REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Médicale

Par :

M^elle^ MOUHADGER MEBARKA

Sur le thème

Comparaison de la dosimétrie du cancer du sein traité par deux méthodes (IMRT et par radiothérapie conformationnelle).

Soutenu publiquement le 25 juin 2025 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr LIANI Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme BOUCHIKHI Asma	Docteur	CAC Tlemcen	Encadrante
Mr TALEB Lotfi	Professeur	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme BOUCHAOUR Mama	Maitre de conférences B	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année Universitaire : 2024 ~ 2025

بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

A l'aide de Dieu, j'ai pu réaliser ce mémoire dont je dédie à ;

Ceux dont les cœurs furent ma partie lorsque je me suis éloigné, mon refuge quand j'étais épuisé, et ma lumière dans les ténèbres du chemin …

Mon père, dont la voix résonnait en moi à chaque moment de faiblesse, et dont la sagesse me guidait silencieusement.

Ma mère, source intarissable de tendresse et de prière, havre de paix et de force dans les tempêtes du quotidien.

Mes frères et sœurs, prolongement lumineux de mon enfance, soutien indéfectible de ma jeunesse, votre présence est un don inestimable que je chérirai toujours.

Mes professeurs, à toutes les étapes de mon parcours éducatif, vous avez été bien plus que des enseignants : des guides, des modèles, des sources d'inspiration. Je vous dois reconnaissance et profond respect.

Mes camarades, merci d'avoir été la partie vivante de cette aventure, la mémoire joyeuse de mes années d'études.

Et enfin, à moi – même, à mon cœur qui a cru, à mon esprit qui a persévéré.

La fin est là, mais le voyage n'est pas terminé, chaque instant se rapproche de la fin, mais le véritable début arrive.

Le rideau est tombé, mais l'histoire ne s'arrête pas là. L'adieu est le début d'une nouvelle opportunité et la fin est le début de quelque chose de plus grand.

Remerciements

En ce moment particulier, alors que j'écris ces mots, je ne peux que remercier et exprimer ma profonde gratitude à Allah, le tout puissant, pour ses innombrables bénédictions et son aide divine, qui ont les raisons de mon arrivée à cette étape de ma vie académique.

Je remercie sincèrement et très chaleureusement ;

Ma directrice de recherche M^{me} BOUCHIKHI Asma, de son soutien permanent et sans relâche, son aide, sa compréhension, ces conseils et orientations fructueuses.

M^{me} BOUCHAOUR Mama, maitre de conférences (université de Tlemcen) d'avoir acceptée d'examiner ce travail.

Mr LIANI Bachir, Professeur (Université de Tlemcen) pour le temps qu'il a consacré à examiner mon mémoire et pour ces remarques constructives.

Mr TALEB Lotfi, Professeur (Université de Tlemcen) pour sa participation à la soutenance et pour la qualité de ses interventions.

Tout le personnel du service de radiothérapie de centre hospitalo - universitaire de Tlemcen, merci pour votre aide et vos conseils sincères.

Ceux qui ont travaillé dans l'ombre pour faciliter mon parcours, en particulier le personnel administratif de département de physique (université de Tlemcen) merci pour vos facilités, vos efforts tout au long de ces années.

Enfin, je me remercie moi – même pour la patience, la persévérance et la détermination qui m'ont permis d'atteindre ce moment.

Cette fin est un pas vers une nouvelle étape, pleine de réussites et de fierté dans ma carrière académique et professionnelle.

Merci.

Une femme debout et une femme à genoux se regardent. Celle qui est debout a été à genoux et celle qui est à genoux sera debout. L'une est le futur de l'autre. Et leur regard dit cette certitude : oui, on se relève, oui on est tous un jour celui qui demande de l'aide, oui le cancer peut être dans le parcours d'une vie, la date d'une renaissance, une aventure qui vous emmène loin, c'est - à- dire plus près de vous-même. Ce fut mon aventure.

Hélène JOUSSE

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction……...1

Chapitre I : Généralités sur le cancer du sein

Introduction :..... 4

1. Définition du cancer : 4

2.Objet de l′étude : 5

3. Anatomie du sein : 5

4. Le cancer du sein : 7

5. Les types du cancer du sein :..... 8

5.1. Le cancer du sein non – infiltrant (in situ) : 8

5.2. Le cancer du sein infiltrant : 8

6. Classification des cancers de sein : 10

7. Les symptômes du cancer du sein : 11

8. Les facteurs de risque du cancer du sein : 12

8.1. Les principaux facteurs favorisants : 12

8.2. Les facteurs favorisants secondaires :..... 12

9. Dépistage et diagnostic du cancer du sein : 13

9.1. L′auto- palpation :..... 13

9.2. Les examens cliniques : 14

10. Traitement du cancer du sein :..... 16

10.1. Traitements médicaux : 16

10.2. La chirurgie : 17

10.3. La radiothérapie : 18

10.3.1. Les techniques d′irradiation :..... 18

10.3.2. Les effets secondaires de la radiothérapie : 18
Conclusion :……. …….. ……20
Chapitre II : La radiothérapie externe et sa procédure de traitement
Introduction : 22
1.Histoire de la radiothérapie : 22
2. Définition de la radiothérapie : 23
3. Les types de la radiothérapie : 24
3.1. La radiothérapie interne : 24
3.2. La radiothérapie externe : 24
4. La radiothérapie externe (par accélérateur linéaire) : 25
4.1. Principe de la radiothérapie externe : 25
4.2. Les différentes techniques de la radiothérapie externe : 26
4.3. Définitions des volumes cibles : 27
4.4. Les organes à risque (OAR) : 28
4.5. L′accélérateur linéaire et ces composants : 31
5. Principe de la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle : 34
6. Principe de la radiothérapie conformationnelle avec modulation d′intensité (IMRT ou RCMI) : 35
7. Études et résultats antérieurs comparant les deux techniques (RCMI et RC 3D) dans le cas du cancer du sein : 37
8. Les indications de la radiothérapie dans le cancer du sein : 39
9. La procédure de la radiothérapie adjuvante du cancer du sein : 39
9.1. Consultation d'annonce thérapeutique et éducation du patient : 39
9.2. La simulation : 40
9.3. Délinéation des volumes cibles et des OAR (contourage) : 41
9.4. Planification et validation du plan de traitement : 43
9.5. Le traitement : 43
Conclusion : 45
Chapitre III : Matériels et méthodes
1.Objectif de l′étude : 47
2. Type d′étude : 47
3. La population étudiée : 47
4. Matériel utilisé dans l′étude : 48

4.1. Scanner de simulation : 49
4.2. L′appareil de traitement : 49
4.3. Système de planification de traitement (TPS) : 50
5. Le contourage : 51
6. Le choix méthodologique de PTV : 53
7. Description de protocole de planification pour la technique 3D-CRT : 53
8. Description de protocole de planification pour la technique IMRT : 55
9. Outils d′évaluation d′un plan de traitement : 58
9. 1. L′histogramme dose-volume (DVH) : 58
9.2. Indice de conformité : 59
9. 3. Indice d'homogénéité : 59
Chapitre IV : Résultats et Évaluation
Introduction : 62
1. Présentation des résultats de chaque technique : 62
1.1. Les résultats dosimétriques pour la technique 3D-CRT : 62
1.2. Les résultats dosimétriques pour la technique IMRT : 63
2. L′analyse et l′évaluation de résultats dosimétriques cas par cas : 63
2.1. La patiente 1 (3D-CRT vs IMER) : 63
2.2. La patiente 2 (3D-CRT vs IMER) : 65
2.3. La patiente 3 (3D-CRT vs IMER) : 66
2.4. La patiente 4 (3D-CRT vs IMER) : 67
2.5. La patiente 5 (3D-CRT vs IMER) : 68
3. Avantages et inconvénients de chaque technique : 69
Conclusion : 70
Conclusion générale 73
Résumé : 75
Références bibliographiques
..... **Erreur ! Signet non défini.**
Annexes

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le cancer du sein		
Numéro tableau	**Le titre**	**N° la page**
01	Classification des cancers des seins	10
Chapitre II : La radiothérapie externe et sa procédure de traitement		
02	Les résultats obtenus lors d′une étude précédente	38
Chapitre III : Matériels et méthodes		
03	Caractéristiques des patientes	48
04	Les étapes de l′optimisation à la délivrance de la dose	56
Chapitre IV : Résultats et Évaluation		
05	Résumé des résultats dosimétriques pour la technique 3D-CRT	62
06	Résumé des résultats dosimétriques pour la technique IMRT	63
07	Avantages et inconvénients de chaque technique	69

Liste des figures

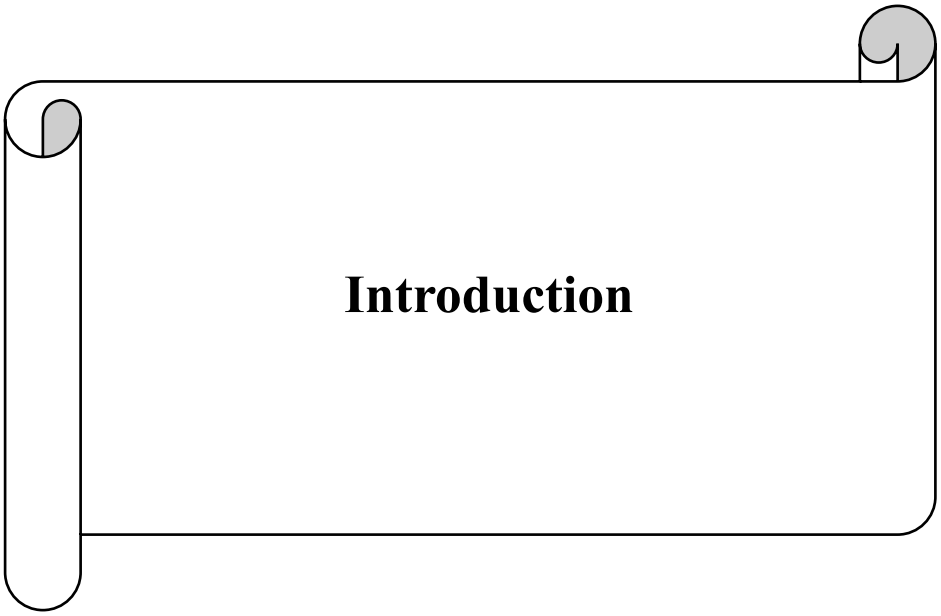
Chapitre I : Généralités sur le cancer du sein		
Numéro figure	**Le titre**	**N° la page**
01	Anatomie du sein	7
02	Cancer du sein non-infiltrant	9
03	Cancer du sein infiltrant	9
04	Les étapes de l′autopalpation	14
05	L′appareil de mammographie	15
06	Mammographie du sein	15
Chapitre II : La radiothérapie externe et sa procédure de traitement		
07	La définition des volumes cibles selon L′ICRU	30
08	L′organisation des unités fonctionnelles d′un OAR	30
09	Les composants d′accélérateur linéaire	34
10	L′évolution du nombre de publications sur l′IMRT et 3D-CRT	35
11	Les modes d′irradiation en l′IMRT	37
12	Le plan incliné	40
13	Scanner de simulation	41
14	Accélérateur linéaire médicale (TRILOGY) de VARIAN	44
Chapitre III : Matériels et méthodes		
15	La détermination de l′isocentre	52
16	L′étape de contourage	52
17	Planification de traitement pour la technique 3D-CRT (champs tgi / tge)	54
18	La création de bolus virtuel	57
19	La balistique de traitement pour la technique IMRT (création des champs et l′optimisation)	57

20	Histogramme dose-volume (DVH)	58
Chapitre IV : Résultats et Évaluation		
21	Résultats de la patiente 1	64
22	Résultats de la patiente 2	65
23	Résultats de la patiente 3	66
24	Résultats de la patiente 4	67
25	Résultats de la patiente 5	68

Liste des abréviations :

- **I MRT** : Radiothérapie avec Modulation d'Intensité.
- **VMAT** : Arc-thérapie Volumétrique Modulée.
- **RC-3D** : Radiothérapie Conformationnelle 3D.
- **3D-CRT** : Radiothérapie Conformationnelle en Trois Dimensions.
- **OAR** : Organes à Risque.
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé.
- **ADN** : Acide Désoxyribonucléique.
- **CCIS** : Cancer Canalaire In Situ.
- **CLIS** : Cancer Lobulaire In Situ.
- **CCI** : Cancer Canalaire Infiltrant.
- **CLI** : Cancer Lobulaire Infiltrant.
- **BRCA1** : Gène de cancer du sein (réparation de l′ADN et suppression tumorale)
- **IRM** : Imagerie par Résonance Magnétique.
- **SBR** : Scarff-Bloom-Richardson (système de grading des tumeurs du sein basé sur l′aspect cellulaire et la vitesse de prolifération).
- **HER2** : Human Epidermal growth factor Receptor 2.
- **C-erbB2** : C-erbB2 (autre nom de HER2)
- **RE** : Récepteurs aux Œstrogènes.
- **RP** : Récepteurs à la Progestérone.
- **RH** : Récepteurs Hormonaux.
- **TEP** : Tomographie par Émission de Positrons.
- **IGRT** : Radiothérapie Guidée par l'Image.
- **RCMI** : Radiothérapie Conformationnelle Modulée en Intensité.
- **SRS** : Radiochirurgie Stéréotaxique.
- **SBRT** : Radiothérapie Corporelle Stéréotaxique.
- **ICRU** : Commission Internationale des Unités et Mesures des Rayonnements.
- **GTV** : Volume Tumoral Brut.
- **CTV** : Volume Cible Clinique.
- **PTV** : Volume Cible Planifié.
- **HDV** : Histogramme Dose-Volume.

- **RF** : Source de fréquence radio.
- **OBI** : On-Board Imager.
- **CBCT** : Tomodensitométrie par Faisceau Conique.
- **MLC** : Collimateur Multilames.
- **RTOG**: Radiation Therapy Oncology Group.
- **ESTRO**: European Society for Radiotherapy and Oncology.
- **T4a** : Tumeur envahissant la paroi thoracique (classification TNM)
- **T4b** : Tumeur avec œdème ou ulcération de la peau du sein (classification TNM).
- **TPS** : Système de Planification de Traitement.
- **KI67** : Marqueur de prolifération cellulaire KI67.
- **BDR** : Risque Défini Biologiquement.
- **UM** : Unité Moniteur.
- **AAA** : Anisotropic Analytical Algorithm.
- **PO** : Photon Optimizer.
- **TDM** : Tomodensitométrie.
- **TGI** : Tangentiel Interne.
- **TGE** : Tangentiel Externe.
- **Dmax** : Dose Maximale.
- **Dmin** : Dose Minimale.
- **Dmoy** : Dose Moyenne.


Introduction

Introduction :

Vivre avec sa propre maladie ou vivre avec la maladie d'un proche est aujourd'hui un sujet d′intérêt collectif. En fait, des maladies autrefois mortelles sont devenues des maladies chroniques, c'est-à-dire des maladies caractérisées par leur durée, la prise en charge qu'elles nécessitent et l'incertitude qu'elles engendrent. Parmi ces maladies, on trouve le cancer notamment le cancer du sein. [1]

Le cancer du sein est l′un des cancers les plus fréquents chez les femmes, il touche les femmes de tous âges, mais il se développe le plus souvent vers 60 ans. Près de la moitié des cas de cancer du sein sont diagnostiqués entre 50 et 69 ans. Ce cancer peut également survenir chez les hommes, mais il est très rare (moins de 1 % des cas de cancer) [2]. C'est avant tout un vrai problème de la santé publique, il est le premier cancer à toucher les femmes et la principale cause de décès par cancer chez les femmes dans le monde. [3]

Le cancer du sein est une maladie complexe qui nécessite une approche de traitement personnalisée, les options de traitement varient en fonction du type de cancer du sein de sa localisation, de stade et grade du cancer, de l′âge et état de santé générale de la patiente et d′autres facteurs. La radiothérapie joue un rôle important dans le traitement du cancer du sein. Après une mastectomie, l'efficacité de la radiothérapie a été confirmée par de nombreux essais randomisés et méta-analyses. Son efficacité est constante quel que soit l'âge ; Elle est plus évidente en cas de facteurs significatifs de récidive locorégionale, notamment l'invasion ganglionnaire axillaire. En général, la radiothérapie réduit le nombre de récidives locales de 60 à 70 %, mais augmente également la probabilité de survie à long terme de 8 à 9 %. Après une chirurgie conservatrice, la radiothérapie peut réduire le taux de récidive locale après 10 ans de 20-25 % à 5-8 %. De nombreux essais randomisés et méta-analyses ont confirmé ce fait [4]. Le but principal de la radiothérapie externe est de détruire les cellules cancéreuses tout en minimisant les dommages aux tissus sains environnants.

Le parcours de soins du patient en radiothérapie externe est divisé en 5 phases principales au cours là où différents acteurs interviennent. Tout d'abord, nous retrouvons la consultation pré-traitement, elle est réalisée par un radiothérapeute, et le volume cible est ensuite obtenu à partir d'une imagerie réalisée par des manipulateurs, la planification de dose et des séances par travail collaboratif des physiciens, dosimétristes et radiothérapeutes. La phase de traitement elle-même consiste en une série de séances de radiothérapie réalisées par des manipulateurs en électroradiologie et enfin suivi post-traitement [5].

Introduction

Ces dernières années, la radiothérapie est devenue un traitement essentiel, il a souligné son rôle dans les soins des tumeurs du sein à un stade précoce et cas de maladie localement avancée ou métastatique. Le développement des technologies de radiation a permis d′établir de véritables progrès dans les traitements prodigués aux patients aujourd'hui. Il y a une vingtaine d'années, la radiothérapie est passée de la bidimensionnelle à la tridimensionnelle et plus récemment à la thérapie par modulation d'intensité (IMRT) et à la thérapie par modulation volumétrique (VMAT), permettant des traitements plus conformationnels [6]. Les avancées technologiques en radiothérapie visent à minimiser les effets secondaires tout en améliorant l′efficacité du traitement.

Cette étude aborde deux techniques dans le traitement du cancer du sein : la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RC-3D) et la radiothérapie à intensité modulée (IMRT). La technique de la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle utilise des faisceaux de radiation conformes à la forme de la tumeur, elle permet de délivrer une dose élevée à la tumeur tout en réduisant l′exposition des tissus sains avoisinants mais elle peut être limitée dans les cas où la tumeur est proche d′organes critiques .La radiothérapie avec modulation d′intensité IMRT est une technique plus avancée, elle offre une plus grande précision dans la distribution de la dose, permettant de délivrer une dose plus élevée à la tumeur tout en préservant les organes à risque OAR .

La comparaison entre les deux techniques s′intéresse non seulement à la précision de la dose administrée au volume tumoral cible, mais aussi aux doses reçues par les organes à risque voisins (les poumons, le cœur). Le but de cette étude est d′évaluer quelle technique offre un meilleur rapport risque-bénéfice en termes d′efficacité thérapeutique et de réduction des effets secondaires pour les patientes atteintes de cancer du sein.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre sur la notion du cancer et son traitement. Le deuxième chapitre décrit la radiothérapie externe et sa procédure dans traitement du cancer du sein. Le troisième chapitre précise le matériels et les méthodes sur lesquels nous nous sommes appuyés dans l′aspect pratique de ce travail. Le quatrième chapitre présente l′analyse des résultats obtenus et la comparaison de l′IMRT et la 3D-CRT. Enfin nous avons une conclusion.

Chapitre I : Généralités sur le cancer du sein

Introduction :

Le cancer du sein, comme le suggère son nom, se trouve dans l'organe humain appelé le sein. Elle résulte d'un défaut dans certaines cellules qui se multiplient pour former une masse appelée tumeur. Il existe différents types qui ne se développent pas de la même manière : certains sont « agressifs » et se développent très rapidement, d'autres se développent lentement. Le cancer du sein peut prendre plusieurs mois, voire plusieurs années, à se développer.

Dans ce chapitre nous posons l′objectif de l′étude et nous discuterons également du cancer du sein sous plusieurs aspects, dont les plus importants sont : la définition de la maladie, ses symptômes, les facteurs de risque qui y conduisent, comment la diagnostiquer et la détecter et sur les méthodes et les techniques de son traitement.

1. Définition du cancer :

19,3 millions de nouveaux cas de cancer sont diagnostiqués chaque année dans le monde et près de 10 millions de personnes meurent chaque année de cette maladie selon les dernières données de l′organisation mondiale de la santé (OMS). Le cancer est ainsi l′une des principales causes de maladie et de décès dans le monde. Ces chiffres résument l′énorme fardeau que représente le cancer dans la société contemporaine [1].

Au départ, le cancer n'est qu'une simple cellule qui ne parvient pas à copier ses gènes lorsqu'elle se divise. Chaque fois que l'ADN d'une cellule est copié pour créer une autre cellule certaines erreurs s'accumulent. Quelques erreurs n'ont aucune conséquence, d'autres ont des conséquences mineures. Certains d'entre eux modifient suffisamment la forme des protéines pour les rendre moins efficaces (ce qui explique en partie le déclin des performances avec l'âge). D'autres permettent aux cellules cancéreuses de commencer à se développer.

Ce phénomène est en réalité très courant dans nos cellules, qui sont au nombre d'environ 100 000 milliards. Chaque jour, nous subissons entre 500 000 et un million de lésions génétiques dans nos cellules. Lorsque tout va bien, ces lésions se résorbent rapidement grâce aux systèmes de réparation de l'ADN. Le problème est que ces systèmes se détériorent avec l'âge, mais aussi avec la pollution, la malnutrition, les infections chroniques, etc. Si elles ne sont pas traitées, ces lésions deviennent des mutations et entraînent un risque de propagation incontrôlée appelée métastase. Il s'agit d'un cancer : un clone d'une seule cellule, ou dans de rares cas de plusieurs cellules, aux mécanismes de régulation défaillants, qui va se multiplier et

se modifier jusqu'à se transformer en un autre organisme, une sorte "d′alien" qui parasite l'organisme d'origine et détourne ses ressources à son propre avantage, jusqu'à sa mort [2].

Pour comprendre plus précisément le développement du cancer du sein, jetons un œil à l′anatomie.

2.Objet de l′étude :

Dans le monde, environ un million de femmes reçoivent un diagnostic de cancer du sein chaque année et le nombre de décès dus à cette maladie est susceptible de dépasser 410000 femmes. Ce qui fait du cancer du sein la principale cause d′incidence et de décès chez les femmes [3].

Nouvelles techniques de radiothérapie améliorent la distribution de la dose au sein du volume tumoral en réduisant l′exposition aux organes à risque. Leur développement est florissant dans le cancer du sein en cadre adjuvant en utilisant des techniques de radiothérapie conformationnelle à intensité modulée. Mais aussi en cadre oligométastatique en utilisant des techniques de radiothérapie stéréotaxique, pour les tumeurs cérébrales et les tumeurs extracérébrales. Cependant, leur place dans la prise en charge du cancer du sein reste controversée [4].

Le but de notre étude est de réaliser une comparaison dosimétrique entre la technique RC-3D et IMRT dans le cas de cancer du sein, afin d′avoir une meilleure précision de la dose au niveau de volume tumoral cible, tout en minimisant l′exposition aux tissus sains voisins.

3. Anatomie du sein :

Les seins sont deux organes supplémentaires du système reproducteur féminin. Ils commencent à se développer à la puberté et réagissent aux changements hormonaux dans le corps notamment à l'augmentation des niveaux d'œstrogène et de progestérone. Les femmes plus jeunes ont tendance à avoir des seins plus denses, avec plus de tissu glandulaire, que les femmes plus âgées [5].

Les seins situés dans la partie antéro - supérieure du thorax de chaque côté de sternum en avant des muscles pectoraux et en face de l′espace, entre la troisième et la septième côte. Cette position dépend de la forme et du type thoracique.

Les seins sont en lien vers l′avant avec le plan cutané et vers l′arrière avec le plan musculo – fascial et thoracique.

Les moyens de fixités de sein représentés par les éléments suivants :

- Les ligaments suspenseurs, la glande mammaire est enveloppée par les fascias pré et rétro mammaire attachés par de nombreux septa qui traversent et séparent la glande. Les septums fibreux mieux développés dans la partie supérieure et postérieure de la glande forment les ligaments suspenseurs du sein.
- La peau, elle a des connexions avec le fascia pré mammaire qui la doublent. Cette coopération est si restreinte que les mouvements de la peau et la glande sont indissociables.

Le revêtement cutané du sein comprend trois zones :

- **La zone périphérique** : elle est douce, flexible et lisse au toucher. Cette zone contient le tissu cellulo – graisseux pré mammaire.
- **La zone moyenne** : l′aréole est pigmentée et circulaire d′environ 35 à 50 mm de diamètre. Le degré de pigmentation varie selon la race, cette pigmentation s′intensifie et s′étend pendant la grossesse et prend une forme granuleuse grâce aux grosses glandes sébacées. Les glandes deviennent plus grosses pendant la grossesse. Cette zone est bordée par le muscle aréole (muscle peaucier).
- **La zone centrale** : le mamelon occupe le centre de l′aréole où la pigmentation est similaire à celle de l′aréole. Cette zone contient des canaux galactophores et entourée de fibres élastiques et de fibres musculaire [6].

La glande mammaire est une glande exocrine, paire et lobée, dont la forme varie selon le sexe et le stade de la vie génitale. Il se développe chez les femmes au début de la puberté et consiste en une masse grossièrement circulaire de tissu glandulaire située sur la surface antérieure de la partie externe du muscle grand pectoral. Il est constitué de 15 à 20 lobes, séparés par du tissu graisseux et du tissu conjonctif, qui contribuent à soutenir le sein, avec la peau. Les lobes sont divisés en lobules et en alvéoles.

Le sein contient de nombreux vaisseaux sanguins et lymphatiques. Les vaisseaux lymphatiques collectent la lymphe et la transportent du sein vers de petites masses de tissu lymphatique en forme de haricot appelées ganglions lymphatiques, qui entourent la région du sein. Les vaisseaux et les ganglions lymphatiques font partie du système lymphatique, qui aide à lutte contre les infections. Plusieurs groupes de ganglions lymphatiques drainent la lymphe de chaque sein. Ils se trouvent des deux côtés du corps (ganglions lymphatiques sous-claviculaires et ganglions lymphatiques mammaires internes) [5].

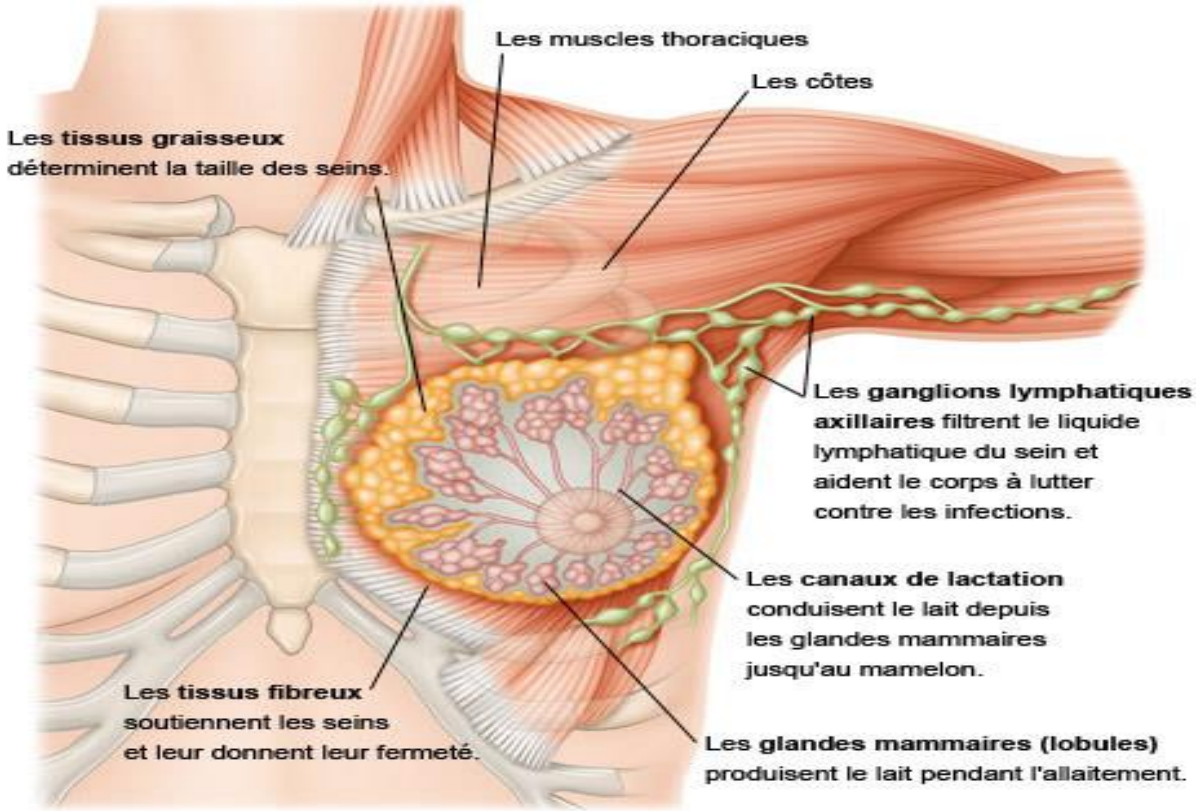


Figure 1: Anatomie du sein [7]

4. Le cancer du sein :

Le cancer du sein est une croissance relativement indépendante d′un tissu nouvellement formé au niveau de la glande mammaire. Il est possible que ce soit un carcinome qui se développe au détriment de l′épithélium des canaux galactophores et lobules, le sarcome se développe au détriment du tissu conjonctif [6]. Les tumeurs cancéreuses rongent tout ce qui les entoure via le système lymphatique et atteignent des organes tels que le cerveau, les poumons et le foie.

On pense que le cancer du sein touche uniquement les femmes, mais environ 1 % des cancers du sein surviennent chez les hommes. Les hommes ont une petite quantité de tissu derrière le mamelon et même si elle n'est pas aussi grande que chez les femmes, un cancer peut néanmoins survenir. Peu d'hommes sont conscients de cette maladie, elle est donc généralement diagnostiquée plus tard que chez les femmes. En conséquence, le cancer du sein masculin est généralement plus avancé au moment du diagnostic et donc plus difficile à traiter [8].

5. Les types du cancer du sein [8] :

5.1. Le cancer du sein non – infiltrant (in situ) :

Le cancer du sein non infiltrant (in situ) fait référence au cancer qui est toujours présent dans le conduit du lait et/ou les lobules du sein. En d'autres termes, le cancer n'a pas envahi les parois des canaux galactophores ou des lobules ; Il a été divisé en deux types : CCIS et CLIS.

- Le cancer canalaire in situ (CCIS), également appelé carcinome intracanaliaire, fait référence aux cellules cancéreuses qui se sont formées dans les canaux galactophores et restent confinées dans cet espace. Les canaux se bouchent et s'élargissent en raison de l'accumulation de cellules cancéreuses à l'intérieur. Le calcium a tendance à s'accumuler dans les canaux obstrués et apparaît sur les mammographies.
- Le cancer lobulaire in situ (CLIS) fait référence aux cellules cancéreuses qui se sont formées dans les glandes mammaires et restent confinées dans cet espace. Ce type de cancer est le plus souvent observé chez les femmes pendant la ménopause. Le CLIS diffère du CCIS, car ce dernier présente un risque plus élevé, tous les tissus des deux seins peuvent devenir cancéreux. Par conséquent, le traitement du CLIS doit cibler les deux seins.

5.2. Le cancer du sein infiltrant :

Le cancer du sein infiltrant fait référence aux cellules qui se sont développées à travers les parois des canaux galactophores et des glandes dans le tissu adipeux normal du sein. Les cellules continuent de croître, ce qui donne naissance à une masse. Il peut ensuite métastaser par la circulation sanguine ou les vaisseaux lymphatiques vers d'autres parties du corps. Les principaux types de cancer du sein infiltrant sont les suivants :

- Le cancer canalaire infiltrant (CCI) est le plus courant et est également appelé adénocarcinome infiltrant.
- Le cancer lobulaire infiltrant (CLI) : moins fréquent et difficile à diagnostiquer à la mammographie, il comporte un risque légèrement plus important dans les deux seins.

Il existe d'autres types de cancer du sein que nous pouvons rencontrer (cas rares) : cancer mucineux (colloïde), cancer médullaire, cancer papillaire, cancer tubulaire, cancer adénoïde kystique, cancer apocrine juvénile, cancer apocrine, cancer épidermoïde avec métaplasie, cancer à cellules fusiformes avec métaplasie, chondrosarcome et cancer osseux avec métaplasie, cancer avec métaplasie mixte, maladie de Paget du mamelon.

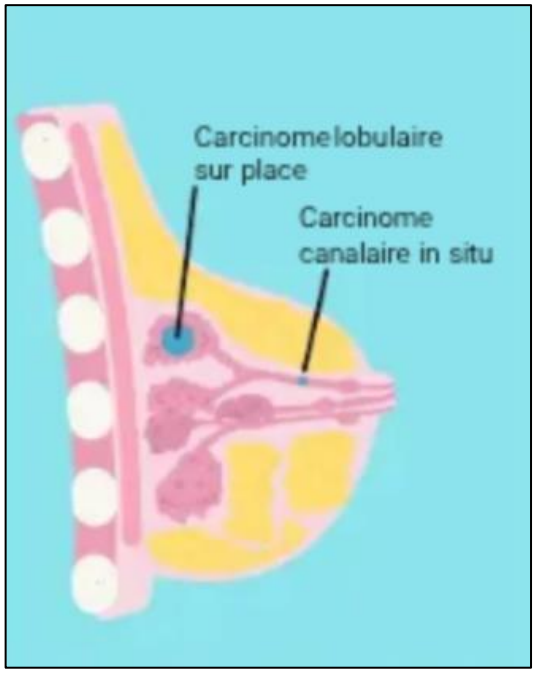


Figure 2: Cancer du sein non-infiltrant [2]

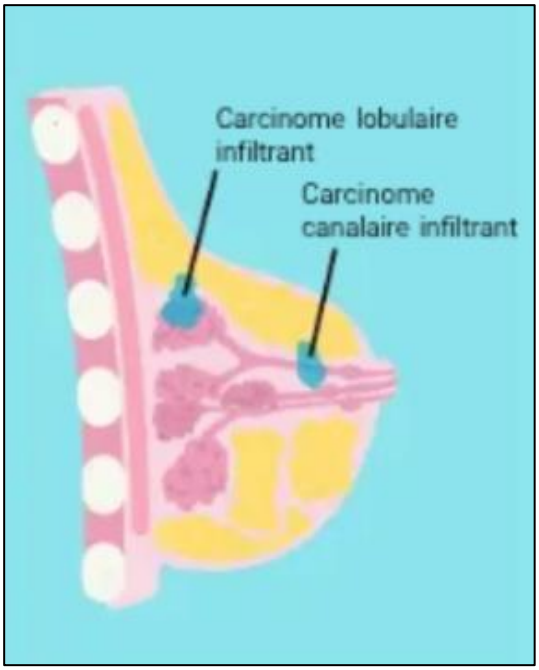


Figure 3: Cancer du sein infiltrant [2]

6. Classification des cancers de sein :

T	T1:tumeur <2cm dans sa plus grande dimension	T1mic: micro-invasion<0,1cm
		0,1cm < T1a< 0.5 cm
		0.5 cm < T1b ≤1 cm
		1cm< T1c <2cm
	2cm < T2 < 5cm dans sa plus grande dimension	
	T3 > 5cm dans sa plus grande dimension	
	T4 : toute taille avec	T4a: extension à la paroi thoracique
		T4b: extension à la peau
		T4c :T4a+T4b
		T4d : tumeurs Inflammatoires
N	N0: pas d'envahissement ganglionnaire	
	N1:adénopathies axillaires homolatérales suspectes mobiles	
	N2	N2a: ganglions axillaires homolatéraux fixés
		N2b: ganglions mammaires internes sans adénopathie axillaire
	N3	$N3_a$:ganglions suspects sous-claviculaires et axillaire
		N3b: ganglions axillaires et mammaires internes homolatéraux
		N3c:ganglions sus-claviculaires homolatéraux suspects
N	N1 :1-3 a adénopathies	
	N2 :4-9 adénopathies	
	N3 :10 adénopathies et plus	
M	M0: pas de métastases retrouvées	
	M1: métastases (adénopathies sus-claviculaires incluses)	

Tableau 1 : Classification des cancers des seins [9]

Cette classification est basée principalement sur trois lettres : T, N et M. Il s'agit d'un système de classification des cancers en fonction de leur anatomie. La première lettre correspond à l'invasion de la tumeur primaire, tandis que la deuxième lettre indique une attaque des ganglions lymphatiques, et la dernière lettre, M, indique la présence ou l'absence de métastases.

Selon la classification TNM, les différentes stratégies suivantes peuvent être choisies :

- La chirurgie
- La radiothérapie
- Les traitements médicamenteux (chimiothérapie, hormonothérapie, thérapies ciblées)

Ces traitements peuvent être appliqués seuls ou en combinaison les uns avec les autres. Leurs choix font l'objet d'une consultation multidisciplinaire, avec au moins trois médecins de spécialités différentes et d'autres professionnels de santé réunis pour déterminer l'approche à adopter pour assurer sa prise en charge, en tenant compte des spécificités de la patiente et des résultats de ses examens [9].

7. Les symptômes du cancer du sein :

Les symptômes les plus courants associés au cancer du sein sont :

- L′autopalpation ou l′hétéropalpation d′une bosse dans le sein et /ou l′aisselle,
- Une invagination inconnue du mamelon précédemment
- Écoulement sanglant du sein.
- Une mastite et des ulcères cutanés
- L'apparition de fossettes ou de plis sur la peau
- Modification de la taille ou de la forme du sein.
- Un aspect de la peau ressemblant à une peau d′orange.
- Douleur localisée

Á un stade évolué, les symptômes sont associés à des métastases à distance : osseuses, pulmonaires et cérébrales. Une détérioration de l′état général est constante [10] [11].

8. Les facteurs de risque du cancer du sein :

Le cancer de sein est une maladie multifactorielle, dans laquelle interagissent les prédispositions génétiques, l′environnement, la nutrition et d′autres facteurs de risque liés au mode de vie. L′identification des facteurs de risque exploitables et une meilleure compréhension des mécanismes biologiques impliqués faciliteront la mise en œuvre de stratégies de prévention efficaces [12].

8.1. Les principaux facteurs favorisants :

- Les antécédents familiaux : ils sont faciles à identifier pour le généraliste, si la mère ou la sœur de la patiente est atteinte d′un cancer du sein, ce risque est doublé par deux ou trois. Ce risque accru est dû à des causes génétiques ou environnementale.
- Les femmes porteuses d′un ou plusieurs gènes qui les prédisposent au cancer du sein héréditaire : BRCA1 et 2 voire 3. Le risque relatif est de 10.
- Les antécédents personnels de maladie du sein : les niveaux de risque les plus élevés semblent être associés à la maladie des fibromes kystiques associée à une hyperplasie proliférative avec dysplasie cytologique élevée, en particulier si la femme est jeune. Ce n′est pas le cas de l′adénofibrome de la dysplasie kystique simple.
- Une longue vie reproductive expose à un risque augmenté (les pubertés précoces et les ménopauses tardives)

8.2. Les facteurs favorisants secondaires :

- Les facteurs liés à la reproduction : ce sont les plus connus depuis longtemps, les femmes à naître et les femmes ayant accouché leur premier enfant après 35 ans présente un risque quatre fois plus élevé de développer un cancer du sein supérieur aux multipares. L′œstrogène aura un rôle simulant, tandis que la progestérone au contraire aura un rôle préventif.
- Les femmes qui souffrent d′infertilité en raison d′un arrêt de l′ovulation ont un risque cinq fois plus élevé de développer un cancer du sein plus élevé que chez les femmes souffrant d′infertilité tubaire. En revanche les femmes castrées ont un tarif plus bas, les effets des contraceptifs à base d′œstrogènes sont débattus.
- Les traitements substitutifs de la ménopause : ce risque croît avec la durée du traitement, l′ajout de progestérone à l′œstrogène ne protège pas contre le cancer.
- Le niveau socio-économique : les femmes ayant un niveau de vie élevée sont deux fois plus susceptibles de développer cette maladie, le stress peut être la cause d′un

dysfonctionnement ou d′une déficience de l′ovulation et d′une carence en progestérone mais aussi le rôle des facteurs nutritionnels dans la consommation des graisses, des protéines, des boissons alcoolisées et de tabac.

- La présence d′un cancer du côlon, de l′endomètre : représente également un facteur de risque [6].

9. Dépistage et diagnostic du cancer du sein :

Avant de faire un dépistage du cancer du sein le plus significatif est de définir pour chaque femme les caractéristiques de son tissu mammaire et la structure de ces seins à divers moments. Le dépistage du cancer du sein est : un ensemble d′examens et de tests visant à vérifier l′existence de tumeur dans le sein. Cet examen consiste à utiliser une mammographie qui est considérée en tant que la méthode la plus exacte pour la détection précoce du cancer du sein. Ce dépistage est effectué afin de diminuer le taux de mortalité par cancer du sein et de réduire les traitements par ablation (mastectomie) [13]. Grâce à un dépistage régulier du cancer du sein, les petits cancers peuvent être détectés à un stade précoce avec de meilleures chances de guérison. Lorsque le cancer du sein est diagnostiqué avec une taille inférieure à 1 cm et sans atteinte ganglionnaire, le taux de survie à 5 ans pour les femmes est de 90 %. De grandes études montrent une réduction de 16 à 30 % des taux de mortalité par cancer du sein grâce au dépistage systématique [5].

9.1. L′auto- palpation [2] :

Il est très facile d’effectuer un auto-examen des seins tous les mois après la fin de vos règles. Placez-vous devant un miroir et assurez-vous qu'il n'y a aucun défaut. Levez votre bras droit et sentez votre sein avec les doigts de votre main gauche. Faites des petits cercles. N'oubliez pas non plus de vérifier toute la zone entre votre sein et votre aisselle. Enfin, vérifiez votre mamelon et appuyez doucement dessus pour vous assurer qu’il n’y a pas d’écoulement.

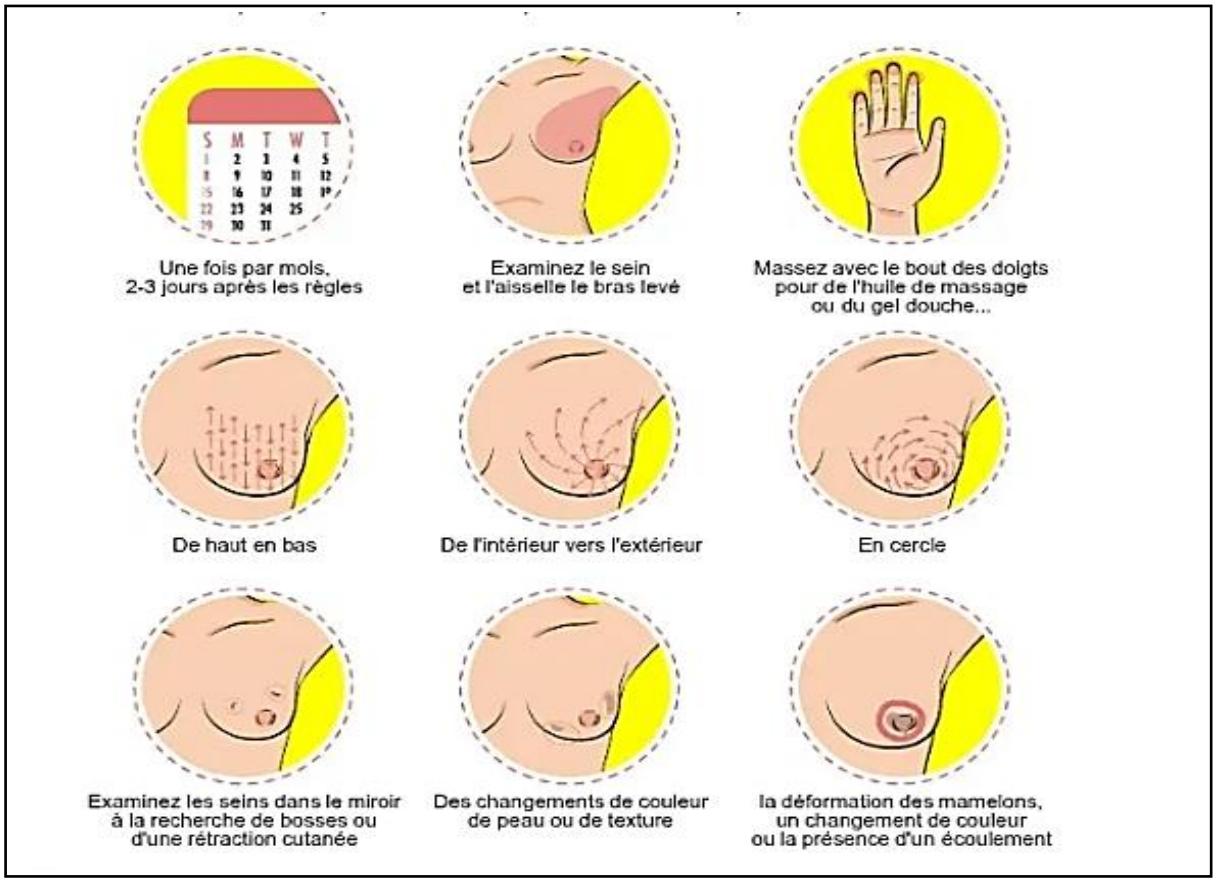


Figure 4 : Les étapes de l'autopalpation [2]

9.2. Les examens cliniques :

L'autopalpation est la première forme d'examen, mais elle n'est pas suffisante ; Un examen clinique par un médecin généraliste, un gynécologue ou une sage-femme est recommandé chaque année à partir de 25 ans. Des examens plus approfondis peuvent ensuite être réalisés.

- **La mammographie :** Les seins sont placés sur la plateforme de l'appareil radiographique et comprimés pendant 10 à 15 secondes entre les plaques pour obtenir une meilleure image. Deux radiographies ont été prises de chaque sein (horizontale et oblique). C'est un peu inconfortable mais très rapide.
- **L′échographie :** Le même principe est utilisé dans l'échographie de grossesse. Un gel est appliqué sur les seins et un radiologue les examine à l'aide d'une sonde d′échographie pendant 5 à 10 minutes. C'est indolore.
- **La biopsie :** Sous anesthésie locale, un morceau de tissu est retiré de l'anomalie à l'aide d'une aiguille passée à travers la peau. Si l'anomalie est visible à l'échographie, la

biopsie dure 20 à 30 minutes. Si elle n'est visible que sur une mammographie, l'examen dure une heure. C'est indolore grâce à l'anesthésie [2].

Figure 5 :

L'appareil de mammographie [14]

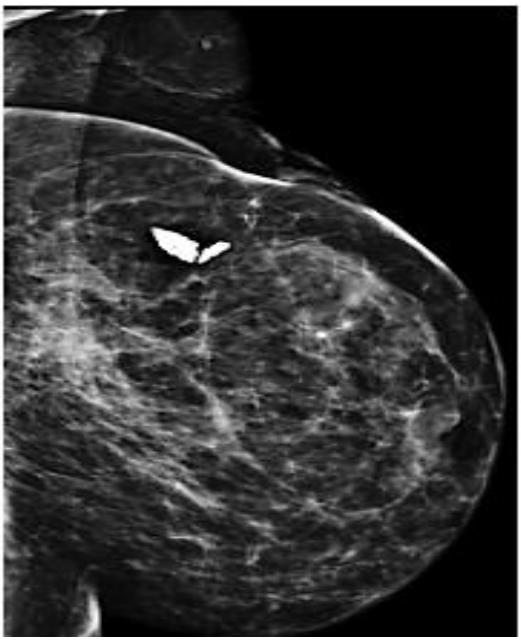


Figure 6 :

Mammographie du sein [15]

- **L'IRM mammaire :** L'IRM n'est jamais prescrite en première intention, ses indications sont limitées :

➢ Description d'une image écho- mammographique difficile à interpréter.

➢ Détecte d'une lésion mammaire en présence d'adénopathie axillaire sans anomalie écho-mammographie.

➢ En cas d'un carcinome lobulaire invasif (multifocalité et multicentricité et bilatéralité).

➢ Risque génétique (mutation BRCA).

➢ En cas de suspicion de récidive de la maladie.

➢ Évaluation de la réponse après chimiothérapie néo adjuvante pour traitement conservateur.

➢ Femme jeune avant 40ans [16].

10. Traitement du cancer du sein :

Le cancer du sein est fréquemment cité en tant qu'exemple de pluridisciplinarité en cancérologie, car il nécessite souvent une combinaison de traitements chirurgicaux, de radiothérapie et médicaux notamment la chimiothérapie, l'hormonothérapie et éventuellement des thérapies ciblées.

Les facteurs ou paramètres suivants nous permettent de proposer un schéma de traitement le mieux adapté possible :

- Le type de cancer, déterminant s'il est invasif ou non.
- La détermination de son origine (canalaire ou lobulaire).
- La détermination de son grade SBR.
- L'existence ou l'absence de récepteurs à la progestérone.
- L'existence ou l'absence d'une surexpression d'une protéine de la famille des récepteurs des facteurs de croissance, nommée HER2 ou C-erb2 B2.
- L'âge de la patiente et ses antécédents de santé [15].

Les traitements possibles pour le cancer du sein peuvent inclure :

10.1. Traitements médicaux :

Les traitements médicaux dépendent des caractéristiques ci-dessus et peut être néoadjuvants (curatifs) ou adjuvants (auxiliaires) :

10.1.1. La chimiothérapie et l'immunothérapie :

Généralement, la chimiothérapie est prescrite pour les tumeurs avec des ganglions lymphatiques positifs ou si le diamètre est supérieur à 0,5 ou 1 cm sans ganglions lymphatiques positifs. Chez les femmes ménopausées atteintes d'un cancer du sein RE- positive, RP- positive, HER2- négative ou atteinte ganglionnaire minimale, des tests génomiques tumoraux sont effectués pour aider à guider le traitement et peuvent déterminer le risque de récidive. La chimiothérapie commence environ 8 à 12 semaines après la chirurgie et peut inclure les médicaments suivants : docétaxel et cyclophosphamide pendant 12 semaines, ou doxorubicine et cyclophosphamide suivis de pactitaxel pendant 16 à 20 semaines. Pour les patientes atteintes d'un cancer du sein HER2- positif, triple négatif ou présentant un cancer résiduel au moment de la chirurgie. En plus de la chimiothérapie néoadjuvante, des séances de chimiothérapie

supplémentaires peuvent être administrées après la chirurgie à l′aide de la capécitabine en cas de cancer du sein triple négatif et le trastuzumab emtansine en cas de HER2 positif.

L′immunothérapie est utilisée dans le traitement du cancer du sein triple négatif, où elle est administrée comme traitement néoadjuvante avec la chimiothérapie. [17]

10.1.2. La thérapie ciblée :

Les patientes atteintes d′un cancer du sein HER2 positif peuvent recevoir du trastuzumab, un anticorps qui bloque les récepteurs HER2. Il est administré toutes les trois semaines pendant un an, après une chimiothérapie à base d′anthracycline est initiée. Dans le cas de cancer du sein à haut risque, on utilise le pertuzumab, qui cible également HER2 et peut être prise en même temps que le trastuzumab. [17]

10.1.3.L′hormonothérapie :

Son nom prête à confusion : il vaut mieux parler d′anti-hormonothérapie, car elle n′agit qu′en présence de récepteurs hormonaux (RH). Ce qui définit la tumeur comme hormonosensible, elle n′est donc prescrite que lorsque les récepteurs hormonaux sont présents et vise à inhiber l′effet mimétique des hormones féminines (estrogènes, progestérone) sur la tumeur. Elle peut également être utilisé avant ou à la fin d′autres traitements, c′est-à-dire après que la patiente a terminé son traitement à l′hôpital. Elle est le plus souvent administré par voie orale [15].

10.2. La chirurgie :

L′étape chirurgicale est une composante essentielle du contrôle local et régional de la maladie avec résection curative de la tumeur avec des marges saines associée à une évaluation à distance de la maladie par exploration axillaire. Cette phase chirurgicale a un rôle thérapeutique primordial, mais elle joue également un rôle diagnostique et pronostique. Elle s′inscrit dans une vision globale des soins qui inclut notamment les acteurs des soins de support. Il y a deux types d′opération :

- La mammectomie radicale : il s′agit d′une ablation totale du sein.
- La tumorectomie : il s′agit de l′ablation de la tumeur et d′une partie des cellules saines qui l′entourent.

Les soins chirurgicaux découlent d′un équilibre entre quatre éléments : les connaissances scientifiques, la prise en compte du patiente, la prise de décision médicale partagée et les

connaissances techniques. Si l′un de ces piliers est affaibli, c′est tout le système qui perd son importance [15] [2].

10.3. La radiothérapie :

Ce type de traitement du cancer du sein utilise des rayons de très haute énergie capable de détruire les cellules cancéreuses. Comme la chirurgie, la radiothérapie est un traitement local du cancer du sein ; elle agit directement sur la zone affectée par les cellules cancéreuses. Elle est utilisée en fonction de la situation pour :

- Réduire le risque de récidive locale après une intervention chirurgicale.
- Permettre de conserver le sein dans les meilleures conditions.
- Traitement direct de la tumeur lorsque la chirurgie n'est pas possible.
- L'irradiation de diverses zones ganglionnaires autour du sein lors d'une dissection chirurgicale des ganglions lymphatiques montre la présence de plusieurs ganglions lymphatiques envahis. [18]

10.3.1. Les techniques d′irradiation :

- **La radiothérapie externe :** Le rayonnement est produit par un appareil situé à l'extérieur du corps et ne nécessite généralement pas d'hospitalisation. La radiothérapie est administrée 5 jours par semaine, pendant plusieurs semaines consécutives. Dans certains cas particuliers, une radiothérapie peut être administrée pendant l'intervention chirurgicale (technique dite du Mobetron).
- **La radiothérapie interne :** La source de rayonnement est placée dans des tubes minces qui sont implantés temporairement dans le sein. Ce type de radiothérapie nécessite un séjour à l'hôpital de plusieurs jours. [18]

10.3.2. Les effets secondaires de la radiothérapie [19] :

10.3.2.1. Effets aigus :

Effets locaux au niveau de la glande mammaire :

- Douleur, œdème, tiraillement, prurit.
- Radioépithélite – Érythème : De la troisième à la quatrième semaine (lors des traitements normofractionnés) notamment dans les zones pileuses, l'effet doit être davantage recherché si le volume est important et/ou si des facteurs favorisants.

Œsophagite En cas de traitement des aires ganglionnaires.

Un effet secondaire aigu inhabituel pour la dose reçue et le site traité chez le patient doit inciter à rechercher un facteur contributif (tabac), une erreur de mesure de dose ou du site traité, ou un syndrome d'hypersensibilité.

10.3.2.2. Effets tardifs :

Sur le plan clinique :

- Cutané : Télangiectasie – fibrose sous cutané, lymphœdème lors d′une irradiation de la région axillaire
- Pulmonaire : Fibrose pulmonaire – un cas rare de pneumopathie radique ou immunoallergique
- Cardiaque : un cas rare de péricardite, troubles du rythme, fibrose myocardique, syndrome coronarien selon le côté irradié
- Effets très rares et exceptionnels : comme le risque de cancers radio-induits.

Des modifications post radiques peuvent être visibles sur les examens d′imagerie :

- Immédiatement après la radiothérapie : œdème et réaction inflammatoire, avec épaississement de la peau, tissu sous-cutané dense et épaississement du tissu conjonctif - tendant à régresser en quelques mois.
- A distance de la radiothérapie : fibrose possible avec épaississement et condensation du tissu conjonctif mammaire et/ou pulmonaire, nécrose des cellules mammaires et/ou rétrécissement sous-cutané.

Conclusion :

L′objectif recherché est d′obtenir une gestion optimale de la maladie en produisant le minimum d′effets secondaires liés au traitement. La radiothérapie externe, est l′une des méthodes les plus utilisées pour traiter cette maladie. Les deux techniques proposées dans cette étude sont : La radiothérapie conformationnelle trois dimensions (RC-3D) et la radiothérapie par modulation d′intensité des faisceaux (IMRT).

Chapitre II : La radiothérapie externe et sa procédure de traitement

Introduction :

La radiothérapie fait partie intégrante du traitement du cancer du sein adjuvant et métastatique, elle est associée à la chirurgie, à la chimiothérapie, à l′hormonothérapie et aux thérapies ciblées. Elle repose sur l′utilisation des rayonnements ionisantes pour détruire les cellules cancéreuses.

Dans ce chapitre nous parlons de la radiothérapie en général et de ses types. Nous aborderons ensuite la radiothérapie externe sous plusieurs aspects, sa définition, ses types en particulier la radiothérapie avec l′accélérateur linéaire. Nous fournirons également une description simple de l′accélérateur linéaire, le considérant comme un outil essentiel dans ce type de radiothérapie. Ensuite, nous aborderons les principes de la radiothérapie conformationnelle 3D et la radiothérapie à modulation d′intensité. Après, nous discuterons des études et des résultats précédents qui ont comparé les deux techniques (RC-3D et IMRT). Enfin nous parlons des indications de la radiothérapie dans le cancer du sein et nous présenterons la procédure de la radiothérapie adjuvante du cancer du sein**.**

1.Histoire de la radiothérapie :

En 1895, Röntgen découvre les rayons X. Dès lors, des services de radiologie ont été progressivement mis en place dans les hôpitaux à partir de 1897. Puis, à partir de 1900, les premières tentatives ont été faites pour traiter les patients au radium et aux rayons X, notamment les patients atteints de cancer. En 1898, Pierre et Marie Curie découvrent le radium et le polonium. Le radium a été utilisé pour la première fois en radiothérapie locale chez les patients atteints d'un cancer de la peau. Puis sont venus les traitements du col de l'utérus, les traitements des tumeurs du sein, du nez, des oreilles et de la gorge à l'aide d'aiguilles. La découverte de la radioactivité artificielle en 1934 par Irène et Frédéric Joliot-Curie entraîne l'abandon progressif du radium au profit d'éléments radioactifs artificiels, moins coûteux et plus faciles à utiliser. Ensuite, grâce au remplacement des aiguilles au radium par des fils en iridium-192, les conditions de la curiethérapie seront complètement modifiées, tout en améliorant simultanément l'efficacité du traitement. À la fin des années 1950, la nouvelle utilisation des rayonnements à haute énergie, émis par les appareils de téléthérapie au cobalt, a révolutionné la radiothérapie. À la fin des années 1960, apparaissent les accélérateurs linéaires de particules (électrons, protons, etc.), plus efficaces que le cobalt. En 1973, l'invention du scanner par Hounsfield permet de planifier les traitements de radiothérapie en trois dimensions. Ensuite,

l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et de la tomographie par émission de positons (TEP) permettra de mieux définir le volume cible.

Aujourd'hui, la radiothérapie conformationnelle est la plus utilisée, utilisant 4 à 6 directions de faisceaux et des caches multilames pour mieux adapter le champ irradié à la taille de la tumeur et minimisant ainsi l′exposition aux tissus sains. Les nouvelles techniques de radiothérapie guidée par l'image (IGRT) permettent un contrôle précis de la tumeur cible pendant le traitement, grâce à l′obtention d′images volumétriques 3D. La radiothérapie conformationnelle par modulation d'intensité (RCMI), permet de moduler l'intensité du faisceau de rayonnement pour délivrer des doses plus élevées à la tumeur tout en épargnant les tissus sains. La radiothérapie à arc modulé volumétrique (VMAT), emploie une modulation d'intensité délivrée par un ou plusieurs arcs à 360 degrés et une radiothérapie conformationnelle guidée par l'image. Cette technique offre une meilleure qualité de traitement, en particulier pour les tumeurs complexes. La radiothérapie stéréotaxique (SRS/SBRT), utilisée pour traiter les petites tumeurs ou les métastases avec une extrême précision, cette technique délivre une dose très élevée en quelques séances seulement.

L′ hadronthérapie, utilisant des particules lourdes comme les ions du carbone, les protons et les neutrons cette technique est étudiée pour son potentiel dans le traitement des tumeurs capables de résister aux radiations conventionnelles. La protonthérapie, cette technique utilise des protons au lieu de photons pour traiter les tumeurs. Les protons présentent l'avantage de délivrer leur énergie directement à la tumeur diminuant ainsi la dose aux tissus environnants ceci est particulièrement utile pour les traitements requérant une précision extrême. Afin d'améliorer la précision du traitement, la radiothérapie utilise aujourd′hui des techniques de plus en plus complexes, nécessitant des équipements sophistiqués et des procédures de dosimétrie complexes. Pour cette raison, ces nouvelles techniques visent à traiter les tumeurs dont la localisation ne permet pas l′application de la radiothérapie conformationnelle (classique). Plusieurs essais cliniques sont en cours afin d′ évaluer l'efficacité et la tolérance de ces traitements. [1]

2. Définition de la radiothérapie :

La radiothérapie est définie comme la spécialité médicale qui utilise les rayonnements ionisants comme agent thérapeutique dans le but de guérir ou d′atténuer la maladie en empêchant la capacité des cellules cancéreuses à se multiplier. De cela nous pouvons dire que la radiothérapie fait partie intégrante du processus de traitement curatif ou palliatifs. Elle permet de délivrer une

dose précise et homogène de rayonnement ionisant à la tumeur et à ses extensions visibles ou présumées (volume cible), dose suffisante et nécessaire pour obtenir un contrôle local. Tenant compte des limitations imposées par les tissus sains (organes à risque). [2] [3]

3. Les types de la radiothérapie :

Nous pouvons classer la radiothérapie en deux catégories en fonction de la nature et la situation de la source radioactive :

3.1. La radiothérapie interne :

Le rayonnement est émis de l'intérieur du patient. Par exemple, en curiethérapie, des sources radioactives sont placées en contact avec la zone du corps à traiter où elles peuvent être placées :

- Dans une cavité : dans ce cas, nous distinguons la curiethérapie de contact ou plésiocuriethérapie, qui se divise en curiethérapie endocavitaire et curiethérapie endoluminale.
- Directement dans un organe : dans ce cas, nous distinguons la curiethérapie pie interstitielle ou endocuriethérapie.

En revanche, la radiothérapie interne peut s′appuyer sur l′injection intraveineuse ou l′ingestion de sources radioactives. Elles se fixent sur les cellules cancéreuses afin de les détruire, c′est ce qu′on appelle la radiothérapie interne vectorisée ou la radiothérapie métabolique (médecine nucléaire). [2]

3.2. La radiothérapie externe :

La radiothérapie externe repose sur l′utilisation d′une source de rayonnement externe, qui produit un faisceau de particules énergétiques, telles que des électrons, des photons ou des ions. Les accélérateurs linéaires sont généralement considérés comme des sources fiables, mais au départ, on comptait sur des sources de cobalt 60 très intenses et émettrice de rayons gamma. [4]

- La radiothérapie par accélérateur linéaire : c′est un type de radiothérapie externe qui utilise un accélérateur linéaire de particule (LINAC), localisé près du patient et dont les faisceaux sont guidés vers la zone à traiter (photons X ou électrons de haute énergie) afin de détruire les cellules cancéreuses. La radiothérapie par accélérateur linéaire comprend toutes les techniques de rayonnement dans lesquelles la source d′irradiation est placée à distance du patient à traiter.[2]

- Le contacthérapie : La radiothérapie de contact est une technique de rayonnement photonique à basse voltage, qui consiste à appliquer une source de rayonnement au contact de la lésion à traiter. Le rayonnement est très localisé, ce qui permet d'augmenter les doses par fraction, tout en réduisant le nombre de fractions. Les tumeurs éligibles doivent mesurer moins de 2 cm, être minces et avoir une surface plane (les tumeurs cutanées). Les appareils utilisés dans ce type de radiothérapie sont : l′ accélérateur linéaire miniature qui produit des photons d'une énergie de 30 à 50 keV pour des irradiations per opératoires (cancer du sein) et un tube à rayons X miniature pour des irradiations endocavitaires. [5]
- Le protonthérapie : La protonthérapie est une méthode de radiothérapie qui repose sur l'utilisation de protons, qui sont des particules subatomiques chargées qui s'arrêtent à une certaine profondeur selon leur énergie initiale. (pic de Bragg). La protonthérapie évite ainsi toute dose de sortie et est donc supérieure aux autres méthodes de radiothérapie conventionnelle utilisant des photons, dont la dose de sortie importante n'est compensée que par une optimisation balistique (faisceaux multiples, modulation de fluence …). Cette technologie s′appuie sur deux types d′accélérateurs, le cyclotron et le synchrotron. [6]
- L′hadronthérapie : Est une technique plus avancée de la radiothérapie. Ce dernier est appelé hadronthérapie, lorsque les faisceaux de rayonnement sont constitués de particules chargées telles que des protons et d'autres ions tels que le carbone. La spécificité de l'hadronthérapie est liée aux propriétés physiques et radiobiologiques spécifiques de ces particules. Elles peuvent pénétrer les tissus avec peu de diffusion latérale et déposer une énergie maximale juste avant le blocage (pic de Bragg). Cela permet d'identifier précisément la zone à traiter. Grâce à l'utilisation des hadrons, la tumeur peut être exposée aux radiations tandis que les dommages aux tissus sains sont moindres qu'avec les rayons X. [7]

4. La radiothérapie externe (par accélérateur linéaire) :

4.1. Principe de la radiothérapie externe :

La radiothérapie externe est une technique utilisée pour traiter le cancer, qui s′appuie sur les propriétés ionisantes du rayonnement photonique ou électronique dans le but de détruire les cellules cancéreuses. Les accélérateurs linéaires médicaux sont généralement utilisés pour produire le rayonnement photonique utilisé dans la radiothérapie externe, car ces rayons ont

suffisamment d′énergie pour ioniser la matière en retirant les électrons du trajet électronique des atomes. Lorsque ces rayons traversent les tissus humains, ils causent des dommages directs à l′ADN, c′est-à-dire qu′ils affectent directement ses composants. Ces rayons peuvent également interagir avec l′environnement de l′ADN et stimuler la radiolyse de l′eau, produisant de nombreux radicaux libres. Ces radicaux libres affectent les molécules d′ADN, provoquant des dommages indirects. La combinaison de dommages directs et indirects à la molécule d′ADN se manifeste par diverses lésions.

L′action des radiations conduit à la mort cellulaire lorsque les dommages à l′ADN sont importants ou que les mécanismes de réparation de l′ADN sont défectueux. Les cellules cancéreuses ont une capacité limitée à réparer les dommages non mortels à l′ADN par rapport aux cellules saines, la radiothérapie est donc administrée sur plusieurs séances pour favoriser la réparation des tissus sains. Cependant, cela n′empêche pas le développement de lésions dans ces tissus après le traitement. [8]

4.2. Les différentes techniques de la radiothérapie externe :

4.2.1. La radiothérapie bidimensionnelle (conventionnelle) :

La radiothérapie bidimensionnelle est une technique classique du traitement du cancer, dans laquelle les faisceaux sont assez larges que possible pour irradier la cible entière sous différents angles de rayonnement. Dans cette technique, le traitement est planifié manuellement, des faisceaux à profils plats sont utilisées et 2 à 4 faisceaux sont placées aux quatre points cardinaux dans le but de faciliter le calcul déjà complexe. En raison des limites de cette technique et avec l′avènement de l′ordinateur et le développement du collimateur multilames la radiothérapie conformationnelle est apparue à la fin des années 1990. [9]

4.2.2. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (3D-CRT) :

Il s’agit d’une irradiation transcutanée dans laquelle le volume traité est adapté au volume cible qui a été reconstruit en trois dimensions. Cette précision balistique a pu être réalisée par les progrès de l’imagerie, des logiciels de planification de la radiothérapie et de l’évolution de l’environnement des accélérateurs. Dans cette technique, de nombreux faisceaux peuvent être utilisés, qui ont tous la même intensité (isopendérés). La radiothérapie conformationnelle vise à améliorer le contrôle local tout en réduisant la toxicité grâce à la correspondance la plus précise possible entre le volume tumoral cible déterminé par imagerie 3D et le volume irradié.[10]

4.2.3. La radiothérapie par modulation d′intensité des faisceaux (IMRT) :

La radiothérapie à modulation d'intensité (IMRT) emploie des faisceaux d'intensités différentes dans le même champ afin de produire plus de degrés de liberté dans la distribution de dose et, en règle générale, une conformation plus précise que celle utilisée dans la technique habituelle ; L'effet des particules dans le faisceau n'est pas uniforme et varie d'un pixel à l'autre. Avec l′aide des systèmes de collimation dynamique, il est désormais possible de modifier rapidement la forme de la zone irradiée pendant le traitement, selon une programmation prédéfinie. Il est devenu possible d'irradier des tumeurs sous forme concave, ce qui était impossible avec le RTC-3D. [10] [11]

4.2.4. La radiothérapie par Arcs avec modulation volumétrique (VMAT) :

En tant qu'extension de la technique RCMI, cette technique consiste à réaliser une irradiation du volume cible par irradiation rotationnelle continue autour du patient. Lors de l'irradiation plusieurs paramètres peuvent être modifiés, notamment la forme de l'ouverture du collimateur le débit de dose, la vitesse de rotation du bras ou la direction du collimateur multilames. [12]

4.2.5. La radiothérapie stéréotaxique (SBRT- SRS) :

La radiothérapie stéréotaxique est une méthode de traitement qui vise à irradier des lésions intracrâniennes ou extracrâniennes avec des doses élevées avec une précision millimétrique, en utilisant plusieurs petits faisceaux qui convergent vers le centre de la cible. Pour les traitements de radiothérapie stéréotaxique, la dose totale est délivrée au cours d'une séance unique ou de manière hypofractionnée selon la maladie à traiter ; Cette technique nécessite, d'une part, une grande précision dans la détermination du volume cible et, d'autre part, que le traitement soit le plus conforme possible, c'est-à-dire que les faisceaux de rayonnement épousent au plus près la forme de la tumeur. [12]

Cette étude se concentre sur l′étude des deux techniques (3D-CRT et IMRT) et à les comparer dans le traitement du cancer du sein.

4.3. Définitions des volumes cibles [13] :

Le rapport de l′ ICRU 50, 1993 (Commission internationale des rayonnements Units) identifie clairement plusieurs volumes d′intérêt, que nous mentionnons ici les définitions.

- **Le volume tumoral macroscopique (Gross Tumor Volume : GTV) :** C'est lui qui apparaît sur l'imagerie (scanner, IRM) et qui recevra la dose la plus élevée.
- **Le volume cible clinique (Clinical Target Volume : CTV) :** Cela inclut le GTV, ainsi que les tissus présentant un potentiel tumoral élevé, même s'ils ne sont pas visibles à l'imagerie. La définition du CTV reste subjective dans de nombreuses localisations et repose sur l'expérience et la connaissance de la maladie (atteinte ganglionnaire occulte par exemple). La définition de GTV et CTV représente une partie fondamentale de la prescription.
- **Le volume cible planifie (Planning Target Volume : PTV) :** Cela comprend le CTV et la marge de sécurité qui permet de considérer les incertitudes de positionnement et les mouvements des organes et du patient.

L'ICRU recommande d'optimiser les paramètres de la série de traitement afin de standardiser la dose autant que possible dans le PTV. Il est recommandé que le dosage du PTV soit compris entre 95 % et 107 % de la dose prescrite.

D′autre part, l'ICRU a recommandé la présence des volumes relatifs à la dose :

- **Le volume traité :** Il s'agit du volume entourant la surface isodose déterminé par le radiothérapeute, qui correspond au niveau de dose minimal permettant d'atteindre l'objectif du traitement. Idéalement, cette taille traitée devrait correspondre à la taille de PTV attendue.

- **Le volume irradié :** Il s'agit du volume de tissus qui recevant une dose considérée comme importante par rapport à la tolérance des tissus sains. Par exemple, nous pouvons évaluer une dose égale à 80 %, 50 % ou 25 % de la dose prescrite au niveau de volume de l′isodose.

4.4. Les organes à risque (OAR) [13] :

Les organes à risque (OAR) sont des tissus pour lesquels il est nécessaire de limiter l'exposition aux radiations afin de réduire les effets secondaires. Une attention particulière doit être portée à la répartition de la dose aux organes à risque, principalement en raison de l'importance des gradients observés au bord du volume cible. Trois catégories d'organes à risque sont définies en fonction de leur niveau de morbidité :

- **La classe 1 : morbidité sévère :** Organes qui, en cas de lésions graves, peuvent entraîner une perte complète de fonction, par exemple, des lésions de la moelle épinière

provoquant une paraplégique, ou des lésions de la rétine ou du nerf optique provoquant la cécité.

- **La classe 2 : morbidité modérée :** Les organes dont les dommages entraînent une perte de fonction importante comprennent les glandes salivaires, le cristallin et les oreilles.
- **La classe 3 : morbidité transitoire :** Les organes dont les dommages entraînent peu ou pas de perte de fonction, par exemple la peau ou les muqueuses.

L'organisation tissulaire est importante pour identifier cette morbidité :

- **Une organisation en série :** correspond à un organe souffrant d'une morbidité sévère car la fonction dépend de toutes ses sous-unités fonctionnelles, et il peut être représenté par analogie avec des circuits électriques en série, où la rupture d'un composant entraîne la perte complète de la fonction de l'organe, et donc un surdosage à un point de cet organe dénature la fonction de l'organe entier, et nous nous intéressons alors à la dose maximale que reçoit ce tissu.
- **Une architecture en parallèle :** Correspond à un organe avec un taux de morbidité modéré voire faible, ou transitoire. L'organe est constitué de plusieurs sous-unités fonctionnelles qui sont quelque peu indépendantes les unes des autres, et par conséquent la perte de fonction de l'organe après une irradiation nécessite la destruction d'un grand nombre de sous-unités. Nous nous intéressons donc à la contrainte de dose moyenne dose-volume, c'est-à-dire qu'aucune partie du volume ne doit être exposée à un rayonnement dépassant une certaine dose.

Enfin, pour chaque membre de l′organe série ou parallèle, les relations dose-volume doivent être respectées, et cette relation peut être représentée par des histogrammes dose-volume (HDV). Que nous expliquerons plus en détail dans les parties suivantes de cette étude.

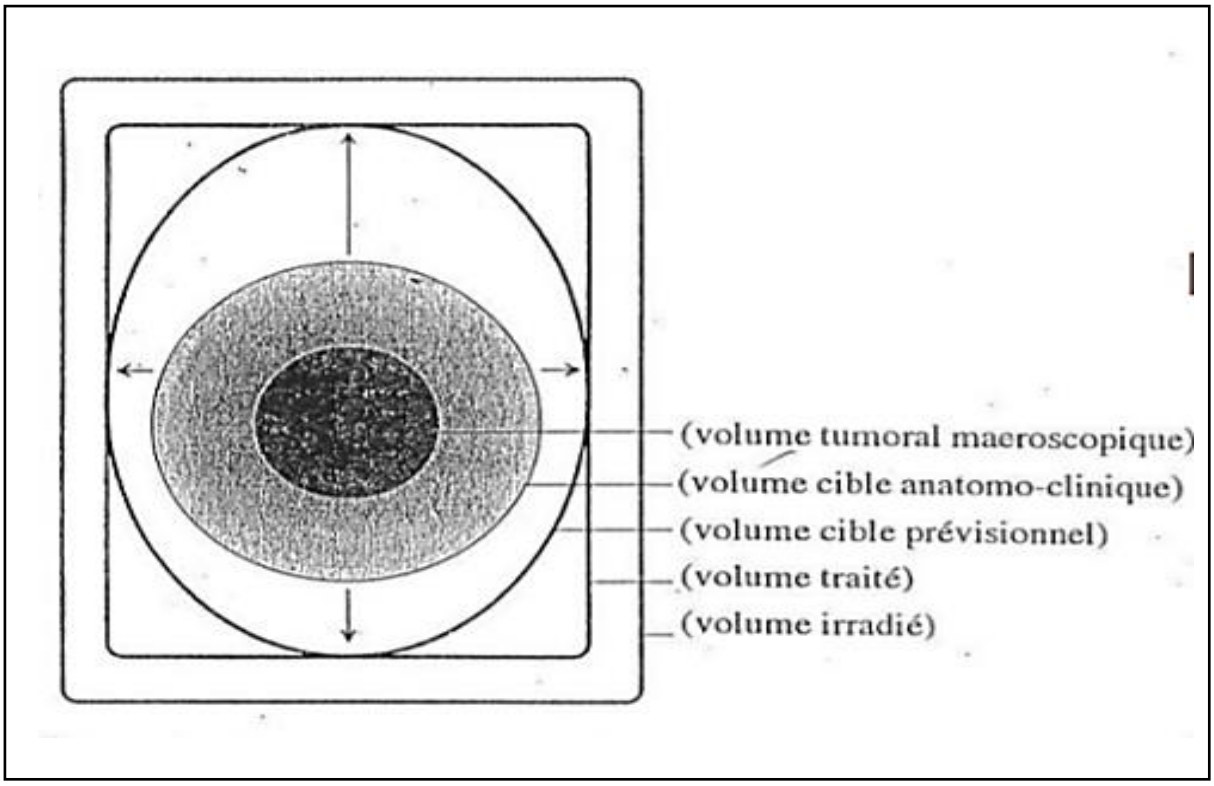


Figure 7 : La définition des volumes cibles selon L'ICRU [13]

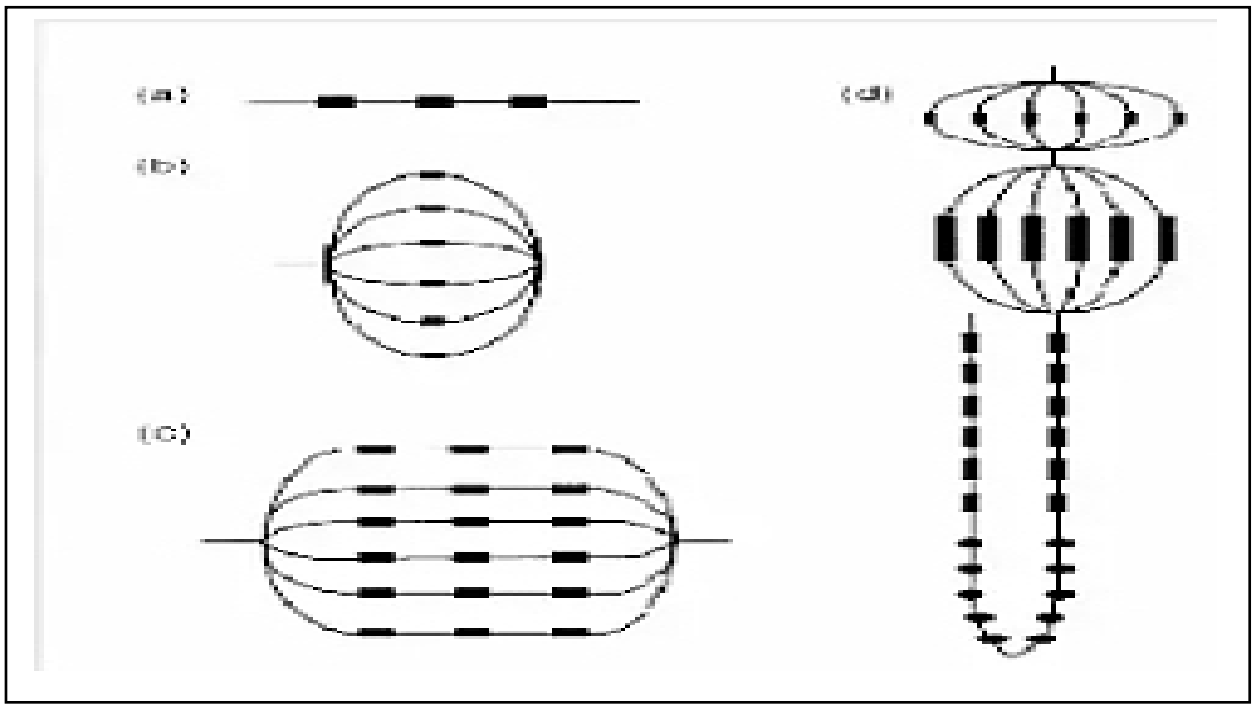


Figure 8 : L'organisation des unités fonctionnelles d'un OAR

4.5. L′accélérateur linéaire et ces composants :

Les accélérateurs linéaires médicaux (son acronyme courant″ Linac″), sont des dispositifs qui accélèrent les particules, généralement des électrons pour générer des faisceaux de rayonnement. Ces faisceaux peuvent être constitués d′électrons ou de photons et possèdent suffisamment d′énergie pour ioniser les cellules cancéreuses. Grâce à l′effet thermoélectronique, les électrons sont initialement produits à partir de filaments de tungstène puis accélérés dans une cavité linéaire dans le but d′atteindre l′énergie appropriée, qui se situe entre 4 et 25 MeV en radiothérapie. Ces électrons peuvent être utilisés directement comme faisceaux d′électrons (sont employés pour traiter des tumeurs jusqu′à environ 70 mm de profondeur) ou, s′ils sont ralentis par une cible, générant des photons X entre 4 et 25 MeV (pour traiter les tumeurs plus profondes). [14] [15]

L′accélérateur linéaire se compose de plusieurs parties, chacune ayant un rôle et une importance significatifs pour assurer le fonctionnement efficace de l′appareil. Ces pièces sont les suivantes :

- **Le Système d′injection (canon à électrons) :**

Il s'agit d'un système électrostatique qui permet de chauffer la plaque cathodique par un filament, au sein d′ une cavité soigneusement examinée, sous vide qui permet l'éjection des électrons, comprenant une grille de focalisation, une grille de contrôle et une terminaison avec l'anode. L'anode est connectée à la borne positive de la haute tension et la cathode à la borne négative. La barrière formée par la grille de contrôle s′ouvrira et permettra aux électrons de la traverser, lorsqu′une impulsion positive sera appliquée à cette grille. [16]

- **Le générateur d'onde électromagnétique klystron ou magnétron :**

Sont deux techniques différentes pour générer des ondes, mais le fond du principe reste identique, qui consiste à convertir l'impulsion haute tension en une impulsion haute fréquence. Le magnétron c'est un oscillateur qui génère directement les radiofréquences, et est généralement utilisé pour les énergies moyennes (14MeV pour les électrons, 15MV pour les photons). Par opposition à un magnétron, un klystron est un amplificateur d'ondes radiofréquences générées par un autre appareil appelé le pilote de radiofréquence. Le klystron est utilisé dans les machines de haute puissance (21 MeV pour les électrons, 23 MV pour les photons). [17]

❖ **Le modulateur :**

Il fournit la haute tension, le courant élevé et les impulsions courtes nécessaires aux systèmes de source RF et d'injection d'électrons. [17]

❖ **Guide d′onde :**

Il s'agit d'une structure métallique de section rectangulaire ou circulaire utilisée pour transmettre des micro-ondes. Deux types de guides d'ondes sont utilisés dans les accélérateurs linéaires (de transmission et de l′accélérateur), le premier transmet des ondes radiofréquences de la source au guide d'ondes de l'accélérateur, où les électrons sont accélérés. [17]

❖ **La cible :**

La cible est généralement en tungstène et présente des épaisseurs différentes selon l′énergie afin de réduire les pertes. Elle est nécessaire pour obtenir un faisceau de photons X. Dans le cas de la thérapie électronique, la cible contient des pré-diffuseurs, ces derniers permettent la première étape de mise en forme du faisceau d′électrons sur le patient. [16]

❖ **Le collimateur primaire :**

Situé à la sortie de la cible, il permet de fixer la dimension maximale du faisceau de rayonnement et de déterminer également la section conique du faisceau. [16]

❖ **Le cône égalisateur :**

L'unité la plus importante dans l'optimisation de l′irradiation, car elle est utilisée pour uniformiser la fluence. La forme de cette unité est due à l'inhomogénéité du faisceau à la sortie de la cible. Comme nous l'avons vu, les photons proviennent du phénomène de bremsstrahlung et ont donc tendance à créer davantage de photons dans la direction préférée des électrons incidents. Cependant, les multiples diffusions subies par les électrons dans la cible conduisent à une uniformité énergétique à la sortie. Il est donc nécessaire de compenser cette distribution en intensité en atténuant ultérieurement l'intensité du faisceau.[17]

❖ **La chambre d′ionisation (monitrice) :**

Son rôle est d′assurer une mesure continue du débit de dose à la sortie de l′appareil de traitement, elle est doublée pour fournir deux lectures indépendantes de la dose délivrée au patient pour des raisons de sécurité. La chambre d′ionisation assure également l′homogénéité et la cohérence du faisceau d′irradiation.[16]

❖ **Le collimateur secondaire :**

Il prend la forme de quatre blocs de tungstène formant deux mâchoires superposées, l'une dans la direction transversale X et l'autre dans la direction cranio-caudale selon l′orientation du patient Y, et permettent la définition de champs carrés ou rectangulaires susceptible atteindre 40 cm de côté à l'isocentre avec possibilité d'asymétrie et de rotation relativement à l'axe du champ.[17]

❖ **Le collimateur multilames :**

L′importance de ce collimateur réside dans la délivrance de traitements de radiothérapie conformationnelle. Il peut contenir de 40 à 60 paires de lames en plomb ou en tungstène disposées sur deux rangées opposées, pour un total de 80 à 120 lames. Pour modifier la forme du champ de rayonnement et s′adapter à la forme de la tumeur, ces lames sont déplacées individuellement. Le mouvement de ces dernières est contrôlé par un ordinateur selon les données de la dosimétrie. Le filtre secondaire et l′interdigitation entre les lames servent à atténuer les fuites de rayonnement. [16]

❖ **Les appareils d'imagerie :**

- OBI, qui s′appuie sur un faisceau de rayons X pour vérifier l′installation. La faible dose de rayonnement fournie par cet appareil assure une utilisation quotidienne.
- Le CBCT, qui utilisé avant la séance de radiothérapie et permet de scanner la zone à traiter.
- L'imagerie portale, qui permet de prendre des radiographies des faisceaux d′irradiation et de vérifier leur localisation avant la séance de traitement. Elle permet également de réaliser des images pendant le traitement et ainsi de visualiser les mouvements du patient pour tenter de les quantifier. [17] [18]

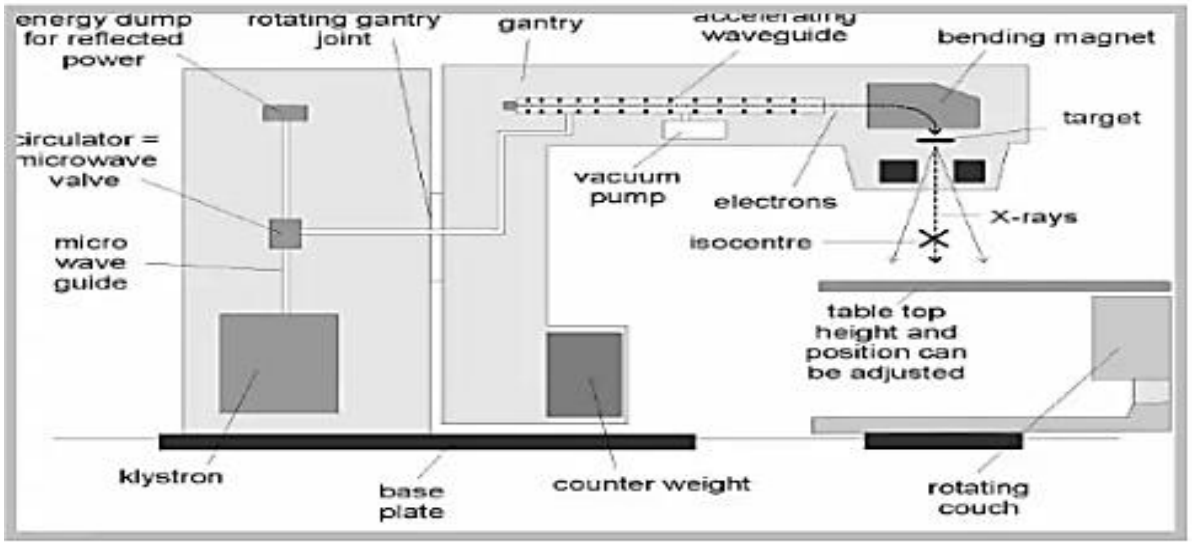


Figure 9 : les composants d'accélérateur linéaire [14]

5. Principe de la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle :

La radiothérapie s′est mis à réduire les complications associées à l'irradiation des tissus sains lorsque le blindage des faisceaux de rayonnement est devenu possible. La radiothérapie conformationnelle a pris toute sa dimension grâce à l'imagerie 3D obtenue avec le scanner. La protection des tissus anatomiquement sains a été déterminée, proportionnellement à la forme et à l'étendue de la tumeur.[19]

La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RC-3D) apparue au début des années 1990, est une technique qui s′appuie sur l′analyse d′images de scanner et sur les nouveaux logiciels informatiques de mesure des doses. La tomodensitométrie permet une reconstruction tridimensionnelle du corps et de tous les organes, une simulation de rayonnement est également réalisée afin de déterminer les caractéristiques optimales des faisceaux (l′orientation, le nombre et la taille).des plans de traitement 3D qui correspondent plus précisément à la tumeur tout en minimisant les tissus sains, sont obtenus à partir de le "beam eye view" qui offre une vue de l′anatomie du patient obtenue par un observateur situé à l′origine du faisceau. Ceci permet de délivrer la dose très près de la forme de la tumeur avec l′utilisation de collimateur multilames, ces distributions de dose sont illustrées par les courbes d′isodoses qui montrent les iso- niveaux de dose absorbée.[20]

Au début des années 2000, la RC-3D est devenue la technique employée dans la plupart des traitements de radiothérapie, en particulier ceux à des fins thérapeutiques. Cependant, dans

les cas où la tumeur présente des formes concaves avec des organes à risque proches de ces concavités, cette technique peut représenter moins de précision. La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle a conduit à l′émergence de plusieurs technologies avancées qui contribuent à une meilleure allocation de dose et permettent l′irradiation de volumes complexes. La radiothérapie à intensité modulée (IMRT) nous permet de reconsidérer les objectifs d'amélioration du contrôle local-régional en nous permettant de reconsidérer l'escalade de dose jusqu'au volume cible tout en limitant l'irradiation des organes à risque (OAR). [19] [20] [21]

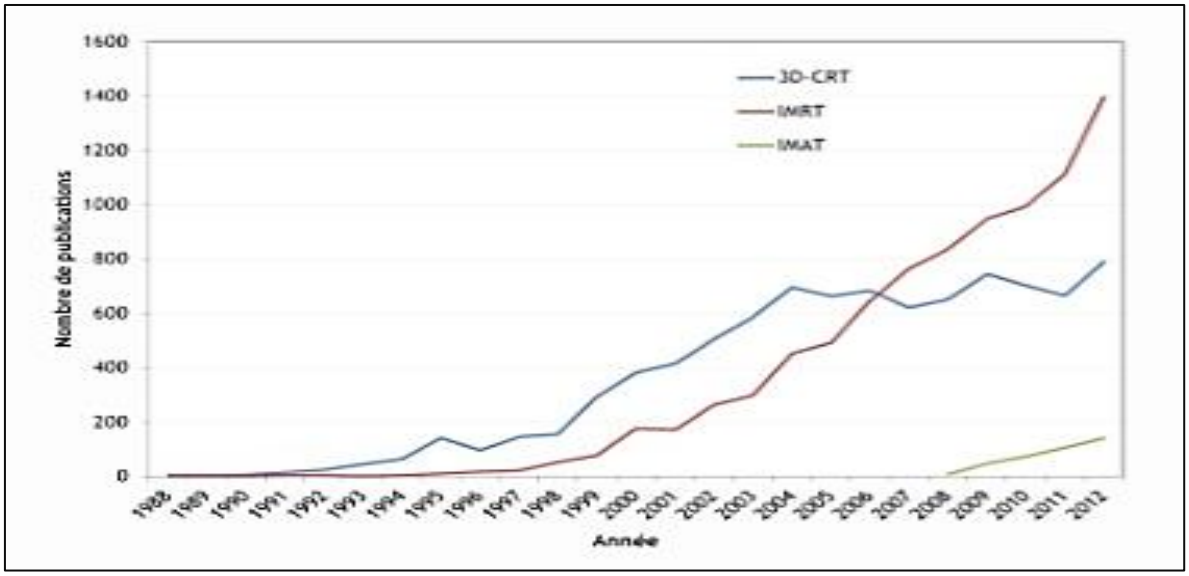


Figure 10 : L'évolution du nombre de publications sur l'IMRT et 3D-CRT [22]

6. Principe de la radiothérapie conformationnelle avec modulation d′intensité (IMRT ou RCMI) :

Dans la technique de radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (RC 3D) traditionnelle, selon la direction incidente des faisceaux de rayonnement, la forme du champ de rayonnement correspond à la forme de la cible. Dans la technique de radiothérapie à intensité modulée (RCMI ou IMRT), en fonction de la disposition de la cible et des organes environnants l′intensité du faisceau est modifiée, où l′intensité des rayons qui traversent principalement la cible est augmentée et l′intensité des faisceaux qui traversent les organes à risque est réduite. L′inhomogénéité résultant de l′intensité intentionnellement non uniforme du faisceau est compensée par des rayons provenant d′autres directions. L′IMRT améliore le contrôle de la distribution de dose tridimensionnelle en superposant un grand nombre de champs fractionnés indépendants provenant soit de directions réparties sur un ou plusieurs arcs, soit d′un certain

nombre de directions statiques. Une modulation d′intensité est ajoutée à la géométrie basée sur cette méthode, rendant la distribution de dose concave dans la technique de l′IMRT. Contrairement à la technique RC 3D, qui repose sur une traversée convexe, un faisceau géométriquement identique d′intensité uniforme est formé. On peut dire que l′IMRT permet de réduire la dose de rayonnement aux organes exposés qui sont situés dans la zone concave du volume cible de planification (PTV).

L′unité minimale de surface de rayonnement qui peut être contrôlée individuellement est appelée petit faisceau de rayonnement, et une carte d′intensité fait référence à la distribution de l′intensité des petits faisceaux de rayonnement dans le champ de rayonnement. Dans le cas d′un champ 10 cm x 10 cm, la modulation d′intensité peut atteindre 100 petits faisceaux de rayonnement de taille 1cm x 1cm. Dans le cas d′un traitement avec cinq champs, le total peut atteindre 500 petits faisceaux de rayonnement et leur intensité est réglée individuellement. Cela n′est pas possible pour les planificateurs de traitement, dans ce cas l′optimisation informatique joue un rôle important. Le planificateur définit d′abord la distribution de dose pour la tumeur et les OARs, ensuite la méthode d′optimisation détermine l′intensité du faisceau. C′est ce qu′on appelle la planification inverse.

Le problème du calcul de dose est envisagé dans une perspective causale, où le faisceau de rayonnement et ses paramètres associés (énergie, direction, distance et intensité) représentent les causes et les distributions de dose représentent les effets. C′est pourquoi le plan de l′IMRT est appelé plan inverse, dans lequel les distributions de dose (effets) sont d′abord données puis l′intensité du faisceau (causes) est calculée. Contrairement au plan adopté dans la technique RC 3D, les distributions de dose sont calculées en fonction des paramètres de faisceau donnés.

Dans l′IMRT utilisant un accélérateur linéaire équipé d′un collimateur multilames (MLC) nous pouvons obtenir différentes formes de modulation d′intensité en déplaçant le MLC motorisé sous contrôle informatique. La plupart des systèmes de planification de l′IMRT produisent des cartes d′intensité de rayonnement grâce à un processus d′optimisation. Ces cartes sont utilisées dans un processus appelé séquençage des lames, où l′algorithme tente de déterminer les configurations de mode statique pour la radiothérapie à modulation d′intensité (IMRT), en utilisant la technique ″step and shoot″ qui assure l′administration séquentielle de sous-champs de rayonnement déterminés pour fournir la distribution de flux requise. En ce qui concerne le mode dynamique de l′IMRT, grâce à la technique de la fenêtre coulissante ou ″ sliding window″ les lames se déplacent pendant l′opération de rayonnement et leurs trajectoires

sont déterminés pour créer une distribution d′intensité asymptotiquement exécutable aux distributions calculées par le système d′optimisation. [23]

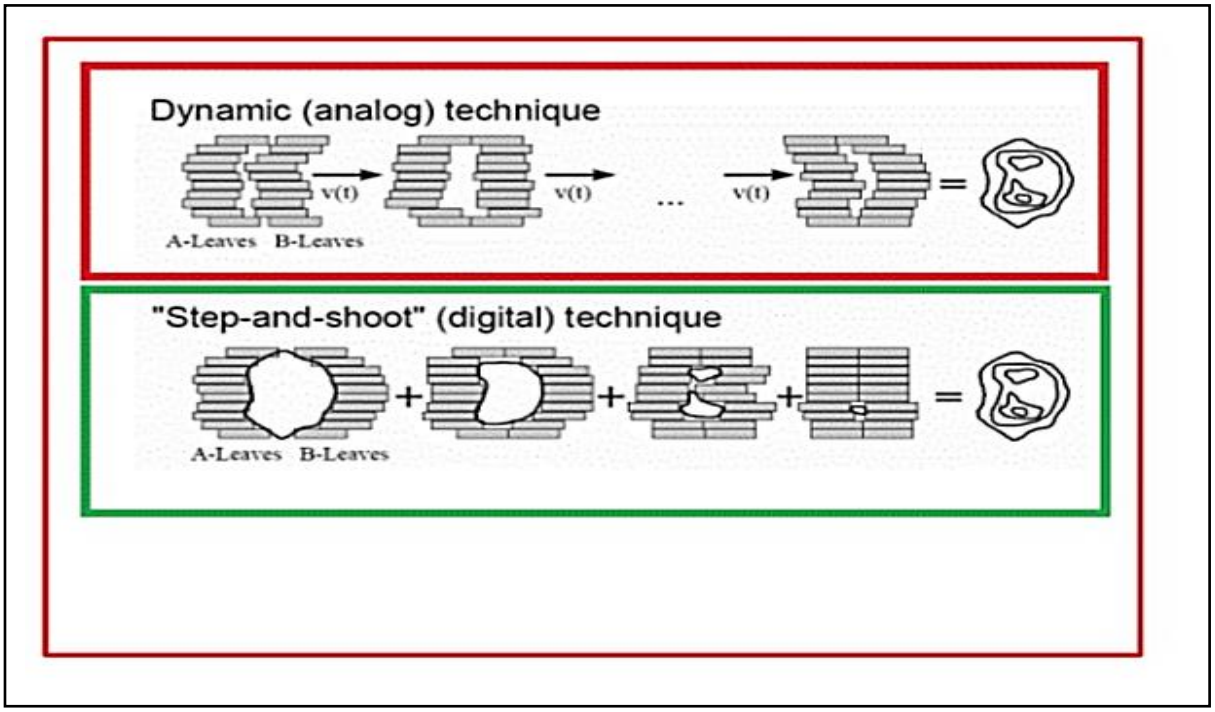


Figure 11 : Les modes d'irradiation en l'IMRT [24]

7. Études et résultats antérieurs comparant les deux techniques (RCMI et RC 3D) dans le cas du cancer du sein :

Il n'y a plus de doute sur le rôle de la radiothérapie adjuvante dans le traitement local et régional du cancer du sein. Cependant, la couverture des volumes cibles représente un défi de dose standard en raison de la complexité anatomique de la partie supérieure du thorax (forme du volume, concavité du thorax) et des organes adjacents à risque (cœur et poumons). En radiothérapie conformationnelle 3D, il est fréquent d'observer des zones de surdosage à l'intersection des faisceaux tangentiels et de la chaîne mammaire interne ou des zones de « sous-dosage » à l'intersection des faisceaux tangentiels et sus-claviculaires. Cette variabilité dans le dépôt de dose peut soit augmenter le risque de récidive locale en cas de « sous-dosage » soit augmenter le risque d'effets secondaires à long terme en cas de surdosage. La radiothérapie à intensité modulée (IMRT) est une forme de radiothérapie qui améliore la couverture du volume cible, réduit l'exposition des organes à risques à des doses élevées de rayonnement et permet un dépôt de dose plus uniforme. [25]

Dans le but d′améliorer le traitement du cancer du sein par la radiothérapie, plusieurs études antérieures ont comparé deux techniques, la radiothérapie conformationnelle 3D et la radiothérapie à intensité modulée (IMRT) pour déterminer l′efficacité dosimétrique des deux techniques. Dans cette étude, nous avons discuté de l′une des études précédentes, qui a été réalisée par l′étudiante Wissam BOUDJELIL en 2023, au niveau de l′hôpital Chahids Mahmoudi de Tizi-Ouzou. Cette étude s′intitule « Comparaison dosimétrique des techniques de traitements 3D, IMRT et hybride dans le cancer du sein cas mastectomie ». Mais dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons uniquement sur les résultats liés à deux techniques l′IMRT et 3D-CRT qui sont au centre de cette étude. Cette étude dont nous discutons a étudié un échantillon de 11 patientes qui ont été traitées par les deux techniques (3D-CRT et IMRT). Les résultats les plus importants atteints par cette étude sont résumés dans le tableau suivant :

La zone	Index dosimétrique	IMRT (Gy/%)	3D-CRT (Gy/%)	Observation et conclusion
PTV (paroi gauche)	D95 %	47,64	45,94	L′IMRT a surpassé la 3D, car nous avons observé des doses plus élevées dans les paramètres présentés. On peut dire que l′IMRT présente l′avantage de distribuer la dose avec une plus grande précision.
	D98%	46,85	42,32	
	ICO	1,03	0,92	
	IH	0,07	0,12	
Cœur	D100	0,18	0,84	L′IMRT a surpassé la 3D, car nous avons enregistré des doses plus faibles dans les paramètres présentés. Donc elle a l′capacité de réduire l′exposition aux tissus sains.
	Dmoy	3,54	4,19	
	V5 %	6,34	11,10	
Poumons homolatéraux	V20%	12,31	13,59	L′IMRT a surpassé la 3D, car les valeurs de l′IMRT sont plus optimisées. Alors elle a l′capacité de réduire l′exposition aux tissus sains.
	V30%	9,92	11,45	
	V5%	24,67	27,53	
Poumons controlatéraux	D2 cm^3	6,52	2,64	Dans ce cas 3D a surpassé l′IMRT car nous avons observé des doses plus faibles à plus de 2 cm^3 de tissu pulmonaire. Alors elle a l′capacité de réduire la toxicité pulmonaire.
	D1 cm^3	0,64	/	
Seins controlatéraux	Dmax	4,24	0,93	L′IMRT a surpassé la 3D, car nous avons observé des valeurs faibles à Dmoy et V2. Alors elle réduit l′exposition sauf les zones ciblées.
	Dmoy	0,32	0,88	
	V2%	7,32	20,28	

Tableau 2 : Les résultats obtenus lors d'une étude précédente [26]

Finalement, après avoir examiné les résultats et les conditions de cette études, nous avons constaté que chaque technique présente des avantages et des limites, ce qui nécessite des études complémentaires comme celle que nous menons actuellement dans le but d′évaluer les différences dosimétriques entre les deux techniques au niveau clinique.

8. Les indications de la radiothérapie dans le cancer du sein :

Afin de déterminer les indications de la radiothérapie, il faut prêter attention à l′imagerie initiale, à l′intervention chirurgicale réalisée (tumeur ou mastectomie), ainsi qu′aux résultats finaux de l′anatomopathologie (marge et ganglions affectés). [27]

Selon le stade du cancer les indications de la radiothérapie varient :

- **Pour les cancers du sein in situ et infiltrants :** la radiothérapie peut être utilisée en supplément de la chirurgie pour détruire les cellules cancéreuses qui pourraient rester après la chirurgie et réduire le risque de récidive :
  - **Après une chirurgie conservatrice :** la radiothérapie externe de la glande mammaire est presque toujours réalisée avec la présence de facteurs de risque de récidive.
  - **Après une chirurgie non conservatrice (mastectomie totale) :** l′irradiation de la paroi thoracique n′est utilisée que pour les cancers infiltrants avec la présence de facteurs de risque de récidive. L′irradiation des aires ganglionnaires peut être débattue selon qu′ils sont affectés ou non.
- **Pour certains cancers du sein métastatiques :** la radiothérapie du sein peut être considérée pour ralentir la progression tumorale. La radiothérapie est aussi employée pour traiter les métastases cérébrales ou osseuses. [28]

9. La procédure de la radiothérapie adjuvante du cancer du sein :

9.1. Consultation d'annonce thérapeutique et éducation du patient :

Dans cette étape, la patiente est informée d′un ensemble d′informations spécifiques à ce type de traitement notamment :

- Le nom du médecin qui suivra son cas et la décision qui a été prise.
- L′avantage de la radiothérapie dans son cas et on lui a dit que c′était un traitement indolore.
- Les étapes de la radiothérapie que vous traverserez.
- Les effets secondaires aigus et tardifs possibles.

- Tout au long de la période de traitement, un suivi hebdomadaire sera assuré.
- Fournir un soutien psychologique au patient.
- Informez – la des conseils qu′elle devrait suivre pour améliorer la capacité de sa peau à tolérer la radiothérapie. [29]

9.2. La simulation :

9.2.1. Positionnement et contention :

La patiente doit être placé dans une position très confortable et reproductible. Nous prenons généralement le décubitus dorsal comme position de référence. A l′aide d′un plan incliné et un appui – bras, on obtient une fixation standard où les deux bras sont levés au – dessus de la tête et placés sur des supports réglables pour assurer le bon dégagement de la glande mammaire et aussi le confort de la patiente. Si l′irradiation est sus – claviculaire, la tête est placée en extension inclinée du côté opposé au sein traité, et si la glande mammaire est volumineuse et pendante, la patiente est placée en décubitus latéral ou ventral avec une contention appropriée. [30]

9.2.2. Détermination et repérage des volumes cibles :

- Si le traitement est conservateur, les contours cliniques du sein sont déterminés à l′aide de fils radio – opaques par palpation puis la cicatrice d′ablation de la tumeur est déterminée.
- Si le traitement est radical, et toujours à l′aide d′un fils radio – opaque la cicatrice de mastectomie et la glande mammaire controlatérale sont identifiées.
- Le rôle du fil opaque est d′agir comme un miroir.
- Á l′aide d′un laser, la patiente est alignée de manière à ce qu′il passe par la fourchette sternale et par le centre du sternum.
- Le long de la ligne médiane, des marques d′encre sont dessinées et enfin des repères tridimensionnels apparaissent sur la patiente.[29]

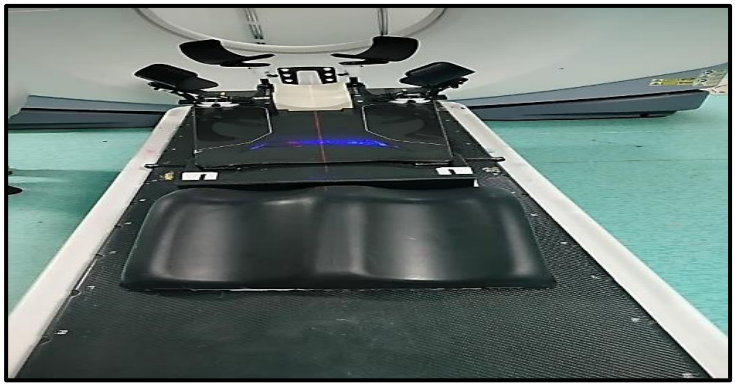


Figure 12 : Le plan incliné [31]

9.2.3. Acquisition des données anatomiques :

- Sans injection de produit de contraste, un scanner simulé est réalisé en position de traitement.
- De la mandibule jusqu′au bas des coupes diaphragmatiques, des coupes de 3 mm sont obtenues.
- Les trois points doivent se trouver sur la même section du scanner, puis les données sont transférées à l′unité de contourage. [30]

Figure 13 : Scanner de simulation [31]

9.3. Délinéation des volumes cibles et des OAR (contourage) :

Á cette étape, le rôle du radiothérapeute devient clair. Il contourne les volumes cibles et les organes à risque selon les recommandations de l′ICRU, et nous trouvons :

9.3.1. CTV T (le volume cible tumoral) :

Le CTV lors d′une mastectomie est cohérent avec la paroi thoracique et les limites sur lesquelles on s′appuie sont :

- Il reste 5mm sous le périmètre cutané à partir de l′avant.
- De l′arrière : selon RTOG (Radiation Therapy Oncology Group) : les muscles de la poitrine, les muscles de la paroi thoracique et les côtes doivent être inclus. Selon ESTRO (European Society for Radiotherapy and Oncology) : en cas de T4a et T4c, comprend
- Les côtes et les muscles de la poitrine.

- Cordialement, pour les bords latéraux, supérieurs et inférieurs la glande mammaire controlatérale est utilisée pour déterminer l′emplacement de l′ancien sein

En cas de traitement conservateur, nous trouvons :

CTV T 1 : Le sein restant est déterminé et les limites sur lesquelles on s′appuie sont :

- 5 mm à l′intérieur du revêtement cutané, depuis l′avant.
- De l′arrière, en prend en compte la face antérieure des muscles pectoraux.
- De l′extérieur, de l′intérieur et de haut en bas, les projections orthogonales des repères cutanés sue la paroi.

CTV T 2 (Boost) : Comprend la cavité de résection tumorale avec une marge de 1,5 cm. une cicatrice d′excision doit être incluse dans ce volume. [29]

9.3.2. CTV N (le volume cible ganglionnaire) :

Ce volume comprend :

- La zone des ganglions lymphatiques axillaires.
- La série mammaire interne.
- La zone des ganglions lymphatiques sus- et sous claviculaire.

9.3.3. PTV (volume cible de planification) :

Nous trouvons deux types de PTV :

- PTV T : il s′agit d′un CTV T avec un ajout de 5 mm jusqu′à 10 mm.
- PTV N : il s′agit d′un CTV N avec un ajout de 5 mm jusqu′à 10 mm. [30]

9.3.4. Les organes à risque :

- Le poumon du même côté est entièrement identifié.
- Le cœur est entièrement défini.
- La moelle épinière est définie en ajoutant 2 cm au – dessus et au – dessous du bord du PTV N.
- En cas d′irradiation sus – claviculaire, la thyroide et le larynx sont identifiés.
- Si le sein droit est irradié, le foie est identifié.
- L′œsophage est identifié. [30]

9.4. Planification et validation du plan de traitement :

9.4.1. La mise en place des faisceaux d′irradiation :

Dans le cancer du sein la technique recommandée est RC 3D, mais cela n′empêche pas l′utilisation de l′IMRT car cette dernière peut être employée si les contraintes ne sont pas respectées par RC 3D. Nous déterminons un isocentre unique pour tous les faisceaux et cela s′appelle la technique mono isocentrique, cela est fait afin de reproduire les connexions entre les faisceaux en reliant les faisceaux les uns aux autres. D′autre part, cela permet de réduire la durée de la séance et de réduire l′incertitude du positionnement. Les énergies utilisées sont des photons X (6 MV et 18 MV). Pour le sein ou la paroi nous utilisons deux faisceaux tangentiels opposés (externe et interne), pour la zone sus et sous claviculaire nous utilisons les champs antérieurs, pour la zone axillo-sus claviculaire nous utilisons deux champs antéropostérieurs pondérés de manière différente, pour la région du lit tumoral (Boost) nous utilisons généralement un faisceau direct d′électrons. [29]

9.4.2. Dosimétrie et validation du plan du traitement :

En utilisant le TPS, la distribution de dose est calculée en tenant compte de la dose aux volumes exposés et des contraintes de dose aux l′OAR, nous utilisons des filtres en coins pour assurer l′homogénéité de la dose, n′oubliez pas d′utiliser le collimateur multilames pour cacher les organes à risque, ensuite nous calculons les doses et pour éliminer les zones de surdose nous utilisons la technique champ dans champ. Finalement nous calculons les unités de moniteur.

La validation et l′approbation du plan de traitement se font en collaboration entre un radiothérapeute et un physicien médical. Où la vérification de l′hétérogénéité du PTV (entre 95et 107 % de la dose), le respect des contraintes de dose au niveau de OAR doit également être vérifié. [29]

9.5. Le traitement :

Dans cette étape, l′identité de la patiente est d′abord vérifiée, puis les paramètres de l′irradiation sont vérifiés. La patiente est ensuite placée sur la table de traitement, toujours à l′aide des moyens de contention et grâce à l′imagerie nous contrôlons la position de la patiente. Selon les données de la dosimétrie, les déplacements sont effectués. Le traitement est ensuite fourni à la patiente avec une surveillance continue pendant la séance de l′irradiation et les données de traitement sont enregistrées à la fin de chaque séance. La patiente est suivie chaque

semaine par le radiothérapeute et les effets secondaires sont traités médicalement. Enfin, à cette étape un rapport de fin d′irradiation est rédigé, une hormonothérapie est prescrite si la patiente est RH positive. [29]

La patiente bénéficie d′un suivi post - traitement tous les quatre mois pendant deux ans, puis tous les six mois pendant trois ans, puis tous les ans. Cela est fait pour détecter les complications tardives du traitement et pour diagnostiquer la possibilité de récidive. Cela se fait en interrogeant la patiente, en effectuant un examen clinique et une mammographie. En fonction des symptômes, des tests sont proposés. [29]

Figure 14 : Accélérateur linéaire médicale (TRILOGY) de VARIAN [31]

Conclusion :

D′une part, la radiothérapie externe est une partie importante du parcours de traitement de nombreuses tumeurs, y compris le cancer du sein. En particulier s′il est à un stade précoce ou post – chirurgical. La radiothérapie a connu un développement important récemment, avec l′émergence de techniques très avancées telles que la RC 3D et IMRT, qui ont permis de réduire les effets secondaires sur les organes à risque. D′autre part, la procédure de traitement du cancer du sein a été discuté à partir duquel nous pouvons conclure l′importance d′une bonne planification et du choix de la technique d′irradiation appropriée pour augmenter l′efficacité du traitement.

Chapitre III : Matériels et méthodes

1.Objectif de l′étude :

Cette étude vise à réaliser une comparaison dosimétrique entre la technique de radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle 3D-CRT et la technique de radiothérapie à intensité modulée IMRT dans le traitement du cancer du sein, afin d′avoir une meilleure précision de la dose au niveau de volume tumoral cible, tout en minimisant l′exposition aux tissus sains voisins.

Afin de tenter de répondre aux questions soulevées par notre étude, nous avons suivi une méthodologie comparative. Cette dernière repose principalement sur l′analyse des plans de traitement pour chaque technique appliquée à un échantillon de femmes souffrant d′un cancer du sein gauche. Cette section décrit d′une part, les dispositifs les plus importants sur lesquels nous nous sommes appuyés et d′autre part, elle décrit les méthodes utilisées pour atteindre l′objectif de notre étude.

2. Type d′étude :

Cette étude est une étude comparative analytique. Nous avons utilisé les données anatomiques de cinq patientes atteintes d′un cancer du sein gauche, précédemment traitées par la technique 3D-CRT. Nous avons créé de nouveaux plans de traitement pour chaque patiente incluse dans l′étude, en appliquant les deux techniques 3D-CRT et IMRT. Cette étude a été menée de 15 avril au 30 mai 2025 au service de radiothérapie du centre de lutte contre le cancer de Tlemcen. Elle a permis de comparer plusieurs paramètres dosimétriques notamment : la couverture de volume cible PTV, l′homogénéité de la dose et la dose reçue par les organes à risque (OARs) tels que le cœur le poumon, entre les deux techniques et sur toutes les patientes sélectionnées.

3. La population étudiée :

Dans cette étude nous avons sélectionné 5 patientes atteintes d′un cancer du sein gauche dont toutes les caractéristiques sont décrites avec précision dans le tableau suivant :

La patiente / Les données	1	2	3	4	5
Âge (ans)	61	75	43	55	41
Localisation de sein atteint	gauche	gauche	gauche	gauche	gauche
Type histologique	carcinome infiltrant non spécifié (CINS)	carcinome infiltrant non spécifié (CINS)	carcinome infiltrant non spécifié (CINS)	carcinome infiltrant non spécifié (CINS)	carcinome infiltrant non spécifié (CINS)
Grade SBR	II SBR	II SBR	III SBR	II SBR	III SBR
Récepteur hormonal	positif (+)	Positif (+)	Positif (+)	Positif (+)	Positif (+)
Statut HER2	négatif (-)	négatif (-)	négatif (-)	négatif (-)	négatif (-)
KI67	5%	14%	10%	30%	30%
BDR	sain	sain	sain	sain	sain
Type de chirurgie	conservatrice	conservatrice	conservatrice	conservatrice	conservatrice
Stade anatomopathologique	pT4bN2M0	pT1cN1M0	T1N0M0	pT1N1M0	pT1cN1M0
chimiothérapie	4AC60/4Txt	4AC50	3FEC/3Txt	3FEC/3Txt	4AC60/4Txt

Tableau 3 : caractéristiques des patientes

4. Matériel utilisé dans l′étude :

Dans cette étude nous nous sommes appuyés sur un ensemble d′équipements disponibles au niveau du service. Nous avons choisi de mettre leurs informations sous la forme d′une fiche technique comme indiqué ci-dessous :

4.1. Scanner de simulation :

- Nom de l′appareil : scanner médical
- La marque :GE OPTIMA CT 580 RT
- Définition : ce scanner se caractérise par sa conception simple et ses images de haute qualité, privilégiant le confort du patient. Sa compacité en fait la solution idéale pour les établissements disposant d′un espace limité. Ses fonctionnalités d′imagerie avancées assurent des examens haute résolution avec une exposition minimale aux radiations. Les utilisateurs bénéficient d′une efficacité accrue grâce à l′interface simple et à la configuration rapide de l′appareil. [1]
- Caractéristiques techniques :
  - Nombre de coupes : 16
  - Epaisseur de coupe : varie de 0 à 3 mm, mais le niveau applicable au niveau de service est de 2,5 mm.
  - La puissance de générateur peut atteindre 100 KW.
  - L′épaisseur de l′ouverture de gantry est estimée à 800 mm.
- Position de la patiente : Le scanner de centrage est la première étape dans la planification de la radiothérapie. Toutes les patientes incluses dans cette étude ont subi une acquisition des données à l′aide du scanner GE OPTIMA 580 RT, avec des coupes de 2,5 mm. Le processus d′imagerie est simple et indolore ce qui nous permet de localiser précisément la tumeur à traiter. La patiente est positionnée correctement et confortablement à l′aide de moyens de contention appropriés (le plan incliné dans le cas de cancer du sein). La position habituelle est allongée sur le dos, les bras levés au-dessus de la tête et maintenus par des accoudoirs, le cou légèrement tourné dans la direction opposée à la tumeur. Les lignes laser constituent un autre moyen de garantir un positionnement correct. Enfin les images sont transmises à l′unité de planification de traitement via le réseau.
- Les avantages de l′appareil : cet appareil garantit simplicité d′utilisation, la précision et l′efficacité. [2]

4.2. L′appareil de traitement :

- Nom de l′appareil : accélérateur linéaire médicale.
- Le fabricant : VARIAN.
- Le modèle : TRILOGY.
- Les techniques de traitement : 3D-CRT, IMRT, VMAT et le traitement par électrons.

- Les énergies photoniques : X6, X18 et X6 SRS.
- Les énergies électroniques : 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 15 MeV, 18 MeV, 22 MeV.
- Débit de dose maximal : 600 um/min pour (X6 et X18) et 1000 um/min pour (X6 SRS).
- Les faisceaux avec filtre.
- La taille maximale du champ : 40 cm x40 cm.
- Le collimateur multilames (MLC) : millennium MLC, le total est de 120 lames. Il y a 60 lames à droite et 60 lames à gauche. De chaque côté, 40 lames au milieu chacune d′environ 5 mm de largeur. Il y a également 10 lames en haut et 10 lames en bas, chacune d′environ 1 cm de largeur. Ces lames se déplacent indépendamment les unes des autres. Selon les instructions envoyées par le système de planification de traitement (TPS) à l′accélérateur linéaire.
- Les logiciels, les systèmes et plateformes de contrôle complétant le travail de l′ accélérateur linéaire :
  - RT SCAN 13,6 : c′un système de positionnement.
  - ECLIPSE 13,7 : Système de planification de traitement (TPS).
  - ARIA : le rôle de cette plateforme propriété de VARIAN, est de gérer et de stocker les informations des patients.

4.3. Système de planification de traitement (TPS) :

- Définition : il s′agit d′un appareil comprenant un ordinateur, un logiciel et un ensemble d′accessoires. Il permet de déterminer les contours des volumes cibles et des organes à risque, comme une étape préliminaire à la planification de la radiothérapie. Á partir de tomodensitométries transversales, ce système crée un modèle virtuel tridimensionnel du patient. Il permet une simulation virtuelle de la forme du faisceau de rayonnement, de la zone masquée par les lames et Bolus. Il calcule également les temps de traitement par faisceau (UM) qui seront nécessaires pour délivrer la dose prescrite et aussi la distribution de la dose au sein du patient. [3]
- Le logiciel de planification de traitement utilisé : ECLIPSE.
- Développé par : VARIAN.
- Version : 13,7.
- Techniques pouvant être réalisées avec le logiciel : 3D-CRT, IMRT et VMAT.
- Nombre de station Eclipse au niveau de service : 3 stations dont une dédiée à l′IMRT et au VMAT.
- Les algorithmes utilisés :

- Dans la technique 3D-CRT, l′algorithme AAA (Anisotropic Analytical Algorithm) est utilisé pour calculer la dose.
- Dans la technique IMRT, l′algorithme PO (photon optimizer) est utilisé pour l′optimisation de l′intensité des faisceaux de rayonnement, puis l′algorithme AAA est utilisé pour calculer la dose finale.

5. Le contourage :

Dans cette étape précédant la planification du traitement, le radiothérapeute utilise Eclipse pour déterminer les volumes cibles et les organes à risque (OARs) pour chaque patiente inclus dans l′étude. En s′appuyant sur les recommandations de l′ICRU et du RTOJ. Cependant, avant de déterminer les contours des volumes cibles, il détermine d′abord l′isocentre directement sur les images TDM, ce point de référence géométrique guide la planification de traitement et la distribution des faisceaux de rayonnement. Le radiothérapeute détermine le CTV à l′aide des fils radio-opaques placés lors de l′examen d′imagerie, il détermine ensuite le PTV en ajoutant une marge d′environ 5 mm à le CTV. Il détermine ensuite les organes à risque notamment, le cœur, le poumon gauche et le sein controlatérale.

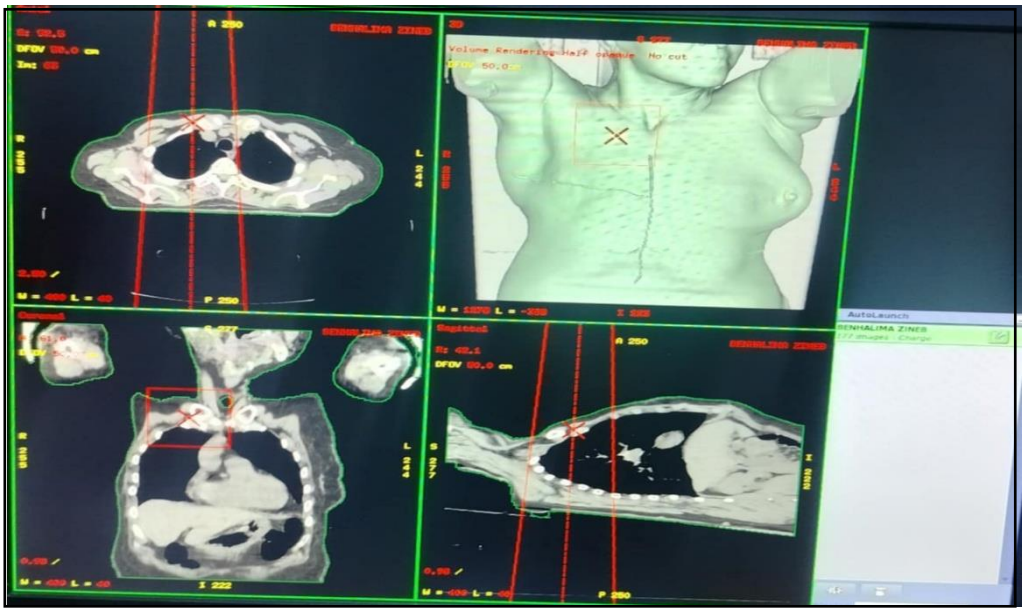


Figure 15 : La détermination de l'isocentre [4]

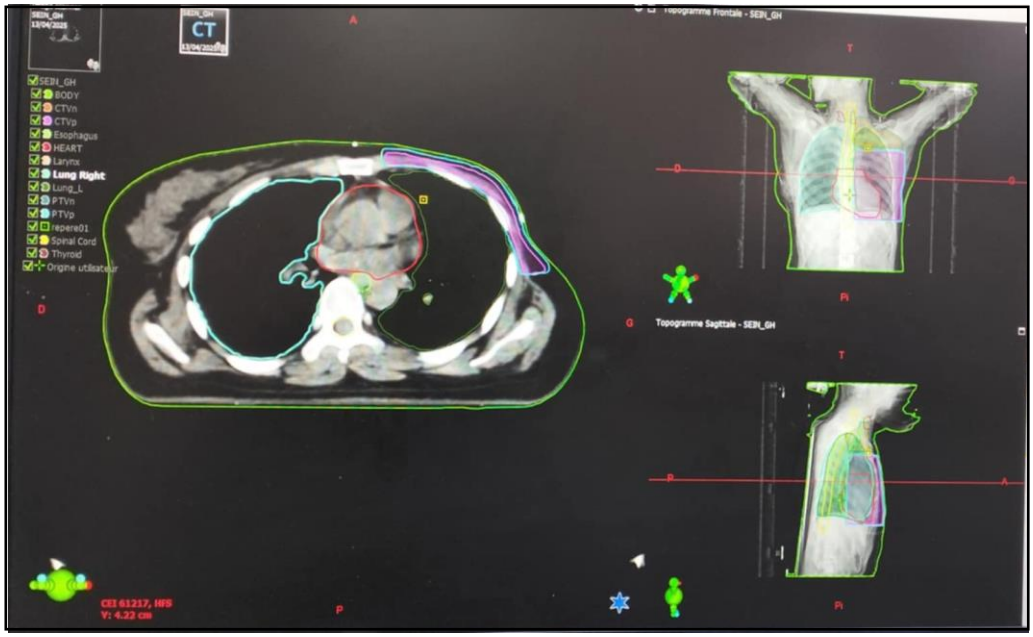


Figure 16 : L'étape de contourage [4]

6. Le choix méthodologique de PTV :

Dans cette étude, nous avons examiné cinq cas de femmes atteintes d′un cancer du sein gauche. Toutes traitées par la radiothérapie après une chirurgie conservatrice, c′est-à-dire que seule la tumeur a été retirée tout en préservant le sein. Ces cas avaient initialement bénéficié d′une radiothérapie sur plusieurs zones, telles que la région sus-claviculaire et la zone du lit tumoral. Cependant afin de standardiser le cadre d′étude et de simplifier l′analyse des résultats nous nous sommes concentrés dans cette planification dosimétrique sur le PTV (sein restant) pour améliorer la précision lors de la comparaison des deux techniques (3D-CRT et IMRT).

7. Description de protocole de planification pour la technique 3D-CRT :

La planification utilisée dans cette technique est une planification directe, nous saisissons toutes les données que nous souhaitons appliquer aux paramètres de l′appareil. Ces données incluent les angles du gantry et du collimateur, la position des mâchoires et des lames, ainsi que les unités de moniteurs fournis. Le TPS calcule ensuite la dose pour tous les faisceaux, ce qui nous donne la dose finale. L′optimisation de la dose est réalisée manuellement pour obtenir la prescription requise.

Grâce au système de planification de traitement (TPS) ECLIPCE, nous créons le plan de la technique 3D-CRT à l′aide de faisceaux de photons de 6 MV et parfois d′une combinaison de photons de 6 MV et 18 MV si l′épaisseur de pénétration est importante. Ces faisceaux sont délivrés par un accélérateur linéaire trilogy de la marque VARIAN, nous utilisons des filtres en coins pour garantir l′homogénéité de la dose. Les plans sont réalisés à l′aide de deux champs tangentiels opposés, l′un interne (tgi) et l′autre externe (tge). Les angles des champs ne sont pas constants pour toutes les patientes, mais une plage commune est généralement utilisée : l′angle de tgi est d′environ 300° et l′angle de tge est d′environ 120°, avec un seul isocentre a été positionné au milieu de PTV (sein restant). Nous ajoutons également un point de normalisation et utilisons déférents pondérations. Le collimateur multilames permet de suivre les contours du PTV et de masquer les organes à risque (OAR).

La dose totale prescrite par le radiothérapeute pour le PTV était de 40,05 Gy. Cette dose a été délivrée en 15 fractions de 1,67 Gy par fraction (1 fraction par jour et 5 fractions par semaine). A l′aide de TPS ECLIPSE et de l′algorithme analytique anisotrope (AAA) nous avons calculé la dose. Le calcul de la dose nécessite une couverture de 95% du volume cible, tandis que la dose maximale ne doit pas dépasser 108% de la dose totale prescrite. Dans cette étude

nous avons utilisé la technique champs dans champs afin d'éliminer les zones de surdose. Enfin nous avons calculé les unités de moniteurs.

Figure 17 : Planification de traitement pour la technique 3D-CRT (champs tgi / tge) [4]

8. Description de protocole de planification pour la technique IMRT :

L′IMRT repose sur la planification inverse, qui s′appuie sur les fonctions d′optimisation de TPS. L′utilisateur commence par spécifier les angles du gantry et du collimateur, puis le logiciel optimise la collimation et les unités moniteurs pour chaque faisceau. Lors de la planification inverse, l′utilisateur spécifie le résultat souhaité sous forme de contraintes et d′objectifs, les différentes composantes sont ensuite calculées à l′aide de TPS. Une fois la contrainte appliquée à une région, celle-ci est considérée comme prioritaire, quelle que soit l′importance des autres objectifs spécifiés.

Dans cette technique nous avons commencé par créer le bolus virtuel avec un épaisseur de 1cm. Ceci permet de compenser la fuite laissée au moment de la planification 3D-CRT, cette fuite nous permet de prendre en compte les mouvements internes des organes provoqués par les battements cardiaques et la respiration. Ces mouvements peuvent entraîner un déplacement du volume cible PTV (sein restant), impactant négativement l′efficacité du traitement. Le bolus utilisé lors de l′optimisation du technique IMRT, est avec une densité similaire à celle de l′eau (1 g / cm^3).

En s′ appuyant sur le système de planification de traitement (TPS) ECLIPCE, nous créons le plan de la technique IMRT à l′aide de faisceaux de photons de 6 MV. Nous définissons deux à six faisceaux fixes, les angles de ces faisceaux varient selon les cas mais sont généralement répartis entre 120° et 340°. Nous évitons tout faisceau susceptible de traverser directement le cœur. Ces faisceaux sont délivrés via un MLC dynamique, utilisant la technique de fenêtre glissante (sliding window) permettant de moduler l′intensité des faisceaux. Nous avons utilisé l′algorithme PO pour l′optimisation inverse et pour calculer la dose finale nous avons appuyé sur l′algorithme AAA.

Nous avons fixé les contraintes pour le volume cible (PTV) ainsi que celles pour les organes à risque (OARs), en leur donnant des priorités particulières. Pour le PTV, nous avons défini deux contraintes :

- La contrainte supérieure : la dose maximale (Dmax), qui ne doit pas être dépassé pour un pourcentage donné de volume.
- La contrainte inférieure : la dose minimale (Dmin), qui doit être atteinte pour un pourcentage donné de volume.

Pour les organes à risque (OARs) tels que le cœur, le poumon gauche et le sein controlatéral, nous avons également identifié des contraintes spécifiques associées à chaque organe.

Après avoir identifié toutes les contraintes, nous lançons le processus d′optimisation où l′algorithme d′optimisation (PO) ajuste automatiquement les fluences pour répondre à ces faits, nous avons résumé les différentes étapes de l′optimisation à la délivrance de la dose dans le tableau suivant :

L′étape	Techniques et outils utilisés	Le fluence
La planification IMRT	▪ La définition des contraintes spécifiques concernant le volume cible (PTV) et les organes à risque (OARs). ▪ L′optimisation de la fluence par l′algorithme d ′optimisation PO.	La fluence optimale
Conversion de la fluence optimale en fluence actuelle	La fluence optimale est convertie en fluence actuelle grâce à une module logiciel appelé ″Left Motion Calculator (LMC)‟, la fluence actuelle basée sur la technique de délivrance contrairement à une fluence optimale et prend en compte les propriétés mécaniques physiques et dosimétriques du MLC	La fluence actuelle
Le calcul de la dose	Pour calculer la dose finale nous avons appuyé sur l′algorithme AAA.	La fluence calculée
La délivrance de la dose	La délivrance de la dose via un MLC dynamique utilisant la technique de fenêtre glissante (sliding window).	La fluence réelle

Tableau 4 : Les étapes de l'optimisation à la délivrance de la dose

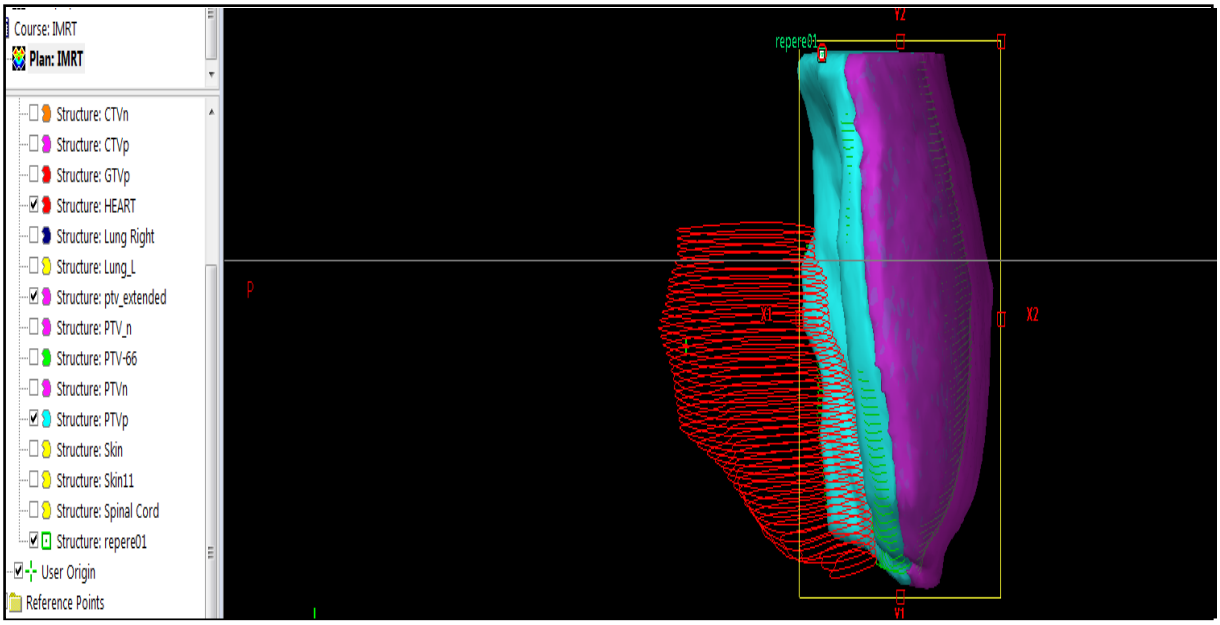


Figure 18 : La création de bolus virtuel [4]

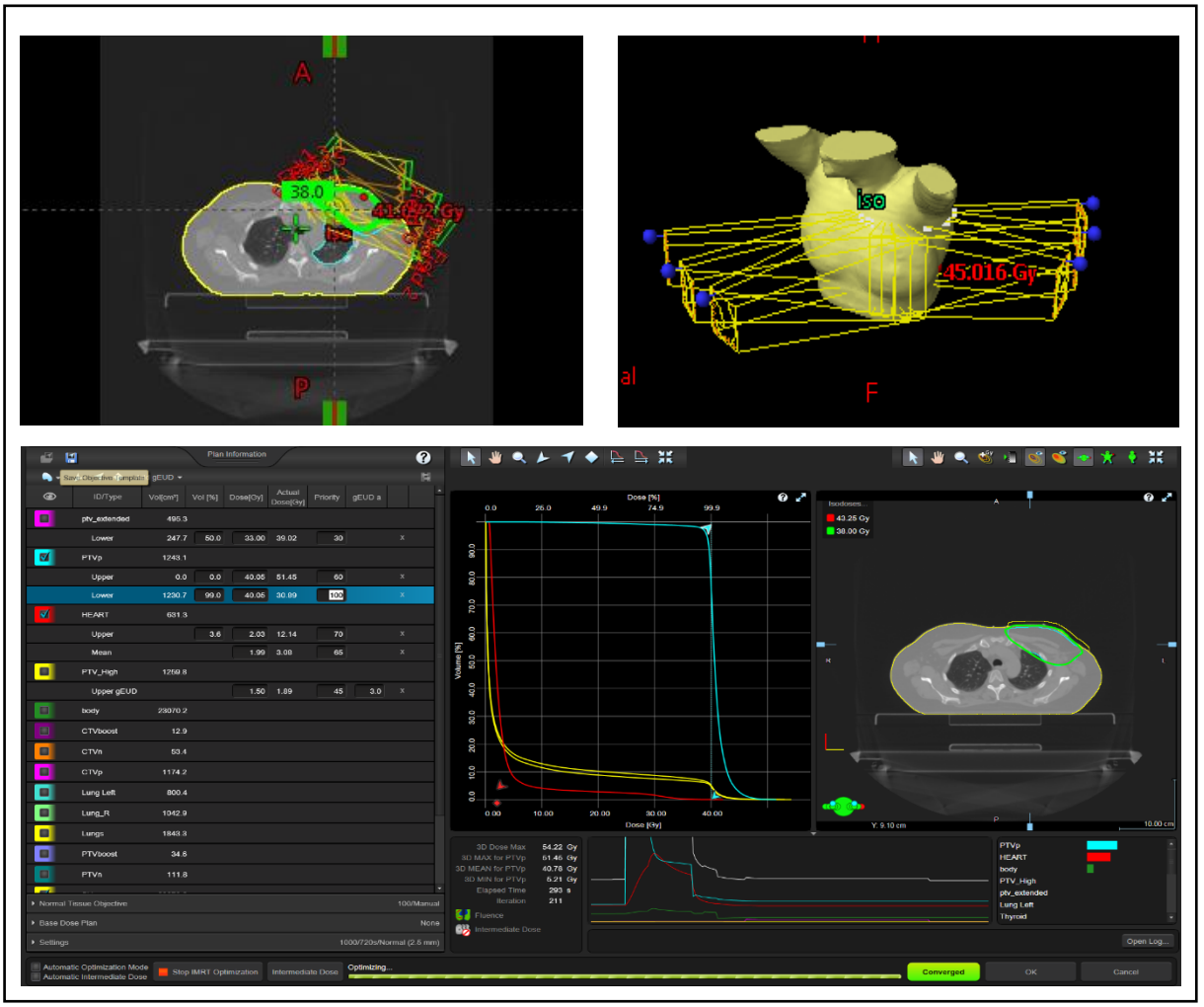


Figure 19 : la balistique de traitement pour la technique IMRT (création des champs et l'optimisation) [4]

9. Outils d′évaluation d′un plan de traitement :

9. 1. L′histogramme dose-volume (DVH) :

L'évaluation du plan de traitement se base sur l'utilisation de l′ histogramme dose-volume (DVH), ce dernier est une représentation graphique de la distribution de la dose dans le volume de l′organe où la dose est représentée sur l′axe des abscisses, tandis que le pourcentage de volume de l′organe est représenté sur l′axe des ordonnées. Grâce à l′analyse de DVH, nous pouvons comparer visuellement la dose reçue à différents volumes en tenant compte de la couverture de PTV. Cela nous permet d′évaluer la corrélation entre PTV et OARs lors du processus de planification dosimétrique. D′autre part nous pouvons évaluer le DVH quantitativement en nous s′appuyant sur des paramètres tels que : [5]

- La valeur de la dose maximum (Dmax) est établie à D2%
- La valeur de la dose minimum (Dmin) est établie à D98%
- Le PTV reçoit 95% de la dose prescrite
- La dose moyenne (Dmoy)
- Dose maximum (le point chaud : 107%)
- La dose médiane (D50%) est proche de la dose de la prescription et très proche de la dose de référence.

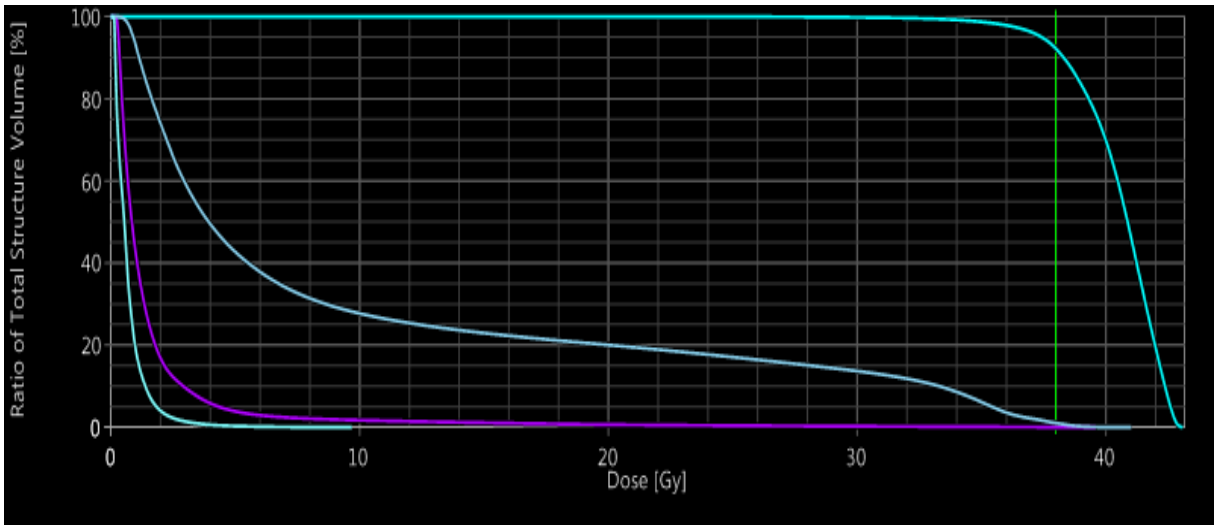


Figure 20 : Histogramme dose-volume (DVH) [4]

Étant donné que le DVH contient de nombreuses informations qui peuvent être difficiles à analyser et à interpréter, certaines études ont suggéré l′utilisation des indices dosimétriques

car ce sont des outils simples qui nous permettent d′analyser la distribution de la dose et d′aider à choisir le plan de traitement idéal. Ces indices sont les suivants :

9.2. Indice de conformité [6] :

Cet indice a été suggéré par le Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) en 1993 dans le but d′apprécier le degré de conformation de dose au volume tumoral, la relation suivante définit cet indice :

$$\mathbf{IC} = \frac{V_{IR}}{V_T}$$

Sachant que :

- V_{IR} : exprime le volume de l'isodose de référence.
- V_T : exprime le volume tumoral.

Le RTOG a défini l'isodose de référence (IR) de même que l'isodose de prescription. Le rapport 50 de l'ICRU a recommandé que l'isodose de référence correspond à 95% de la dose prescrite alors :

$$\mathbf{IC} = \frac{V_{95\%}}{V_T}$$

Sachant que :

- La conformation est idéale au cas où IC = 1
- Le volume cible est inférieur au volume irradié et ce dernier peut comprend les tissus sains au cas où IC > 1
- Le volume cible est incomplètement irradié au cas où IC < 1

9. 3. Indice d'homogénéité [6] :

L'uniformité de la distribution de la dose reçue au niveau de volume cible est exprimée par l'homogénéité de la dose, plusieurs organisations et auteurs ont défini cet indice sous la forme de nombreuses définitions dans la littérature. RTOG a donné l′indice d′ homogénéité comme suit :

$$\mathbf{IH} = \frac{I_{max}}{IR}$$

Sachant que :

- I_{max} : exprime l'isodose maximale au niveau de la tumeur.
- IR exprime l'isodose de référence.

L′ équations d'indice d'homogénéité a connu de nombreuses recherches et développements, alors qu′une aitre définition a été mentionnée dans le rapport 83 de l'ICRU est donnée comme suit (c′est la forme utilisée pour l'IMRT) :

$$\mathbf{IH} = \frac{\boldsymbol{D_{2\%} - D_{98\%}}}{\boldsymbol{D_{50\%}}}$$

Sachant que :

- D2% : exprime la dose qui assurant la couverture de 2% du volume cible ou la dose maximale reçue par le PTV.
- D98% : exprime la dose qui assurant la couverture de 98% du volume cible ou la dose minimale reçue par le PTV.
- D50% : exprime la dose qui assurant la couverture de 50% du volume cible.

La dose délivrée au PTV est homogène si le résultat de IH est proche de zéro.

Chapitre IV : Résultats et Évaluation

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de la comparaison entre les deux techniques : 3D-CRT et IMRT, dans le traitement de cancer du sein gauche. En évaluant la dose au niveau du volume cible (PTV : sein restant) : D2%, D98% et D50% et au niveau des organes à risque (OARs) notamment : le cœur et le poumon gauche, en nous appuyant sur les indices dosimétriques : l′indice d'homogénéité (IH) et l′indice de conformité (IC). Les résultats de cette étude nous permettront d′identifier les avantages et les inconvénients de chaque technique.

1. Présentation des résultats de chaque technique :

1.1. Les résultats dosimétriques pour la technique 3D-CRT :

Les résultats associés aux paramètre étudiés de PTV et OARs pour la technique 3D-CRT sont présentés dans le tableau suivant :

Le cas / La zone		Patiente 1	Patiente 2	Patiente 3	Patiente 4	Patiente 5
Le volume cible (PTV) : Sein restant	D2%	42,61	42,75	42,74	42,93	42,96
	D98%	25,04	35,80	21,82	24,71	22,56
	D50%	41,32	40,86	41,09	41,03	41,79
	Vptv(cm^3)	1352,90	1735,60	1290,40	1479,50	1640,0
	V95 (Gy)	1208,65	1596,09	1144,77	1320,06	1467,89
	V95 (%)	89,13	91,79	88,92	89,12	90,98
	IH	0,42	0,17	0,50	0,44	0,48
	IC	0,89	0,92	0,88	0,89	0,91
Le poumon gauche	V16 (%)	8,25	22,28	20,23	22,09	20,56
	V26 (%)	5,79	16,43	13,57	13,76	15,09
Le cœur	Dmoy	2,62	1,55	2,88	3	2,42

Tableau 5 : résumé des résultats dosimétriques pour la technique 3D-CRT

1.2. Les résultats dosimétriques pour la technique IMRT :

Les résultats associés aux paramètre étudiés de PTV et OARs pour la technique IMRT sont présentés dans le tableau suivant :

Le cas / La zone		Patiente 1	Patiente 2	Patiente 3	Patiente 4	Patiente 5
Le volume cible (PTV) : Sein restant	D2%	41,69	42,07	41,37	42,33	41,95
	D98%	24,97	37,47	35,04	29,91	34,61
	D50%	40,21	40,59	39,92	40,03	40,65
	Vptv(cm^3)	1304,7	1669,7	1243,1	1479,5	1614
	V95 (Gy)	1170,78	1617,04	1134,63	1284,4	1495,5
	V95 (%)	89,8	98	91	93,81	92
	IH	0,43	0,11	0,15	0,31	0,18
	IC	0,89	0,96	0,91	0,86	0,92
Le poumon gauche	V16 (%)	5,42	23	11	25,19	19
	V26 (%)	3,38	11	7	13,76	11
Le cœur	Dmoy	4,22	2	4,6	2,54	4,15

Tableau 6 : résumé des résultats dosimétriques pour la technique IMRT

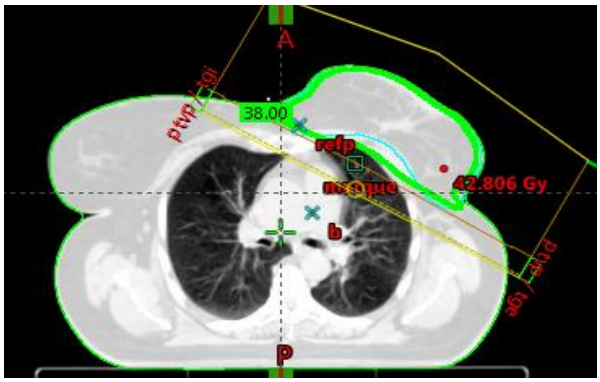
2. L′analyse et l′évaluation de résultats dosimétriques cas par cas :

2.1. La patiente 1 (3D-CRT vs IMER) :

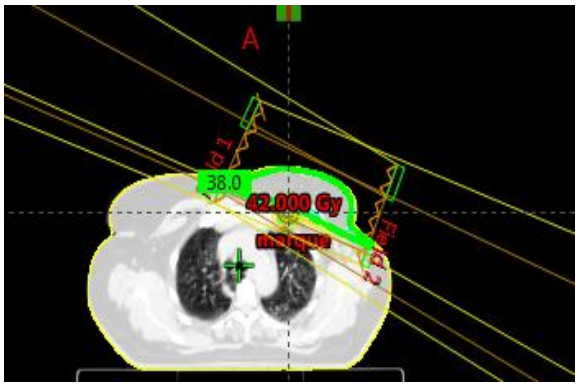
Concernant la couverture tumorale, nous observons des valeurs très similaires pour D2%, D98% et V95% dans les deux techniques, en revanche nous n′avons pas observé de différence nette dans les valeurs de IH et IC lors de la comparaison des deux techniques. A partir de ces valeurs, nous pouvons dire qu′il existe une très légère différence dans la couverture du volume cible (PTV) et qu′elle n′est cliniquement significative dans aucune des deux techniques. Concernant les organes à risque (OARs), nous observons des valeurs plus faibles de V16 et V26

dans la technique IMRT par rapport à la technique 3D-CRT ce qui garantit une toxicité pulmonaire réduite (risque de pneumopathie radique). En revanche, la 3D-CRT est clairement supérieure pour l'épargne du cœur avec une dose moyenne plus faible, ce qui garantit une toxicité cardiaque réduite et une meilleure protection du cœur.

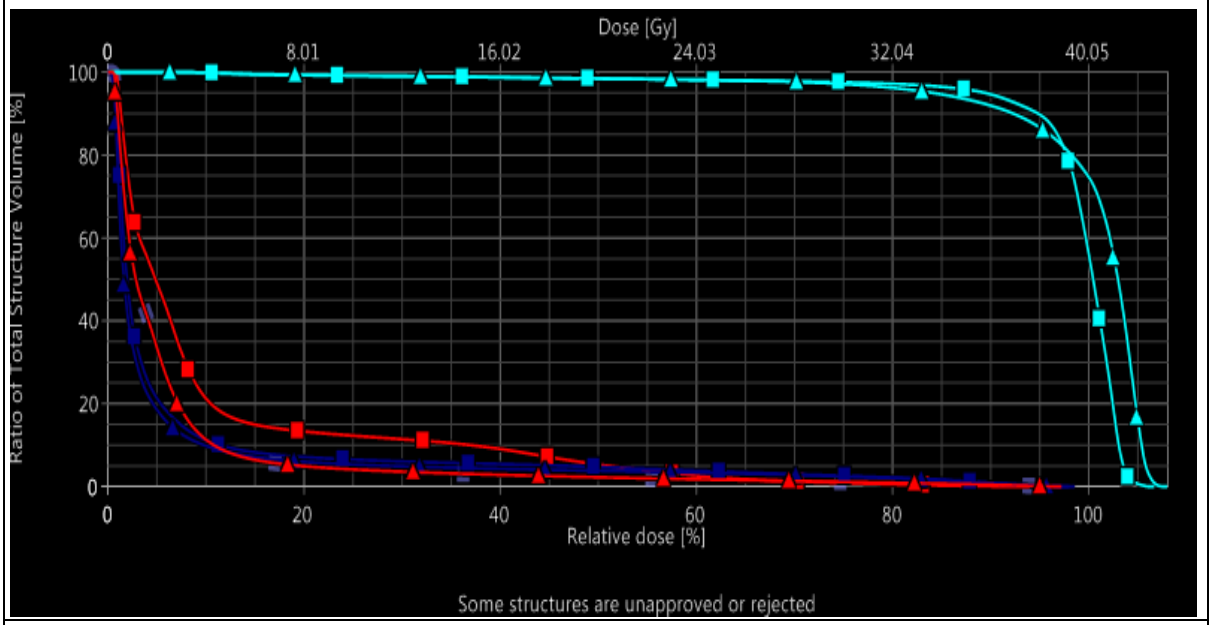
En résumé, la 3D-CRT offre une meilleure épargne du cœur, tandis que l'IMRT est plus avantageuse pour le poumon gauche. La performance sur la cible est très comparable. Le choix idéal dépendrait des priorités cliniques spécifiques pour cette patiente.



3D-CRT



IMRT



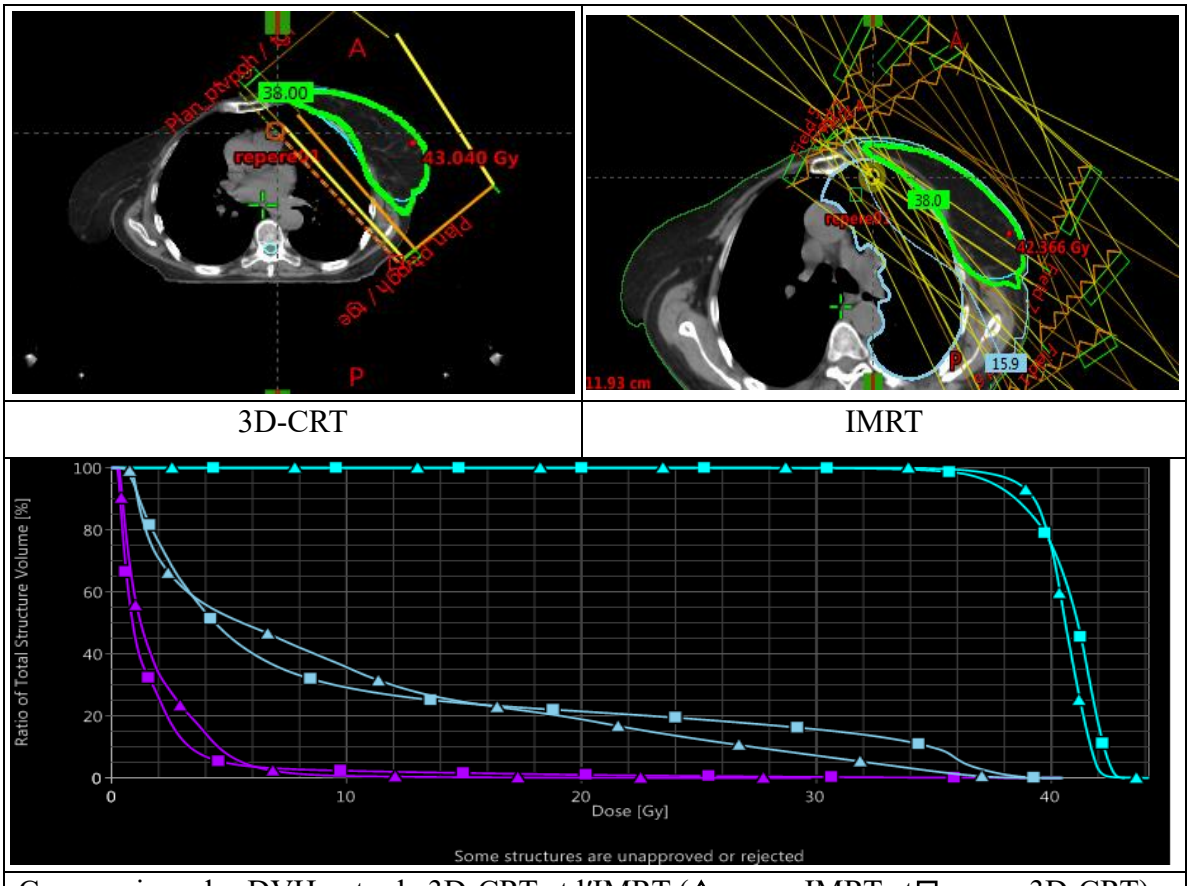
Comparaison des DVH entre la 3D-CRT et l'IMRT (△ : pour 3D-CRT et □ pour IMRT)

Figure 21 : résultats de la patiente 1

2.2. La patiente 2 (3D-CRT vs IMER) :

Concernant la couverture tumorale, nous remarquons des valeurs élevées pour D98% et V95% et une valeur faible pour D2% en IMRT par rapport à la 3D-CRT, nous constatons que l'IMRT offre une bonne homogénéité (IH 0,11 vs 0,17) et une meilleure conformité (IC 0,96 vs 0,92). Sur la base de ces valeurs, nous pouvons affirmer que l'IMRT assure une meilleure couverture du volume cible (PTV) et offre une plus grande efficacité en termes de contrôle tumoral. Concernant les organes à risque (OARs), nous observons une valeur très faible pour V26 dans la technique IMRT, ce qui assure une moindre toxicité pulmonaire, nous notons d'autre part que la valeur de Dmoy pour le cœur est faible dans la technique 3D-CRT par rapport à l'IMRT, la différence est estimée à 0,45 Gy ce qui est dans les limites cliniquement admissibles et n'est pas d'impact significatif au vu du reste des bénéfices obtenus.

En résumé, l'IMRT excelle pour la couverture et l'homogénéité de volume cible (PTV) et elle offre une protection très acceptable du poumon gauche, la 3D-CRT épargne mieux le cœur. Le compromis est important ici, car une dégradation significative de la couverture de PTV avec 3D-CRT pourrait ne pas être acceptable même avec une meilleure épargne cardiaque.



3D-CRT	IMRT

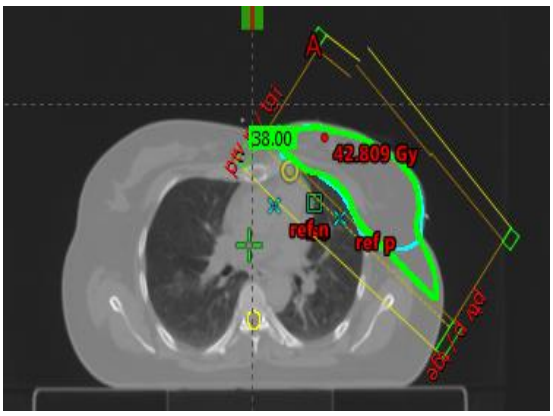
Comparaison des DVH entre la 3D-CRT et l'IMRT (△ : pour IMRT et □ : pour 3D-CRT)

Figure 22 : résultats de la patiente 2

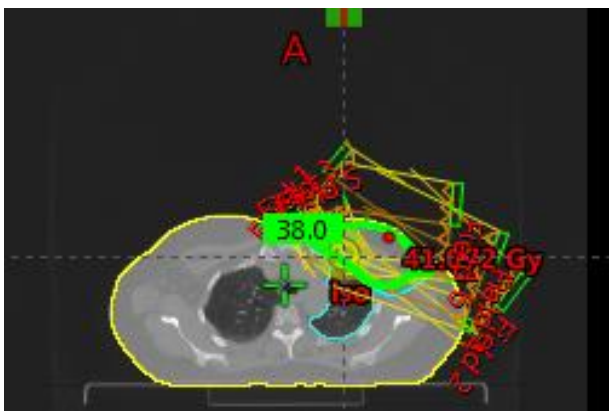
2.3. La patiente 3 (3D-CRT vs IMER) :

En ce qui concerne la couverture tumorale, nous remarquons des valeurs élevées pour D98% et V95% et une valeur faible pour D2% en IMRT par rapport à la 3D-CRT, nous constatons que les valeurs de IH et IC sont très acceptables en IMRT. Sur la base de ces valeurs, nous pouvons assurer que l'IMRT offre plus grande précision en termes de couverture du volume cible (PTV) et assure une plus grande efficacité en termes de contrôle tumoral. En ce qui concerne les organes à risque (OARs), nous remarquons des valeurs faibles pour V16 et V26 en IMRT par rapport à 3D-CRT, assurant une toxicité pulmonaire réduite. En revanche nous observons une réduction de dose moyenne au cœur avec 3D-CRT, ce qui assure une toxicité cardiaque réduite et une meilleure protection du cœur.

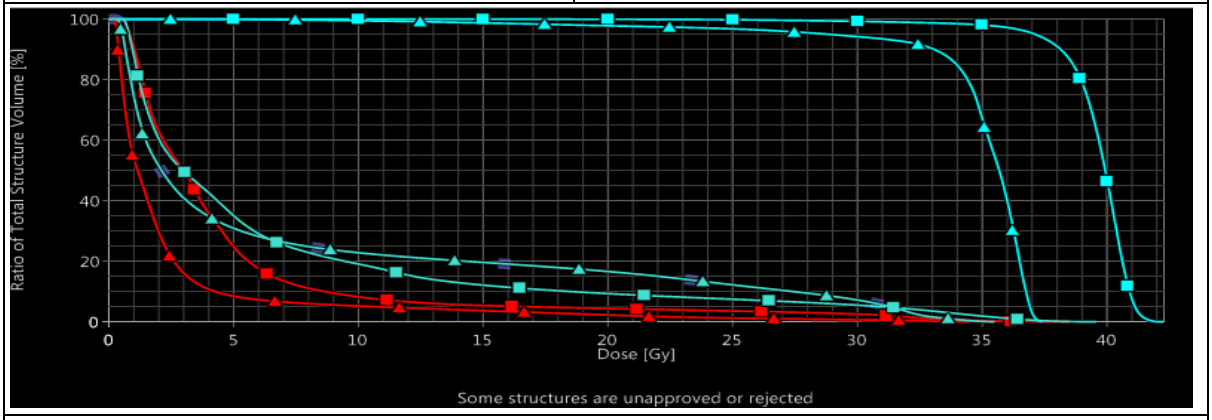
En résumé, l'IMRT assure une meilleure couverture du PTV et une meilleure protection du poumon gauche. La 3D-CRT est meilleure pour l'épargne du cœur. Dans ce cas, les avantages de l'IMRT semblent prédominer, suggérant peut-être une géométrie de traitement plus favorable à cette technique ou une optimisation 3D-CRT particulièrement réussie.



3D-CRT



IMRT



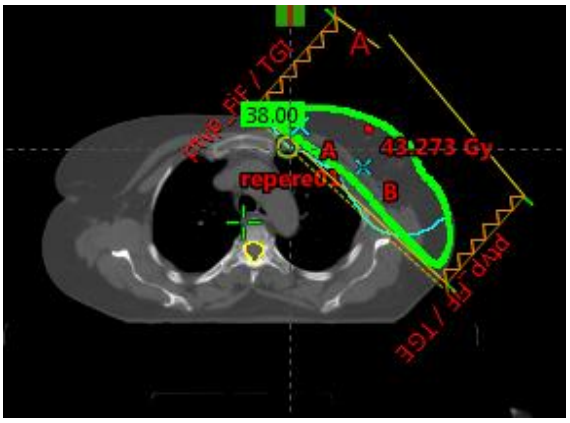
Comparaison des DVH entre la 3D-CRT et l'IMRT (□: pour IMRT et △: pour 3D-CRT)

Figure 23 : résultats de la patiente 3

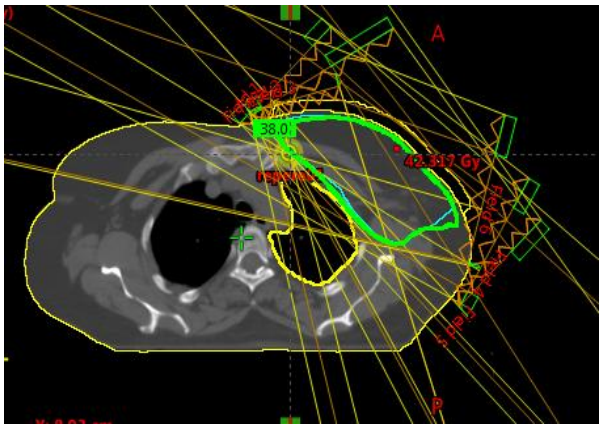
2.4. La patiente 4 (3D-CRT vs IMER) :

A propose de la couverture tumorale, nous constatons que les valeurs de D98% et de V95% sont élevées et la valeur de D2% est faible en IMRT par rapport à la 3D-CRT. Pour les indices calculés, nous observons que la 3D-CRT a un indice de conformité légèrement meilleure, tandis que la valeur de IH en IMRT est meilleure par rapport à la 3D-CRT. Donc en peut dire que l'IMRT garantit une meilleure couverture du volume cible (PTV) et offre une plus grande précision en termes de contrôle tumoral. A propose les organes à risque (OARs), nous observons une réduction de dose moyenne au cœur avec IMRT, ce qui assure une toxicité cardiaque réduite et une meilleure protection du cœur. Concernant la protection de poumons gauche, la 3D-CRT est meilleure pour le poumon à 16 Gy, et les deux techniques sont identiques à 26 Gy.

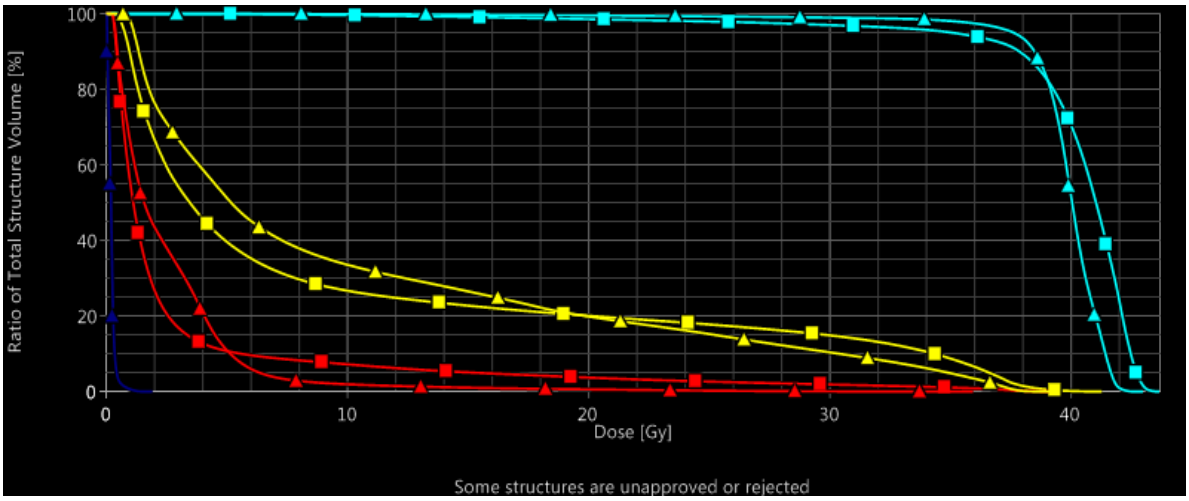
En résumé, c'est un cas de compromis mixte. L'IMRT offre une meilleure couverture/ homogénéité de PTV et une meilleure épargne du cœur. La 3D-CRT est légèrement plus conforme et meilleure pour le poumon à 16 Gy. Le choix dépondra des priorités cliniques.



3D-CRT



IMRT



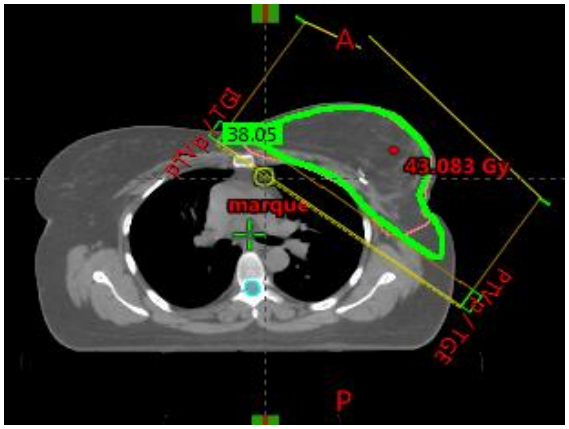
Comparaison des DVH entre la 3D-CRT et l'IMRT (□ :pour 3D-CRT et △ : pour IMRT)

Figure 24 : résultats de la patiente 4

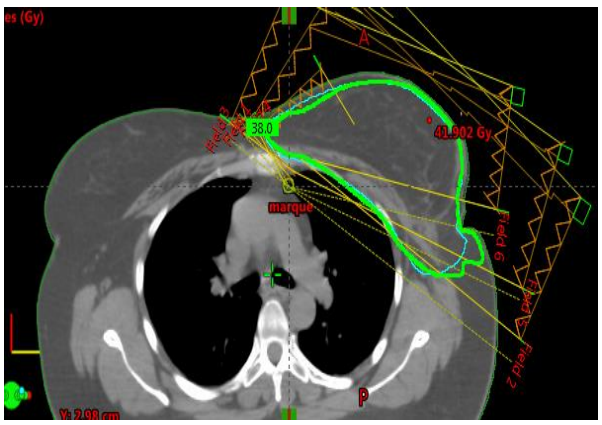
2.5. La patiente 5 (3D-CRT vs IMER) :

Pour la couverture tumorale, nous remarquons des valeurs élevées pour D98% et V95% et une valeur faible pour D2% en IMRT par rapport à la 3D-CRT, de plus nous constatons que la valeur de IH est très acceptable en IMRT par rapport à la 3D-CRT, tandis que les valeurs de IC sont quasiment identiques dans les deux techniques. Grâce à ces résultats, nous pouvons dire que l′ IMRT a permis d′obtenir une meilleure précision de couverture de PTV. Pour les organes à risque (OARs), en comparaison avec la technique 3D-CRT nous observons des valeurs faibles pour V16 et V26 en IMRT, assurant une toxicité pulmonaire réduite. Au contraire nous observons une réduction de dose absorbé par cœur avec 3D-CRT, ce qui assure une toxicité cardiaque réduite et une meilleure protection du cœur.

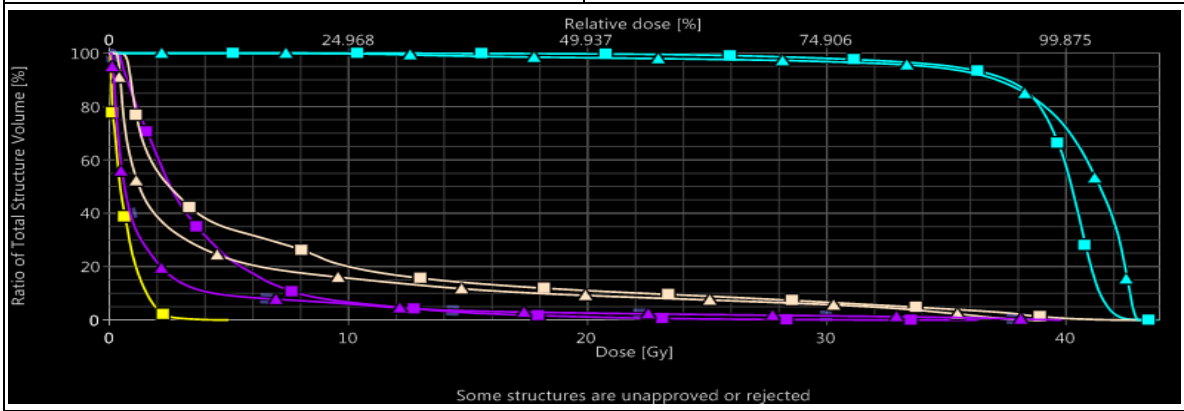
En résumé, grâce à l′IMRT nous avons obtenu une bonne couverture du PTV et une meilleure protection de poumon gauche. Bien que la 3D-CRT ait permis de réduire efficacement le Dmoy cardiaque. Ce cas présente un compromis similaire aux précédents.



3D-CRT



IMRT



Comparaison des DVH entre la 3D-CRT et l′IMRT (△:pour IMRT et □ :pour 3D-CRT)

Figure 25 : résultats de la patiente 5

3. Avantages et inconvénients de chaque technique :

A partir des résultats de la majorité des cas des résultats dans cette étude, nous avons résumé les avantages et les inconvénients de chaque technique dans le tableau suivant :

Le paramètre	La technique 3D-CRT	La technique IMRT
Couverture de PTV	Une couverture réduite du PTV	Une meilleure couverture du PTV
Protection des OARs	▪ Une protection moindre du poumon gauche. ▪ Une meilleure protection du cœur.	▪ Une meilleure protection des OARs notamment le poumon gauche. ▪ Une protection moindre du cœur.
Le temps de planification	Court	Long
Le temps de traitement	Court	Long
La planification	Plus simple	Complexe

Tableau 7 : Avantages et inconvénients de chaque technique

Conclusion :

Vos données mettent en lumière le fait que le choix entre 3D-CRT et IMRT n′est pas toujours simple et ne penche pas systématiquement en faveur de l′IMRT pour tous les critères. Bien que la 3D-CRT montre une supériorité claire dans l′épargne du cœur (un organe très critique), l′IMRT a démontré dans cette série une meilleure performance sur l′homogénéité et la couverture de volume cible, ainsi que sur l′épargne du poumon gauche.

Cela souligne l′importance d′une planification individuelle et d′une optimisation minutieuse pour chaque patiente et pour chaque technique. Le plan optimal dépondra de la localisation et de la forme de la tumeur, de la proximité et de la tolérance des organes à risque ainsi que des objectifs cliniques spécifiques et des priorités établies par l′équipe soignante.

Conclusion générale

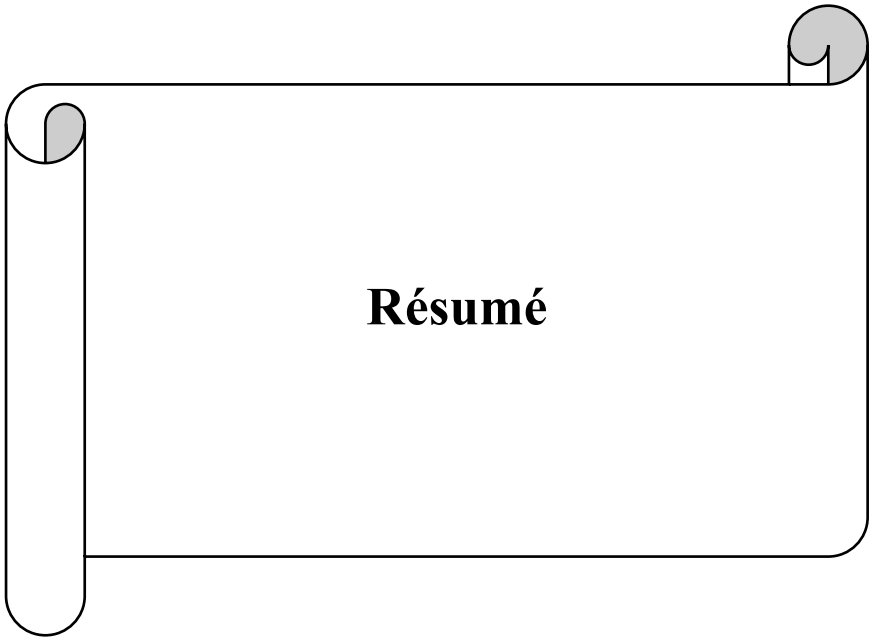
Conclusion générale

Le travail réalisé au centre de lutte contre le cancer de Tlemcen était très intéressant, d′une part grâce à ce travail nous permis de comprendre les deux techniques de planification de traitement (la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle 3D-CRT et la radiothérapie à intensité moduler IMRT). D′autre parte, grâce à la comparaison entre les deux technique (3D-CRT et IMRT) dans le traitement de cancer du sein, nous pouvons identifier les avantages et les limites de chaque technique.

La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (3D-CRT) assure une distribution précise de la dose et une bonne couverture de volume cible, tout en minimisant l'exposition aux radiations des tissus sains environnants. Mais, elle peut augmenter l'exposition de certains organes à risque (notamment le poumon gauche) dans les cas complexes, comme ceux présentant une forme particulière de sein (morphologie concave). Grâce à sa modulation d'intensité, la radiothérapie à modulation d'intensité (IMRT) permet une meilleure homogénéité de dose et une meilleure protection des organes à risque (poumon et cœur), réduisant les effets secondaires à long terme (tels que les complications pulmonaires ou cardiaques). Mais, cette technique est plus complexe à appliquer, exige un temps de planification plus long et peut augmenter le risque d'exposition de volumes de tissus plus importants à des doses plus faibles.

Le choix entre les deux techniques dépend de : l′objectif principal du traitement qui est de mieux couvrir le volume cible tout en minimisant l′exposition des tissus sains, la localisation du cancer, la morphologie chez la patiente, les équipements et les ressources disponibles au niveau du centre. En général, l′IMRT a été privilégiée dans certains cas nécessitant la préservation optimale des organes à risque (OARs) mais la 3D-CRT reste une technique simple et efficace pour les cas standards. Par conséquent, des études complémentaires sont nécessaires pour suivre les effets cliniques des deux techniques sur la qualité de vie des patientes.

En conclusion, nous pouvons affirmer que les développements récents dans le domaine de la radiothérapie doivent être compatibles avec une priorité donnée à l′optimisation de la dose reçue par la tumeur tout en minimisant l′exposition des organes à risque. Cela ouvre la voie au dialogue entre les radiothérapeutes, les physiciens médicaux et tous les acteurs du domaine, afin de parvenir à un traitement efficace et personnalisé.



Résumé

Résumé :

Ce mémoire porte sur une analyse comparative de la dosimétrie dans le traitement du cancer du sein, en se concentrant spécifiquement sur deux techniques de radiothérapie externe : la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (3D-CRT) et la radiothérapie avec modulation d'intensité (IMRT). L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et de comparer les distributions de dose délivrées aux tumeurs mammaires, ainsi qu'aux organes à risque (OARs) adjacents tels que le cœur, en utilisant des plans de traitement basés sur ces deux modalités. La méthodologie implique la planification dosimétrique rétrospective sur une cohorte de patients atteints d'un cancer du sein, en simulant des traitements avec les deux techniques pour chaque patient. Des critères dosimétriques spécifiques (par exemple, D95%, IH, IC pour la cible ; Dmoy, V26 Gy pour les OARs) seront utilisés pour quantifier et comparer l'efficacité de la couverture tumorale et la protection des tissus sains.

Les résultats attendus de cette recherche visent à mettre en évidence les avantages et les inconvénients dosimétriques de l'IMRT par rapport à la 3D-CRT dans le contexte du cancer du sein. L'hypothèse est que l'IMRT pourrait offrir une meilleure conformité de dose à la cible et une réduction significative de la dose aux OARs, potentiellement diminuant la toxicité à long terme. Les conclusions de ce mémoire fourniront des informations précieuses pour les cliniciens et les physiciens médicaux dans l'optimisation des stratégies de planification du traitement, contribuant ainsi à l'amélioration des soins personnalisés et à la qualité de vie des patientes atteintes d'un cancer du sein.

Abstract:

This master's thesis focuses on a comparative dosimetric analysis in breast cancer treatment, specifically examining two external beam radiation therapy techniques: 3D Conformal Radiation Therapy (3D-CRT) and Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT). The primary objective of this study is to evaluate and compare the dose distributions delivered to breast tumors, as well as to adjacent Organs at Risk (OARs) such as the heart, lungs, using treatment plans based on these two modalities. The methodology involves retrospective dosimetric planning on a cohort of breast cancer patients, simulating treatments with both techniques for each patient. Specific dosimetric criteria (e.g., D95%, HI and CI for the target ; Dmea, V26Gy for OARs) will be used to quantify and compare the effectiveness of tumor coverage and the protection of healthy tissues.

The expected results of this research aim to highlight the dosimetric advantages and disadvantages of IMRT compared to 3D-CRT in the context of breast cancer. The hypothesis is that IMRT could offer better dose conformity to the target and a significant reduction in dose to OARs, potentially decreasing long-term toxicity. The conclusions of this thesis will provide valuable information for clinicians and medical physicists in optimizing treatment planning strategies, thereby contributing to the improvement of personalized care and the quality of life for breast cancer patients.

ملخص :

تركز هذه المذكرة على تحليل مقارن لقياس الجرعات في علاج سرطان الثدي، مع التركيز بشكل خاص على تقنيتين للعلاج الإشعاعي الخارجي :العلاج الإشعاعي ثلاثي الأبعاد المطابق (3D-CRT) والعلاج الإشعاعي المعدل الشدة (IMRT)الهدف الأساسي لهذه الدراسة هو تقييم ومقارنة توزيعات الجرعات التي تُسلّم إلى أورام الثدي، وكذلك إلى الأعضاء المعرضة للخطر (OARs) المجاورة مثل القلب والرئتين، باستخدام خطط العلاج القائمة على هاتين الطريقتين. تتضمن المنهجية التخطيط الرجعي لقياس الجرعات على مجموعة من مرضى سرطان الثدي، ومحاكاة العلاجات بكلتا التقنيتين لكل مريض. سيتم استخدام معايير قياس جرعات محددة على سبيل المثال، D95%، IH وIC للهدف؛ Dmoy ، V26Gy للأعضاء المعرضة للخطر لتحديد ومقارنة فعالية تغطية الورم وحماية الأنسجة السليمة.

تهدف النتائج المتوقعة لهذا البحث إلى تسليط الضوء على المزايا والعيوب الجرعاتية لـ IMRT مقارنة بـ 3 D-CRT في سياق سرطان الثدي. الفرضية هي أن IMRT يمكن أن توفر توافقًا أفضل للجرعة مع الهدف وتقليلًا كبيرًا في الجرعة للأعضاء المعرضة للخطر، مما قد يقلل من السمية على المدى الطويل. ستقدم استنتاجات هذه الرسالة معلومات قيمة للأطباء والفيزيائيين الطبيين في تحسين استراتيجيات تخطيط العلاج، وبالتالي المساهمة في تحسين الرعاية الشخصية وجودة حياة مرضى سرطان الثدي.

Références bibliographiques

Introduction :

[1] : Belomaria Ibtissam, Oulmekki Safed, Ouhaddi Oumaima et El arrache Leila ; *Les conséquences de la mastectomie sur la qualité de vie des femmes atteintes du cancer du sein au niveau de l'institut national d'oncologie à Rabat*. Mémoire de fin d'étude ; Institut supérieur des professions infirmières et techniques de santé de Rabat 2021

[2] : Achille, E ; Classe, JM ; Dohollou, N ; Gilles, R ; Kerbrat, P ; Mauriac, A ; Tardivou, A ; Vennin, P. (2007). *Comprendre le cancer du sein, Institut national du cancer*, France ; 12

[3] : Khrouf, S ; Ksontini, F.L ; Ayadi, M ; Rais, H.B.A ; et MezlinI, A. (2020*). Le dépistage du cancer du sein : une polémique qui divise*. *La tunisie médicale*, 98(01), 22-34

[4] : Cutuli, B. (2009). *Radiothérapie du cancer du sein chez le sujet âgé. Cancer /Radiothérapie*, 13(6-7), 615-622

[5] : Hadjidj, I ; Benkhoris, B ; Ghzaiel, K ; et Claude, I. (2023). *Innovations en radiothérapie externe au sein du parcours de soin du patient. IRBM News*, 44(6), 1-15

[6] : Buisseret, L ; Desmet, A ; Pop, F ; Philippson, C ; Veys, I ; et Azambuja, E. (2022). *L'évolution de la prise en charge du cancer du sein : nouveautés en 2022. Revue médicale de Bruxelles*, 43(4), 298-305

Chapitre 1 :

[1] : Marchetti, T. (2024). *Le cancer a-t-il encore un avenir ? un guide médical sur le chemin inexorable d'une maladie mortelle à une maladie chronique, le presse de l'université de Bremen* ; 10

[2] : Arnal, B ; Curtay, JP ; Dransart, P ; Lagarde, P ; Moro buronzo, A ; Schwartz, L ; Sivault, C. (2018). *Cancer SOIS TOI Ce qu'on ne vous dit pas, éditions SNI, l'équipe de plantes & bien être*, Suisse ; 11-14-15-59-60-61

[3] : Frikha, N ; Chlif, M. *Un aperçu des facteurs de risque du cancer du sein. Bulletin de l'académie nationale de médecine*, 205 (5),519-527

[4] : Falk, A.T ; Fenoglietto, P ; Azria, D ; et Bourgier, C. (2014). *Nouvelles techniques de radiothérapie externe : exemple de prise en charge dans les cancers du sein. Cancer/Radiothérapie,* 18(5-6), 480-485

[5] : Douae ElkhroufI ; *Les facteurs limitant le recours des femmes au dépistage du cancer du sein au niveau des deux centres de santé DIOR ESSALAM ET SIDI SAID*. Mémoire de fin d′étude ; Institut privé de formation professionnelle Maroc 2024

[6] : Traore, S.T ; *Cancer du sein au Mali : anatomie clinique et suivi* ; thèse de doctorat en médecine ; Faculté de médecine, de pharmacie et d′odontostomatologie, Mali ; 2008

[7] : Disponible sur : https://www.vidal.fr/maladies/cancers/cancer-sein.html

[8] : Aichetou Djime Galledou ; *Etude et implémentation d'un outil d'aide à la décision médicale sur basé l'intelligence artificielle : cas du cancer du sein chez la femme*. Mémoire de fin d′étude ; Université Cheikh Anta DIOP de Dakar 2018

[9] : Wissam BoudjeliL ; *Comparaison dosimétrique des techniques de traitements 3D, IMRT et hybride dans le cancer du sein cas mastectomie*. Mémoire de fin d′étude ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2023

[10] : Vinanti, A ; Vinchant, M ; Presse, M ; Benachi, A. (2022). *Gynécologie-Obstétrique, Elsevier Masson,* France ;83

[11] : Hammouche Fatima et Hammiche Lamia ; *La qualité de vie chez les femmes atteintes du cancer du sein opérées*. Mémoire de fin d′étude ; Université de Béjaïa 2017

[12] : Nkondjock, A ; Ghadirian, P. (2005). *Facteurs de risque et réduction du risque de cancer du sein. Revue M /S : médecine sciences*, 21(2), 175-180

[13] : Boussalem Chaimaa ; *Application des techniques nucléaires (XRF&INAA) pour le dosage du zinc dans les cheveux de femmes atteintes du cancer du sein*. Mémoire de fin d′étude ; Université Saad Dahleb Blida (1) 2020

[14] : Obtenu grâce à un stage pratique dans une clinique chirurgicale privée à Tlemcen

[15] : Serin, D ; Ferrandez, G. (2022). *Cancer du sein : rééducation, réadaptation, qualité de vie, Elsevier Masson,* France ; 4-9-19-21-22-23-24

[16] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/472336829/Cancer-du-sein-2020

[17] : Wilkinson, A.N. (2020*). Démystifier le cancer du sein. Canadian Family physician / Le Médecin de famille canadien,* 96, e 151

[18] : Cours par Chaimae Benmousa. (2022). *Cancer du sein*

[19] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/652024067/8-Radiotherapie-du-Sein-SFjRO

Chapitre 2 :

[1] : EspeneL, S ; Trone, J. C ; Vallard, A ; Guy, J. B ; Moriceau, G ; Mery, B ; Langrand-Escure, J ; Rivoirard, R ; Loroche, G ; Chargari, C ; et Magne, N. (2015). *Cancers rares et nouvelles techniques de radiothérapie. Bulletin du Cancer, 102*(1), 105-112

[2] : Zorn, C; Schmit, V; Moerschel, E; Dillenseger, J. (2024). *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie quand la théorie éclaire la pratique*, 3éme édition, *Elsevier Masson*, France ; 423-425- 428

[3] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/562478518/LA-RADIOTHERAPIE

[4] : FabbrO, R ; *Modélisation d'un accélérateur linéaire clinique en vue de l'exploitation d'un détecteur à transmission dédié au contrôle qualité en radiothérapie* ; thèse de doctorat ; Université Grenoble Alpes, France, 2017

[5] : Dubois, M ; Bataille, B ; Carlier, D ; Gras, L ; Tokarski, M ; Bonafos, G ; Demailly, F ; Darloy, F ; Mortier, L ; et Desmedt, E. (2018). *Radiothérapie de contact dans le traitement de carcinomes périoculaires: résultats carcinologiques et cosmétiques du centre Léonard-de-Vinci de Dechy. In Annales de Dermatologie et de Vénéréologie*, 145(12), S173-S174

[6] : Thariat, J. ; Habrand, J. L. ; Lesueur, P. ; Chaikh, A. ; Kammerer, E. ; Lecomte, D. ; Batalla, A ; Balosso, J ; et Tessonnier, T. (2018). *Apports de la protonthérapie à la radiothérapie d'aujourd'hui, pourquoi, comment ?.Bulletin du Cancer*, 105(3), 315-326

[7] : France Hadron. (2015). *Hadronthérapie*. Consulté le 17 mai 2025, à l'adresse https://www.francehadron.fr/fr/component/search/?searchword=hadronth%C3%A9rapie&searchphrase=all&Itemid=139

[8] : Colnot, J ; *Risques de complications associés à la radiothérapie externe : étude comparative des doses délivrées aux tissus sains par les techniques avancées de radiothérapie* ; thèse de doctorat ; Université Paris Saclay (COmUE) ; 2019

[9] : Mingchao Yang ; *Optimisation des plans de traitement en radiothérapie grâce aux dernières techniques de calcul de dose rapide* ; thèse de doctorat ; Université PARIS – SUD ; 2014

[10] : Taleb Lotfi ; *Radiothérapie conformationnelle du cancer de la prostate à Oran : technique et résultats* ; thèse de doctorat en sciences médicaux ; Université d′Oran 1, Algérie ; 2017

[11] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/657558353/Radiotherapie-externe-1ere-partie

[12] : Autorité de sûreté Nucléaire. (2017). *La sûreté nucléaire et la radioprotection en France en 2017, ASN- Autorité de sûreté Nucléaire*, France ; 272-273

[13] : ICRU 50 Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy [Rapport]. – 1993

[14] : Dillenseger, JP; Moerschel, E; Zorn, C. (2016). *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie.*

[15] : Mayles, P; Nahum, A; Rosenwalo, JC. (2007). *Handbook of radiotherapy physics theory and practice, Taylor & Francis*, New York Landon ; 199

[16] : Drif, S ; *Calculs dosimétriques des faisceaux de rayons X dans une radiothérapie externe* ; Mémoire de fin d′étude ; Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2019

[17] : Dahi El hadj et Meherchi Lamia ; *Système de double calcul dosimétrique*. Mémoire de fin d′étude ; Université de Tlemcen 2011

[18] : Mehdi Hammoutene ; *Etude d'un accélérateur de particules linéaire à usage médical* ; thèse de doctorat ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie ; 2014

[19] : Maingon, P ; Marchesi, V ; et Crehange, G. (2010*). Radiothérapie conformationnelle par modulation d'intensité. Bulletin du cancer,* 97(7), 759-768

[20] : Coulaud, J ; *Sécurisation des traitements radiothérapeutiques du cancer : validation physique des plans théoriques de radiothérapie par des fantômes dosimétriques anthropomorphes* ; thèse de doctorat ; Université Paul Sabatier-Toulouse III, France ; 2020

[21] : Champciaux, V ; *Calcul accéléré de la dose périphérique en radiothérapie* ; thèse de doctorat ; Université Paris-Saclay, France ; 2021

[22] : Martinetti, F. (2015). *Radiothérapie conformationnelle : Principe et mise en œuvre*. Mémoire de DQPRM, Gustave Roussy, Grand Paris.

[23] : Cho, B. (2018). *Intensity-modulated radiation therapy : a review with a physics perspective. Radiation oncology journal*, 36(1), 1-10

[24] : Bokhari, H; Rather, Y. (2022). *Advanced techniques IMRT : Concept and principles planning in Eclipse.*

[25] : Bourgier, C ; Fenoglietto, P ; Lemanski, C ; DuctieiL, A ; Charissoux, M ; Draghici, R ; et Azria, D. (2016). *Techniques d'irradiation du cancer du sein en 2016 : intérêt et indications de la radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité. Cancer /Radiothérapie*, 20(6-7), 572-575

[26] : : Wissam Boudjelil ; *Comparaison dosimétrique des techniques de traitements 3D, IMRT et hybride dans le cancer du sein cas mastectomie.* Mémoire de fin d'étude ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2023

[27] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/652024067/8-Radiotherapie-du-Sein-SFjRO

[28] : Institut national du cancer. (2013). *Les traitements des cancers SoIS ToI, la ligue contre le cancer,* France ; 50-51

[29] : Dr Mouhcine Hommadi ; *Procédure de la radiothérapie adjuvante hypofractionnée du cancer du sein à l'institut national d'oncologie* ; thèse de doctorat ; Université Mohammed V, Maroc ; 2021

[30] : L'ordre National des Médecins. (s.d). *Guide national des protocoles de radiothérapie, fondation LALLA SELMA prévention et traitement des cancers*, Maroc ; 10-12

[31] : Obtenu grâce à un stage pratique dans le Centre Hospitalo- Universitaire de Tlemcen, Unité de Lutte Contre le Cancer, Service de radiothérapie

Chapitre 3 :

[1] : Disponible sur : https://www.probomedical.com/shop/ge-healthcare/ge-optima-ct580-rt/

[2] : Disponible sur : https://fr.bimedis.com/ge-optima-ct580-w-16-m20353

[3] : Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/657558353/Radiotherapie-externe-1ere-partie

[4] : Obtenu grâce à un stage pratique dans le Centre Hospitalo- Universitaire de Tlemcen, Unité de Lutte Contre le Cancer, Service de radiothérapie.

[5] : Cours par : Dr. Kaddar. (2024). Évaluation d′un plan de traitement en radiothérapie externe.

[6] : Menzel, H. (2010). *Journal of the ICRU, The International Commission on Radiation Units and Measurements, 10*(1), 1-106. https://doi.org/10.1093/jicru/ndq001

Annexes

Annexe 1 : Contraintes de Dose pour le Sein Gauche (IMRT vs. 3D-CRT)

Organes à risque (OAR) / Cible	Contrainte de Dose (IMRT)	Contrainte de Dose (3D-CRT)	Commentaires
Cible (PTV Sein)			
D95%	≥ Prescription	≥ Prescription	Doit couvrir au moins 95% du volume cible avec la dose prescrite.
Dmax	≤ 107% Prescription	≤107% Prescription	Éviter les points chauds excessifs.
Cœur			
V5Gy	≤ 10%	V20Gy ≤ 5%	Réduire le volume du cœur recevant des doses faibles (IMRT) ou plus élevées (3D-CRT) pour minimiser les risques cardiaques à long terme.
Dmean	≤ 2 Gy	≤ 3 Gy	Dose moyenne au cœur.
Poumon Homolatéral			
V16Gy	≤ 30%	≤ 35-40%	Volume du poumon recevant 16 Gy ou plus. Souvent utilisé pour évaluer le risque de pneumonite.
V26Gy	≤ 15%	≤ 20-25%	Volume du poumon recevant 26 Gy ou plus.
Dmean	≤ 10 Gy	≤ 15 Gy	Dose moyenne au poumon.
Poumon Controlatéral			
V5Gy	≤ 5%	≤ 10%	Minimiser la dose au poumon non irradié pour réduire le risque de fibrose.
Dmean	≤ 1 Gy	≤ 2 Gy	
Moelle Épinière			
Dmax	≤ 45 Gy	≤ 45 Gy	Pour les cas où la moelle est proche du champ de traitement.
Œsophage			

Dmax	≤ 50 Gy	≤ 50 Gy	Pour les cas où l'œsophage est dans le champ.
Thyroïde			
Dmean	≤ 20 Gy	≤ 30 Gy	Si située à proximité du champ d'irradiation.
Sein Controlatéral			
Dmean	≤ 1 Gy	≤ 2 Gy	Minimiser la dose pour réduire le risque de cancer secondaire.