

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida 1
Faculté des Sciences
Département de Physique



Mémoire de Master

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en :
Physique Médicale

Comparaison dosimétrique des technique IMRT et VMAT dans le traitement du cancer du cavum

Présentée par:
EL-BOUZIRI Asma

Soutenu le 30 Juin 2025 devant le jury composé de:

Mr. OULD MOHAMED Mounir	MCA	USDB1	Président
Mr. LAOUES Mostafa	MCB	USDB1	Examineur
Dr. CHEBRI Khellaf	MA	CAC Blida	Promoteur
Ms. BAHABI Nawel	Physicienne Médicale	CAC Blida	Co-Promotrice

Année Académique 2024–2025

Remerciment

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout d'abord **Dr. CHEBRI Khellaf**, Maître assistant au Centre Anti-Cancer de Blida, pour m'avoir proposé ce sujet de mémoire, ainsi que pour son encadrement, ses conseils pertinents et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie également **Mme. BAHABI Nawel**, physicienne médicale au CAC Blida, pour sa co-encadrement, son accompagnement pédagogique et ses précieux conseils et sa patience.

J'exprime ma reconnaissance à **Mr. OULD MOHAMED Mounir**, président de jury, pour sa bienveillance, son soutien et son aide précieuse dans la mise en forme en LaTeX de ce mémoire. Ses conseils ont été d'une grande aide tout au long de la rédaction.

Je remercie aussi **Mr. LAOUES Mostafa**, examinateur de ce mémoire et responsable de l'option de physique médicale à l'Université Saad Dahlab – Blida 1, pour son suivi rigoureux, son encadrement pédagogique durant tout le parcours.

Je remercie l'ensemble de l'équipe du service de radiothérapie et d'oncologie du CAC Blida, en particulier **Pr.HAOUI** chef de service de la radiothérapie et oncologie et les physiciens pour leur collaboration et leur professionnalisme et leur aide tout au long de la pratique.

Dédicace

Je dédie ce travail à

mes chers parents

pour leur patience infinie, leur soutien moral indéfectible et leurs prières tout au long de mon parcours.

Je le dédie également à mes frères *Khaled* et *Abdelkarim* et à leurs épouses respectives pour leur présence bienveillante, leurs encouragements et leurs conseils précieux.

À ma sœur *Nouceyba*

pour son affection, sa confiance en moi et son soutien constant.

À mes *neveux bien-aimés*

source de joie et de motivation.

À *toute ma famille élargie*

pour leur amour, leurs encouragements et leur fierté.

À mes chères amies

Wafaa, Hadil et Khaoula

pour leur amitié sincère, leur soutien moral et leur présence rassurante durant toutes les étapes de ce parcours.

Je dédie aussi ce travail à toutes les âmes libres, à ceux qui m'ont inspirée positivement, et avec une pensée émue et profonde à tous *les martyrs de Gaza*, symbole de résistance, courage et de dignité.

Résumé

Le cancer du cavum, est une tumeur maligne relativement rare, dont la prise en charge repose principalement sur la radiothérapie. L'évolution des technologies a permis le développement de la VMAT (radiothérapie volumétrique modulée en arc) après l'IMRT (la radiothérapie avec modulation d'intensité), offrant une meilleure conformation de la dose au volume tumoral et une protection optimisée des organes à risque (OAR).

Ce travail a pour objectif de comparer les performances dosimétriques de la technique IMRT et de la technique VMAT dans le traitement du cancer du cavum. L'étude a été menée au Centre Anti-Cancer (CAC) de Blida, en salle de dosimétrie, sur quatre patients de sexe masculin, sélectionnés de manière aléatoire. Pour chaque patient, deux plans de traitement ont été réalisés à l'aide du logiciel Varian Eclipse : un plan en IMRT et un autre en VMAT, en conservant les mêmes volumes cibles et contraintes cliniques.

Les plans ont été évalués selon plusieurs paramètres dosimétriques : l'indice d'homogénéité (HI), l'indice de conformité (CI), ainsi que les doses maximales et moyennes reçues par les volumes cibles (PTV) et les OAR.

Les résultats indiquent que la technique VMAT permet une meilleure couverture des PTV, un meilleur respect des contraintes aux OAR, et une réduction du temps de traitement, tout en diminuant les UM (unités moniteurs) nécessaires. cependant, l'IMRT reste une alternative solide, spécialement pour certains profils géométriques complexes. Cette étude confirme la supériorité dosimétrique globale de la VMAT dans le contexte du cancer du cavum, tout en soulignant l'importance d'une planification individualisée selon les critères anatomiques du patient.

Abstract

The cavum cancer is a relatively rare malignant tumor, for which radiotherapy remains the mainstay of treatment. The advancement of medical technologies has enabled the development of sophisticated techniques such as Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) and Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT), which offer improved dose conformity to the target volume while better sparing organs at risk (OAR).

This study aims to compare the dosimetric performance of IMRT and VMAT techniques in the treatment of nasopharyngeal carcinoma. It was conducted at the Anti-Cancer Center (CAC) of Blida, in the dosimetry room, using data from five randomly selected male patients. For each patient, two treatment plans were created using Varian Eclipse® software : one using IMRT and the other using VMAT, based on identical target volumes and clinical constraints.

The plans were evaluated using several dosimetric parameters : the Homogeneity Index (HI), Conformity Index (CI), Coverage Index (COVI), as well as the maximum and mean doses delivered to the target volumes (PTV) and surrounding organs at risk.

The results demonstrated that VMAT provided better PTV coverage, greater compliance with OAR dose constraints, and a shorter treatment delivery time, while reducing the number of monitor units (MU) required. Nevertheless, IMRT remains a robust option, particularly for anatomically complex cases.

This study supports the overall dosimetric superiority of VMAT in treating nasopharyngeal carcinoma and highlights the importance of individualized treatment planning tailored to each patient's anatomy.

Liste des abréviations

ADP cervicale	Adénopathie cervicale
OSM	Otite séreuse/muqueuse
ORL	Oto-Rhino-Laryngologie
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
EBV	Virus d'Epstein-Barr
IgGZ	Immunoglobuline G anti-Zebra
TEP	Tomographie par Émission de Positons
FDG	Fluoro-Désoxy-Glucose
TDM	Tomodensitométrie
Classification TNM	Tumor Node Metastasis
GTV	Gross Tumor Volume
CTV	Clinical Target Volume
PTV	Planning Target Volume
OAR	Organe à Risque
TPS	Système de Planification de Traitement
CI	Indice de Conformité
HI	Indice d'Homogénéité
COVI	Indice de Couverture
IMRT	Intensity Modulated Radiation Therapy
VMAT	Volumetric Modulated Arc Therapy
MLC	Multi-Leaf Collimator
AQ	Assurance Qualité

Table des figures

1.1	L'anatomie du Cavum	3
1.2	Nombre estimé de cas prévalents sur 3 ans pour le cancer du cavum, exprimé en proportion pour 100 000 habitants (monde), tous sexes confondus, en 2022	3
3.1	Scanner de simulation Philips au service de radiothérapie, CAC Blida	20
3.2	Contourage des volumes cibles chez un patient atteint d'un cancer du cavum — CAC Blida	21
4.1	Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 1	25
4.2	Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 2	26
4.3	Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 3	27
4.4	Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 4	28
4.5	Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 5	29

Liste des tableaux

1.1	Regroupement en stade selon la classification TNM	9
4.1	Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 1	25
4.2	Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 2	26
4.3	Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 3	27
4.4	Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 4	28
4.5	Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 5	29
4.6	Tableau des moyennes	30

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Liste des abréviations	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Introduction générale	1
1 Généralités sur le cancer du cavum	2
1.1 Définition et anatomie	2
1.2 Epidémiologie	3
1.2.1 Analyse descriptive	4
1.2.2 Analyse géographique	4
1.2.3 Analyse analytique	4
1.3 Diagnostic primitif	5
1.3.1 Signes d'appel	5
1.3.2 Examen clinique	6
1.3.3 Examen paraclinique	7
1.3.4 Bilan d'extension	7
1.4 Diagnostic Différentiel	8
1.4.1 Chez l'adulte	8
1.4.2 Chez les enfants	8
1.5 Stadification	8
1.6 Méthodes de traitement	10
2 Principes de la dosimétrie en radiothérapie et techniques IMRT et VMAT	11
2.1 La radiothérapie dans le traitement du cancer du cavum	11
2.1.1 Définition de la radiothérapie	11
2.1.2 Historique des techniques de radiothérapie appliquées au cavum	11
2.1.3 Présentation générale de l'IMRT et VMAT	12
2.2 Interaction rayonnements-matière	12
2.2.1 Effet Photoélectrique	12

2.2.2	Effet Compton	13
2.2.3	Création des paires	13
2.3	Critères de qualité d'un plan de traitement	14
2.3.1	Indices dosimétriques	14
2.3.2	Dose maximale et dose moyenne	15
2.3.3	Protection des organes à risques(OAR)	15
2.4	Étapes de la planification du traitement	16
2.4.1	Simulation et acquisition scanner	16
2.4.2	Contourage des volumes cibles et des organes à risque	16
2.4.3	Planification dosimétrique	16
2.4.4	Assurance qualité	17
2.4.5	Le traitement	17
2.5	Comparaison technique entre l'IMRT et VMAT	18
2.5.1	Description technique de l'IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy)	18
2.5.2	Description technique du VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy)	18
3	Matériels et méthodes	19
3.1	Cadre de l'étude	19
3.2	Données des patients	19
3.3	Simulation et acquisition des images	19
3.4	Contourage des volumes	20
3.5	Planification dosimétrique	22
3.5.1	La technique VMAT	22
3.5.2	La technique IMRT	23
4	Résultats et discussion	24
4.1	Introduction	24
4.2	Résultats dosimétriques	25
4.3	Analyse comparative	30
4.4	Discussion des résultats	30
4.4.1	Interprétations et limites des résultats	30
4.4.2	Comparaison avec la littérature	31
	Conclusion générale	32
	Bibliographie	34

Introduction générale

Le cancer du cavum, représente une entité pathologique particulière du fait de sa localisation anatomique complexe, de ses facteurs étiopathogéniques spécifiques — notamment l'association étroite avec le virus Epstein-Barr (EBV) — et de son comportement clinique distinct. Sa prise en charge thérapeutique repose principalement sur la radiothérapie, du fait de l'inaccessibilité chirurgicale de la région nasopharyngée et de la radiosensibilité élevée des tumeurs nasopharyngées, en particulier dans leurs formes indifférenciées.

Avec l'évolution des techniques de radiothérapie, l'objectif est désormais non seulement d'assurer un contrôle tumoral local optimal, mais aussi de réduire au maximum les doses délivrées aux organes à risque (OAR), en particulier dans une région aussi anatomiquement chargée que le nasopharynx. Dans ce contexte, L'IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) et VMAT (Volumetric Modulation Arc Therapy) se sont imposées comme des standards modernes, en raison de leur capacité à sculpter la dose autour des structures critiques tout en respectant les volumes cibles.[0.5cm] Cependant, bien que la VMAT permette une réduction significative du temps de traitement et du nombre d'unités de moniteur (UM), des interrogations subsistent quant à sa supériorité réelle sur le plan dosimétrique comparé à l'IMRT, notamment en termes de couverture tumorale, d'homogénéité, de conformité, et de préservation des OAR.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique. Il propose une étude dosimétrique comparative entre les techniques IMRT et VMAT dans le traitement du cancer du cavum, basée sur des plans réalisés au Centre Anti-Cancer de Blida.

L'objectif principal est d'évaluer, à travers des paramètres dosimétriques pertinents, l'impact de chaque technique sur la qualité des plans de traitement, afin d'en tirer des conclusions applicables à la pratique clinique.

Ce travail est structuré en quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le cancer du cavum, de l'anatomie à la stadification.

Le deuxième chapitre présente les principes de la dosimétrie, les techniques IMRT/VMAT et les étapes de la planification.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie de l'étude, de la sélection des patients à l'élaboration des plans.

Enfin, le quatrième chapitre expose les résultats obtenus, suivis d'une discussion critique et de perspectives.

Chapitre 1. Généralités sur le cancer du cavum

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la définition du cancer d cavum, l'anatomie et l'épidémiologie de ce cancer. En second lieu, nous nous focalisons sur les examens de diagnostic et les bilans d'extensions.... Finalement, les moyens thérapeutiques et la stadification de ce type de cancer.

1.1 Définition et anatomie

Le cavum est situé sous la base du crâne, en arrière des fosses nasales, au-dessus de l'oropharynx et en avant des 2 premières vertèbres cervicales. C'est un organe impair et médian.

Les parois latérales sont musculo-aponévrotiques. Dans chaque paroi latérale s'abouche l'orifice de la trompe d'Eustache. Les parois latérales séparent le cavum des espaces parapharyngés rétrostylien et préstylien et leur contenu vasculaire et nerveux. Le toit du cavum est osseux répondant au-dessus au plancher du sinus sphénoïdal. La paroi postérieure est formée par le clivus et les 2 premières vertèbres cervicales.

En avant, le cavum communique avec les cavités nasales par les choanes.

Le cavum communique en bas avec l'oropharynx et n'est fermé que pendant la déglutition par la face postérieure du voile du palais.

La muqueuse du cavum est un épithélium de type respiratoire riche en éléments lymphoïdes.

[2]

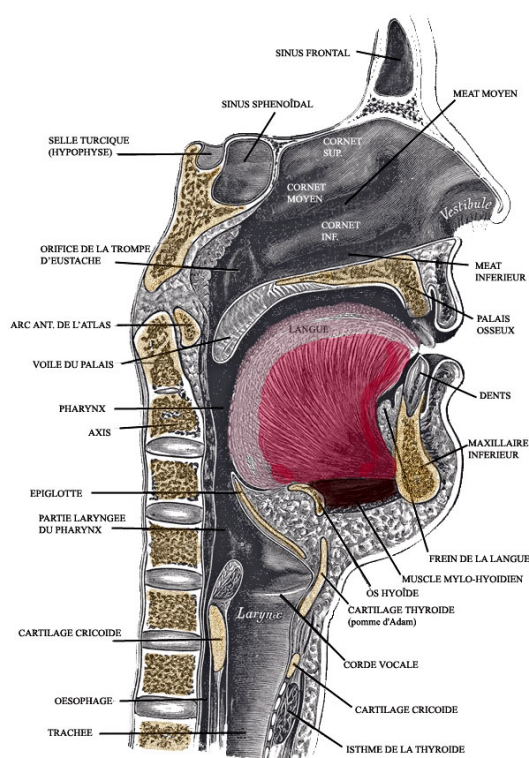
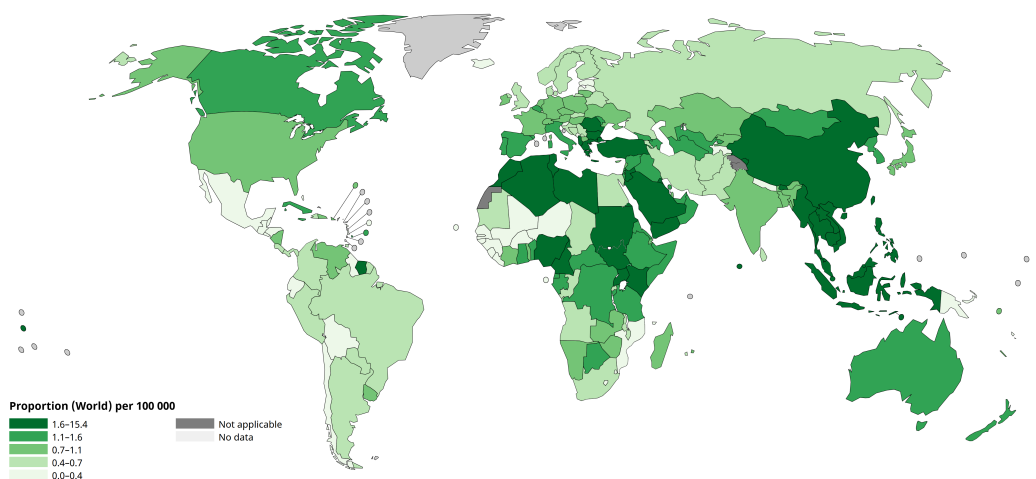


Figure 1.1 – L'anatomie du Cavum

[3].

1.2 Epidémiologie

Estimated number of prevalent cases (3-year), as a proportion (World) per 100 000, Both sexes, in 2022
Nasopharynx



All rights reserved. The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization / International Agency for Research on Cancer concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted and dashed lines on maps represent approximate borderlines for which there may not yet be full agreement.

Cancer TODAY | IARC
<https://gco.iarc.who.int/today>
Data version: Globocan 2022 (version 1.1) - 08.02.2024
© All Rights Reserved 2025

International Agency
for Research on Cancer
World Health
Organization

Figure 1.2 – Nombre estimé de cas prévalents sur 3 ans pour le cancer du cavum, exprimé en proportion pour 100 000 habitants (monde), tous sexes confondus, en 2022

[4].

1.2.1 Analyse descriptive

La carte montre la prévalence sur 3 ans du cancer du nasopharynx pour 100 000 habitants, tous sexes confondus, à l'échelle mondiale. Les données sont réparties en 5 classes : [3]

Classe	Prévalence (/100 000 habitants)	Commentaire
Classe 1	1,6 – 15,4	Prévalence la plus élevée
Classe 2	1,1 – 1,6	Modérée
Classe 3	0,7 – 1,1	Modérée
Classe 4	0,4 – 0,7	Modérée
Classe 5	0,0 – 0,4	Prévalence la plus faible

1.2.2 Analyse géographique

— Prévalence élevée :

Observée principalement en Asie du Sud-Est et de l'Est (Chine, Vietnam, Indonésie, Philippines, Malaisie). Afrique du Nord et centrale, ainsi que certaines régions du Moyen-Orient, affichent également des taux relativement élevés. Ces régions sont bien connues pour être des zones endémiques du carcinome nasopharyngé.

— Prévalence moyenne à faible :

La majorité des pays d'Europe, des Amériques (Nord et Sud) et de l'Océanie montrent des taux bas à très bas ($< 0,7 / 100\ 000$). Les pays nordiques, d'Europe de l'Est et d'Amérique latine affichent une faible incidence.

— Données manquantes ou non disponibles :

Certains pays en Afrique de l'Ouest, en Asie centrale et dans les petites îles du Pacifique n'ont pas fourni de données exploitables [3].

1.2.3 Analyse analytique

Le cancer du cavum est fortement influencé par des facteurs génétiques, environnementaux et viraux (notamment le virus Epstein-Barr).

Les différences géographiques s'expliquent en partie par :

- Des habitudes alimentaires traditionnelles (poissons salés en Asie).
- Une prédisposition ethnique (populations chinoises du sud, notamment cantonnaises).
- Un accès inégal aux soins de santé et au diagnostic précoce.
- Des différences dans le dépistage ou la notification des cas [3].

1.3 Diagnostic primitif

1.3.1 Signes d'appel

— L'ADP cervicale :

Les adénopathies cervicales, qui surviennent dans environ 40% des cas au moment du diagnostic, sont souvent un indicateur majeur du cancer du cavum. Elles mesurent typiquement 6 cm dans 50% des cas et peuvent être la première manifestation clinique, parfois sans aucun autre symptôme local. Ces adénopathies sont typiquement haut situées, en particulier au niveau des ganglions sous-digastriques, les plus fréquemment touchés, ainsi que des ganglions rétro-pharyngés. Toutefois, elles peuvent siéger à n'importe quel niveau de la chaîne ganglionnaire cervicale. Leur présentation est souvent unilatérale ou bilatérale, cette dernière représentant environ 50% des cas. À la palpation, elles sont dures, indolores, souvent adhérentes aux plans profonds, ce qui peut indiquer une atteinte tissulaire avancée. Elles peuvent être uniques ou multiples, ce qui reflète la variabilité de l'envahissement ganglionnaire[5] .

— Signes otologiques :

Sur le plan otologique, les symptômes sont fréquents et généralement unilatéraux, le plus souvent en rapport avec une obstruction de la trompe d'Eustache par extension tumorale. Ils se traduisent principalement par une hypoacousie de transmission progressive, souvent bien tolérée, associée à une autophonie (sensation de résonance de sa propre voix) et une sensation de plénitude auriculaire. Des acouphènes et des otalgies et aussi parfois des otites séromuqueuse (OSM) peuvent également être rapportés. Plus rarement, une otalgie modérée est décrite. Dans certains cas, une otite séromuqueuse (OSM) suppurée peut constituer le symptôme inaugural, ce qui peut entraîner une errance diagnostique[5] .

— Signes rhinologiques :

Sur le plan rhinologique, les symptômes sont fréquents et deviennent particulièrement évocateurs lorsqu'ils sont unilatéraux. Habituellement, on constate une obstruction nasale progressive, pouvant être unilatérale ou bilatérale, selon l'extension tumorale. Elle s'accompagne fréquemment d'une rhinorrhée séro-sanglante ou de petites épistaxis récidivantes. Une rhinolalie (voix nasonnée) est parfois observée, traduisant l'atteinte du voile du palais ou des structures voisines. Plus rarement, une anosmie peut être rapportée[5] .

— Signes neurologiques :

Les signes neurologiques sont souvent trompeurs et peuvent être unilatéraux ou bilatéraux, résultant d'une compression ou d'un envahissement direct des structures nerveuses. L'extension de contiguïté, qu'elle soit exocrânienne ou

endocrânienne, peut entraîner une atteinte des nerfs crâniens, donnant lieu aux manifestations neurologiques les plus fréquentes. Ainsi, une diplopie, souvent liée à l'atteinte du nerf abducens (VI), peut survenir. Des névralgies faciales atypiques peuvent également apparaître, notamment dans les territoires du nerf trijumeau (V) ou du nerf glossopharyngien (IX). Un trismus peut être observé en cas d'atteinte du nerf mandibulaire (branche V3) ou par envahissement des muscles ptérygoïdiens[5].

1.3.2 Examen clinique

Le diagnostic clinique du patient suit une procédure systématique intégrant l'anamnèse, l'examen locale du cavum, l'examen régionale et l'examen global qui permet d'évaluer l'état global du patient.

— Anamnèse :

L'anamnèse permet de recueillir des éléments clés tels que l'âge, les antécédents personnels ou familiaux, et les facteurs de risque (virus EBV, alimentation riche en nitrosamines, expositions environnementales). L'histoire de la maladie retrace une évolution souvent silencieuse marquée par des signes d'appel variés : adénopathies cervicales, troubles auditifs, obstruction nasale, épistaxis, ou douleurs faciales. Elle oriente le clinicien vers un bilan diagnostique adapté[5]. [0.25cm]

— Examen du cavum

La rhinoscopie antérieure, réalisée à l'aide d'un spéculum nasal après anesthésie locale par xylocaïne, est souvent peu contributive en raison de la profondeur anatomique du cavum.

En revanche, la nasofibroskopie (ou endoscopie nasale souple), bien plus performante, permet une visualisation directe de la tumeur, de son aspect macroscopique et de ses éventuelles extensions vers les fosses nasales.

La rhinoscopie postérieure, quant à elle, est réalisée à l'aide d'un miroir ou d'une optique rigide, nécessitant une anesthésie locale et parfois une rétraction du voile du palais à l'aide de sondes souples. Elle permet de préciser la localisation, la forme et l'étendue de la lésion.[5].

— Examen régional

L'examen des aires ganglionnaires cervicales est fondamental, car les adénopathies constituent souvent la première manifestation du cancer du cavum. Il est complété par un examen ORL détaillé, incluant l'inspection des tympans sous microscope avec insufflation. La tympanométrie permet de confirmer une otite séromuqueuse (OSM), et l'audiométrie objective une hypoacousie de transmission, permettant de quantifier la perte auditive. L'examen endobuccal, bien que parfois limité par un trismus, recherche une extension tumorale vers l'oropharynx ainsi que des signes d'atteinte neurologique, tels qu'une asymétrie du voile du palais ou une déviation de la langue[5].

— Examen général

L'objectif de l'examen général est d'évaluer l'état clinique globale du patient. Cela permet de repérer d'éventuels indices de propagation métastatique, de diagnostiquer un syndrome tumoral général (fatigue, perte de poids, fièvre), ou encore d'identifier des comorbidités qui pourraient affecter la stratégie de traitement. Il s'inscrit dans une approche globale de gestion, avant même l'évaluation d'extension [5].

1.3.3 Examen paraclinique

— Nasofibroscopie et la biopsie rhinopharyngée

L'endoscopie constitue l'exploration de première intention. La nasofibroscopie, réalisée après anesthésie de contact, permet d'apprécier le type macroscopique de la tumeur ainsi que ses extensions possibles vers les fosses nasales. Elle permet également de réaliser des biopsies rhinopharyngées nécessaires au diagnostic [5].

1.3.4 Bilan d'extension

— IRM du massif facial

L'IRM présente une grande résolution en contraste et constitue un examen indispensable dans le bilan d'extension, notamment en raison de l'immobilité des espaces profonds de la face, ainsi que de la richesse en graisse et en os médullaire au niveau de la base du crâne. Elle est particulièrement adaptée à l'exploration des aires ganglionnaires profondes rétropharyngées [5].

— TDM cervicofaciale

La tomodensitométrie est réalisée de la base du crâne jusqu'aux creux sus-claviculaires. Elle est performante pour l'exploration de l'os cortical et constitue un parfait complément de l'IRM pour l'évaluation des zones de lyse osseuse et des ganglions latérocervicaux [5].

— Sérologie anti EBV

La sérologie anti-EBV est utile dans certains cas, comme lorsqu'il existe un diagnostic histologique douteux ou des métastases sans lésion primitive identifiée. On peut détecter les EBERs sur les coupes histologiques, et doser les anticorps IgG et IgA anti-VCA, anti-EA et EBNA. Ce bilan est réalisé avant le traitement. Une élévation secondaire de ces anticorps après rémission peut être évocatrice de rechute. Certaines études ont également mis en évidence l'intérêt des anticorps anti-Zebra (IgGZ) [5].

— TEP au FDG (Fluoro-Desoxy-glucose)

La TEP au FDG (Fluoro-Désoxyglucose) présente une meilleure sensibilité et spécificité que l'IRM et la TDM pour détecter les récidives tumorales. Elle est également utile pour évaluer la réponse tumorale après un délai minimal de six mois post-irradiation. Elle peut être intéressante dans les bilans de surveillance, bien que son usage reste limité par sa faible disponibilité[5].

1.4 Diagnostic Différentiel

1.4.1 Chez l'adulte

Parmi les diagnostics à considérer, on note la présence de lésions bénignes comme un kyste ou un polype solitaire de Killian. Il arrive parfois que des maladies granulomateuses telles que la tuberculose nasopharyngée ou la sarcoïdose puissent imiter une tumeur du cavum d'un point de vue clinique ou endoscopique. Cela met en évidence la nécessité d'une analyse histologique pour établir un diagnostic fiable[6].

1.4.2 Chez les enfants

Certaines maladies bénignes ou infectieuses qui peuvent imiter une tumeur nasopharyngée doivent aussi être prises en compte dans le diagnostic différentiel. Il faut considérer l'hypertrophie adénoïde, courante chez les enfants mais parfois persistante à l'âge adulte, ainsi que l'angiofibrome juvénile. Il est essentiel de réaliser un examen anatomopathologique pour confirmer le diagnostic, car certaines étiologies infectieuses chroniques telles que la tuberculose nasopharyngée ou la syphilis peuvent aussi manifester des symptômes cliniques semblables[6].

1.5 Stadification

Le système de classification TNM (Tumeur, Nœud, Métastase), issu de la 8^e édition du système de stadification conçu par l'Union Internationale Contre le Cancer (UICC) en partenariat avec l'American Joint Committee on Cancer (AJCC), est présenté dans le tableau ci-dessous[1].

Il offre la possibilité de décrire l'étendue locale et à distance, ainsi que l'extension ganglionnaire des cancers du cavum, ce qui facilite la classification pronostique des patients et la conception de stratégies de traitement appropriées[1].

T	Description
T0	Tumeur primitive non identifiée, mais adénopathie cervicale induite par le virus d'Epstein-Barr.
T1	Extension au cavum, oropharynx, ou cavité nasale sans extension para-pharyngée.
T2	Extension para-pharyngée avec éventuelle atteinte des tissus mous environnants (ptérygoïdien médial ou latéral, muscles pré-vertébraux).
T3	Envahissement osseux (base du crâne, vertèbres cervicales, ou des sinus paranasaux).
T4	Extension intracrânienne, atteinte de paires crâniennes, de l'hypophyse, de l'orbite, de la parotide ou de la fosse infra-temporale (au-delà du bord latéral du muscle ptérygoïdien latéral).
N	Description
N0	Pas de métastase ganglionnaire.
N1	Métastase(s) unique ou multiples, unilatérale (et/ou avec atteinte rétro-pharyngée bilatérale), au-dessus du bord inférieur du cartilage cricoïde, 6 cm de grand diamètre.
N2	Métastases multiples bilatérales, au-dessus du bord inférieur du cartilage cricoïde, 6 cm de grand diamètre.
N3	Métastase(s) unique ou multiples, > 6 cm ou située au-dessous du bord inférieur du cartilage cricoïde.
M	Description
M0	Pas de métastases à distance.
M1	Métastase à distance.

Stade	Classification TNM
I	T1 N0 M0
II	T2-2 N1 M0
III	T3 N0, T0-2 N2 M0
IVA	T4 ou N3 M0
IVB	M1, quels que soient T et N

TABLE 1.1 – Regroupement en stade selon la classification TNM[1]

1.6 Méthodes de traitement

Intervention chirurgicale :

En raison de la localisation anatomique du cancer du cavum et de sa tendance à se manifester par des métastases au niveau des ganglions cervicaux, une intervention chirurgicale à visée de contrôle local est généralement irréalisable. Il est courant de réaliser une biopsie ganglionnaire ; en revanche, une biopsie de la tumeur primitive du cavum est rarement pratiquée[7].

La Chimiothérapie :

Plusieurs facteurs sont pris en compte dans le choix du protocole de chimiothérapie.

- Efficacité : les résultats les plus prometteurs, récemment mis à jour, sont ceux obtenus avec le protocole Mertens NPC-91-GPOH. Ce protocole doit donc être considéré comme le meilleur traitement actuel. Le protocole NPC-91-GPOH est unique en son genre : il inclut une immunothérapie par interféron bêta après la chimiothérapie et la radiothérapie, ce qui pourrait expliquer ses résultats supérieurs à ceux des protocoles sans interféron[7].
- Effets tardifs : en termes de chimiothérapie, le protocole Manchester — doxorubicine, méthotrexate et cyclophosphamide — pourrait entraîner une infertilité chez les garçons (dose totale de cyclophosphamide : 12 g/m^2) et une possible toxicité aux anthracyclines (dose totale de doxorubicine : 360 mg/m^2). Le protocole NPC-91-GPOH pourrait entraîner une certaine infertilité chez les garçons plus âgés, mais la dose totale de cisplatine n'est que de 300 mg/m^2 . De plus, l'incidence de la toxicité rénale devrait être relativement faible, mais la toxicité auditive serait plus élevée en raison de l'effet supplémentaire de l'irradiation sur l'appareil auditif. Le degré de dysfonctionnement hypophysaire dépend évidemment du champ de radiothérapie et, potentiellement, de la dose de radiothérapie, mais un certain degré d'hypopituitarisme est attendu. De plus, une irradiation du cou entraînerait une hypothyroïdie chez la majorité des patients, tandis qu'une irradiation de l'oropharynx entraînerait une xérostomie et, par conséquent, une mauvaise dentition. Ce dernier effet pourrait être soulagé par l'amifostine, comme l'ont démontré des études menées chez l'adulte[7].

La Radiothérapie :

L'irradiation externe est d'autant plus efficace qu'il s'agit d'une forme histologique indifférenciée. Elle est délivrée sur le site tumoral incluant la base du crâne et les aires ganglionnaires cervicales bilatérales à une dose usuelle de 70 Gy. La curiethérapie peut être employée sur des reliquats tumoraux[8].

Chapitre 2. Principes de la dosimétrie en radiothérapie et techniques IMRT et VMAT

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les techniques utilisées dans la radiothérapie en focalisant sur les techniques IMRT et VMAT. En second lieu, nous nous focalisons sur les étapes de la planification du traitement, et ensuite les critères de qualité d'un plan de traitement. Et finalement, la comparaison technique entre l'IMRT et VMAT.

2.1 La radiothérapie dans le traitement du cancer du cavum

2.1.1 Définition de la radiothérapie

La radiothérapie c'est l'utilisation des radiations à haute énergie provenant des rayons X, des rayons gamma, des neutrons, des protons et d'autres sources pour tuer les cellules cancéreuses et réduire les tumeurs. La radiothérapie peut provenir d'une machine à l'extérieur du corps (radiothérapie à faisceau externe), ou elle peut provenir de matériel radioactif placé dans le corps près des cellules cancéreuses (radiothérapie interne ou curiethérapie)[9].

2.1.2 Historique des techniques de radiothérapie appliquées au cavum

La radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (3D-CRT) a été utilisée pour obtenir une distribution de dose plus conforme que la radiothérapie conventionnelle[10]. Bien que la conformité de la distribution de dose soit améliorée avec la 3D-CRT, elle ne permet pas d'obtenir une préservation satisfaisante des tissus normaux. La radiothérapie par modulation d'intensité (IMRT) peut permettre une meilleure préservation de la parotide et une meilleure qualité de vie que la radiothérapie conformationnelle tridimensionnelle (3D-CRT) pour le cancer du sein néoplasique à un stade précoce. Cependant, bien que l'IMRT soit devenue une technique courante pour la radiothérapie du cancer du sein néoplasique, les inquiétudes concernant son nombre élevé d'unités de surveillance (UM) et sa longue durée de traitement font encore l'objet de discussions[10].

Un nombre élevé d'UM peut augmenter la transmission du collimateur et diffuser le rayonnement de l'accélérateur linéaire, ce qui peut accroître le risque de tumeurs secondaires. L'arcthérapie volumétrique modulée (VMAT) offre une plus grande flexibilité d'adminis-

tration de dose grâce à une gamme complète d'angles (rotation du portique), avec une modulation continue de l'ouverture du faisceau et un débit de dose variable[10].

De nombreuses études ont démontré que la VMAT offre une couverture de la cible équivalente ou supérieure, et améliore considérablement la préservation des organes à risque (OAR), avec des UM beaucoup plus faibles et une durée de traitement plus courte. Cependant, des conclusions contradictoires ont été tirées concernant la comparaison dosimétrique entre la VMAT et l'IMRT[10].

2.1.3 Présentation générale de l'IMRT et VMAT

L'IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) est la technique de radiothérapie la plus couramment utilisée pour le cancer du cavum. L'irradiation diffuse provenant du collimateur, qui peut accroître le risque de cancer secondaire, est proportionnelle au nombre d'unités de traitement[11].

La technique VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy) comprend la rotation du portique (gantry) et les mouvements des collimateurs multilames (MLC) pendant l'irradiation à un débit de dose variable[11].

Il est possible de comparer les techniques de radiothérapie à modulation d'intensité. Chaque option présente des avantages et des inconvénients respectifs[11].

2.2 Interaction rayonnements-matière

2.2.1 Effet Photoélectrique

Pour les photons ayant des énergies faibles (< 100 keV), l'effet photoélectrique est prédominant. Dans ce processus, le photon incident est complètement absorbé et transfère toute son énergie à l'un des électrons de l'atome cible, en particulier ceux situés dans les couches internes. L'énergie cinétique de l'électron émis correspond à l'énergie du photon incident diminuée de l'énergie de liaison de l'électron avant l'interaction. L'énergie cinétique de l'électron émis est donnée par :

$$T_e = h\nu - E_l \quad (2.1)$$

Où E_l représente l'énergie de liaison d'un électron atomique et l'énergie initiale du photon incident. Pour que l'effet photoélectrique se produise, il est nécessaire que $h\nu > E_l$.

Pour les électrons des couches internes de l'atome, cette énergie de liaison peut aller de quelques keV pour les éléments légers à plusieurs dizaines de keV pour les éléments lourds. À la suite de l'interaction, l'atome se retrouve dans un état excité. Son retour à l'état fondamental s'accompagne d'une réorganisation électronique, au cours de laquelle peuvent être émis :

- Des photons de fluorescence X, caractérisés par un spectre de raies discontinues propre à chaque élément.
- Des électrons Auger, produits par une transition non radiative au cours de laquelle

l'énergie libérée par une réorganisation interne est transférée à un électron périphérique, qui est alors éjecté de l'atome [12] .

2.2.2 Effet Compton

Le photon incident, qui a une énergie $h\nu$, transmet une partie de son énergie à un électron des couches périphériques de l'atome (un électron quasi libre faiblement lié), qui est alors éjecté. L'énergie restante est transférée par le photon diffusé. Ainsi, il y a une diffusion du photon incident accompagnée d'une perte d'énergie et d'une modification de direction en raison d'une collision inélastique et l'ionisation de l'atome. Les principes de conservation d'énergie et de quantité de mouvement nous donnent la possibilité de déterminer l'énergie $h\nu'$ du photon diffusé et celle de l'électron T_e [12].

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

$$T_e = h\nu - h\nu' \quad (2.3)$$

Avec :

- $m_e c^2$: 911 keV, l'énergie de repos de l'électron.
- θ : angle de diffusion du photon.
- h : constante de Planck.
- ν, ν' : fréquences du photon incident et du photon diffusé.
- m_e : masse de l'électron.
- c : vitesse de la lumière.
- T_e : énergie cinétique de l'électron éjecté.

2.2.3 Création des paires

Ce phénomène se présente à des énergies des photons incidents dépassant $m_0 c^2$, soit 1.022 MeV. Cela implique la disparition d'un photon près d'un noyau atomique (ou plus rarement, d'un électron) et la création d'une paire positron-électron. La méthode de production de paires varie presque comme Z^2 (Z représentant le numéro atomique du noyau avec lequel le photon entre en collision). En réalité, cette procédure ne s'avère significative que pour des énergies dépassant $4m_e c^2$. Au terme de son trajet, le positron entre en collision avec un électron et s'anéantit, entraînant l'émission de deux photons de 511 keV. Les lois de conservation du moment cinétique font que ces deux photons sont émis dans des directions opposées. La conservation de l'énergie s'écrit :

$$E_\gamma = 2m_e c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \quad (2.4)$$

T_{e^-} et T_{e^+} représentent respectivement les énergies cinétiques de l'électron et du positron [12].

2.3 Critères de qualité d'un plan de traitement

2.3.1 Indices dosimétriques

Indice d'Homogénéité (IH)

L'Indice d'Homogénéité (IH) évalue l'uniformité de la distribution de la dose au sein du volume cible. Une distribution de dose plus homogène est généralement souhaitée pour garantir un traitement efficace tout en minimisant les effets secondaires.

Une valeur HI plus proche de 0 indique une distribution de dose plus uniforme dans le volume cible.

la formule de l'indice :

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \quad (2.5)$$

Avec :

- $D_{2\%}$: Dose reçue par les 2% les plus chauds du PTV.
- $D_{98\%}$: Dose reçue par les 98% les plus froids du PTV.
- $D_{50\%}$: Dose médiane reçue par 50% du PTV.

Indice de Conformité (IC)

L'Indice de Conformité (IC) évalue dans quelle mesure la dose de radiation prescrite correspond à la forme et à la taille du volume cible. Il aide à évaluer la précision du plan de traitement dans la cible du tumor tout en épargnant les tissus sains.

Une valeur de CI de 1 indique une conformité parfaite, ce qui signifie que la région à haute dose correspond précisément au volume cible. Des valeurs inférieures à 1 ou supérieures à 1 indiquent respectivement un sous-dosage ou un surdosage.

la formule de l'indice :

$$CI = \frac{(TV_{PIV})^2}{TV \times PIV} \quad (2.6)$$

Avec :

- T_{PTV} : Volume cible couvert par l'isodose prescrite.
- TV : Volume cible total.
- PIV : Volume de l'isodose de prescription.

Indice de Couverture (COVI)

L'Indice de Couverture (COVI) mesure la proportion du volume cible recevant au moins la dose prescrite. Il est crucial de s'assurer que toute la tumeur reçoive une dose adéquate pour un traitement efficace.

Une valeur de COVI de 1 indique une couverture complète du volume cible par la dose prescrite.

la formule de l'indice :

$$COVI = \frac{PTV_{\text{couverte par la dose prescrite}}}{\text{Total } PTV} \quad (2.7)$$

2.3.2 Dose maximale et dose moyenne

En radiothérapie, la quantification précise de la dose absorbée par les structures cibles et les organes à risque est essentielle pour assurer un traitement efficace et sécurisé. Deux paramètres fondamentaux sont utilisés à cet effet : la **dose maximale** (D_{\max}) et la **dose moyenne** (D_{mean}).

La dose maximale correspond à la plus forte dose reçue dans un petit volume d'un tissu, souvent défini sur $0,03 \text{ cm}^3$ selon les recommandations de l'ICRU [13]. Elle s'exprime mathématiquement comme suit :

$$D_{\max} = \max \{D_i\}, \quad i \in \text{voxels du volume}$$

La dose moyenne est la moyenne arithmétique des doses absorbées dans tous les voxels d'un volume donné (tumeur ou organe à risque) [14] :

$$D_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i$$

où N est le nombre total de voxels considérés et D_i la dose dans le voxel i . Ces deux paramètres sont essentiels dans l'évaluation des plans de traitement. Par exemple, limiter la dose maximale permet d'éviter des toxicités aiguës dans des organes critiques comme la moelle épinière, tandis que la réduction de la dose moyenne est particulièrement importante pour limiter les effets tardifs dans les organes radiosensibles tels que les reins, les glandes salivaires ou les poumons [14].

2.3.3 Protection des organes à risques(OAR)

Dans l'élaboration d'un traitement radiothérapeutique, la protection des organes à risque (OAR) est une préoccupation primordiale. Il est crucial de minimiser la dose administrée aux structures saines à proximité de la tumeur (comme la moelle épinière, le tronc cérébral, les nerfs optiques, les parotides, etc.) pour réduire les effets secondaires et maintenir une bonne qualité de vie du patient. Pour chaque OAR, des contraintes dosimétriques strictes sont établies en fonction de leur résistance à l'irradiation. Des méthodes avancées comme l'IMRT et la VMAT fournissent une régulation précise de la

dose, garantissant ainsi une couverture idéale du volume tumoral tout en préservant au mieux les tissus sains adjacents.

2.4 Étapes de la planification du traitement

La planification du traitement en radiothérapie est une procédure importante qui conditionne la qualité, l'efficacité et la sécurité du traitement délivré au patient. Elle repose sur plusieurs étapes techniques et cliniques rigoureuses permettant d'assurer une couverture optimale de la tumeur tout en épargnant les organes à risque.

Ces étapes débutent dès la simulation du patient et se poursuivent par le contournage des volumes, la planification dosimétrique, l'assurance qualité, jusqu'à le traitement.

2.4.1 Simulation et acquisition scanner

La simulation - où bien le traçage - est effectuée à l'aide d'un scanner spécialisé pour la radiothérapie, qui est généralement équipé d'un gantry plus large afin de permettre la mise en place des dispositifs d'immobilisation. Elle représente une phase cruciale, car elle permet de rassembler les images de référence qui seront employées tout au long du processus de traitement. Le but est de placer le patient dans une posture reproductible et aussi confortable que possible, pour garantir la précision des séances de radiothérapie[15]. Un dispositif laser portatif est employé pour réaliser le centrage dans les trois dimensions de l'espace, et un repère de marquage est fréquemment apposé sur la peau du patient afin d'assurer une précision constante du placement[15].

Le type de matériel de contention employé varie selon divers critères : la position de la tumeur, les aptitudes physiques du patient et le type du traitement[15].

2.4.2 Contournage des volumes cibles et des organes à risque

La phase de contournage est essentielle après la simulation, elle consiste à démarquer précisément sur les images du scanner (CT) les volumes cibles à irradier (gross tumor volume (GTV)), clinical target volume (CTV), planning target volume (PTV) ainsi que les organes à risque (OAR), tels que la moelle épinière et les glandes parotides.

Le but est d'assurer que toute la tumeur et les marges à traiter reçoivent la dose prescrite, tout en limitant l'exposition aux oragnes à risques.

2.4.3 Planification dosimétrique

Lors de la planification de la dose, le physicien médical exploite les images de simulation recueillies pour déterminer les volumes cibles (PTV) et les organes à risque (OAR). Le TPS procède alors au calcul de la distribution de dose, en visant à optimiser la couverture du PTV tout en réduisant la dose aux OAR, conformément aux restrictions établies.

Cette optimisation offre un équilibre entre l'exigence thérapeutique et la protection des tissus normaux. La planification et l'optimisation par TPS permet de mesurer différents paramètres dosimétrique comme l'indice de conformité (CI), l'homogénéité (HI), les doses

maximales et moyennes ainsi que les doses aux OAR calculés pour confirmer la qualité du plan. [16].

2.4.4 Assurance qualité

L'assurance qualité (AQ) en radiothérapie constitue une étape fondamentale pour garantir la sécurité des traitements et la précision des doses administrées au patient. Elle vise à vérifier la conformité entre les doses calculées par le système de planification et celles réellement délivrées par l'accélérateur linéaire, en utilisant des systèmes de mesure spécifiques.

Au sein du service de radio-oncologie du Centre Anti-Cancer de Blida, des outils tels que le Portal Dosimetry (EPID as1000) et le système Octavius 4D (PTW) sont utilisés pour effectuer un contrôle qualité rigoureux avant chaque traitement.

Les plans sont évalués selon des critères gamma (3%/3 mm), avec un seuil d'acceptation fixé à 97%, conformément aux recommandations internationales (AAPM TG-218).

Le système EPID, grâce à sa haute résolution spatiale (0,39 mm/pixel), permet une détection fine des écarts dosimétriques, tandis que le système Octavius permet une reconstruction tridimensionnelle des doses, renforçant ainsi la fiabilité du processus. [17]

[18]

2.4.5 Le traitement

Après validation du plan dosimétrique, l'étape du traitement débute par la mise en place quotidienne du patient sur la table de traitement. Cette mise en place respecte rigoureusement la position utilisée lors de la simulation scanner, à l'aide de dispositifs de contention personnalisés comme le masque thermoformé afin d'assurer une reproductibilité optimale.

Avant chaque séance, une procédure de matching est réalisée pour vérifier la position du patient à l'aide d'une imagerie embarquée. Cette étape permet de comparer l'anatomie du jour avec celle de la planification et de corriger d'éventuels décalages pour garantir une irradiation précise du volume cible.

Une fois le positionnement validé, le traitement est délivré selon la technique choisie, avec un débit de dose et un nombre de monitor units (UM) définis lors de la planification.

Le personnel de radiothérapie assure la surveillance du patient pendant la séance à distance, depuis la salle de contrôle, tout en respectant les protocoles de sécurité et de qualité.

Le respect strict des marges de sécurité, le suivi quotidien de la position et l'adaptation aux variations anatomiques contribuent à une administration sûre et efficace du traitement. [19].

2.5 Comparaison technique entre l'IMRT et VMAT

La technique IMRT et VMAT sont des technique avancées en radiothérapie externe, elles ciblent avec précision les tumeurs en épargnant les tissus sains.

2.5.1 Description technique de l'IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy)

La technique IMRT a permis d'obtenir une distribution de dose raisonnable par modulation d'intensité avec une couverture angulaire limité du faisceau[20].

Dans cette technique :

Le mode de délivrance des rayonnements se fait à partir de plusieurs angles fixes, donc le mouvement du bras de l'accélérateur sont statique.

l'IMRT permet de délivrer des doses non uniformes dans un faisceau unique, en ajustant dynamiquement la position des MLCs au cours du traitement.

La planification est inverse, les objectifs cliniques sont définis en avance, et l'optimisation algorithmique crée une distribution idéale de dose.

L'IMRT utilise généralement 5 à 9 faisceaux fixes orientés autour du patient. Cette technique améliore la couverture tumorale tout en épargnant les organes à risque proches.

2.5.2 Description technique du VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy)

La technique VMAT offre une couverture angulaire suffisant grâce à la rotation continue de l'accélérateur, il ne peut pas atteindre le niveau de modulation d'intensité optimal dans certaines directions spécifiques du faisceau[20].

Le mode de délivrance des rayonnements est continue, pendant la rotation du bras de l'accélérateur autour du patient.

La planification est également inverse et utilise des algorithmes spécifiques.

VMAT peut être délivrée en un ou plusieurs arcs (1 à 4), selon la complexité anatomique. Cette approche permet une meilleure homogénéité, une meilleure conformité.

Chapitre 3. Matériels et méthodes

3.1 Cadre de l'étude

Cette étude a été réalisée au niveau de la salle de dosimétrie du Centre Anti-Cancer (CAC) de Blida, à l'aide du logiciel de planification Varian Eclipse version (18.0.1). Elle a pour objectif de réaliser une comparaison dosimétrique entre deux techniques de radiothérapie : l'IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) et la VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy), dans le cadre du traitement du cancer du cavum.

L'objectif principal est d'évaluer quelle technique permet une meilleure couverture du volume cible (PTV) tout en assurant une protection optimale des organes à risque (OAR), en accord avec les aux critères de qualité d'un plan de traitement.

3.2 Données des patients

Cette étude a porté sur cinq patients de sexe masculin, sélectionnés de manière aléatoire parmi ceux déjà traités, en cours de traitement ou récemment re-simulés au service de radiothérapie du CAC de Blida.

Les patients inclus présentaient un cancer du cavum et avaient des dossiers complets de simulation et de planification. L'âge moyen des patients se situait dans la quarantaine à cinquantaine, représentant ainsi une population adulte typique des cas observés en pratique clinique.

3.3 Simulation et acquisition des images

La salle de simulation du service de radiothérapie au CAC Blida est divisée en deux espaces fonctionnels distincts. La première salle est de pépité de commande pour lancer l'acquisition par les manipulatrices. La seconde salle contient le simulateur, où le patient est installé sur le lit de scanner pour l'acquisition des images.

Le scanner utilisé est de marque Philips, spécialement dédié à la simulation en radiothérapie. Il s'agit d'un scanner hélicoïdal, équipé de repères laser servant le bon positionnement et traçage. Comme visible sur la photo ci-dessous, le scanner est associé à un système de table glissante, permettant un ajustement précis de la position du patient.



Figure 3.1 – Scanner de simulation Philips au service de radiothérapie, CAC Blida

Dans notre étude, les patients sont installés en position couchée sur le dos, avec la tête maintenue par un masque thermomoulé personnalisé pour assurer une immobilisation durant la séance de simulation et pour garantir une précision millimétrique entre la simulation et les séances de traitement.

Le positionnement est vérifié par les manipulatrices en collaboration avec le médecin, à l'aide des lasers et d'indicateurs anatomiques externes. Une fois la position validée, des images CT (scanner) sont acquises.

3.4 Contourage des volumes

Après l'étape de simulation, le médecin procède au contourage des volumes à partir des images CT acquises. Cette étape importante permet de délimiter précisément les zones à traiter et à protéger.

Les volumes cibles comprennent :

- Le GTV (Gross Tumor Volume) : volume tumoral visible.
- Le CTV (Clinical Target Volume) : GTV + zones à risque microscopique.
- Les PTV (Planning Target Volume) : PTV-70, PTV-63 et PTV-56, qui correspondent à des volumes de traitement recevant différentes doses prescrites.

En parallèle, les OARs (les organes à risque) sont identifiés et contournés pour une meilleure protection contre les rayonnements.

Dans notre étude, les OAR incluent notamment :

- La moelle épinière.
- Les glandes parotides (gauche et droite).
- Les cristallins (gauche et droit).
- Les nerfs optiques (gauche et droit).
- La thyroïde.
- La cavité buccale.
- Les ATM (articulations temporo-mandibulaires) gauche et droite.
- Le corps entier (body).
- Le chiasma optique.
- Les globes oculaires (gauche et droit).
- L'hypophyse.
- Le larynx.
- Les lobes temporaux (gauche et droit).
- La mandibule.
- Le tronc cérébral.
- L'œsophage.

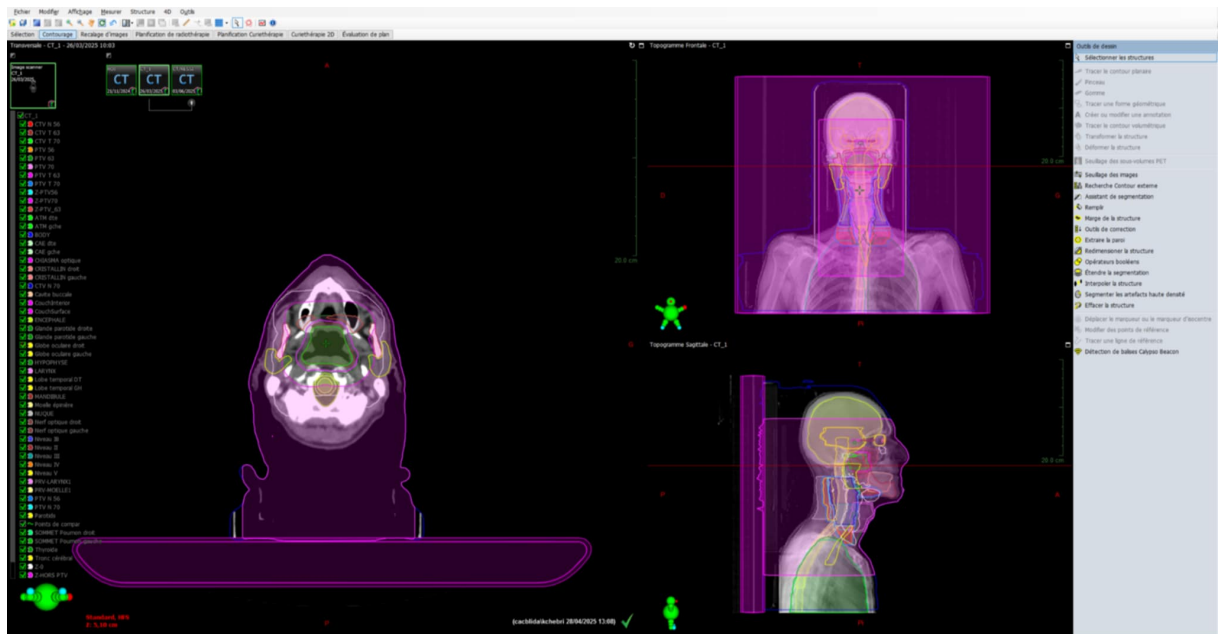


Figure 3.2 — Contourage des volumes cibles chez un patient atteint d'un cancer du cavum — CAC Blida

Le contourage est réalisé en suivant les recommandations cliniques et les contraintes dosimétriques publiées, afin d'assurer une couverture optimale des volumes cibles tout en protégeant efficacement les organes à risque.

En général, les critères de qualité imposent que au moins 95% du volume PTV reçoive 100% de la dose prescrite pour éviter le sous-dosage, et tout en limitant la dose maximale à moins de 107% pour éviter les surdosages dans la zone ciblée.

3.5 Planification dosimétrique

Dans cette étude, deux techniques de planification sont utilisées : IMRT (Intensity modulated radiation therapy) et VMAT (radiothérapie volumétrique modulée en arc). La planification est réalisée à l'aide du logiciel Varian, en salle de dosimétrie du CAC de Blida. Les deux techniques partagent plusieurs étapes fondamentales dans la planification :

- Utilisation des mêmes images de simulation scanner.
- Application identique des volumes cibles (GTV, CTV, PTV) et des OAR.
- Prescription de dose identique (fractionnement sur 35 séances).
- Utilisation du même système de planification (Eclipse).
- Respect des mêmes contraintes cliniques imposées aux organes à risque.
- Optimisation inverse guidée par les mêmes objectifs dosimétriques.
- L'énergie des faisceaux est de 6 MeV.
- Pour éviter les chevauchements entre les PTVs, on applique une règle clinique basée sur le différentiel de dose :
chaque 5 mm d'écart correspond à 10 Gy. Ainsi, entre PTV-70 et PTV-56 (écart de 14 Gy), on applique une marge d'environ 0.7 mm.
- Les contraintes de dose sont assurées pour chaque PTV (Planning target volume) et OAR(organe à risque).

Malgré ces similitudes, les techniques diffèrent par la nature du mode de délivrance de la dose, ce qui justifie une planification et une évaluation distinctes.

3.5.1 La technique VMAT

La planification VMAT débute par la définition de l'isocentre, suivie de la vérification du contournage des structures, notamment le body (qui ne doit contenir aucune zone d'air), les volumes cibles PTV-56, PTV-63 et PTV-70, avec une pénétration de 3 mm à l'intérieur du body.

Le fractionnement retenu est de 35 séances, à raison de :

- 2 Gy par séance pour atteindre 70 Gy (PTV-70).
- 1.8 Gy par séance pour atteindre 63 Gy (PTV-63).
- 1.6 Gy par séance pour 56 Gy (PTV-56).

Paramètres du plan VMAT

La planification inclut généralement 3 à 4 arcs :

- Le premier arc est complet, avec une exclusion de 5°, dans le sens horaire.
- Le deuxième arc est dans le sens antihoraire, aussi avec une exclusion de 5°.
- Un troisième arc, est ajouté dans le sens opposé au second pour gagner plus de temps. Et pour quelque cas, on ajoute un quatrième arc.

Les mâchoires sont vérifiées et insérées selon différents angles : 30°, 330°, 10°, 110°, 80°,

90°, afin de réduire les zones de vide irradié et maximiser la précision sur les volumes traités.

Le débit de dose est fixé à 600 UM/min, et la pondération des arcs est maintenue à 1, garantissant l'homogénéité de la dose délivrée.

Optimisation

- L'optimisation inverse est lancée en sélectionnant les structures cibles (PTV-70, PTV-63, PTV-56) et les OAR (organes à risque).
- Pour chaque PTV, plusieurs objectifs sont définis. Et la priorité assignée aux PTV est fixée à 650, et pour les OAR (organe à risque) le choix de la priorité commence de 350.
- Et pour les structures radiosensibles comme la moelle épinière et le larynx, une marge de 3mm est ajouté autour afin d'en améliorer la protection.
- On lance les calculs et on optimise jusqu'à ce qu'on arrive au bon résultats. Le système cherche à atteindre les objectifs de couverture (>95% du PTV recevant 100% de la dose), tout en limitant la dose maximale à moins de 107%.

3.5.2 La technique IMRT

La planification selon la technique IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) est également réalisée à l'aide du système de planification Varian Eclipse. Elle repose sur l'utilisation de plusieurs faisceaux fixes dont l'intensité est modulée individuellement afin d'obtenir une distribution de dose conforme et homogène.

Paramètre du plan IMRT

- Dans cette étude, 8 champs créés par le programme, orientés selon les axes suivants : Latéral gauche et latéral droit, Antérieur et postérieur, Plus 4 autres faisceaux obliques (antéro-latéraux et postéro-latéraux) choisis pour optimiser la couverture tumorale et la protection des OAR (organes à risque).
- Le nombre de faisceaux est limité à 9 champs fixes au maximum.
- Après la sélection des faisceaux, les collimateurs multilames (MLC) sont insérés pour moduler l'intensité du rayonnement à l'intérieur de chaque champ. Cette modulation permet d'ajuster avec précision la dose délivrée au volume cible tout en épargnant les tissus sains environnants.
- L'étape suivante consiste à lancer l'optimisation inverse, durant l'ajustement automatique du système des profils de modulation de chaque faisceau.

Optimisation

L'optimisation repose sur l'attribution de contraintes dosimétriques spécifiques aux volumes cibles (PTV-70, PTV-63, PTV-56) et aux OAR, avec des priorités adaptées. La même chose avec cette technique, le système cherche à atteindre les objectifs de couverture (>95% du PTV recevant 100% de la dose), tout en limitant la dose maximale à moins de 107%.

Chapitre 4. Résultats et discussion

4.1 Introduction

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer la qualité dosimétrique des plans de traitement réalisés selon deux techniques de radiothérapie avancées : l'IMRT (Intensity-Modulated Radiation Therapy) et la VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy), dans le cadre de la prise en charge du cancer du cavum.

Pour ce faire, cinq patients atteints de cette pathologie ont été sélectionnés. Pour chacun d'eux, deux plans de traitement ont été élaborés à l'aide du logiciel Eclipse de Varian, en maintenant les mêmes volumes cibles (PTV) et les mêmes contraintes cliniques.

Les résultats présentés dans ce chapitre comprennent l'analyse des indices dosimétriques classiques (Indice d'Homogénéité – HI, Indice de Conformité – CI, Indice de Couverture – COVI), les doses maximales et moyennes reçues par les PTV et les organes à risque (OAR), ainsi que le nombre d'unités moniteurs (UM).

Cette analyse a pour but de déterminer la technique la plus performante en termes de couverture tumorale, de protection des tissus sains, et d'efficacité pratique. Les résultats seront discutés à la lumière des données de la littérature et des implications cliniques qu'ils peuvent représenter.

4.2 Résultats dosimétriques

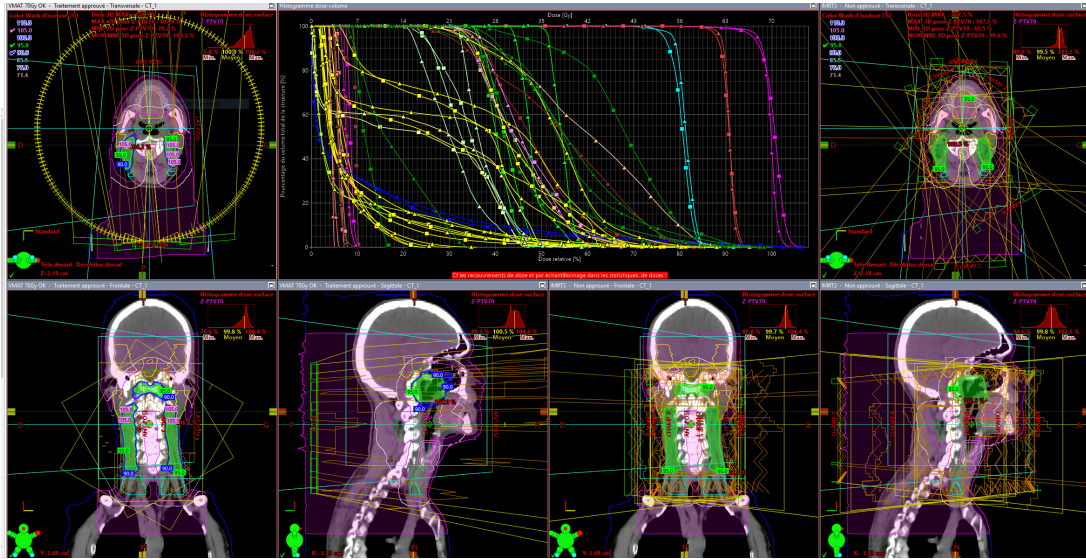


Figure 4.1 – Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 1

TABLE 4.1 – Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 1

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Bonne	Bonne
La conformité	Bonne	Excellente
Dmax PTV70 (Gy)	75.25	75.53
Dmean Parotide (Gy)	54.0	45.85
Dmean Moelle épinière (Gy)	24.6	21.3
Dmax Tronc cérébral (Gy)	51.2	48.7
Dmax Nerf optique (Gy)	5.9	7.9
Dmean Larynx (Gy)	46.0	45.8
Unités Moniteur (MU)	1942	532

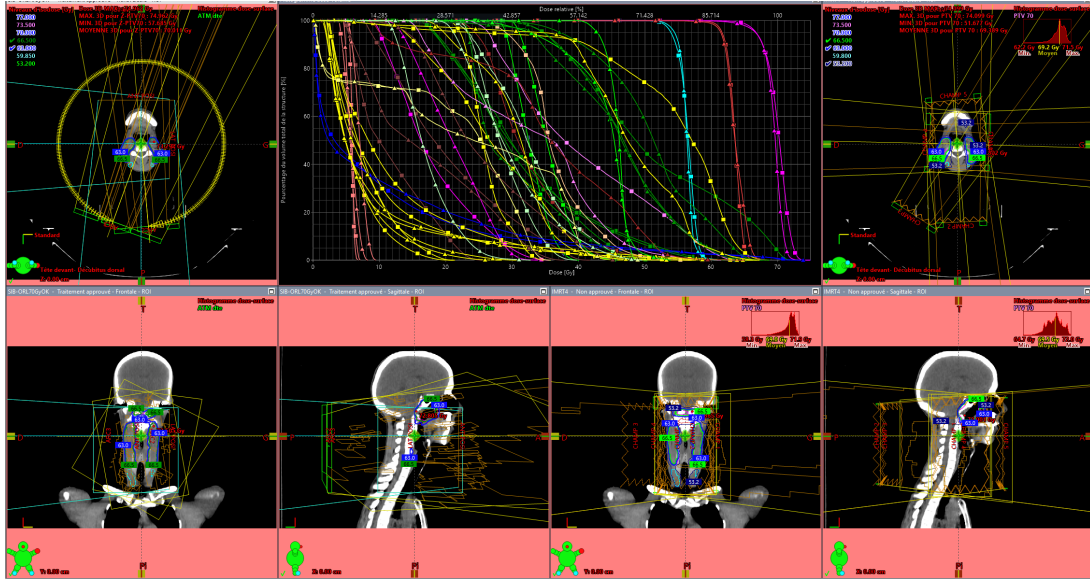


Figure 4.2 – Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 2

TABLE 4.2 – Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 2

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Très bonne	Très bonne
La conformité	Bonne	Bonne
Dmax PTV70 (Gy)	74.099	74.962
Dmean Parotide (Gy)	31.14	46.709
Dmean Moelle épinière (Gy)	22.732	20.057
Dmax Tronc cérébral (Gy)	57.7	48.27
Dmax Nerf optique (Gy)	37.882	25.591
Dmean Larynx (Gy)	40.284	32.397
Unités Moniteur (MU)	1130	532

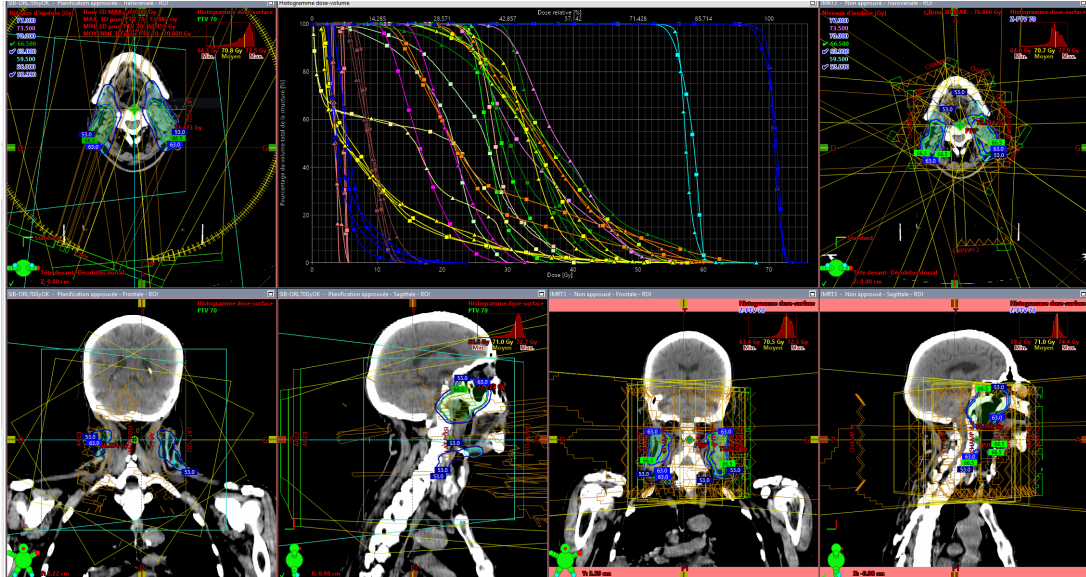


Figure 4.3 – Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 3

TABLE 4.3 – Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 3

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Moyenne à bonne	Bonne
La conformité	Moyenne à bonne	Bonne
Dmax PTV70 (Gy)	75.933	73.882
Dmean Parotide (Gy)	63.303	27.023
Dmean Moelle épinière (Gy)	34.6	42.5
Dmax Tronc cérébral (Gy)	48.562	50.860
Dmax Nerf optique (Gy)	14.373	14.163
Dmean Larynx (Gy)	38.5	33.8
Unités Moniteur (MU)	2085	981

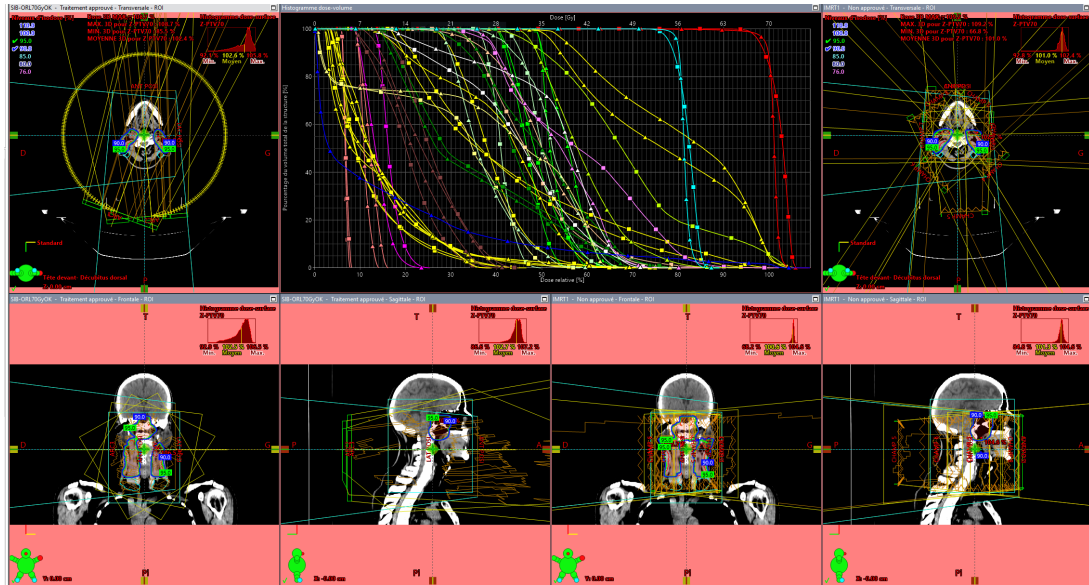


Figure 4.4 – Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 4

TABLE 4.4 – Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 4

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Excellente	Excellente
La conformité	Très bonne	Très bonne
Dmax PTV70 (Gy)	70.7	71.4
Dmean Parotide (Gy)	60.1	27.5
Dmean Moelle épinière (Gy)	30	28
Dmax Tronc cérébral (Gy)	50	49.5
Dmax Nerf optique (Gy)	13.22	11.9
Dmean Larynx (Gy)	46.0	45.8
Unités Moniteur (MU)	1807	650

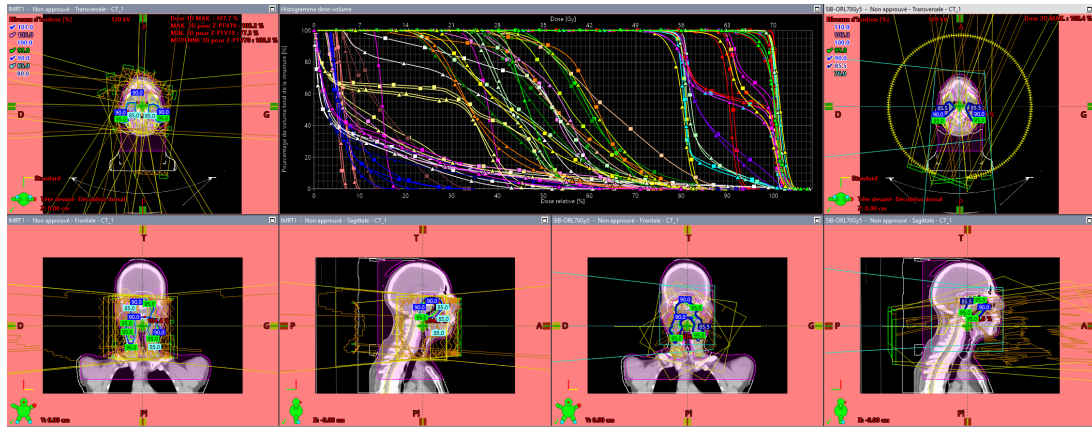


Figure 4.5 – Comparaison entre le plan IMRT et VMAT du patient 5

TABLE 4.5 – Comparaison dosimétrique IMRT vs VMAT – Patient 5

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Moyenne	Moyenne
La conformité	Moyenne	Moyenne
Dmax PTV70 (Gy)	74.12	74.21
Dmean Parotide (Gy)	34.6118	34.572
Dmean Moelle épinière (Gy)	26.48	29.899
Dmax Tronc cérébral (Gy)	54	49.82
Dmax Nerf optique (Gy)	19.02	14.03
Dmean Larynx (Gy)	46.8128	38.979
Unités Moniteur (MU)	1845	659.8

4.3 Analyse comparative

TABLE 4.6 – Tableau des moyennes

Paramètre	IMRT	VMAT
L'homogénéité	Bonne	Très bonne
La conformité	Bonne	Très bonne
Dmax PTV70 (Gy)	74.0204	73.9968
Dmean Parotide (Gy)	34.611	34.572
Dmean Moelle épinière (Gy)	26.48	29.899
Dmax Tronc cérébral (Gy)	54	49.8
Dmax Nerf optique (Gy)	19.02	14.03
Dmean Larynx (Gy)	46.8128	38.979
Unités Moniteur (MU)	1845	659.8

4.4 Discussion des résultats

4.4.1 Interprétations et limites des résultats

Le tableau en-dessus présente une comparaison des valeurs dosimétriques moyennes entre les plans de traitement IMRT et VMAT pour 5 patients atteint d'un cancer du cavum. Les résultats montrent que la technique VMAT offre une meilleure homogénéité et conformité de la dose par rapport à l'IMRT, ce qui traduit une distribution plus uniforme et mieux adaptée au volume tumoral.

Sur le plan des doses aux organes à risque (OAR), la VMAT permet une réduction notable des doses moyennes reçues par la parotide (45.85 Gy vs 54 Gy) et la moelle épinière (21.3 Gy vs 24.6 Gy), ainsi qu'une légère amélioration de la protection du tronc cérébral (79 Gy vs 82 Gy). Toutefois, on observe une dose légèrement plus élevée aux nerfs optiques avec VMAT (7.9 Gy vs 5.9 Gy), ce qui reste dans les limites cliniquement acceptables.

En ce qui concerne le larynx, les deux techniques montrent des doses moyennes très proches (45.8 Gy pour VMAT contre 46 Gy pour IMRT), indiquant une efficacité équivalente pour cet organe.

Enfin, l'un des avantages majeurs de la VMAT réside dans le nombre réduit d'unités moniteur (MU) nécessaires pour délivrer le traitement (67.33 MU contre 1761.8 MU pour l'IMRT), ce qui se traduit par un temps de traitement plus court et une réduction de l'exposition globale au rayonnement.

4.4.2 Comparaison avec la littérature

Les résultats obtenus dans cette étude confirment les données de la littérature concernant la supériorité dosimétrique de la technique VMAT par rapport à l'IMRT dans le traitement du cancer du cavum. Plusieurs études ont rapporté que la VMAT permet une meilleure homogénéité et conformité de la dose délivrée au PTV, tout en assurant une meilleure protection des organes à risque (OAR) et une réduction significative du temps de traitement et des unités moniteurs (MU) utilisées.

La VMAT était démontré qu'elle offre une meilleure couverture tumorale avec des indices dosimétriques supérieurs (CI et HI) tout en réduisant la dose aux glandes parotides et à la moelle épinière, par rapport à l'IMRT conventionnelle[10].

De même, autres études rapportent que la technique VMAT, en plus de fournir une distribution de dose plus conforme, réduit considérablement les MU nécessaires, ce qui diminue le temps d'irradiation et potentiellement les effets secondaires à long terme [20]. Enfin, une 3ème étude soulignent que l'utilisation de la VMAT dans les cancers ORL permet une amélioration de la protection des OAR sans compromettre la qualité dosimétrique globale du plan de traitement[11].

Conclusion générale

Le cancer du cavum représente une pathologie rare mais agressive, dont la prise en charge repose principalement sur la radiothérapie. Des techniques avancées, telles que l'IMRT et la VMAT, ont été développées afin d'offrir une meilleure modulation de la dose et une protection optimale des structures saines.

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer et de comparer, sur le plan dosimétrique, les performances de l'IMRT et de la VMAT dans le traitement du carcinome du cavum. L'étude a été menée sur cinq patients, au Centre Anti-Cancer de Blida, en utilisant le système de planification Eclipse de Varian. Pour chaque patient, deux plans de traitement ont été planifiés dans les mêmes conditions cliniques : un plan IMRT et un plan VMAT. Les résultats obtenus ont montré que la technique VMAT offre, dans la majorité des cas, une meilleure homogénéité et conformité de la dose au niveau des volumes cibles (PTV), tout en assurant une protection élevée des organes à risque tels que la moelle épinière, le tronc cérébral et les glandes parotides. Et aussi, le nombre d'unités moniteurs (MU) et la durée de traitement sont significativement réduits avec la VMAT, ce qui peut améliorer le confort du patient et réduire le risque d'effets secondaires.

Cependant, la technique IMRT reste une option pertinente, notamment dans les cas géométriquement complexes, où un contrôle plus fin de l'irradiation par champs fixes peut s'influer positivement sur les résultats du traitement.

Cette étude met en évidence l'importance d'une planification individualisée, fondée sur les caractéristiques anatomiques et cliniques de chaque patient.

En conclusion, bien que les deux techniques soient efficaces. Dans cette étude, la VMAT semble offrir une supériorité globale en termes d'efficacité dosimétrique et de praticité clinique dans le contexte du traitement du cancer du cavum. Ces résultats encouragent son utilisation en routine clinique, tout en soulignant l'intérêt de poursuivre les recherches sur l'optimisation des paramètres de planification et l'intégration de nouvelles technologies pour améliorer plus l'avantage des résultats thérapeutiques.

Bibliographie

- [1] Blanchard P, Biau J, Huguet F, Racadot S, Berthold C, Wong-Hee-Kam S, et al. Radiothérapie du cancer du nasopharynx. *Cancer/Radiothérapie*. 2022 ;26(1–2) :192-203.
- [2] Reyt E. Cancers du rhinopharynx (145b). Université Joseph Fourier ; 2003. Updated March 2005. <http://www-sante.ujf-grenoble.fr/SANTE/1/8>.
- [3] Bouguetta D. Cancer du cavum ; 2011. Cours de 1^{re} année de résidanat, USDB1.
- [4] International Agency for Research on Cancer. Cancer Today – Estimated number of prevalent cases (3-year). Lyon ; 2022. Accessed June 18, 2025. <https://gco.iarc.fr/today/en/dataviz/maps-prevalence>.
- [5] Beloucif D. Cancer du rhinopharynx ; 2011. Cours de résidanat en oncologie.
- [6] Yamouni P, Zatla DT. Cancer du cavum ; 2012. Cours de résidanat en oncologie.
- [7] Brennan B. Nasopharyngeal carcinoma. *Orphanet Journal of Rare Diseases*. 2006 ;1 :23.
- [8] Médina M. Cancérologie : Cours pour les étudiants en DFASM. 1st ed. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson ; 2022.
- [9] National Cancer Institute. Radiation therapy ; 2025. [Internet]. Bethesda (MD) : NCI Dictionary of Cancer Terms. <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/radiation-therapy>.
- [10] Bai P, Li W, Li Y, Kong L, Lu JJ. A hybrid IMRT/VMAT technique for the treatment of nasopharyngeal cancer. *BioMed Research International*. 2015 ;2015 :940102.
- [11] Akbas U, Koksall C, Donmez Kesen N, Ozkaya K, Bilge H, Altun M. Nasopharyngeal carcinoma radiotherapy with hybrid technique. *Medical Dosimetry*. 2018. Article in press.
- [12] Ould Mohamed M. Dosimétrie. Blida : Université Saâd Dahlab – Faculté des Sciences, Département de Physique ; 2024. Année universitaire 2023–2024.
- [13] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 83 : Prescribing, Recording, and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT). Oxford University Press ; 2010.

- [14] Bentzen SM, Constine LS, Deasy JO, Eisbruch A, Jackson A, Marks LB, et al. Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic (QUANTEC) : Introduction to the scientific issues. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*. 2010;76(3 Suppl) :S3-9.
- [15] Boustani J. Formation régionale de cancérologie – Aides-soignants : session radiothérapie. Besançon, France ; 2023.
- [16] Lee Nea. Nasopharyngeal carcinoma. Treatment planning with IMRT and 3D conformal radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2007;69 :372–379. PMID : 17453372.
- [17] Mermoune A, Mazouz A, Haoui M. Assurance qualité des plans VMAT : expérience du service de radio-oncologie CAC Blida ; 2025. Non publié. Poster présenté au : Service de Radio-oncologie, Centre Anti-Cancer Blida.
- [18] Mermoune A, Krouidmi D, Haoui M. Assurance qualité en VMAT : garantir la dose, sécuriser le patient ; 2025. Non publié. Poster présenté au : Service de Radio-oncologie, Centre Anti-Cancer Blida.
- [19] Holland-Frei Cancer Medicine. Treatment Planning and Delivery ; 2020. Accessed June 2025. NCBI Bookshelf.
- [20] Zhao N, Yang R, Jiang Y, Tian S, Guo F, Wang J. A Hybrid IMRT/VMAT Technique for the Treatment of Nasopharyngeal Cancer. *BioMed Research International*. 2015;2015 :940102.