d'un ou plusieurs produits alimentaires par des doses précises pour chaque type d'aliment. L'irradiation détruit les bactéries pathogènes et les microorganismes et limite les risques de maladies d'origine alimentaire. L'irradiation ne stérilise pas les aliments. Ceux-ci doivent encore être traités ou cuits correctement mais ils sont propres et non radioactifs et ne s'altèrent pas, ce qui permet de les conserver plus longtemps et de garantir un niveau de sûreté et de qualité très élevé. Le traitement ionisant consiste à soumettre les aliments, soit à un rayonnement gamma (issu de cobalt 60), soit à des rayons X d'énergie inférieure à 5 MeV, soit à un faisceau d'électrons accélérés d'énergie inférieure à 10 MeV. Dans ces conditions, il n'y a aucun risque nucléaire

pour l'aliment et les produits ionisés ne présentent aucune potentialité toxique pour le consommateur. L'exposition d'un aliment aux radiations ionisantes a des effets positifs comme l'amélioration de la qualité hygiénique et la prolongation de la durée de préservation, notamment, des effets négatifs comme les mauvaises odeurs essentiellement, tout dépendent de la dose appliquée.

La détection des aliments irradiés s'effectue à l'aide d'un certain nombre de méthodes et des procédures. Des méthodes de routine rapides qui sont basées sur des techniques facilement accessibles aux fabricants et aux laboratoires de contrôle alimentaire ; et d'autres méthodes souvent plus compliqués conduisant à une véritable preuve. Dans le second cas, en trouvant des preuves d'ionisation ou de non-ionisation, cela est très important pour pouvoir détecter le non étiquetage des produit traités par rayonnement ionisant (contrôle de la fraude à l'information) ainsi que l'efficacité d'un traitement ionisant (contrôle qualité).

## **2. Identification de l'irradiations par thermoluminescence**

La thermoluminescence (TL) des minéraux silicatés contenus dans les aliments est une méthode puissante pour l'identification des produits irradiés. En raison de ses avantages dans la conservation prolongée des aliments et des semences, l'irradiation a été pratiquée sur de nombreux produits agricoles à des fins diverses, tels que les pommes de terre, les épices, les fruits et les fruits de mer (**Khan et Delincée, 1995 ; Raffi et al., 2000 ; Kwon et al., 2002 ; Bayram et Delincée, 2004 ; D'Oca et al., 2009 ; Chen et al., 2011 ; Todoriki et al., 2014**). Le processus d'identification par irradiation repose sur l'extraction de minéraux à partir d'aliments irradiés. La procédure d'extraction standard des minéraux silicatés de la pomme de terre est décrite par la norme européenne EN 1788 (2001).

## **3. Protocol expérimental**

### **3.1 Irradiation des échantillons de pomme de terre**

Les tubercules de pommes de terre utilisées sont de la variété Désirée, sélectionnées d'une manière qu'elles soient presque du même calibre et ne présentent aucune blessure. Le traitement par irradiation ionisante se fait à l'aide de l'irradiateur Gamma qui est constitué

de trois sources cylindriques  $^{60}\text{Co}$  ORIS-COP4. Ces cylindres sont disposés verticalement dans un rack électrique en acier inoxydable. Les sources ont une longueur de 384 mm et une hauteur de 26,6 mm. L'activité initiale de la source était de 3 599 kCi le 8 octobre 2002. L'irradiation des pommes de terre est faite en juillet 2022. Le débit de dose réel mesuré était de 3,22 Gy/min. La dosimétrie Fricke est utilisée pour l'étalonnage et la mesure du débit de dose au sein du CRNA, Centre de Recherche Nucléaire d'Alger. Les tubercules DESIREE ont été irradiés à différentes doses de 10, 20, 30, 50, 150, 1000, et 1500 Gy (Figure 34).



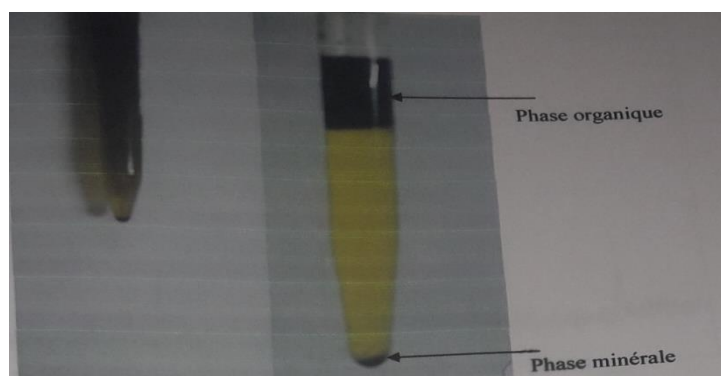
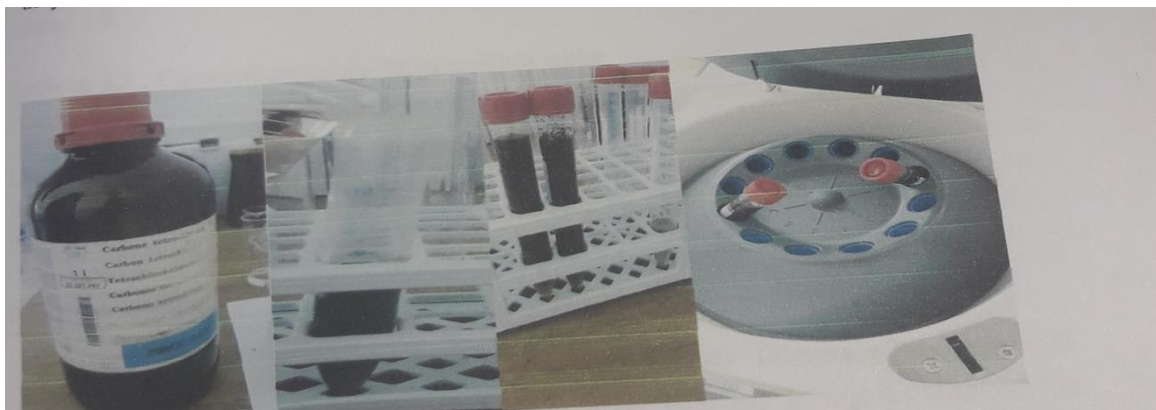
**Figure 36: Tubercules de pomme de terre irradiés**

### 3.2 Séparation de la phase minérale

La séparation des phases organiques et inorganiques (minérales) a été effectuée en fonction des différentes densités de chaque phase comme il est recommandé dans le standard européen EN 1788 : 2001), qui présente la procédure complète de cette étape de séparation.

Dans cette partie de la thèse, une procédure adaptée de la séparation de la phase minérale en fonction de la disponibilité des produits chimiques au sein de le laboratoire de Dosage, Analyse et Caractérisation en haute résolution de l'université de Setif1, DAC-hr a été suivie.

La première étape de cette procédure expérimentale est l'émergence des échantillons prélevés des tubercules irradiés dans des béchers contenant du carbone tétrachlorure  $\text{CCl}_4$  suivit de l'agitation. Le  $\text{CCl}_4$  est un solvant inerte qui ne nuit pas nos échantillons et qui possède la bonne densité pour la séparation par la méthode des densités. Après l'agitation dans un bain à ultrason, la seconde étape consiste à la centrifugation subséquente, le produit est mis dans des tubes d'essai dans la centrifugeuse pendant 10min à des vitesses de rotation de 3000 tr /min répétées. Après cette étape, les deux phases ont été séparées par décantation pendant 1 heure, la matière organique flotte à la surface et la matière minérale se dépose au fond. Comme dernière étape pour la séparation de la phase minérale, le séchage du produit final à l'air libre pendant plusieurs jours à l'abri de la lumière et de l'humidité. La partie minérale séparée est composée principalement de silicate dont les tectosilicates qui sont des tetraedres à sommets communs, exemples : quartz, tridymite, cristobalite, feldspathes, feldspathoïdes, zéolites et scapolites.



**Figure 37:** La séparation de la phase organique et la phase minérale

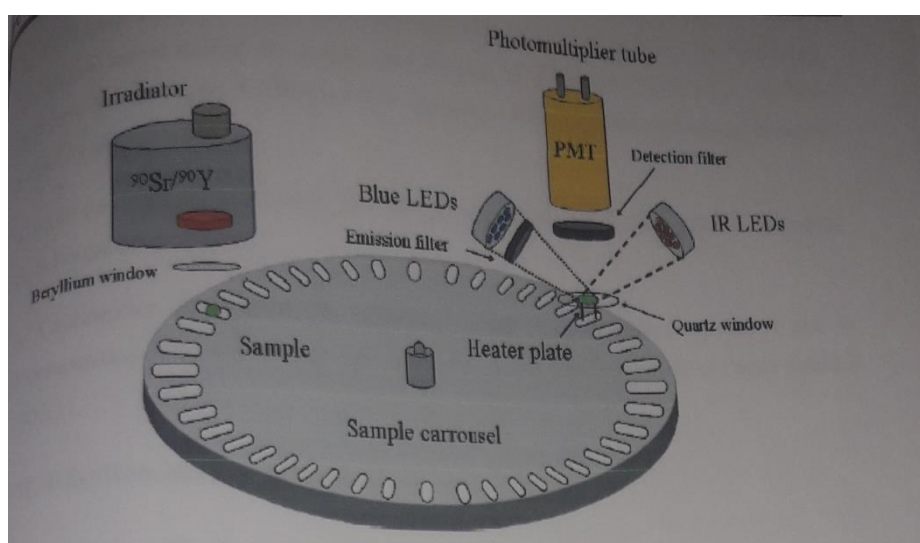
### 3.3 La lecture du signal de thermoluminescence

La lecture des signaux de thermoluminescence est effectuée à l'aide d'un lecteur de luminescence Riso TL/OSL modèle DA-20.

Ce lecteur est composé par trois parties essentielles qui sont :

- Un système de détection de la lumière : ce système comprend un photomultiplicateur PM combiné avec plusieurs filtres de lumière.
- Un système de stimulation de l'émission de la lumière : cette partie comprend une source d'émission de lumière et une plaque chauffante qui peut être utilisée séparément pour la luminescence stimulée optiquement ou pour la thermoluminescence.
- Des sources supplémentaires d'irradiation : sources béta et générateur X.

Le lecteur utilisé permet l'analyse en un seul passage de 48 échantillons chacun avec sa propre séquence de programmation en terme de type de lecture, température, type de filtre de lumière, etc.(Figure 36)



**Figure 38:** Description du lecteur Riso OSL/TL

Les principales caractéristiques du lecteur Riso OSL/TL utilisé sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau 16 : Les principales caractéristiques du lecteur Riso OSL/TL utilisé**

<b>Photomultiplicateur</b>	Type	EMI 9235QBPM
	Cristal	CsSb
	Efficacité de détection maximale	Entre 200 et 400 nm
	Distance échantillon- PM	5.5mm
	Angle solide de détection	0.4 stéradians
<b>Source optique</b>	Diode bleue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NICHIA type NSPB-500AS</li> <li>• Longueur d'onde : 470nm</li> <li>• Luminescence : 80MW/cm<sup>2</sup> au niveau de l'échantillon</li> </ul>
	Diode infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vishay TSFF 5210</li> <li>• Longueur d'onde : 870nm</li> <li>• Luminescence : 145MW/cm<sup>2</sup> au niveau de l'échantillon</li> </ul>
	Mode de stimulation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continu</li> <li>• Modulé linéairement</li> <li>• Pulsé</li> </ul>



	Type de filtre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoya U-340 (7.5mm épaisseur, 45mm de diamètre)</li> <li>• Scott BG39 (2mm épaisseur, 45mm de diamètre)</li> <li>• Coming 7-59 (4mm épaisseur, 45 mm de diamètre)</li> </ul>
<b>Plaque chauffante</b>	Matériau	Kanthal
	Température	700°C
	Taux de chauffage	0.1 à 10 °C/s
	Thermocouple	Cormel-Alume thermocouple 0.5mm
<b>Source Beta</b>	Type	$^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$
	Energie maximale	2.27MeV
	Période	30 ans
	Activité	Habituellement 1.48GBq
	Débit de dose	0.1Gy/s
	Durée fermeture-ouverture	0.11s
<b>Générateur X</b>	Type	
	Puissance maximale délivrée	50kV, 1mA, 50W
	Cible	Tungstène
	Durée ouverture/fermeture	62ms/162ms
	Débit de dose moyen à 50 kV	2Gy/s

Dans cette étude expérimentale, les signaux de thermoluminescence ont tous été collectés dans les mêmes conditions présentées dans le tableau suivant :

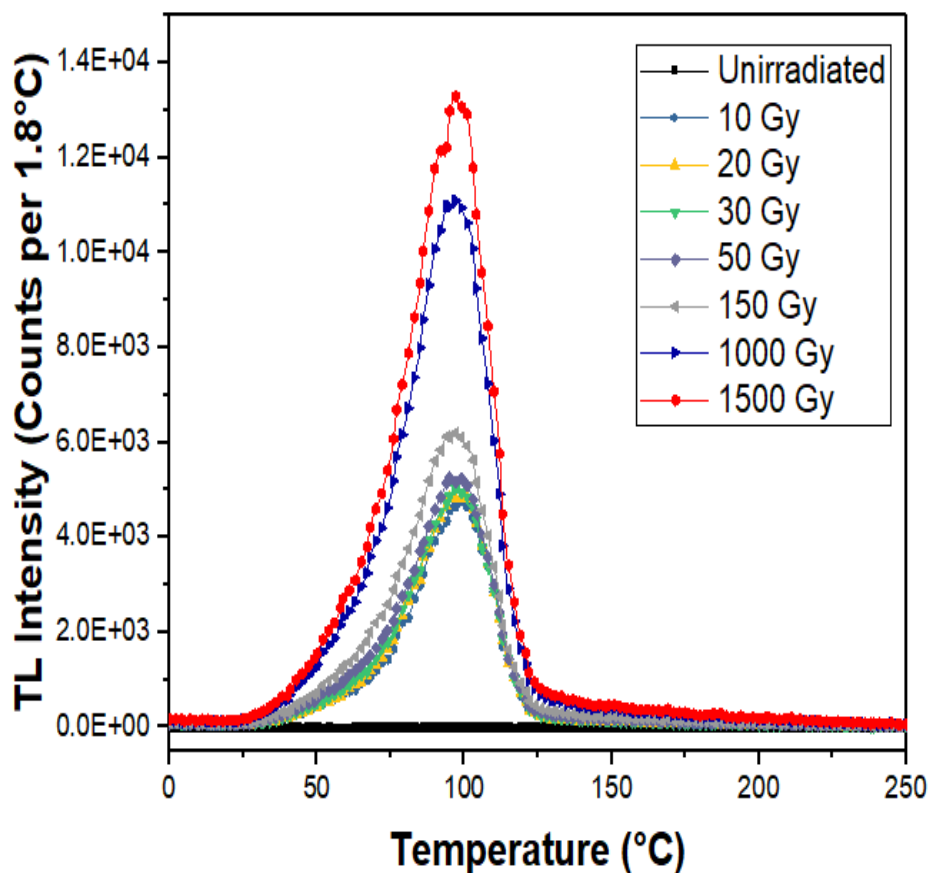
**Tableau 17 : Les conditions de lecture du signal TL**

Condition de lecture	Valeur retenue
Mode de lecture	Thermoluminescence
Température maximale de lecture	252 °C
Taux de chauffage	5 °C/s
Echantillonnage du signal TL	140 points sur l'intervalle 0 et 252 °C
Poids de l'échantillon à analyser	2mg

#### 4. Résultats et discussion

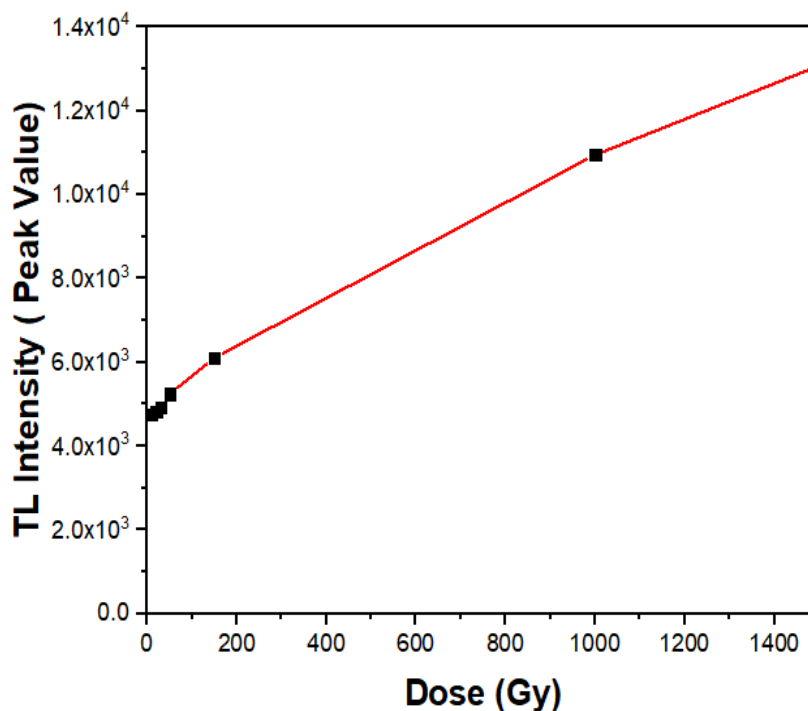
Les réponses TL des minéraux silicatés séparés des tubercules de la pomme de terre non irradiée et irradiés par différentes doses 10, 20, 30, 50, 150, 1000 et 1500 Gy au niveau de l'irradiateur gamma sont représentées dans la figure 36.

Les courbes TL (figure 36) obtenues sont constituées de pics très nets centrés à ~97°C. Ces pics de thermoluminescence stables obtenus permettent l'identification des tubercules de pomme de terre irradiés.



**Figure 39 : Courbe TL des minéraux silicatés séparés de pommes de terre non irradiées montrant le fond et les courbes TL de pommes de terre irradiées après exposition à 10, 20, 30, 50, 150, 1 000 et 1 500 Gy au niveau de l'irradiateur gamma.**

La figure ci-dessous illustre la dépendance entre la dose d'irradiation et l'intensité de la thermoluminescence TL obtenue pour un seul test.



**Figure 40: La courbe de dépendance TL-Dose**

Notre objectif d'identification des tubercules de pomme de terre traités par irradiations a été atteint. De plus, cette courbe de dépendance TL-Dose (Figure 38) peut être utilisée pour déterminer la dose d'irradiation donnée aux échantillons, mais des recherches plus approfondies et supplémentaires sont nécessaires pour obtenir une précision appropriée sur le niveau de dose. En effet, en cas où des écarts de dose, la réponse dose TL des minéraux silicatés séparés des pommes de terre peut être corrigée en considérant un protocole basé sur des tests de récupération de dose et des mesures de dose répétées, puis une courbe d'étalonnage peut être construite.

## 5. Conclusion

La détection des denrées alimentaires traitées par irradiation ionisante s'effectue à l'aide d'un certain nombre de techniques et de procédures, des méthodes de routine rapides qui sont basées sur des techniques facilement accessibles aux fabricants et aux laboratoires de contrôle de qualité alimentaire ; et d'autres méthodes souvent plus compliquées conduisant à une véritable preuve. Cela est très important pour pouvoir détecter le non étiquetage des

produits alimentaires traités par rayonnement ionisant (contrôle de la fraude à l'information) ainsi que l'efficacité d'un traitement ionisant (contrôle qualité). La thermoluminescence des minéraux silicatés présents dans les aliments est une technique efficace pour identifier les produits alimentaires irradiés. La TL est la méthode utilisée dans ce travail de thèse pour l'identification des tubercules de pomme de terre DESIREE traités par irradiations gamma, ces tubercules ont été identifiés avec succès par la TL pour des doses gamma allant jusqu'à 1,5 kGy.

# Conclusions

### Conclusions

Au cours des dernières années, le traitement par irradiation est apparu comme une technique puissante et efficace pouvant être utilisée pour induire des mutations chez les plantes, permettant la création de variétés de meilleure qualité avec des rendements élevés et une meilleure résistance au stress hydrique. Dans le domaine de l'agriculture et de la lutte contre les maladies des plantes, l'irradiation s'est avérée extrêmement utile et efficace. En effet, la technique de traitement par l'irradiation ionisante peut contribuer à améliorer les variétés végétales à multiplication végétative. Traditionnellement, les variétés de pomme de terre ont préservées sous forme de véritables clones en plantant successivement des tubercules. Les traitements par l'irradiation peuvent jouer un rôle important dans l'amélioration de la durée de conservation et des caractéristiques qualitatives des tubercules de pomme de terre grâce à ses effets conservateurs sur leurs propriétés physiques, chimiques et physiologiques.

Dans ce travail de thèse, les pommes de terre DESIREE irradiées ont été identifiées efficacement par la technique de thermoluminescence pour des doses gamma allant jusqu'à 1,5 kGy. De plus, les effets de l'irradiation gamma sur la croissance des plantes, la teneur en sucre et le rendement ont été étudiés pour deux variétés de tubercules de pommes de terre, DESIREE et SPUNTA, produites par culture conventionnelle et in vitro. Aucune mutation en terme de couleurs des yeux et de texture de la peau pour les faibles doses inférieures à 25 Gy n'a été constatée.

Notre étude a clairement montré qu'une irradiation relativement tardive, trois semaines avant la plantation, avec une faible dose de 10 à 25 Gy, est bénéfique pour la formation et la croissance des tubercules et a un impact direct sur le rendement. Cette faible dose augmente significativement le nombre de feuilles (+~ 75 %) et la capacité de croissance en termes de poids du tubercule (15-30 %).

## Conclusions

---

En effet, Le pourcentage d'émergence, en termes de hauteur des plantes et de longueur des racines des plantes, était optimal pour l'intervalle de dose de 10 à 25 Gy, sans capacité d'émergence à des doses plus élevées que 55 Gy et 75 Gy pour SPUNTA et DESIREE, respectivement. La teneur en sucre total a été mesurée avec précision par spectrophotométrie. Il a été observé que les faibles doses n'ont aucun effet sur la production totale de sucre et sur le métabolisme de transformation de la plante. Pour les tubercules de semence non plantés, la concentration en sucres totaux a augmenté pour une dose plus élevée, ce qui peut être dû à l'utilisation des sucres comme substrat pour la respiration ainsi qu'aux effets de l'irradiation.



## REFERENCES

- Aikawa Yasuyuki, 2000. A new facility for X-ray irradiation and its appli. *Radiation Physics and Chemistry* 57 (2000) 609 612
- IAEA , 2018. International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Glossary: Terminology used in nuclear safety and radiation protection, 2018 Edition ([https:// www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/ PUB1830\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf))
- Ahari, H., Mahyar, S., Fathollahi, H., 2012. The Potential of Food Irradiation: Benefits and Limitations, in: Amer Eissa, A. (Ed.), *Trends in Vital Food and Control Engineering*. InTech. <https://doi.org/10.5772/34520>
- Afrasiab H, Iqbal J, 2010. In vitro techniques and mutagenesis for the genetic improvement of potato cvs. desiree and diamant. *Pak. J. Bot.* 42(3):1629- 1637 ([http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/42\(3\)/ PJB42\(3\)1629](http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/42(3)/PJB42(3)1629))
- Al-Safadi B, Ayyoubi Z, Jawdat D, 2000. The effect of gamma irradiation on potato microtuber production in vitro. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 61:183–187 (<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006477224536>)
- Ahmed, I., Qazi, I.M., Jamal, S., 2016. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 34, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
- Andrews, L.S., Ahmedna, M., Grodner, R.M., Liuzzo, J.A., Murano, P.S., Murano, E.A., Rao, R.M., Shane, S., Wilson, P.W., 1998. Food Preservation Using Ionizing Radiation, in: Ware, G.W. (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Springer New York, New York, NY, pp. 1–53. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2208-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2208-8_1)
- Aparna M. , Anurag Chaturvedi , M. Sreedhar. , D. Pavan Kumar , P. Venu-Babu and R. K. Singhal , 2013. Impact of Gamma Rays on the Seed Germination and S. Asian j. Exp. Biol. Sci. Vol 4 (1) 2013.

- Arvanitoyannis, I.S., Tserkezou, P., 2010. Legislation on Food Irradiation. European Union, United States, Canada, and Australia Chapitre 1, Irradiation of Food Commodities.
- Bahain, J.-J., 1993. Datation par resonance de spin electronique (ESR) de carbonates et d'email dentaire quaternaires : potentiel et problemes.
- Baskaran R, 2007. Effect of low-dose g-irradiation on the shelf life and quality characteristics of minimally processed potato cubes under modified atmosphere packaging. *Radiat. Phys. Chem.* 76: 1042–1049 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X06005081>)
- Bayram, G., Delincée, H, 2004. Identification of irradiated Turkish foodstuffs combining various physical detection methods. *Food Control* 15 (2), 81–91 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713503000185?via%3Dihub>)
- Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T., Barbosa-Cánovas, G.V., 2011. Ultrasound Applications in Food Processing, in: Feng, H., Barbosa-Canovas, G., Weiss, J. (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Food Engineering Series. Springer New York, New York, NY, pp. 65–105. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_3)
- Bilquez A. F, 1961. Emploi des Rayonnements ionisants pour la production de nouvelles variétés de plantes industries atomiques 11/12 - 1961
- Cerda, H., Delincée, H., Haine, H., Rupp, H., 1997. The DNA 'comet assay' as a rapid screening technique to control irradiated food. *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.* 375, 167–181. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(97\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(97)00012-2)
- Chauhan, S.K., Kumar, R., Nadanasabapathy, S. Bawa, A.S., 2009. Detection Methods for Irradiated Foods. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 8, 4–16. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2008.00063.x>

- Chen, S., Morita, Y., Saito, K., Kameya, H., Nakajima, M., Todoriki, S, 2011. Identification of irradiated prawn (*Penaeus monodon*) using thermoluminescence and 2-alkylcyclobutanone analyses. *J. Agric. Food Chem.* 59 (1), 78–84 (<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf103439c>)
- D’Oca, M.C., Bartolotta, A., Cammilleri, C., Giuffrida, S., Parlato, A., Di Stefano, V, 2009. The additive dose method for dose estimation in irradiated oregano by thermoluminescence technique. *Food Control* 20 (3), 304–306 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095671350800131X>)
- Cheng L *et al.*, 2010. Effect of gamma-ray radiation on physiological, morphological characters and Potato processing and irradiation identification chromosome aberrations of minitubers in *Solanum tuberosum*. *Int. J. Radiat. Biol.* 86(9):791-799 (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/09553002.2010.484478?journalCode=irab20>)
- Diehl, J.F, 2018. Safety of Irradiated Foods. Second Edition, Revised and Expanded
- Dionísio Dionísio A P , Renata Takassugui Gomes et Marília O, 2009. Ionizing radiation effects on food vitamins a rev. Vol.52, n. 5: pp. 1267-1278, September-October 2009
- Dubois M *et al.*, 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *J Anal Chem* 28: 3 (<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60111a017>)
- Edwards. J et Martin S. Peterson, 2018. Preservation of Food by Ionizing Radiation Volume I
- EFSA J, 2011. Statement summarising the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. EFSA J. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011>.
- Erkmen, O., Bozoglu, T.F.,2016. Food Preservation by Irradiation, in: Food Microbiology: Principles into Practice. Wiley, pp. 106–126. <https://doi.org/10.1002/9781119237860.ch32>.

- FAO/IAEA , 2003. Genetic improvement of underutilized and neglected crops in low income food deficit countries through irradiation and related techniques. Actes d'une réunion finale de coordination de la recherche organisée par la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, Pretoria, Afrique du Sud, 19-23 mai 2003
- Farkas, J., Mohácsi-Farkas, C., 2011. History and future of food irradiation. *Trends Food Sci. Technol.* 22, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.002>
- Farkas J, 1998. Irradiation as a method for decontaminating food. *International Journal of Food Microbiology* 44 (1998) 189–204
- Fellows, P., 2000. *Food processing technology: principles and practice*, 2nd ed. ed, Woodhead Publishing in food science and technology. Woodhead Pub. ; CRC Press, Cambridge, England : Boca Raton, FL.
- Fred Van de Voort et Jim S, 1987, *Food irradiation processin*, Depatement des sciences alimentaire et chimie agriculture.
- Fink A et Rehmann D, 1994 - *Research priorities relating to food irradiation*. ISBN 92-826-7496-7.
- Furetta, C., 2003. *Handbook of thermoluminescence*. World Scientific Pub, River Edge, NJ.
- Ganguly, S., Mukhopadhyay, S.K., Biswas, S., 2012. Preservation of food items by irradiation process.
- Ghosh S, Das MK, 2014. Optimization of the effect of gamma radiation on textural properties of different varieties of potato (Kufri Chandramukhi and Kufri Jyoti) and mango (Langra and Fazli) during storage by response surface methodology. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 26:257–264 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856414000691>)
- Gillard, N., 2006. Effets des radiations ionisantes sur des complexes ADN-protéine. <https://theses.hal.science/tel-00011412>.

IAEA, 2009. La science nucléaire au service de la sécurité alimentaire IAEA. Bulletin 50-2 | Mai 2009 | 19.

Jasem Al Fawwaz, 2012. سورية في المصنعة الأطفال أغذية تعقيم في الأشعة استخدام Sterilizing\_Childrens\_Food\_Manufactured in Syria Using irradiation. These de magister, Syrie.

Junqueira-Gonçalves, M.P., Galotto, M.J., Valenzuela, X., Dinten, C.M., Aguirre, P., Miltz, J., 2011. Perception and view of consumers on food irradiation and the Radura symbol. *Radiat. Phys. Chem.* 80, 119–122. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.08.001>

Jonathan P, Rémi F, Victor C, Raphaël H, Nicolas G, 2023. La luminescence moléculaire : définitions, exemples et applications. <https://hal.science/hal-04066925>

Kalyani, B., Manjula, K., 2014a. Food Irradiation - Technology and Application. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (2014) 3(4): 549-555

Kalyani, B., Manjula, K., 2014b. Food Irradiation - Technology and Application. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (2014) 3(4): 549-555

Kamenopoulou V., Catoire B., J. Barthe. 1988. Résonance paramagnétique électronique des fibres, *Radioprotection, GÉDIM1988 Vol.23,n°3,pages277à28*

Khan, H.M., Delincée, H, 1995. Detection of radiation treatment of spices and herbs of Asian origin using thermoluminescence of mineral contaminants. *Appl. Radiat. Isot.* 46 (10), 1071–1075 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/096980439500193H>)

Kharfi F et Ketfi R, 2018. Irradiated black pepper identification based on thermoluminescence of silicate minerals. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5699-2>

Kwon JH, Jeong J, Chung HW, 2002. Thermoluminescence characteristics of minerals from irradiated potatoes of different origins of production. *Radiat. Phys. Chem.* 63 (3–6),

415–418 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X01005904>)

Mattick, A.T.R., 1950. La pasteurisation du lait par les radiations infrarouges. XIIe congrès international de laiterie (Stock. holm, août 1949).

Mostafavi, H.A., Fathollahi, H., Motamedi, F., Mahyar, S., 2010. Food irradiation: Applications, public acceptance and global trade. *African Journal of Biotechnology* Vol. 9 (20), pp. 2826-2833, 17 May, 2010

Muley AB *et al*, 2019. Gamma radiation degradation of chitosan for application in growth promotion and induction of stress tolerance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Carbohydr Polym.* 210:289–301 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861719300694?via%3Dihub>)

Muredzi P, 2008. Food Irradiation as a model preservation technique for the food industry: the pros. School of Industrial Sciences and Technology Harare Institute of Technology.

Nout, R., Hounhouigan, J.D., Boekel, M.A.J.S. van, 2003. Les aliments: transformation, conservation et qualité. Backhuys Publishers ; CTA, Leiden, Wageningen.

Olive, P.L., Banáth, J.P., 2006. The comet assay: a method to measure DNA damage in individual cells. *Nat. Protoc.* 1, 23–29. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.5>

OMS, 1989. L'irradiation Des produits Alimentaires, Une technique pour conserver et améliorer la salubrité des aliments Publié par l'Organisation mondiale de la santé en collaboration avec l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

Opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of eight foodstuffs (expressed on 17.09.1998).

Patterson M, 2005. Food Irradiation: Microbiological Safety and Disinfestation. International Symposium “New Frontier of Irradiated food and Non-Food Products”22-23 September 2005, KMUTT, Bangkok, Thailand.

- Prakash A, Jos Ornelas-Paz, 2019. Irradiation of Fruits and Vegetables. Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00017-1>
- Pinnioja, S, 1998. Thermoluminescence Method for Detection of Irradiated Food. Report Series in Radiochemistry 9/1998
- Ramli, R.A.A., Dzomira, A.Z.M., Othmana, Z., Abdullah, S.W., 2012. Development of photostimulated luminescence technique for detecting irradiated food.
- Raffi J, Yordanov, ND, Chabane, S., Douifi, L., Gancheva, V., Ivanova, S, 2000. Identification of irradiation treatment of aromatic herbs, spices and fruits by electron paramagnetic resonance and thermoluminescence. *Spectrochim. Acta Mol. Biomol. Spectrosc.* 56 (2), 409–416 ([https:// www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1386142599002528](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1386142599002528))
- Rezaee M *et al.*,2013. Impact of post-harvest radiation treatment timing on shelf life and quality characteristics of potatoes. *J Food Sci Technol* 50(2):339–345 ([https:// link.springer.com/article/10.1007/s13197-011-0337-9](https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-011-0337-9))
- Risø, 2015. Guide to the Risø TL/OSL Reader. DTU Nutech, Denmark (file:///C:/Users/fujitsu/ Downloads/Risoe-Reader-and-Beta-Counter-Product-catalogue-1803a.pdf)
- Robichaud V, Bagheri L, Salmieri S, Aguilar-Uscanga B.R, Millette M, Lacroix M, 2020. Effect of  $\gamma$ -irradiation and food additives on the microbial inactivation of foodborne pathogens in infant formula. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110547>.
- Roxane L, 2003.Utilisation de l'irradiation gamma seule ou en combinaison avec d'autres traitements comme moyen de conservation des carottes pretes à manger. mémoire pour l'obtention du grade de MS en microbiologie, université de Québec .
- Sanderson, D.C.W., Carmichael, L.A., Fisk, S., 2008. Optimisation of the photostimulated luminescence tests to detect irradiated dietary supplements.

- SCF, 2003. Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food . SCF/CS/NF/IRR/24 Final
- Stevenson M.H.et Stewart E.M., 1995. Identification of irradiated food: the current status. *Radiat. Phys. Chem.* Vol. 46, No. 4-6, pp. 653-658, 1995
- Thomet P, Rassat A, Servoz-gavin P, Henri de Choudens. 1967 - Etude par la technique de résonance paramagnétique. Rapport CEA - R 3250.
- Todoriki, S., Kameya, H., Saito, K., Hagiwara, S, 2014. Detection of commercially irradiated potatoes by thermoluminescence and photostimulated luminescence analyses. *Food Sci. Technol. Res.* 20 (3), 555–561 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/fstr/20/3/20\\_555/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/fstr/20/3/20_555/_html/-char/en))
- Toledo, R.T., 2007. Fundamentals of food process engineering, 3rd ed. ed, Food science text series. Springer, New York, NY.
- Vinod B. R., Ram A, Shruti S , Prakash J, Nirmal K M, Menak M, Shatakashi M, Gouthami S, 2023. Recent advances in physical treatments of papaya fruit for postharvest quality retention: A review. DOI: 10.1002/efd2.79
- WHO, 1994. World Health Organization. Safety and nutritional adequacy of irradiated food. World Health Organization, Geneva.
- Youbi I, 2022. Irradiation des Aliments. DOI: 10.13140/RG.2.2.35280.99848.



## Résumé

Dans ce travail de thèse, la pomme de terre DESIREE irradiée a été identifiée avec succès par technique de thermoluminescence pour des doses gamma allant jusqu'à 1,5 kGy. De plus, des tubercules de pommes de terre minutieusement sélectionnés SPUNTA et DESIREE ont également été cultivés après avoir été irradiés avec différentes doses gamma, variant de 10 à 150 Gy. Les effets de l'irradiation gamma sur la croissance des plantes, la teneur en sucre et le rendement ont été ainsi étudiés. Les tubercules de semence de pomme de terre ont été irradiés tardivement trois semaines avant la plantation. L'analyse des descendances des tubercules ne montre aucune mutation ni changement en terme de couleur des yeux et de couleur et texture de la peau pour les faibles doses inférieures à 25 Gy. Le pourcentage d'émergence des plantes était optimal pour l'intervalle de dose de 10 à 25 Gy. Aucune capacité d'émergence des plantes n'a été observée à partir de 55 Gy et 75 Gy pour SPUNTA et DESIREE, respectivement. L'irradiation avec des doses de 10 à 25 Gy a favorisé la formation des tubercules. Il n'y a eu aucune amélioration morphologique de la croissance à partir de 25 Gy et aucune survie à partir de 65 Gy et 85 Gy pour SPUNTA et DESIREE, respectivement. Les effets du rayonnement gamma sur les tubercules irradiés mais non plantés montrent que la teneur en sucres totaux augmente de ~1,5 % à ~3,5 % pour de faibles doses et reste constante pour les doses les plus élevées. Les tubercules récoltés produits à partir de semences irradiées plantées présentent une teneur en sucre constante même dans le cas d'une variation dose et aucune influence de l'irradiation sur la consommation et la production totale de sucre. Cette étude indique également qu'une irradiation tardive avec une faible dose inférieure à 25 Gy (10 Gy) augmente significativement le nombre de feuilles de la plante (+~ 75 %) et la capacité de croissance en termes de poids du tubercule (15-30 %).

## Abstract

In this thesis work, the irradiated DESIREE potato was successfully identified by thermoluminescence technique for gamma doses up to 1.5 kGy. In addition, the cultivation of carefully selected SPUNTA and DESIREE potato tubers was studied after being irradiated with different gamma doses, varying from 10 to 150 Gy. The effects of gamma irradiation on plant growth, sugar and yield were thus analysed. Potato seed tubers were irradiated late three weeks before planting. Analysis of tuber progenies showed no mutations or changes in eye color and skin color and texture for low doses below 25 Gy. The percentage of plant emergence was optimal for the range of dose from 10 to 25 Gy. No plant emergence capacity was recorded from 55 Gy and 75 Gy for SPUNTA and DESIREE, respectively. Irradiation with doses of 10 to 25 Gy favored the formation of tubercles. There was no morphological growth from 25 Gy and no survival from 65 Gy and 85 Gy for SPUNTA and DESIREE, respectively. The effects of gamma radiation on irradiated but unplanted tubers show that the total sugar content increases from ~1.5% to ~3.5% for low doses and remains constant for the highest doses. The tubers produced from irradiated seeds planted have a constant sugar content even in the case of a dose variation and no influence of the irradiation on the consumption and total production of sugar was observed. This study also indicates that late irradiation with a low dose below 25 Gy (10 Gy) significantly increases the number of leaves of the plant (+~ 75%) and the growth capacity in terms of tuber's weight (15- 30 %).

## ملخص

في هذه الأطروحة، تم بنجاح التعرف على بطاطس DESIREE المشعة بتقنية التألق الحراري لجرعات جاما تصل إلى 1.5 كيلو جراي. بالإضافة إلى ذلك، تم أيضًا زراعة درنات بطاطس SPUNTA

وDESIREE المختارة بعناية بعد تعريضها لجرعات مختلفة من اشعة جاما، تتراوح من 10 إلى 150 غراي. وبالتالي تمت دراسة آثار اشعاع جاما على نمو النبات والسكر و مردود الإنتاج. تم تشجيع درنات بذور البطاطس في وقت متأخر قبل ثلاثة أسابيع من الزراعة. أظهر تحليل سلالات الدرنات عدم حدوث أي طفرات أو تغيرات في لون العين ولون وملمس القشرة عند الجرعات المنخفضة أقل من 25 غراي. وكانت النسبة المئوية لظهور النبات هي الأمثل لمدى الجرعة من 10 إلى 25 غراي. ولم يتم تسجيل أي قدرة لظهور النبات ابتداء من 55 غراي و 75 غراي لـ SPUNTA وDESIREE، على التوالي. أدى التشجيع بجرعات تتراوح من 10 إلى 25 غراي إلى ظهور الدرنات. لم يكن هناك نمو شكلي ملحوظ ابتداء من 25 غراي ولم يكن هناك بقاء على قيد الحياة ابتداء من 65 غراي و 85 غراي لـ SPUNTA وDESIREE، على التوالي. تظهر تأثيرات إشعاع جاما على الدرنات المشععة و غير المزروعة أن إجمالي محتوى السكر يزيد من 1.5% إلى 3.5% تقريباً للجرعات المنخفضة ويظل ثابتاً للجرعات الأعلى. تحتوي الدرنات المنتجة من البذور المشععة المزروعة على نسبة سكر ثابتة حتى في حالة اختلاف الجرعة ولوحظ عدم وجود تأثير للإشعاع على استهلاك السكر وإنتاجه الإجمالي. تشير هذه الدراسة أيضاً إلى أن التشجيع المتأخر بجرعة منخفضة أقل من 25 جراي (10 جراي) يزيد بشكل كبير من عدد أوراق النبات (+~ 75%) وقدرة النمو من حيث وزن الدرنات (15- 30%).