

Utilisation de la réalité virtuelle pour la planification chirurgicale des tumeurs au niveau de la colonne vertébrale

par

Tina Nomena Herimino NANTENAINA

MÉMOIRE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES TECHNOLOGIES DE LA SANTÉ
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 18 OCTOBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Tina Nomena Herimino Nantenaina, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Simon Drouin, directeur de mémoire
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

Mme Rita Noumeir, présidente du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. David Labbé, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 OCTOBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEUR

REMERCIEMENTS

Je souhaite d'abord exprimer ma gratitude à l'univers, pour avoir placé sur mon chemin des personnes inspirantes et bienveillantes ainsi que des opportunités propices au bon moment.

En premier lieu, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Simon Drouin, pour son encadrement exceptionnel, sa supervision éclairée, sa disponibilité, sa patience, et ses précieux conseils tout au long de ce travail de recherche. Merci pour ta confiance depuis notre rencontre en 2022, et pour avoir cru en mon potentiel, cela m'a profondément encouragée. Ta rigueur, ton expertise, et ton soutien constant ont été essentiels à la réalisation de ce projet. J'espère que nous aurons l'occasion de collaborer à nouveau à l'avenir.

Je remercie ensuite Mme Rita Noumeir, présidente du jury et Mr David Labbé, membre du jury, pour avoir accepté d'examiner avec attention mon travail.

Un grand merci aussi à Dr Sung-Joo Yuh du CHUM, dont l'expertise et la disponibilité ont été d'une aide inestimable pour la réalisation de ce projet. Je vous remercie de m'avoir accordé votre confiance, de m'avoir fourni un bureau pour mener les expérimentations, et surtout d'avoir sensibilisé les participants. Je remercie également tout le personnel du service de neurochirurgie du CHUM pour leur accueil chaleureux, en particulier le chef de service, ainsi que tous les neurochirurgiens seniors et résidents qui ont pris part à l'étude. Sans vos engagements et vos participations, ce projet n'aurait pu aboutir.

Je tiens à remercier chaleureusement Mme Nicola Hagemeister pour son aide tout au long de ce projet, ainsi que pour m'avoir prêté son bureau pour la réalisation de mes expérimentations. Mes remerciements vont également à Rémi Courteille, ainsi qu'aux équipes du CÉR du CHUM et de l'ÉTS pour leur assistance lors de la procédure d'approbation éthique du projet. Je remercie aussi le bureau de la convenance institutionnelle de la recherche du CHUM, les

équipes techniques de l'OACIS, les équipes des archives médicales du CHUM ainsi qu'Alice Le Nilias Houmeau, dont leur aide a été essentielle pour l'obtention des dossiers médicaux nécessaires pour ce projet. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Mme Sylvie Gervais, pour sa grande disponibilité et sa précieuse aide pour l'analyse des données. Enfin je remercie tous les membres du laboratoire LIO pour leur accueil chaleureux.

Je remercie également mon école ISIS en France, de m'avoir donné l'opportunité de faire ce double diplôme à l'ÉTS, ce qui m'a permis de mener à bien ce projet.

Par ailleurs, je tiens à remercier Andrey Titov pour son aide précieuse. Grâce à ses compétences et à son expertise, j'ai pu intégrer sa technique dans mon projet, ce qui a largement contribué à son aboutissement. Merci pour ta générosité et ton soutien tout au long de ce travail. Je vous remercie également Léa, Alejandro, Naomi pour vos précieuses contributions à travers nos échanges d'idées et discussions. Vos présences ont rendu la réalisation de ce projet encore plus agréable. Enfin, je remercie mes ami(e)s, de près comme de loin, pour leur soutien, leur écoute et pour avoir toujours été là pour moi, même dans les moments plus difficiles.

Pour terminer, je souhaite exprimer toute ma gratitude la plus profonde à ma mère, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Ton soutien indéfectible, ton amour inconditionnel et les innombrables sacrifices que tu as faits tout au long de ma vie m'ont permis de me concentrer pleinement sur mes études et d'arriver là où je suis aujourd'hui. Ta force, ta patience et ta générosité ont toujours été une source d'inspiration pour moi. Merci pour tous ces moments où tu as été là, dans les moments de doute comme dans ceux de réussite, et pour avoir cru en moi, même quand j'avais du mal à y croire moi-même. Ce projet est aussi le fruit de tes sacrifices et de ton amour, et je te suis éternellement reconnaissante. Enfin, un remerciement particulier à toi, qui représente l'un des piliers les plus importants de ma réussite.

Utilisation de la réalité virtuelle pour la planification chirurgicale des tumeurs au niveau de la colonne vertébrale

Tina Nomena Herimino NANTENAINA

RÉSUMÉ

Les tumeurs de la colonne vertébrale, qu'elles soient primitives ou métastatiques, représentent un défi majeur en neurochirurgie en raison de leur proximité avec des structures neurologiques telles que la moëlle épinière et les racines nerveuses. Dans cette situation, en cas d'indication chirurgicale dans leur traitement, une planification chirurgicale minutieuse est nécessaire pour minimiser les risques de complications peropératoires ou postopératoire. Cependant les méthodes de visualisation d'images médicales en 2D ou 3D sur un écran d'ordinateur sont limitées en termes de perception spatiale. Les neurochirurgiens sont confrontés à une charge cognitive importante, car ils doivent mentalement reconstruire une image 3D à partir de la visualisation en 2D afin d'avoir une bonne appréhension des structures. En outre, l'analyse des relations spatiales entre les structures anatomiques même avec des images 3D sur un ordinateur, peut devenir compliqué dans certaines situations. Face à ces limites de visualisation, la réalité virtuelle s'avère être une solution innovante offrant une visualisation immersive et interactive.

L'objectif de cette recherche est d'évaluer l'impact de l'utilisation de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale des tumeurs au niveau du rachis. Cette étude s'appuie sur une comparaison entre les deux modes de visualisations : réalité virtuelle et ordinateur, pour déterminer si la réalité virtuelle permet une meilleure perception des structures anatomiques et une amélioration du choix de la voie d'approche chirurgicale. La méthodologie utilisée est basée sur l'analyse du domaine de travail en neurochirurgie qui est une approche issue de l'ingénierie cognitive. Cette méthodologie a permis d'élaborer une échelle d'évaluation objective pour mesurer la qualité et la quantité des informations anatomo-fonctionnelles perçues à partir des deux modes de visualisations. Une étude usager a été menée auprès de huit neurochirurgiens du centre hospitalier universitaire de Montréal (CHUM). Chaque neurochirurgien a réalisé une planification chirurgicale de six différents cas de tumeurs du rachis en utilisant les deux modes de visualisations. Les résultats ont montré que la réalité virtuelle a permis la perception d'un grand nombre de structures anatomiques en un temps réduit par rapport à l'ordinateur. De plus la réalité virtuelle a permis de visualiser plus de structures anatomiques à traverser pour atteindre la tumeur, améliorant ainsi la planification de la voie d'approche chirurgicale. L'impact de la réalité virtuelle dans l'identification des structures anatomiques essentielles à la planification chirurgicale et son influence dans la prise de décision, notamment dans le choix de la voie d'approche chirurgicale a été démontrée. La réalité virtuelle offre une vision immersive et interactive permettant ainsi d'aider les neurochirurgiens pendant la planification chirurgicale, tout en réduisant les risques de complications peropératoires et postopératoires.

Mots-clés : Réalité virtuelle, planification chirurgicale, analyse du domaine de travail, tumeur, neurochirurgie

Use of virtual reality in surgical planning for spinal tumors

Tina Nomena Herimino NANTENAINA

ABSTRACT

Spinal tumors, whether primary or metastatic, present an important challenge in neurosurgery due to their proximity to neurological structures, especially the spinal cord and nerve roots. When surgical intervention is necessary, careful surgical planning is crucial to reduce the risk of intraoperative or postoperative problems. However, conventional 2D or 3D medical image visualizations on a computer display are limited in their spatial perceptive capabilities. Neurosurgeons have considerable cognitive workload as they must mentally reconstruct a 3D image from 2D visualizations to accurately understand the anatomical structures. Additionally, analyzing spatial relationships between anatomical structures, even with 3D images on a computer screen, can become challenging in certain situations. In response to these visualization constraints, virtual reality has arisen as an innovative solution, providing immersive and interactive visualization experiences.

This research aims to assess the effects of virtual reality on the surgical planning of spinal tumors. This study compares two visualization modalities: virtual reality and computer, to determine whether virtual reality improves the perception of anatomical structures and enhances the selection of surgical approaches. The methodology is based on work domain analysis in neurosurgery, an approach coming from cognitive engineering. This methodology enabled the creation of an objective assessment scale to quantify and qualify the anatomo-functional information obtained from the two visualization modalities. The user study involved eight neurosurgeons from the University of Montreal Hospital Center (CHUM), each responsible for planning surgery for six distinct spinal tumor cases using both visualization modalities. The results indicated that virtual reality facilitated the visualization of a greater number of anatomical structures in a shorter time compared to the computer. Furthermore, virtual reality enabled the visualization of a greater number of anatomical structures to be traversed to reach the tumor, thus improving the planning of the surgical approach. The effect of virtual reality on recognizing critical anatomical structures for surgical planning and its role in decision-making, especially for the choice of surgical approach, was demonstrated. Virtual reality offers an immersive and interactive perspective, helping neurosurgeons in surgical planning by minimizing the risks of intraoperative and postoperative complications.

Key-words: virtual reality, surgical planning, work domain analysis, tumor, neurosurgery

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 La colonne vertébrale.....	5
1.1.1 Anatomie de la colonne vertébrale	5
1.1.2 Pathologie de la colonne vertébrale	11
1.1.3 Tumeurs de la colonne vertébrale	11
1.1.4 Traitement des tumeurs de la colonne vertébrale	13
1.2 Planification des interventions chirurgicales	14
1.2.1 Les outils conventionnels de planification préopératoire	14
1.2.2 Les outils de planification préopératoire en réalité virtuelle	18
1.2.3 Autre outil de la planification préopératoire : l'impression 3D.....	20
1.3 Évaluation de l'utilisation de la réalité virtuelle en chirurgie.....	20
1.4 Analyse du domaine de travail en neurochirurgie	23
1.4.1 Cadre théorique et historique de l'Analyse du domaine de travail	23
1.4.2 Méthodologie de l'analyse du domaine de travail	24
1.4.3 Application générale de l'analyse du domaine de travail	27
1.4.4 Application de l'analyse du domaine de travail en neurochirurgie	28
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	31
2.1 Problématique	31
2.2 Objectifs.....	32
2.3 Hypothèses	33
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	35
3.1 Introduction à la méthodologie	35
3.2 Étude usager.....	36
3.2.1 Protocole expérimentale de l'étude usager	37
3.2.1.1 Phase de planification conventionnelle.....	37
3.2.1.2 Phase de planification en réalité virtuelle	41
3.2.2 Les participants	45
3.2.3 Les cas cliniques	45
3.3 Préparation des données pour l'étude usager.....	47
3.3.1 Analyse du domaine de travail.....	47
3.3.2 Conception du questionnaire post-expérimentation.....	50
3.3.3 Conception du questionnaire post-cas	54
3.3.4 Création des modèles anatomiques 3D.....	55
3.4 Conception des interfaces pour l'étude usager	56
3.4.1 Implémentation du module pour la planification chirurgicale conventionnelle	57
3.4.2 Intégration d'une méthode de visualisation en réalité virtuelle	58

3.5	Analyses et traitements des données de l'expérimentation.....	59
3.5.1	Préparation des données du QPoE	59
3.5.2	Préparation des données du QPC	60
3.5.2.1	La distance de Hamming	61
3.5.2.2	La distance de Jaccard	63
3.5.3	Méthode d'analyse statistiques	63
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		65
4.1	Introduction aux résultats de l'étude usager	65
4.2	Statistiques sur les participants	65
4.3	Quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçue.....	66
4.3.1	Effets des modes de visualisation, des niveaux d'abstraction et des concepts clés	67
4.3.2	Interactions entre les modes de visualisations, les niveaux d'abstractions et les concepts clés.....	69
4.3.3	Estimation précise des effets du mode de visualisation, du NAH et du NPH.....	70
4.4	La quantité des structures anatomiques identifiées.....	70
4.4.1	Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et du niveau d'expérience	70
4.4.2	Interactions entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience	73
4.4.3	Estimation précise des effets du mode de visualisation.....	74
4.4.4	Niveau de similarité et de différence de structures anatomiques identifiées selon les modes de visualisation.....	74
4.5	La quantité des structures anatomiques traversées	76
4.5.1	Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et des niveaux d'expérience des neurochirurgiens	76
4.5.2	Interactions entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience	79
4.5.3	Estimation précise des effets des modes de visualisation.....	79
4.5.4	Concordance des structures anatomiques traversées avec le CRPO.....	80
4.5.5	Niveau de similarité et de différence des structures anatomiques traversées selon les deux modes de visualisation	81
4.6	Le temps de planification dans les deux modes de visualisation.....	82
4.6.1	Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et des niveaux d'expérience	83
4.6.2	Interaction entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience	85
4.6.3	Estimation précise des effets du mode de visualisation.....	86
4.7	Rétroaction des participants.....	87
CHAPITRE 5 DISCUSSION		89
5.1	La quantité d'information anatomo-fonctionnelle perçue	89
5.2	La quantité de structures anatomiques identifiées	91

5.3	La voie d'approche chirurgicale	94
5.4	Le temps de planification chirurgicale.....	96
5.5	Le niveau d'expériences des neurochirurgiens	97
5.6	La rétroaction des neurochirurgiens.....	99
CONCLUSION.....		101
ANNEXE I	STRUCTURES ANATOMIQUES IDENTIFIEES.....	103
ANNEXE II	QUESTIONNAIRE POST EXPERIMENTATION (QPoE).....	105
ANNEXE III	QUESTIONNAIRE POST-CAS (QPC).....	111
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1.	Degré de perception des structures anatomiques selon IRM et TDM16
Tableau 1.2.	Exemple des informations contenues dans les niveaux de NAH et NPH..25
Tableau 1.3.	Correspondances des composants du NPH.....29
Tableau 3.1.	Analyse du domaine de travail pour la planification neurochirurgicale48
Tableau 3.2.	Correspondance des questions avec les informations dans l’ADT51
Tableau 3.3.	Les structures anatomiques segmentées.....56
Tableau 4.1.	Moyenne des quantités d’informations perçues selon le mode de visualisation67
Tableau 4.2.	Moyenne des quantités de structures anatomiques identifiées selon le mode de visualisation.....71
Tableau 4.3.	Moyenne des quantités de structures anatomiques identifiées selon les différents cas cliniques dans les deux modes de visualisation.....72
Tableau 4.4.	Moyenne de nombre de structures anatomiques identifiées selon le niveau d’expérience dans les deux modes de visualisation73
Tableau 4.5.	Comparaison des effets des modes de visualisation sur le nombre de structures anatomiques identifiées dans chaque cas clinique73
Tableau 4.6.	Moyenne de nombre de structures anatomiques traversées selon le mode de visualisation.....77
Tableau 4.7.	Moyenne de nombre de structures anatomiques traversées selon le niveau d’expérience78
Tableau 4.8.	Comparaison des distances de Hamming et de Jaccard selon les modes de visualisation.....80
Tableau 4.9.	Moyenne de temps de planification chirurgicale selon le mode de visualisation83
Tableau 4.10.	Moyenne de temps de planification des cas cliniques dans les deux modes de visualisation84

Tableau 4.11.	Comparaison des temps de planification selon les modes de visualisation pour chaque cas clinique.....	86
Tableau 4.12.	Score du F-SUS entre les deux modes de visualisation.....	88

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1.	La colonne vertébrale et les 33 vertèbres.....7
Figure 1.2.	Structure anatomique d'un corps vertébral typique8
Figure 1.3.	Structure anatomique de l'atlas et de l'axis8
Figure 1.4.	Vascularisation de la colonne vertébrale10
Figure 1.5	Classification chirurgicale des tumeurs du rachis.....13
Figure 1.6.	Matrice d'une analyse de domaine de travail24
Figure 3.1.	Plateforme pour la phase 1 de l'étude usager dans 3D Slicer; Montrant le TDM cervical d'un patient dans les trois plans axial, coronal et sagittal, affichant aussi le rendu volumétrique dans la case 3D en haut à droite38
Figure 3.2.	Trajet de la voie d'approche chirurgicale tracée lors de la planification chirurgicale conventionnelle; Le trajet de la voie d'approche chirurgicale est représenté par la ligne rouge du <i>PoinCible</i> au <i>PointEntree</i> , facilitant l'identification des structures anatomiques traversées.....39
Figure 3.3.	Plan frontal d'un TDM du cou; (A) Sans segmentation (B) Avec segmentation, avec la tumeur bien visible en mauve, les veines jugulaires en bleu, les os vertébraux en beige.....40
Figure 3.4.	Vue des participants avec le mode de visualisation en VR; Au milieu le modèle anatomique 3D d'un cas clinique ; en arrière sont affichés les consignes pendant l'étude usager ; à droite s'affiche une liste des segments ou des structures anatomiques du modèle anatomique41
Figure 3.5.	Identification des structures anatomiques par découpage des segments en RV; (A) Modèle anatomique à l'état initial sans découpe; (B) Découpe de la peau (avec une sphère invisible manipulée avec la manette) révélant les muscles en marron et la veine jugulaire en bleu; (C) Découpe des muscles permettant d'identifier la tumeur en mauve (flèche blanche) et les structures anatomiques environnantes telles que les vaisseaux sanguins et les os vertébraux; (D) Autre perspective montrant la tumeur et les structures anatomiques43

Figure 3.6.	Visualisation des structures anatomiques traversées et mise en place de la voie d'approche chirurgicale; (A) Mise en place du « point cible » de couleur rouge (pointé par la flèche blanche) au niveau de la tumeur; (B) La ligne en rose traverse une structure anatomique critique : la veine jugulaire en bleu; (C) Ajustement de la ligne du trajet de la voie d'approche chirurgicale; (D) Le « point d'entrée » à la surface de la peau44
Figure 3.7.	Représentation des composantes du questionnaire post-expérimentation (QPoE)53
Figure 3.8.	Modèles anatomiques 3D; (1) Structures osseux segmentés en jaune et tumeur segmentée en mauve; (2) Structures vasculaires segmentées : carotides en rouge, jugulaires en bleu; (3) Structures musculaires segmentées55
Figure 3.9.	Interface du module implémenté sur 3D Slicer; (1) et (5) représentent les boutons pour QPE et QPC; (2) et (3) sont les cases à cocher pour charger le volume d'IRM et le modèle anatomique segmenté; (4) représente le bouton pour tracer la voie d'approche chirurgicale58
Figure 3.10.	Visualisation en réalité virtuelle du modèle anatomique 3D59
Figure 4.1.	Quantité d'informations perçue pour chaque NAH et selon le mode de visualisation68
Figure 4.2.	Quantité d'informations perçue pour chaque NPH selon le mode de visualisation69
Figure 4.3.	Quantité de structures anatomiques identifiées dans chaque mode de visualisation et selon le niveau d'expérience.....72
Figure 4.4.	Distribution des distances de Hamming entre les modes de visualisation.75
Figure 4.5.	Distribution des distances de Jaccard entre les modes de visualisation.....76
Figure 4.6.	Quantité de structures anatomiques traversées selon le mode de visualisation et selon le niveau d'expérience.....78
Figure 4.7.	Distribution des distances de Hamming entre les modes de visualisation.81
Figure 4.8.	Distribution des distances de Jaccard entre les modes de visualisation.....82
Figure 4.9.	Temps de planification chirurgicale selon le mode de visualisation et selon le niveau d'expérience85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ADT	Analyse du domaine de travail
ANOVA-MR	Analyse de variance multifactorielle et à mesures répétées
CAI	Commission d'accès à l'information
CÉR	Comité d'éthique et de la recherche
CHUM	Centre hospitalier universitaire de Montréal
CRPO	Compte rendu du protocole opératoire
ÉTS	École de technologie supérieure
IRM	Image par résonnance magnétique
MLM	Modèle linéaire mixte
NAH	Niveau d'abstraction hiérarchique
NPH	Niveau partie-tout hiérarchique
RV	Réalité virtuelle
TDM	Tomodensitométrie

INTRODUCTION

Les tumeurs de la colonne vertébrale peuvent se présenter soit sous forme primitive : bénigne ou maligne, soit sous forme métastatique secondaire à une autre tumeur provenant d'un autre site que la colonne vertébrale. Ces tumeurs représentent une pathologie complexe dans le domaine de la neurochirurgie. La complexité de cette pathologie réside surtout dans sa localisation, qui peut envahir ou comprimer des structures neurologiques telles que la moëlle épinière ou les racines nerveuses. Pourtant, l'atteinte au niveau de ces structures anatomiques peut entraîner des complications neurologiques handicapantes pour le patient. Par conséquent, la prise en charge des tumeurs de la colonne vertébrale, notamment lorsqu'une intervention chirurgicale est indiquée, nécessite une planification préopératoire minutieuse.

La planification chirurgicale préopératoire permet au chirurgien de prévisualiser l'intervention chirurgicale et de préparer à l'avance les étapes de l'opération afin de réduire les risques de complication peropératoire et postopératoire. Cette planification implique des processus cognitifs au cours duquel le chirurgien doit analyser les structures anatomiques afin de déterminer la voie d'approche chirurgicale optimale pour atteindre la tumeur. L'analyse de ces structures anatomiques se fait à partir des images médicales obtenues par résonances magnétiques (IRM) ou par tomodensitométrie (TDM). En pratique, ces images sont visionnées sur un ordinateur à l'aide du système de visualisation d'images médicales : PACS (Picture Archiving and Communication System). Avec leur connaissance anatomique et leur compétence chirurgicale, les chirurgiens effectuent une revue séquentielle des tranches d'images en deux dimensions (2D) pour reconstruire mentalement une représentation spatiale de l'anatomie et de la pathologie du patient (Pipolo et al., 2023). Cependant, cette tâche peut être difficile même pour un chirurgien expérimenté, surtout quand l'envahissement de la tumeur est étendu jusqu'aux structures anatomiques voisines. Dans ce cas, la visualisation en 2D ou même en trois dimensions (3D) de ces images médicales peut rendre l'analyse des structures anatomiques et ses relations spatiales difficile, car elle dépasse parfois les capacités de perception et de l'analyse humaine (Soler, 2023 ; Yan et al., 2021). Or il est primordial de bien analyser les relations spatiales entre les structures pour optimiser la stratégie opératoire et

pour limiter les complications peropératoire et postopératoire. Ces limitations ont ainsi entraîné la nécessité d'une méthode plus immersive et interactive, comme la réalité virtuelle (RV) pour améliorer la visualisation des structures anatomiques.

L'utilisation de la RV a beaucoup évolué dans de nombreux domaines ces dernières années, en particulier dans le domaine de la médecine. En milieu médical, l'utilisation de la RV a progressivement apporté des solutions avancées dans la formation en chirurgie, la simulation chirurgicale et l'amélioration de la planification thérapeutique (Li et al., 2017). L'intégration de la RV dans la planification chirurgicale permet au chirurgien d'être immergé dans un environnement virtuel 3D, où il peut explorer et interagir avec les structures anatomiques. Cette immersion a le potentiel d'offrir une meilleure compréhension des relations spatiales entre les différentes structures anatomiques, facilitant ainsi la prise de décision lors de la planification chirurgicale.

La prise de décision repose sur l'intégration et l'interprétation des informations issues des images médicales, ce qui met en jeu des processus cognitifs. Ces processus cognitifs jouent donc un rôle important dans la planification chirurgicale. Cependant, à notre connaissance, il n'y a pas d'étude qui a évalué l'impact de la RV sur l'identification des structures anatomiques lors de la planification chirurgicale des tumeurs de la colonne vertébrale, tout en considérant ces processus cognitifs. La plupart des travaux existants sur l'évaluation de la RV se concentrent sur les recommandations des techniques chirurgicales (S. Z. Alsofy et al., 2021), les compétences chirurgicales (Knafo, Penet, Gaillard, & Parker, 2021) ou les aspects techniques de la RV, sans avoir approfondi la manière dont la RV pourrait affecter la capacité des chirurgiens à percevoir et à interpréter les informations complexes issues des images médicales. Toutefois, certaines études ont exploré les effets de différents modes de visualisation d'images médicale sur la perception des informations anatomiques. Par exemple, une étude comparait deux modes de visualisation sur ordinateur en 2D et en 3D sur la capacité d'identifier les informations anatomiques véhiculées par l'image, en utilisant l'analyse du domaine de travail (ADT) dans le cadre d'une tumeur cérébrale (T. Morineau, Morandi, Le Moëllic, & Jannin, 2013). Leurs résultats ont montré qu'il est possible de mesurer la quantité

d'informations affichées selon les modes de visualisation. Toutefois, bien que cette étude ait démontré l'avantage de la visualisation 3D par rapport à la 2D, elle n'a pas évalué la RV qui pourrait offrir une immersion et une interaction encore plus approfondies avec les structures anatomiques.

Dans cette optique, notre étude vise à évaluer l'impact de l'utilisation de la RV pendant une planification chirurgicale, notamment sur l'identification des structures anatomiques et sur le choix de la voie d'approche chirurgicale. La méthodologie est basée sur les travaux de Morineau et al. (2013) en adaptant l'ADT pour la chirurgie de la colonne vertébrale, et en comparant la RV avec la visualisation des images en 2D et 3D sur ordinateur. Cette approche permet de mesurer de manière objective la quantité et la qualité des informations anatomo-fonctionnelles identifiées lors de la planification chirurgicale. De plus, cette méthode d'évaluation de la RV va considérer les processus cognitifs impliqués dans la prise de décision au cours d'une planification chirurgicale. Nous aspirons à démontrer que la RV améliore non seulement la visualisation et l'identification des structures anatomiques mais qu'elle a aussi un impact sur la prise de décision, notamment en ce qui concerne le choix de la voie d'approche chirurgicale.

La recherche présentée dans ce mémoire est à la fois importante pour la planification chirurgicale et pour l'adoption des technologies immersives dans les pratiques chirurgicales. En réalité, la RV pourrait contribuer à une amélioration notable sur la précision chirurgicale. Par exemple, les neurochirurgiens pourraient mieux appréhender les relations spatiales complexes entre une tumeur envahissant les structures environnantes telles que la moëlle épinière, les racines nerveuses ou les artères vertébrales. Ainsi, l'utilisation de la RV lors de la planification chirurgicale pourra offrir une meilleure perception de ces structures afin de réduire les erreurs peropératoires et de sécuriser les interventions chirurgicales (Mishra et al., 2022). Ce projet peut aussi avoir un gain scientifique, dans le sens où notre recherche pourrait ouvrir de nouvelles voies de recherche dans l'évaluation de la RV pour d'autres spécialités chirurgicales. Enfin, ce projet peut apporter un gain socio-économique, puisqu'une bonne

planification chirurgicale grâce à la RV permet de réduire les complications peropératoires et postopératoires ce qui entraîne une diminution des coûts engendrés par les frais médicaux.

Le présent mémoire est structuré en cinq principaux chapitres. Le premier chapitre combine le contexte et la revue de littérature, en présentant d'abord, l'anatomie et les pathologies de la colonne vertébrale en mettant l'accent sur les tumeurs, puis leurs traitements. Il explore ensuite les différents outils de planification chirurgicale comprenant les outils conventionnels, la RV et les impressions 3D. Ce chapitre se clôture sur l'évaluation de l'utilisation de la RV en chirurgie et l'application de l'ADT en neurochirurgie. Le deuxième chapitre définit la problématique, les objectifs et les hypothèses de cette recherche. Le troisième chapitre détaille la méthodologie utilisée en commençant par la description de l'étude usager et du protocole expérimental, puis la préparation des données incluant l'élaboration de l'ADT, la conception des interfaces et des questionnaires pour l'expérimentation, en passant par la modélisation des modèles anatomiques 3D et l'implémentation en RV. Enfin ce chapitre se termine par l'analyse et le traitement des données de l'expérimentation. Le quatrième chapitre présente les résultats de l'étude puis le cinquième chapitre aborde la discussion suivie des conclusions.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présentera d'abord une mise en contexte de l'anatomie de la colonne vertébrale et les types de tumeurs qui peuvent s'y développer. Puis, l'état actuel de la recherche dans le domaine de la planification des interventions chirurgicales va être exploré autour de trois axes principaux : l'utilisation des outils conventionnels pour la planification préopératoire, l'intégration de la RV dans ces pratiques et l'exploration des possibilités offertes par l'impression en 3D. Après, ce chapitre portera un regard sur l'évaluation de l'utilisation de la RV en chirurgie, soulignant son importance et ses perspectives dans l'amélioration des pratiques chirurgicales. Enfin, l'application de l'analyse du domaine du travail en médecine sera abordée, en se concentrant spécifiquement sur la neurochirurgie.

1.1 La colonne vertébrale

La colonne vertébrale est un élément central du système neuro-musculo-squelettique humain, servant à la fois de support à l'ensemble du corps et de protection pour la moelle épinière. Comprendre les composantes anatomiques, les pathologies associées ainsi que les stratégies thérapeutiques en cas de tumeurs vertébrales est essentiel dans le contexte de la planification neurochirurgicale, notamment en ce qui concerne l'identification et la préservation des structures anatomiques lors de l'intervention chirurgicale. Cette section de la revue de littérature abordera successivement l'anatomie de la colonne vertébrale, les pathologies courantes de la colonne vertébrale, les tumeurs vertébrales et leurs traitements, en mettant l'accent sur l'importance de ces éléments dans le cadre de notre étude.

1.1.1 Anatomie de la colonne vertébrale

La colonne vertébrale encore appelée le rachis est une structure osseuse centrale du corps humain. Elle s'articule avec l'os du crâne en haut et l'os du bassin en bas. Elle présente une longueur de 60 à 70 cm et est constituée de 33 vertèbres superposées les unes sur

les autres (Marieb & Hoehn, 2010). Cependant, le nombre total des vertèbres peut varier d'un individu à l'autre, allant de 32 à 34 vertèbres (Thawait, Chhabra, & Carrino, 2012 ; Zhou, McCarthy, McGregor, Coombs, & Hughes, 2000).

Ces 33 vertèbres sont subdivisées dans cinq régions distinctes du rachis (Figure 1.1) :

- La région cervicale est composée de 7 vertèbres cervicales (C1 à C7)
- La région thoracique est composée de 12 vertèbres thoraciques qui s'articulent avec les côtes (T1 à T12)
- La région lombaire est composée de 5 vertèbres lombaires (L1 à L5)
- Le sacrum est composé de 5 vertèbres sacrées soudées les unes aux autres et reliées au bassin (S1 à S5)
- Le coccyx est composé de 3 à 5 vertèbres coccygiennes fusionnées selon les individus, mais généralement au nombre de 4

Chaque vertèbre de ces régions partage une structure anatomique similaire, à l'exception des deux premières vertèbres cervicales appelées atlas ou C1 et axis ou C2 (Kaminsk & Lengelé, 2022). Comme illustré dans la Figure 1.2, une vertèbre typique comprend :

- Le corps vertébral dans sa partie antérieure
- L'arc vertébral dans sa partie postérieure, composé par deux pédicules et deux lames formant un anneau à l'arrière de la vertèbre
- Le foramen vertébral ou trou vertébral contient et protège la moelle épinière
- Les processus ou apophyses composés par le processus épineux, les deux processus transverses, et les quatre processus articulaires

En outre, l'atlas est formé d'un anneau osseux sans corps vertébral, tandis que l'axis possède un processus odontoïde (dent) autour duquel tourne l'atlas (Figure 1.3) (Kaminsk & Lengelé, 2022). La fonction principale de l'atlas est de transmettre la charge de la tête aux vertèbres cervicales typiques (Bogduk, 2016).

Vue de face, la colonne vertébrale paraît rectiligne, tandis qu'en vue de profil, elle présente des courbures physiologiques également appelées courbures normales comme illustré sur la Figure 1.1. Les courbures au niveau de la région cervicale et lombaire ont une concavité dorsale, connue sous le nom de lordose. Les courbures au niveau de la région thoracique et coccygienne ont une concavité ventrale, connue sous le nom de cyphose.

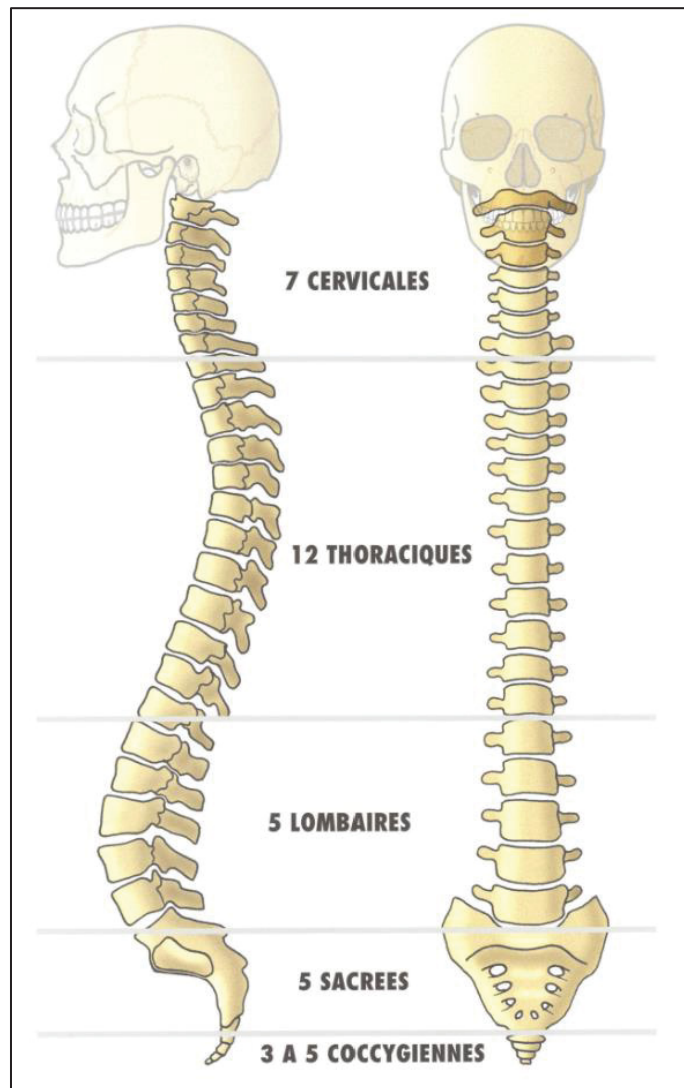


Figure 1.1. La colonne vertébrale et les 33 vertèbres
Tirée de INRS (s.d)

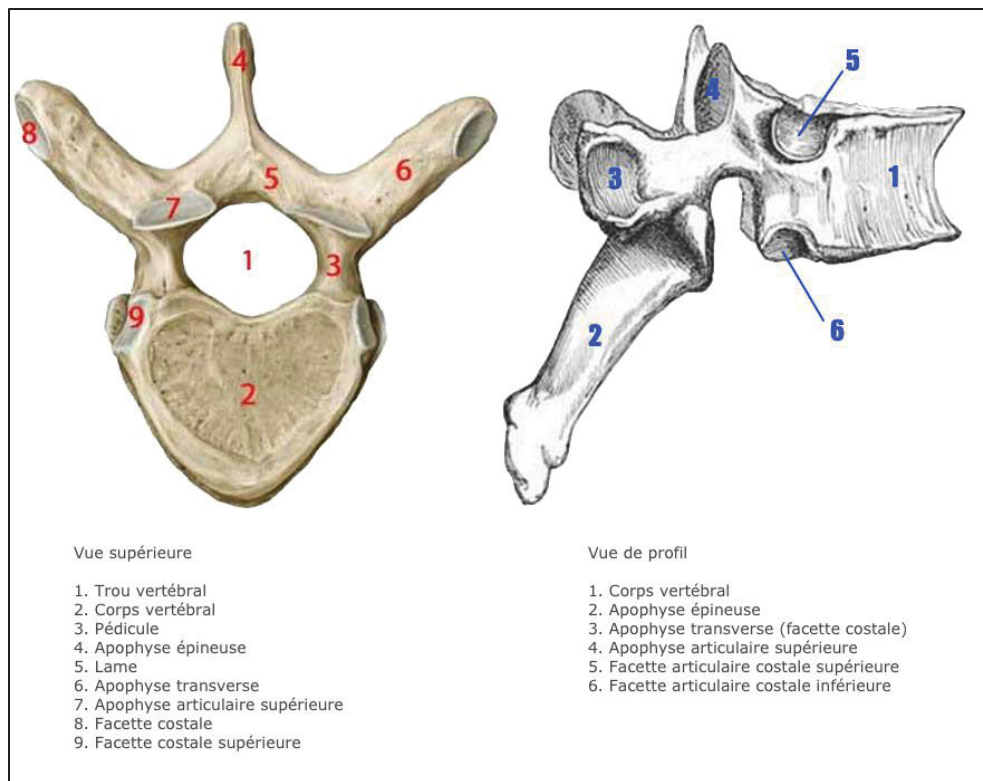


Figure 1.2. Structure anatomique d'un corps vertébral typique
Tirée de Research (2018)

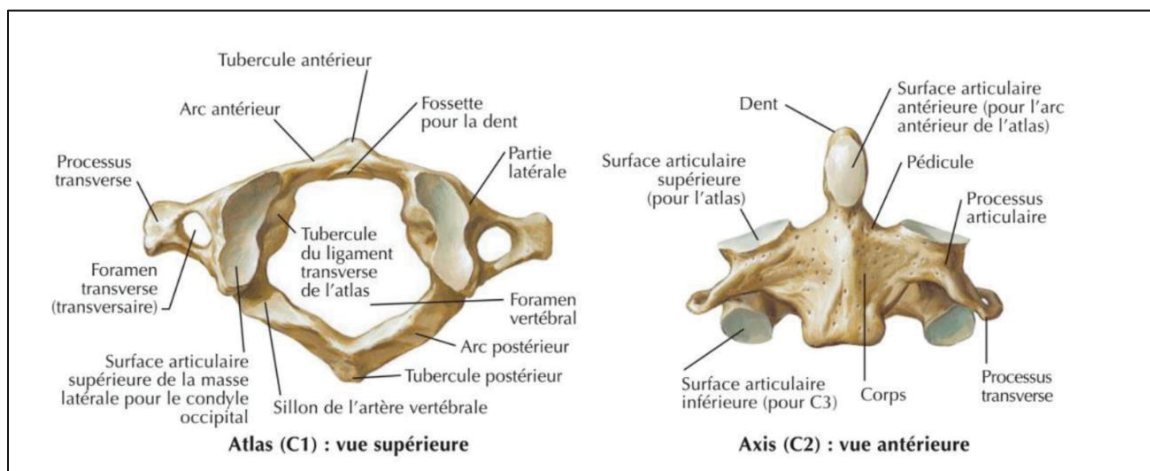


Figure 1.3. Structure anatomique de l'atlas et de l'axis
Tirée de Netter & CO (2019)

Par ailleurs, les vertèbres sont séparées entre elles par un disque intervertébral. Ce disque est composé d'un noyau gélatineux et d'un anneau fibreux. Il joue un rôle essentiel dans l'amortissement des chocs sur le rachis et il contribue à la mobilité du corps (Roberts, Evans, Trivedi, & Menage, 2006).

À part les structures osseuses, les structures vasculaires ont aussi leur importance au cours de la planification chirurgicale. Elles impliquent de nombreuses artères et veines qui transportent le sang vers les différentes structures de la colonne vertébrale, telles que les corps vertébrales et la moelle épinière (Emilie, Zeller, Fautrel, & Aubry, 2016).

Un réseau d'artères segmentaires provenant de l'aorte assure principalement la vascularisation de la colonne vertébrale à chaque niveau des vertèbres (Kaminsk & Lengelé, 2022). Au niveau des vertèbres cervicales, la vascularisation est spécifiquement assurée par les artères vertébrales qui sont des branches ascendantes de l'artère sous-clavière. Ces artères vertébrales traversent les processus transverses de C6 à C1 et se réunissent médialement pour former l'artère basilaire. Au niveau des vertèbres thoraciques, la vascularisation est assurée par les artères intercostales postérieures qui proviennent de l'aorte thoracique. La moelle épinière dans cette région est en grande partie vascularisée par l'artère spinale antérieure. Dans sa partie inférieure entre les niveaux de vertèbres T9 et T12, la moelle épinière reçoit également du sang de l'artère radiculo-médullaire, appelé aussi artère d'Adamkiewicz (Kaminsk & Lengelé, 2022). Au niveau des vertèbres lombaires, la vascularisation est assurée par les artères lombaires segmentaires, qui sont des branches de l'aorte abdominale. La moelle épinière reçoit son approvisionnement sanguin par les artères radiculaires antérieures. Enfin, l'artère sacrée assure l'apport sanguin au niveau de la région sacrée. La Figure 1.4 illustre la vascularisation du rachis dans les différentes régions.

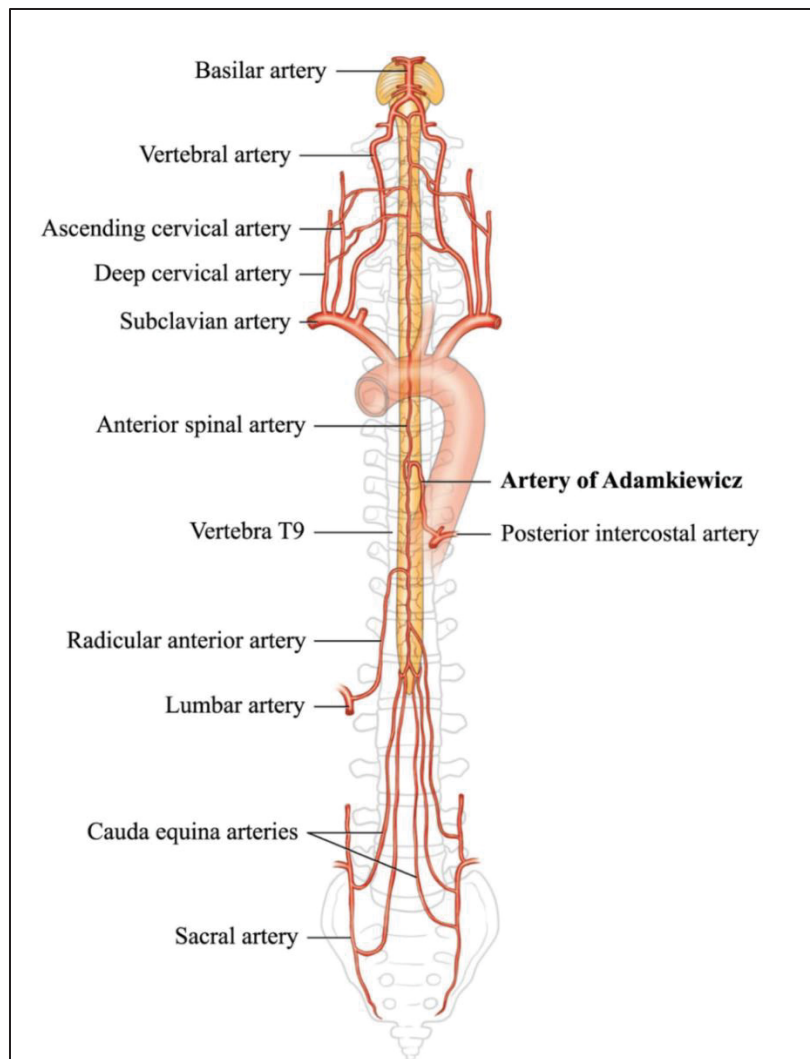


Figure 1.4. Vascularisation de la colonne vertébrale
Tirée de Amato & Stolf (2015)

Concernant l'innervation de la colonne vertébrale, elle est assurée par un réseau complexe de nerfs sensitifs, moteurs et autonomes. Ce réseau est constitué de 31 paires de nerfs rachidiens ou nerfs spinaux qui sortent de la moelle épinière en se divisant en racines dorsales (sensitives) et en racines ventrales (motrices) pour innover la périphérie. Tandis que les vertèbres sont innervées par les branches méningées des nerfs spinaux (DeSai & Agarwal, 2024).

Une bonne compréhension de l'anatomie du rachis est primordiale afin de repérer les structures anatomiques essentielles lors de la planification chirurgicale, comme les artères vertébrales, la

moelle épinière et les nerfs spinaux. Toutefois, des anomalies ou des affections peuvent survenir aux différents niveaux de la colonne vertébrale. Dans la section suivante, nous allons présenter les diverses pathologies qui peuvent affecter la colonne vertébrale.

1.1.2 Pathologie de la colonne vertébrale

Les pathologies du rachis sont nombreuses et peuvent être classées selon leur nature : les troubles dégénératifs, les anomalies congénitales, les infections, les inflammations, les lésions traumatiques et les affections d'origine tumorale. Les pathologies dégénératives telles que la hernie discale, la sténose spinale et la spondylarthrose figurent parmi les affections les plus fréquentes affectant le rachis. Les anomalies congénitales, notamment la scoliose, le spina bifida résultent des malformations pendant le développement embryonnaire. Les infections, comme la spondylodiscite sont causées par la colonisation bactérienne ou fongique des structures vertébrales, ce qui conduit à une destruction osseuse et à un risque de compression médullaire. Les maladies d'origine inflammatoires, comme la spondylarthrite ankylosante affectent les articulations et les ligaments pouvant entraîner une déformation du rachis. Enfin, les pathologies tumorales peuvent se présenter sous forme bénigne ou maligne, et peuvent affecter les vertèbres ou les tissus environnants, engendrant des défis diagnostiques et thérapeutiques complexes (SAURAMPS MEDICAL, 2008).

Parmi ces pathologies, notre étude se concentrera particulièrement sur les tumeurs de la colonne vertébrale, qui représentent un enjeu majeur dans leur prise en charge en raison de leur potentiel à affecter les structures anatomiques voisines. Nous allons explorer plus en détail les tumeurs de la colonne vertébrale dans la prochaine section.

1.1.3 Tumeurs de la colonne vertébrale

Les tumeurs de la colonne vertébrale constituent une variété de lésions pouvant affecter les structures anatomiques environnantes telles que les os vertébraux, les tissus mous paravertébraux, la moelle épinière ou les racines nerveuses.

Les tumeurs du rachis sont classées en tumeurs primitives bénignes ou malignes et en tumeurs secondaires ou métastatiques provenant d'autres sites. Cette classification est basée sur l'observation de la morphologie des tumeurs sous microscope, ainsi que sur des critères de biologie moléculaire et cytogénétique (Drappé et al., 2008). Les tumeurs primitives bénignes du rachis incluent l'angiome, l'ostéome ostéoïde, le kyste osseux anévrysmal, la tumeur à cellule géante, le granulome éosinophile et l'exostose. Les tumeurs primitives malignes incluent le chordome, le sarcome d'Ewing, l'ostéosarcome et le chondrosarcome peuvent entraîner des destructions osseuses (Drappé et al., 2008). Les métastases vertébrales proviennent fréquemment des cancers de la prostate, du sein, du poumon, du rein, et peuvent entraîner des fractures pathologiques du rachis, une instabilité vertébrale ainsi qu'une compression médullaire (Tokuhashi, Uei, & Oshima, 2017).

De plus, la tumeur peut se situer dans diverses régions du rachis. Lors de l'intervention chirurgicale, la localisation de la tumeur influence significativement les structures anatomiques à traverser (Kaloostian et al., 2014). Par exemple, une tumeur dans la région lombaire peut nécessiter une attention particulière à la préservation des racines nerveuses, tandis qu'une tumeur située dans la région cervicale peut envahir les artères vertébrales (Kaloostian et al., 2014). Une classification chirurgicale des tumeurs telle qu'illustrée dans la Figure 1.5 représente l'envahissement ou l'extension tumorale. Les tumeurs du rachis peuvent être intra-compartimentale, extra-compartimentale ou étagée sur plusieurs vertèbres (Tomita et al., 2001). Ainsi, la prise en charge des tumeurs du rachis requiert une planification chirurgicale méticuleuse visant à préserver les structures anatomiques essentielles tout en garantissant l'exérèse (enlèvement) totale de la tumeur (Tokuhashi et al., 2017).

De ce fait, nous voulons vérifier dans notre étude, parmi les modes de visualisation d'imagerie médicale disponible, si la RV permet de bien visualiser les structures anatomiques pendant la planification chirurgicale.

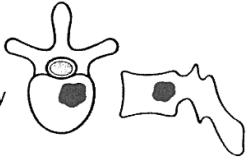
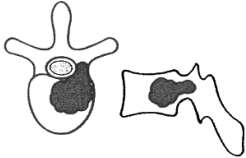
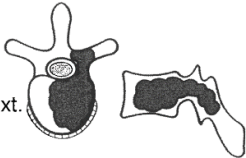
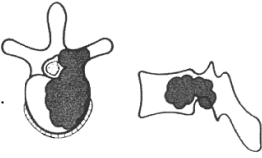
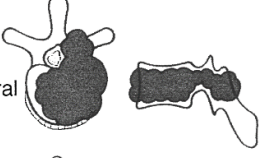
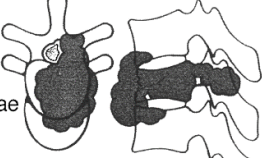
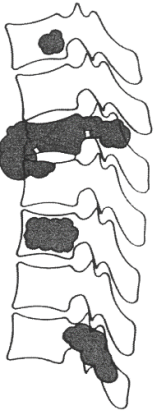
Intra-Compartmental	Extra-Compartmental	Multiple
<p>Type 1 vertebral body</p>  <p>Type 2 pedicle extension</p>  <p>Type 3 body-lamina ext.</p> 	<p>Type 4 epidural ext.</p>  <p>Type 5 paravertebral ext.</p>  <p>Type 6 2-3 vertebrae</p> 	<p>Type 7</p> 

Figure 1.5 Classification chirurgicale des tumeurs du rachis
Tirée de Tomita et al., (2001)

1.1.4 Traitement des tumeurs de la colonne vertébrale

La prise en charge des tumeurs de la colonne vertébrale repose sur une combinaison de traitement, incluant la radiothérapie, la chimiothérapie et la chirurgie. La radiothérapie est souvent associée à la chirurgie dans le traitement des tumeurs malignes, soit pour réduire la taille avant l'intervention chirurgicale, soit pour éliminer les cellules tumorales restantes après l'exérèse de la tumeur. Dans la plupart des cas, la chirurgie reste l'approche de choix pour traiter les tumeurs, surtout si elles sont compressives (Choi et al., 2010).

Pour mener à bien une chirurgie d'exérèse tumorale, une planification préopératoire est nécessaire (Sharma, 2023). Nous allons présenter en détail dans les sections suivantes, les différentes modalités de planification chirurgicale.

1.2 Planification des interventions chirurgicales

Afin de faire une planification chirurgicale, les chirurgiens utilisent les images médicales pour comprendre l'anatomie et la pathologie du patient. Il existe différentes méthodes pour étudier et visualiser les imageries préopératoires. Soit par une méthode conventionnelle où les images sont visionnées sur un ordinateur et sont dérivées des IRM, des TDM ou des angiographies ; soit par une méthode en utilisant des outils plus avancés comme la RV ; ou soit en produisant une impression en 3D de ces images. Les prochaines sections se pencheront en détail sur les différents outils utilisés dans la planification chirurgicale.

1.2.1 Les outils conventionnels de planification préopératoire

La planification chirurgicale est un processus cognitif au cours duquel le chirurgien anticipe et décrit mentalement les différentes étapes qu'il va réaliser pendant une intervention chirurgicale.

Une étape essentielle de la planification chirurgicale est la détermination de la voie d'approche chirurgicale qui représente le chemin permettant au chirurgien d'accéder à la zone cible ou la tumeur, tout en traversant ou en préservant certaines structures anatomiques. Le choix de cette voie d'approche chirurgicale est stratégique, car il influence le déroulement de l'intervention et permet d'anticiper les risques associés au cours de la chirurgie, tels qu'une atteinte des nerfs ou des vaisseaux sanguins critiques (Dubrana et al., 2014).

La détermination de la voie d'approche chirurgicale requiert une analyse au préalable des images médicales préopératoires du patient afin d'identifier les structures anatomiques à explorer, à traverser et à préserver durant l'opération (González-López et al., 2024). En plus, cette analyse permet d'acquérir une perception proprioceptive de la dynamique et de la complexité de l'opération à réaliser (Mussi et al., 2020), et permet d'explorer les solutions possibles au cours de l'intervention chirurgicale en effectuant des simulations (Essert & Joskowicz, 2020). L'analyse repose également sur les connaissances anatomiques approfondies des chirurgiens, sur leur capacité à interpréter les images médicales

en 2D (González-López et al., 2024) ainsi que sur leur compétence à exécuter les procédures opératoires appropriées (Mussi et al., 2020). En outre, les chirurgiens ont une grande aptitude à reconstituer les images bidimensionnelles en images 3D de manière mentale (Pipolo et al., 2023). Par conséquent, le temps consacré à cette planification est crucial, car il déterminera le niveau de confiance du chirurgien pendant l'opération (Mussi et al., 2020).

L'objectif de la planification chirurgicale est en premier lieu d'établir le bon diagnostic (Mussi et al., 2020). En second lieu, d'anticiper et d'éviter toute complication pendant et après l'opération. Les complications les plus fréquentes lors d'une chirurgie de la colonne vertébrale sont la déchirure durale accidentelle, le décollement ou rupture du bord de la plaie chirurgicale (communément appelé déhiscence de plaie), l'infection du site opératoire, la détérioration neurologique et la lésion de la racine nerveuse (Luksanapruksa et al., 2017). Une hémorragie massive peut également se produire en cas de sectionnement d'un vaisseau sanguin important pouvant entraîner le décès d'un patient (Mohme et al., 2021). En général, les lésions nerveuses peropératoires sont rares après une opération du rachis, avec une incidence comprise entre 0,03% et 0,1% (Welch et al., 2009). Cependant, ces lésions sont redoutables et peuvent conduire à une perte de fonction neurologique significative. Les complications peropératoires et postopératoires dépendent aussi de la région du rachis à opérer. La planification chirurgicale est ainsi importante pour avoir une compréhension préopératoire de la pathologie du patient, des relations spatiales entre les structures anatomiques notamment les structures vasculaires et les structures nerveuses (Kaloostian et al., 2014), afin de limiter au mieux les risques des complications.

Au cours de la planification chirurgicale conventionnelle, les modalités d'imageries telles que le TDM et l'IRM permettent de visualiser et d'analyser les structures anatomiques et les structures pathologiques du patient. Les TDM utilisent des rayons X pour produire des images détaillées du corps en plusieurs coupes (Sharma, 2023). Ils sont efficaces pour détecter les lésions responsables d'une compression de la moelle épinière et des racines nerveuses. De plus, ils permettent d'évaluer les lésions, les déformations osseuses au niveau du rachis et le rétrécissement du canal rachidien (Klein, 2015). En revanche, les IRM permettent une

évaluation plus détaillée de la colonne vertébrale en donnant une meilleure différenciation entre les os, les muscles, la graisse, les ligaments, la dure-mère, le liquide céphalo-rachidien (LCR), les racines nerveuses et les vaisseaux sanguins (Bitar et al., 2006). Le Tableau 1.1 suivant représente la perception des différentes structures anatomiques sur le TDM et l'IRM.

Tableau 1.1. Degré de perception des structures anatomiques selon IRM et TDM

Structures anatomiques	TDM	IRM
Os vertébraux	Très bonne perception	Perception limitée
Tissus mous et muscles	Perception limitée	Très bonne perception
Moëlle épinière et racines nerveuses	Perception limitée	Très bonne perception
Vaisseaux sanguins	Perception correcte (bonne perception avec un produit de contraste)	Perception bonne
Tumeurs	Perception bonne, différenciation des types de tumeurs limitée	Perception bonne, meilleure différenciation des types de tumeurs
Métastase osseuse	Très bonne perception	Perception limitée

La différenciation des structures anatomiques est mise en évidence grâce aux séquences utilisées lors de l'acquisition de l'IRM. Sur les images d'IRM avec une séquence pondérée en T1, les structures anatomiques d'origine graisseuse apparaissent plus claires ou en hypersignal, tandis que les structures d'origine liquidienne comme le LCR apparaissent plus sombres ou en hyposignal. La séquence T1 est alors utile pour évaluer les interfaces graisseuse – nerveuse et graisseuse – liquidienne (Bitar et al., 2006). L'injection du produit de contraste tel que le gadolinium permet d'augmenter l'intensité du signal en T1 et d'améliorer la visualisation des structures anatomiques anormales. Les tissus pathologiques tels qu'une inflammation, une

infection ou une tumeur sont ainsi bien différenciés par rapport aux autres tissus normaux (Gaillard, 2015). En revanche, les images d'IRM pondérées en T2 montrent les structures liquidiennes en hypersignal (claires), ce qui les rend idéales pour repérer les anomalies riches en liquide telles que les œdèmes et les inflammations (Bitar et al., 2006). En complément des séquences T1 et T2, d'autres séquences telles que FLAIR, DWI, GRE, STIR apportent des informations supplémentaires importantes pour une visualisation adéquate des structures anatomiques lors de la planification chirurgicale (Allam, Abd Elkhalek, Hassan, & Emara, 2022 ; Bitar et al., 2006 ; Tanitame, Tanitame, & Awai, 2017).

Traditionnellement, la planification chirurgicale repose sur l'identification des points de repère des structures anatomiques pertinentes à partir des données d'imageries, sur la mesure des distances et des angles entre ces points, sur l'évaluation des volumes anatomiques et sur l'esquisse des trajectoires possibles pour atteindre le site tumoral (Mussi et al., 2020). La précision des mesures de distance et d'angle revêt une importance capitale lors des interventions chirurgicales telles que la pose de vis pédiculaire en chirurgie rachidienne, auquel un angle d'insertion précis est essentiel pour éviter les lésions de la moelle épinière ou des racines nerveuses (Kosterhon et al., 2017 ; Weinstein, Rydevik, & Rauschnig, 1992). En chirurgie orthopédique, la planification chirurgicale était traditionnellement effectuée à partir de radiographies sur support papier où les chirurgiens copiaient l'image radiographique sur du papier calque pour pratiquer l'intervention prévue (Ateok, Galos, Jazrawi, & Egol, 2015). Plusieurs études ont démontré l'efficacité de l'utilisation des méthodes de planification chirurgicale conventionnelle. La littérature montre que les images TDM et IRM permet d'avoir une précision dans l'identification des structures anatomiques. Par exemple, dans la mise en place des vis pédiculaire, le TDM et l'IRM jouaient un rôle important dans l'évaluation des risques de lésions neurologiques (Bredow et al., 2016). L'utilisation des IRM fonctionnelle préopératoire permettait de préserver la fonction neurologique et d'assurer une excision maximale du tissu tumoral (Gunal, Savardekar, Devi, & Bharath, 2018).

Bien que les techniques de planification chirurgicale conventionnelle reposent sur l'utilisation des TDM et des IRM, la planification chirurgicale a progressé parallèlement avec la montée

en puissance des systèmes d'imagerie numérique. La RV se distingue parmi les technologies avancées, en proposant une nouvelle perspective pour la visualisation et l'interaction avec les structures anatomiques. La section suivante présentera une revue de littérature portant sur l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale.

1.2.2 Les outils de planification préopératoire en réalité virtuelle

L'utilisation de la RV au cours de la planification chirurgicale a récemment immergé dans le monde chirurgical.

L'un des avantages de la planification chirurgicale en RV est la capacité d'offrir une visualisation immersive et interactive des structures anatomiques en 3D grâce à l'utilisation de la vue stéréoscopique dynamique et de l'effet de parallaxe. Contrairement aux systèmes d'imagerie sur un écran d'ordinateur, la RV permet une perception naturelle de la profondeur en fournissant une perspective différente à chaque œil, simulant ainsi la vision humaine. En outre, la vue stéréoscopique dynamique contribue à améliorer la perception des relations spatiales entre les différentes structures anatomiques (Bogomolova et al., 2021). Par ailleurs, un changement de perspective de l'utilisateur de la RV en fonction de ses mouvements engendre l'effet de parallaxe, qui se traduit par un déplacement apparent des objets proches par rapports aux objets éloignés. Ainsi, les chirurgiens peuvent appréhender les structures anatomiques sous différents angles tant en préopératoire qu'en peropératoire (Guerriero et al., 2018 ; Liu et al., 2022). En d'autres termes, la RV permet de saisir et de manipuler le modèle 3D aisément et de façon immersive, comme si le chirurgien utilisait ses propres mains. De cette manière le chirurgien peut répéter la procédure chirurgicale à volonté (González-López et al., 2024). En intégrant la RV dans la planification chirurgicale, le chirurgien peut réitérer et perfectionner les gestes minutieux d'une intervention. Étant donné que les compétences des chirurgiens sont fondées en grande partie sur leur habileté manuelle (Vayssiere et al., 2022), l'utilisation de la RV contribue à renforcer leur précision lors des procédures chirurgicales.

La majorité des études ont fait une comparaison du plan opératoire entre la méthode de planification conventionnelle et la planification utilisant la RV. La limite de la première méthode était que les TDM et les IRM ne permettent pas d'avoir des détails précis sur l'atteinte tumorale des structures anatomiques voisines. Le plan de résection tumoral est alors difficile à déterminer par le chirurgien (Lyuksemburg et al., 2023). En revanche, avec l'utilisation de la RV, les plans chirurgicaux peuvent être modifiés et adaptés avec facilité. Les auteurs ont conclu que l'utilisation de la RV améliore l'exactitude du plan chirurgical. Cela inclut la précision sur la visualisation de la tumeur et les relations spatiales autour d'elle, ainsi que le choix de la voie d'approche chirurgicale (Bakhuis et al., 2023 ; Lyuksemburg et al., 2023). De plus, une planification avec la RV permet d'éliminer le besoin de faire une conversion visuospatiale mentale des imageries. D'autres auteurs ont fait des études pour générer automatiquement un modèle 3D dérivé des imageries conventionnelles. La visualisation en 3D de ces modèles a permis aux chirurgiens de faire une planification plus intuitive, en sélectionnant les trajets optimaux pour atteindre la tumeur (Tucker et al., 2022).

Cependant, l'intégration de la RV dans la planification chirurgicale de la colonne vertébrale rencontre certaines difficultés. L'une des principales raisons est le manque d'études portant sur l'utilisation de la RV dans le domaine de la planification. En effet, la majorité des études se concentrent sur l'apprentissage et la formation des chirurgiens (McCloskey et al., 2023). Par conséquent, il est important de mener davantage d'études pour valider la pratique de l'utilisation de la RV en neurochirurgie, notamment en ce qui concerne la planification chirurgicale (Durrani et al., 2022 ; Fiani et al., 2020).

Bien que la RV soit un outil de planification important dans notre étude, il est nécessaire d'explorer d'autres outils pour enrichir notre revue de littérature, notamment l'impression 3D qui sera présenté dans la section suivante.

1.2.3 Autre outil de la planification préopératoire : l'impression 3D

L'utilisation de modèles anatomiques physiques, obtenus à partir des impression 3D avait également sa place dans la planification chirurgicale. Ces répliques de la structure anatomique permettent au chirurgien de manipuler directement l'anatomie du patient et d'étudier facilement les structures anatomiques impliquées dans la chirurgie (Mussi et al., 2020). Par exemple, les travaux de Morris et al. (2023), ont utilisé des modèles imprimés en 3D de la colonne vertébrale pour planifier la chirurgie d'une tumeur. L'utilisation de ces modèles imprimés 3D a permis aux neurochirurgiens de visualiser avec précision les marges de résection tumorale, limitant ainsi les atteintes des structures anatomiques importantes (Morris et al., 2023). L'impression 3D a été aussi efficace dans la simulation de la pose des vis pédiculaire chez un patient atteint de scoliose sévère (Chen et al., 2019).

Cependant, l'impression 3D comporte plusieurs contraintes telles que les coûts élevés et les délais de production (Blohm et al., 2022). En outre, dans les situations nécessitant de multiples ajustements des plans chirurgicaux, la production de modèle imprimés 3D peut prendre plusieurs heures à plusieurs jours, en fonction de la complexité de l'anatomie et du cas clinique (Fletcher & Miskovic, 2021). De plus, l'intégration de l'impression 3D dans la pratique chirurgicale nécessite beaucoup de ressources techniques et de ressources humaines avec des compétences spécifiques (Schlegel et al., 2022). Ainsi, l'adoption de cette technologie couteuse reste souvent réservée aux grands centres hospitaliers.

Face à ces limites, la RV apparaît comme une alternative intéressante, permettant une visualisation immersive, et des ajustements en temps réels. Dans la section suivante, nous allons explorer la littérature concernant l'évaluation la RV dans son application en chirurgie.

1.3 Évaluation de l'utilisation de la réalité virtuelle en chirurgie

Faire une planification chirurgicale avec la méthode conventionnelle consiste à utiliser des images issues des IRM et/ou des TDM. À partir de ces images, les chirurgiens font une reconstruction mentale de l'anatomie afin d'identifier les structures anatomiques importantes

et les anomalies. Cependant, avec l'évolution de la technologie dans le domaine médical, la RV est devenue l'un des outils qui pourrait améliorer la visualisation en 3D des imageries médicales. Au cours de cette revue de littérature, nous avons recensé des études portant sur les évaluations de l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale.

L'étude de Ruparelia et al. (2023) a démontré que la RV améliore la compréhension et la description des structures anatomiques complexes en neurochirurgie, en particulier les structures vasculaires. Leur méthode d'évaluation reposait sur un questionnaire composé de 5 questions à choix multiples pour chaque patient, soit un total de 25 questions. Chaque question présentait trois options, dont une correcte et deux inappropriées. Les questions évaluaient les connaissances des participants sur le diagnostic, l'anatomie chirurgicale spécifique au cas clinique, ainsi que la stratégie chirurgicale la plus appropriée. Cependant leur approche se limitait à une évaluation avant/après immédiate entre les modes de visualisation, sans tenir compte de l'effet temporel sur la mémorisation des structures. De plus, les évaluations portaient seulement sur les connaissances anatomiques sans approfondir l'influence de la RV sur la prise de décisions lors de la planification chirurgicale.

D'autres auteurs ont adopté une méthodologie rétrospective pour évaluer l'impact de la RV sur la planification chirurgicale des fusions lombaires. Leur plan expérimental consistait à l'identification des structures anatomiques et à la détermination de la voie d'approche chirurgicale en comparant les imageries en 2D avec les reconstructions en RV. Pour chaque mode de visualisation, des questionnaires ont été utilisés afin de recueillir les préférences des participants concernant les techniques chirurgicales à privilégier et les stratégies qu'ils choisiraient. Toutefois, leur approche respectait un intervalle de trois à quatre semaines afin de minimiser les biais liés à l'apprentissage. Leurs travaux ont montré que la RV avait une influence positive sur la prise de décision sur les traitements chirurgicaux (Alsofy et al., 2021).

Deux autres études réalisées en 2021 et 2019 ont aussi démontré que l'utilisation de la RV a permis au neurochirurgien d'avoir une perspective libre et large de l'anatomie dans toutes les directions spatiale (Alsofy et al., 2021 ; Mikhail, Mithani, & Ibrahim, 2019). Ces études ont conclu que la RV influençait le choix de la voie d'approche chirurgicale pour améliorer les

procédures chirurgicales d'une ablation de tumeur. Cependant, ces approches se concentraient uniquement sur la visualisation des structures anatomiques et ne prenaient pas en compte l'impact cognitif de la RV dans la prise de décision face à la visualisation de ces structures.

En outre, certaines limites ont été soulevées. Hattab et al. (2021) ont fait une étude sur des modèles du foie et ont affirmé que l'utilisation de la RV reste incertaine dans des tâches chirurgicales complexes. Pour évaluer l'efficacité de la RV, Hattab et al. (2021) ont mis en place deux tâches : une tâche de compréhension de scène où les participants devaient naviguer dans les modèles 3D pour identifier les relations spatiales, et une tâche d'estimation de direction, où les participants devaient pointer vers un objet cible sur un modèle imprimé en 3D. Les performances des participants ont été mesurées en termes de précision de rappel et de confiance dans leur réponse. Les résultats de l'étude ont révélé que l'immersion en RV n'avait pas d'impact sur la mémorisation des structures vasculaires, bien que la RV améliore la compréhension spatiale des structures anatomiques (Hattab et al., 2021). Ces observations soulignent la nécessité d'évaluer davantage en profondeur l'impact cognitif de la RV dans des contextes chirurgicaux complexes, afin de mieux comprendre son potentiel et ses limites.

En dépit de ces études sur l'évaluation de l'utilisation de la RV, il existe peu d'étude sur l'utilisation de la RV en neurochirurgie, notamment pour l'ablation d'une tumeur de la colonne vertébrale. La plupart des études rapportées concernent l'utilisation de la RV dans la formation des chirurgiens (Vayssiere et al., 2022). Les études sur la colonne vertébrale utilisant la RV portent principalement sur la planification préopératoire pour la pose de vis pédiculaires (Bredow et al., 2016 ; Mikhail et al., 2019).

En somme, ces études montrent le potentiel de la RV en chirurgie, mais elles révèlent aussi des limites dans l'évaluation de l'utilisation de la RV. Notre travail vise à combler ces lacunes en proposant une évaluation plus objective de la RV. En contraste avec les études précédentes, notre approche intègre à la fois une évaluation qualitative et quantitative basé sur l'analyse du domaine de travail, tel que décrit dans l'étude mené par Morineau et al. (2013). Leurs travaux proposaient une approche pour examiner et évaluer les processus cognitifs impliqués dans

l'interaction entre les chirurgiens et les systèmes de visualisation. La section suivante présentera en détail des revues de littérature concernant cette approche.

1.4 Analyse du domaine de travail en neurochirurgie

Au cours d'une planification chirurgicale, la compréhension approfondie des informations issues de l'imagerie médicale est cruciale, notamment en neurochirurgie où la mise en évidence des structures anatomiques clés permet de réduire les risques opératoires et d'améliorer les résultats pour les patients. De plus, la planification chirurgicale implique un processus cognitif où les chirurgiens anticipent mentalement chaque étape de l'intervention. La RV peut alors générer un impact cognitif sur la réflexion et la prise de décision des chirurgiens face à la visualisation des images médicales. D'où l'intérêt d'utiliser une méthode comme l'analyse du domaine de travail (ADT) pour évaluer l'impact de la RV dans la planification chirurgicale.

L'ADT est une méthode rigoureuse de l'ingénierie cognitive pour la modélisation et l'analyse des environnements de travail complexe tels que la neurochirurgie. L'ADT s'avère une méthodologie indispensable dans un contexte où l'interaction entre l'humain et la technologie joue un rôle important (Rasmussen, 1987). Cette méthodologie consiste à décrire le système de travail en se concentrant sur ses propriétés fonctionnelles à travers une analyse détaillée des processus et des tâches au sein de l'environnement de travail (Aminoff, Meijer, Arnelo, & Groth, 2021). Ainsi, l'ADT permet de dégager des concepts spécifiques essentiels à la compréhension des éléments critiques d'un domaine de travail, tout en offrant un cadre d'évaluation pour une technologie impliquer dans ce domaine de travail. C'est dans cette perspective que nous avons choisi d'intégrer l'ADT dans notre méthodologie, afin d'évaluer l'impact de la RV dans la planification chirurgicale.

1.4.1 Cadre théorique et historique de l'Analyse du domaine de travail

L'ADT a été initialement élaborée par Rasmussen et ses collaborateurs, à la suite d'une enquête sur des incidents survenus dans une centrale nucléaire (Rasmussen, 1987). Leurs travaux visaient à étendre la compréhension des environnements de travail complexe afin de favoriser

l'amélioration des systèmes et des interfaces utilisateurs. Concrètement, Rasmussen a proposé une méthode pour comprendre les contraintes et les solutions possibles offertes par un environnement de travail donné. L'ADT se fait alors par une description complète du domaine de travail, en analysant ses ressources, ses contraintes ainsi que ses limites. L'ADT permet également d'identifier les actions possibles avant d'envisager les tâches qui pouvaient être entreprises dans le domaine de travail (Miller, 2004).

1.4.2 Méthodologie de l'analyse du domaine de travail

La conceptualisation de l'analyse du domaine de travail est basée sur une matrice à deux dimensions (Figure 1.6), intégrant le niveau d'abstraction hiérarchique (NAH) et le niveau partie-tout hiérarchique (NPH), tel que Rasmussen (1987) et Vicente (1999) ont défini.

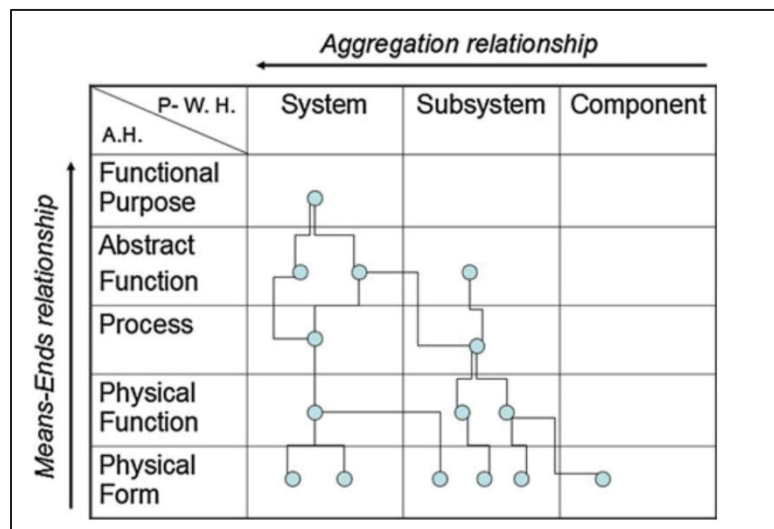


Figure 1.6. Matrice d'une analyse de domaine de travail
Tirée de T. Morineau et al., (2013)

Le concept NAH fait référence à la manière dont les différents niveaux d'abstraction sont interconnectés en ce qui concerne les informations détaillées (ou concrètes) et généralisées (ou abstraites) tout en décrivant le domaine de travail.

Par ailleurs, le concept NPH décrit le domaine de travail en tant qu'entité globale, comprenant le système, le sous-système et le composant (T. Morineau et al., 2013). Le Tableau 1.2 suivant montre des exemples des informations retrouvées dans les concepts NAH et NPH selon deux différents domaines de travail.

Tableau 1.2. Exemple des informations contenues dans les niveaux de NAH et NPH

	T. Morineau et al., 2013	Mattes-O'Brien & Menozzi, 2019
Domaine de travail	Neurochirurgie	Laparoscopie
NAH	<i>Du plus abstrait au plus concret :</i> <ul style="list-style-type: none"> - Enlever tumeur - Gestion des risques pour atteindre tumeur - Processus pour atteindre la tumeur - Chemin à emprunter pour atteindre la tumeur - Volume et forme de la tumeur 	<i>Du plus abstrait au plus concret :</i> <ul style="list-style-type: none"> - Préservation des structures anatomiques - Création de chemin pour entrer dans le corps - Processus de maintenance des organes vitaux - Contrôle des constantes vitales - Anatomie du patient
NPH	Structures identifiées – Structures traversées – Structures préservées – Tumeur cible	Corps entier – Organisme – Organes – Tissus

Bien que les deux exemples représentent des approches différentes, l'exemple de Mattes-O'Brien & Menozzi (2019) présente une structure plus physique (« Corps entier – Organisme – Organes – Tissus »), tandis que l'exemple de Morineau et al., (2013) est plus abstrait (« Structures identifiées – Structures traversées – Structures préservées – Tumeur cible »), mais tous deux décrivent la globalité du domaine de travail sans établir une hiérarchie stricte.

Pour plus de détail, les NAH sont au nombre de cinq (5) allant du niveau le plus bas, qui se concentre sur des descriptions concrètes et détaillées, jusqu'au niveau le plus élevé caractérisé par des descriptions abstraites et généralisées, Rasmussen (1987) les a définis de la manière suivante :

- La forme physique (FP) : représente le niveau le plus bas de l'ADT, mettant l'accent principalement sur les aspects concrets, tels que l'apparence physique, l'emplacement des objets. Ce niveau est essentiel pour comprendre les interactions avec le système du domaine de travail à étudier, car il aide à identifier les différentes parties nécessaires à son bon fonctionnement. Par exemple en neurochirurgie, selon Morineau et al. (2013), ce niveau décrit de manière concrète la forme, la densité, l'élasticité, la couleur ou la taille des tissus cérébraux.
- La fonction physique (FoP) : représente l'association des propriétés fonctionnelles des formes physiques en se concentrant sur les processus mécaniques, électriques ou chimiques d'un système. Son importance réside dans sa capacité à identifier les origines des dysfonctionnements, car des changements physiques au sein des composants peuvent entraîner des répercussions significatives sur leur fonctionnement. Selon Morineau et al. (2013), les fonctions physiques associées aux formes physiques décrites précédemment correspondent à des entités anatomiques ou à des emplacements dans la tête et dans le cerveau comme les fibres, les sillons et les gyri. Certaines fonctions peuvent être aussi représentées par des informations liées à l'imagerie médicale, telles que l'échelle de l'image, la perception de profondeur.
- Le processus (P) : est la fonction généralisée qui repose sur des modèles théoriques reconnus dans l'ingénierie en mettant l'accent sur les relations fonctionnelles communes à diverses configurations physiques. Les descriptions de ce processus ne sont plus alors liées aux aspects physiques, mais plutôt aux fonctions qu'ils remplissent dans un système. Ce niveau permet également de comprendre la coopération des différentes fonctions pour le bon fonctionnement d'un système dans son ensemble. Selon Morineau et al. (2013), les fonctions généralisées englobent des processus

physiologiques comme la pression de l'environnement ou la réactivité chimique, ainsi que les informations sur l'historique médical du patient. Ces fonctions incluent également les interactions entre le cerveau du patient et les objets externes de la salle d'opération.

- La fonction abstraite (AF) : représente la fonction globale d'un système en termes de lois et principes qui régit le processus précédemment cité. À ce niveau, la représentation dépend des connaissances de l'objectif du système dans son ensemble. Selon Morineau et al. (2013), les fonctions abstraites impliquent des connaissances biomédicales, telles que des lois physiologiques ou des règles médicales. Les éléments de stratégies et de compromis qui orientent l'activité du neurochirurgien sont également abordés au niveau de la fonction abstraite.
- Objectif fonctionnel (OF) d'un système est défini par l'impact fonctionnel qu'il est censé avoir sur son environnement. Selon Morineau et al. (2013), cet objectif est directement associé au contrôle des composants du domaine, tel que l'identification des entités pertinentes, du milieu traversable, du tissu à préserver ou de la cible à atteindre.

1.4.3 Application générale de l'analyse du domaine de travail

L'ADT a été appliquée dans divers domaines tels que l'industrie des centrales électriques, la marine militaire, le pilotage d'avion et la gestion du trafic aérien (T. Morineau et al., 2013).

Diverses études ont également rapporté l'utilisation de l'ADT dans le domaine médical, notamment dans le développement d'un système d'alarme de surveillance en anesthésie. Cette application de l'ADT est focalisée sur les paramètres cardiovasculaires et respiratoires afin d'identifier les informations à recueillir par les capteurs du système d'alarme dans la salle d'opération (Watson & Sanderson, 1998).

La mise en place d'un service de télémedecine pour des consultations chirurgicales à distance a aussi été explorée dans une étude utilisant l'ADT. L'analyse du domaine de travail a permis d'identifier de manière méthodique les contraintes fonctionnelles rencontrées dans la pratique

clinique lors de l'implémentation des différents sites de télémédecine. Les contraintes relevées par cette approche comprenaient les équipements médicaux, les processus administratifs impactant l'accès au personnel et aux ressources. Les auteurs ont conclu que l'ADT a été efficace pour représenter et analyser les contextes cliniques complexes face aux avancées technologiques (Aminoff et al., 2021).

L'étude réalisée par Mattes-O'Brien et al. (2019) a également utilisé l'ADT pour développer un système de simulation chirurgicale destinée à la formation et à l'entraînement des chirurgiens. Dans ce cadre, les auteurs ont appliqué une analyse hiérarchique des tâches et une analyse cognitive du travail dans le contexte de la chirurgie laparoscopique. Plusieurs étapes de la chirurgie ont été mises en évidence à partir de ces approches afin de développer des systèmes de formations efficaces.

1.4.4 Application de l'analyse du domaine de travail en neurochirurgie

Les travaux de Morineau et al. (2013) ont eu recours à l'ADT afin de mesurer la quantité d'information abstraite et concrète du domaine de travail, tel qu'affiché à travers les systèmes de visualisation en 2D et en 3D sur ordinateur. Leur objectif principal était de déterminer quel contenu informatif devait être présent dans les images médicales pour aider les cliniciens. Pour ce faire, ils ont utilisé comme approche la méthode de l'ingénierie cognitive pour définir ce contenu informatif, en se basant spécifiquement sur le domaine de travail en neurochirurgie. Une échelle d'évaluation des systèmes de visualisation issue de l'ADT a été ensuite élaborée par Morineau et al. (2013) afin d'évaluer les systèmes de visualisations d'images médicales.

Afin de caractériser les composantes du NPH de l'ADT, Morineau et al. (2013) s'appuyait en partie sur les résultats des travaux de Jannin et al. (2003), qui ont réalisé une étude sur 29 cas cliniques. Cette étude visait à modéliser la procédure chirurgicale dans le but d'améliorer la planification et les performances de la neurochirurgie guidée par l'image. La procédure chirurgicale a été décomposée en une séquence d'étapes définissant un script chirurgical (Jannin, Raimbault, Morandi, Riffaud, & Gibaud, 2003). Chaque étape a été assignée à une

entité d'image à la fois anatomique et fonctionnelle et qui ont été extraites des images préopératoires. Cette association étape – image leur a permis d'identifier la zone cible telle que la tumeur, les zones à éviter telles que les vaisseaux sanguins et les zones du cerveau à haut risque fonctionnel, les zones de références et l'approche chirurgicale. Les concepts développés dans cette association ont été ensuite appliqués par Morineau et al. (2013) dans l'élaboration de l'ADT, qui correspondent aux quatre composants du NPH représentés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3. Correspondances des composants du NPH

Jannin et al. (2003)	Morineau et al. (2013)
Zones de références	Structures identifiées
Approche chirurgicale	Structures traversées
Zones à éviter	Structures préservées
Zone cible	Tumeur cible

Pour définir la nature des informations contenues dans chaque niveau NAH de l'ADT, Morineau et al. (2013) ont également utilisé les résultats d'une étude préliminaire faite en 2009. L'objectif principal de cette étude était d'élaborer une stratégie de détection et de résolution de problème au cours de la planification chirurgicale (Thierry Morineau et al., 2009).

Les limites de leurs travaux résidaient dans l'utilisation de l'ADT pour développer une échelle d'évaluation comparant les modes de visualisation des images médicales en 2D et en 3D sur ordinateur. En outre, leur domaine de travail en neurochirurgie se limitait à l'anatomie du cerveau. Ces travaux menés par Morineau et al. (2013) ont constitué le fondement de notre analyse du domaine de travail en neurochirurgie dans le contexte d'une planification chirurgicale des tumeurs au niveau de la colonne vertébrale. Ils nous ont permis d'établir une échelle d'évaluation des modes de visualisation des images médicales, ce qui permet de comparer la visualisation en 3D sur ordinateur avec la visualisation en réalité virtuelle.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

2.1 Problématique

Pour effectuer une chirurgie d'exérèse tumorale, les neurochirurgiens ont besoin d'informations sur les structures anatomiques (Presti et al., 2015). Les différentes modalités de visualisation de ces informations comprennent l'utilisation des images en 2D provenant de l'IRM ou du TDM ainsi que des rendus volumétriques en 3D générés par ordinateur.

Cependant, les systèmes de visualisations des images (PACS) et les systèmes de planification actuels ne permettent pas d'avoir une visualisation satisfaisante et détaillée des structures anatomiques pour faire une planification chirurgicale précise. Par exemple, lors de la planification d'une chirurgie de la colonne vertébrale à l'aide des images 2D de TDM et IRM, il peut être difficile pour les chirurgiens de comprendre comment une tumeur très envahissante est positionnée par rapport aux nerfs et aux vaisseaux sanguins environnants. Pour y parvenir, les chirurgiens doivent souvent procéder à une reconstruction mentale des tranches d'images de TDM (Pipolo et al., 2023). De plus, bien que les images 3D sur écran d'ordinateur apportent plus de détails que les images 2D, elles présentent également des limites. Ces limites sont dues à la surface bidimensionnelle des écrans d'ordinateur qui affiche les images 3D. Par conséquent, les chirurgiens doivent parfois faire des efforts cognitifs supplémentaires pour interpréter correctement les relations spatiales entre les structures anatomiques (Soler, 2023).

Par ailleurs, d'autres difficultés se présentent au moment du choix de la voie d'approche chirurgicale. En effet, l'estimation de la meilleure voie d'approche chirurgicale est une tâche complexe pour plusieurs raisons, telles que : les variations anatomiques des patients et les pathologies spécifiques à traiter (Little & Wu, 2021), ainsi que la difficulté à percevoir les distances et les positions entre les structures voisines (Heinrich et al., 2021).

En somme, les modes de visualisation conventionnelles en 2D et 3D ne permettent pas une immersion complète dans les images médicales. Les neurochirurgiens doivent souvent se fier à leur expérience personnelle et à des méthodes manuelles, telles que le traçage sur les images de TDM et IRM, ou l'utilisation de modèle imprimé en 3D, pour déterminer le meilleur chemin d'accès à la tumeur. L'ensemble de ces éléments entraîne une contrainte dans la distinction des différentes structures, compromettant ainsi le choix d'une approche chirurgicale efficace et sécuritaire.

Dans ce contexte, il devient essentiel de recourir à d'autres moyens tels que la réalité virtuelle afin d'avoir une meilleure perception et une meilleure reconstruction visuo-spatiale des structures anatomiques et pathologiques. L'utilisation de la réalité virtuelle est une solution prometteuse pour améliorer la planification chirurgicale, en particulier en neurochirurgie. La réalité virtuelle pourrait potentiellement influencer le choix de la voie d'approche et la trajectoire chirurgicale dans l'espace physique, en offrant une visualisation plus détaillée et interactive des structures anatomiques.

2.2 Objectifs

L'objectif principal du projet est d'évaluer l'impact de l'utilisation de la RV pendant une planification chirurgicale par rapport à la méthode de planification conventionnelle. Notre approche se base sur le cadre méthodologique proposé par Morineau et al., (2013), qui évalue la perception et l'identification des informations anatomo-fonctionnelles en fonctions des modes de visualisation. Leur méthodologie a été adapté pour répondre aux spécificités de la chirurgie de la colonne vertébrale, afin de mesurer les effets de la RV dans ce contexte.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- D'évaluer si l'utilisation de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale permet une meilleure perception et identification d'un plus grand nombre d'informations dans le domaine de travail en neurochirurgie comparativement à la méthode conventionnelle.

- D'évaluer la précision et l'efficacité de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale en comparant la quantité de structures anatomiques identifiées et traversées dans les deux modes de visualisations.
- D'évaluer la performance de l'utilisation de la réalité virtuelle en comparant le temps requis pour effectuer une planification chirurgicale par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle.
- D'évaluer qualitativement les avantages et les inconvénients de la visualisation en réalité virtuelle par rapport à la visualisation conventionnelle lors de la planification chirurgicale en recueillant les rétroactions des neurochirurgiens.

2.3 Hypothèses

- 1- L'utilisation de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale permet une meilleure perception et identification des informations anatomiques et fonctionnelles par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle.
- 2- La réalité virtuelle a un impact sur l'identification des structures anatomiques essentielles lors de la planification chirurgicale.
- 3- La réalité virtuelle a un impact sur le choix de la voie d'approche chirurgicale en fonction des structures anatomiques à traverser pour atteindre la tumeur.
- 4- Le temps requis pour effectuer une planification chirurgicale est réduit avec la réalité virtuelle par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle.
- 5- La réalité virtuelle pourrait bénéficier davantage aux neurochirurgiens résidents qu'aux seniors expérimentés à la méthode conventionnelle.

- 6- De façon subjective, les neurochirurgiens ont une préférence pour l'utilisation de la réalité virtuelle dans la planification chirurgicale par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction à la méthodologie

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'utilisation de la RV par rapport à l'ordinateur au cours de la planification chirurgicale, en validant la perceptibilité des composantes de l'ADT dans ces deux modes de visualisation.

Pour répondre à cet objectif, nous avons adapté l'ADT en neurochirurgie, telle que développée dans les travaux de Morineau et al., (2013), pour l'appliquer à la colonne vertébrale. Les éléments de l'ADT ont été déterminés en se basant sur les comptes rendus des protocoles opératoires (CRPO) de divers cas cliniques. Par la suite, une échelle d'évaluation sous forme de questionnaires a été établie à partir de l'ADT, afin d'évaluer les modes de visualisations utilisés pendant une planification chirurgicale. Ce questionnaire a été utilisé dans une étude usager menée auprès des neurochirurgiens du centre hospitalier universitaire de Montréal (CHUM) afin de comparer objectivement le mode de visualisation conventionnelle et le mode de visualisation en RV lors d'une planification chirurgicale.

Les prochaines sections exposent en premier lieu le déroulement de l'étude usager et les protocoles expérimentaux utilisés pour comparer les modes de visualisation. Ensuite, les détails techniques nécessaires pour réaliser cette étude usager sont présentés. Ces détails incluent l'acquisition des dossiers médicaux, la préparation des données comprenant l'élaboration de l'ADT et la création des modèles anatomiques 3D utilisées dans l'étude usager, ainsi que la conception des interfaces pour l'étude usager. Enfin, les analyses et les traitements des données recueillies après l'étude usager sont présentés.

3.2 Étude usager

Afin d'évaluer l'impact de l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale, une étude usager a été réalisée auprès des experts cliniques du CHUM. L'objectif de cette étude usager était de vérifier les six hypothèses décrites dans le CHAPITRE 2, section 2.3.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude usager a été faite en deux phases distinctes, impliquant des neurochirurgiens seniors et des résidents en neurochirurgie. Dans chaque phase, les neurochirurgiens avaient comme tâches d'identifier les structures anatomiques essentielles à la planification chirurgicale et d'identifier la voie d'approche chirurgicale en fonction des structures anatomiques à traverser pour atteindre la tumeur. Ces tâches ont été réalisées sur deux modes de visualisation des images médicales. Dans la première phase, le mode de visualisation était sur un ordinateur avec des images en 2D à partir des TDM et IRM. Cette visualisation était accompagnée d'une représentation en 3D du rendu volumétrique et de la segmentation du modèle anatomique d'un cas clinique. Le neurochirurgien devait faire une planification mentale du déroulement de l'opération pour les cas cliniques présentés. Dans la deuxième phase, le mode de visualisation était en RV avec lequel le neurochirurgien devait faire la planification chirurgicale des mêmes cas cliniques. Après planification de chaque cas clinique, les neurochirurgiens devaient remplir un questionnaire post-cas afin de sélectionner, parmi une liste, les structures anatomiques identifiées et les structures anatomiques traversées en fonction de la voie d'approche choisie. Par la suite, à la fin de chaque phase, les neurochirurgiens devaient répondre à un autre questionnaire pour évaluer les informations anatomo-fonctionnelles qu'ils ont perçues à travers les deux modes de visualisation.

Après cette perspective globale de l'étude usager, les sections suivantes présentent de manière détaillée le protocole expérimental de chaque phase de l'étude, les participants et la sélection des cas cliniques.

3.2.1 Protocole expérimentale de l'étude usager

Au début une courte présentation du projet a été faite à chaque participant, afin de donner des instructions et expliquer le déroulement de l'étude. Après, chaque participant a été invité à lire et à signer le formulaire de consentement. Ensuite, un numéro d'identification a été attribué à chaque participant, qui était nécessaire pour l'identifier à chaque étape de l'étude.

Avant de commencer, les neurochirurgiens ont été invités à remplir un questionnaire pré-expérimental (QPE) afin de permettre à l'équipe de recherche de recueillir les informations générales suivantes :

- Leur âge
- Leur genre
- Leur nombre d'années d'expérience en neurochirurgie
- Leur spécialité en neurochirurgie (par exemple la colonne vertébrale, le cerveau, l'épilepsie...)
- Leur fréquence d'utilisation de la réalité virtuelle : n'a jamais utilisé, utilisation moins d'une fois par mois, une fois par mois, une fois par semaine, plusieurs fois par semaine ou tous les jours.

Par la suite, l'étude s'est déroulée en deux phases, chacune utilisant un mode de visualisation des images médicales : la phase de planification conventionnelle et la phase de planification en RV. Ces phases seront détaillées dans les sections suivantes.

3.2.1.1 Phase de planification conventionnelle

Cette première phase consiste à réaliser la planification chirurgicale en utilisant le mode de visualisation conventionnel des images médicales : sur un écran d'ordinateur avec des images 2D dérivées des TDM et des IRM, ainsi qu'avec des images 3D du rendu volumétrique et/ou de la segmentation des modèles anatomiques des cas cliniques (Figure 3.1).

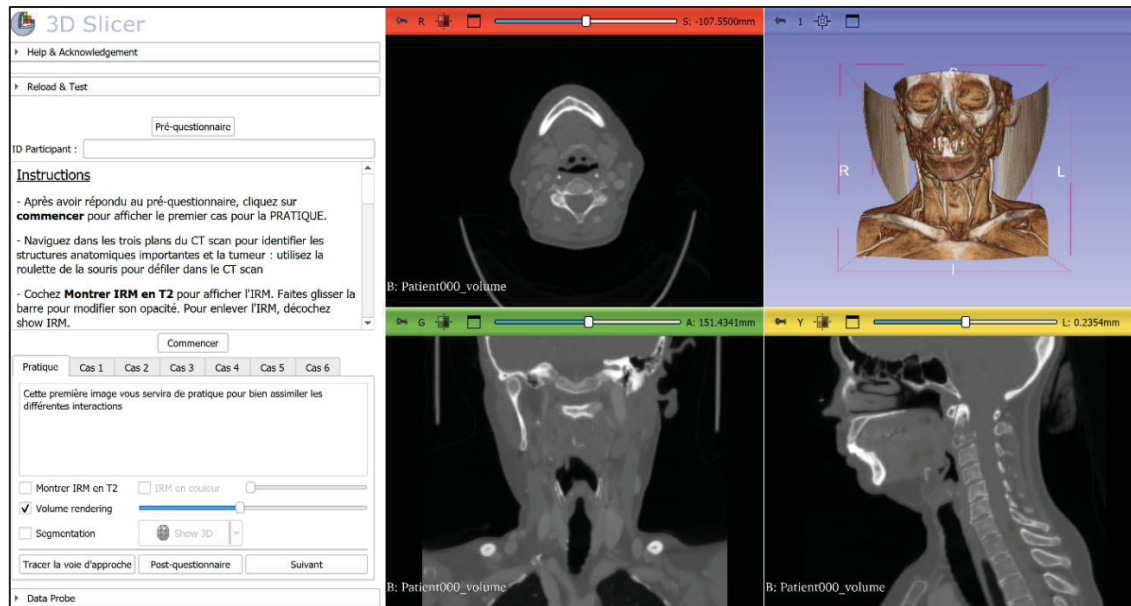


Figure 3.1. Plateforme pour la phase 1 de l'étude usager dans 3D Slicer; Montrant le TDM cervical d'un patient dans les trois plans axial, coronal et sagittal, affichant aussi le rendu volumétrique dans la case 3D en haut à droite

Lors de cette phase, les participants avaient comme tâche de faire une planification mentale de l'opération pour atteindre la tumeur cible. Une planification mentale consiste à explorer les images médicales en 2D et en 3D, à identifier les structures anatomiques essentielles en défilant les images dans les trois plans, à identifier la tumeur cible, et à mettre en place la meilleure voie d'approche chirurgicale pour atteindre la tumeur tout en tenant compte des structures traversées. Pour mettre en place cette voie d'approche chirurgicale dans la plateforme, le participant devait placer un premier point appelé « point cible » sur la tumeur qu'il avait identifié sur l'image. Ensuite, il devait placer un second point appelé « point d'entrée » au niveau de la surface de la peau où l'incision devrait être faite. Ce « point d'entrée » a été placé selon le jugement professionnel et l'expertise clinique du participant afin d'atteindre le « point cible ». Une fois les deux points positionnés, une ligne les reliant a été tracée de manière automatique. Cette ligne représentait la trajectoire de la voie d'approche permettant d'atteindre et de retirer la tumeur (Figure 3.2). Enfin, les participants avaient la possibilité d'ajuster la trajectoire de cette ligne en tenant compte des structures anatomiques qu'elle traversait.

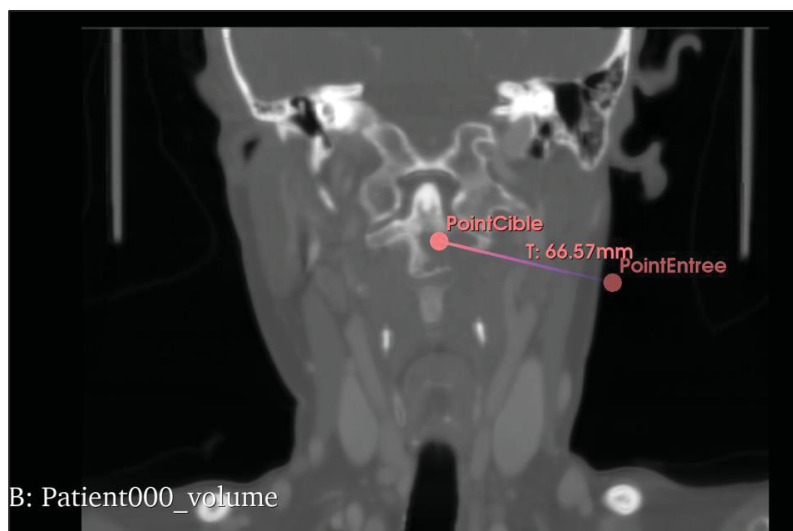


Figure 3.2. Trajet de la voie d'approche chirurgicale tracée lors de la planification chirurgicale conventionnelle; Le trajet de la voie d'approche chirurgicale est représenté par la ligne rouge du *PoinCible* au *PointEntree*, facilitant l'identification des structures anatomiques traversées

Au cours de l'expérimentation, chaque participant avait exploré six cas cliniques différents. Chaque cas lui a été présenté un par un successivement sur une plateforme dédiée (Figure 3.1). Dans cette plateforme, le participant accédait tout d'abord à un lien menant vers le PQE, puis aux instructions sur le déroulement de l'étude et à l'utilisation de la plateforme. Un cas pratique guidé par l'équipe de recherche devrait être fait au préalable avant que le participant puisse débiter la planification avec le premier cas clinique. D'un côté de l'écran, une description du cas clinique est affichée incluant l'historique du patient, tandis que de l'autre côté, le participant peut visualiser le TDM ou l'IRM correspondant à ce cas selon les trois plans axial, sagittal et coronal. Le participant peut par la suite naviguer sur ces trois plans, avec la roulette de la souris, pour identifier les structures anatomiques importantes et les éventuelles anomalies, afin de confirmer son diagnostic et procéder à la planification chirurgicale.

Pour une meilleure visualisation, le participant pouvait activer l'option « volume rendering » pour faire apparaître dans la vue 3D le rendu volumétrique du cas clinique. Le participant pouvait ajuster l'opacité du rendu volumétrique avec le glisseur. Il pouvait aussi afficher

la segmentation du volume pour maximiser la visualisation des différentes structures anatomiques (Figure 3.3-B).

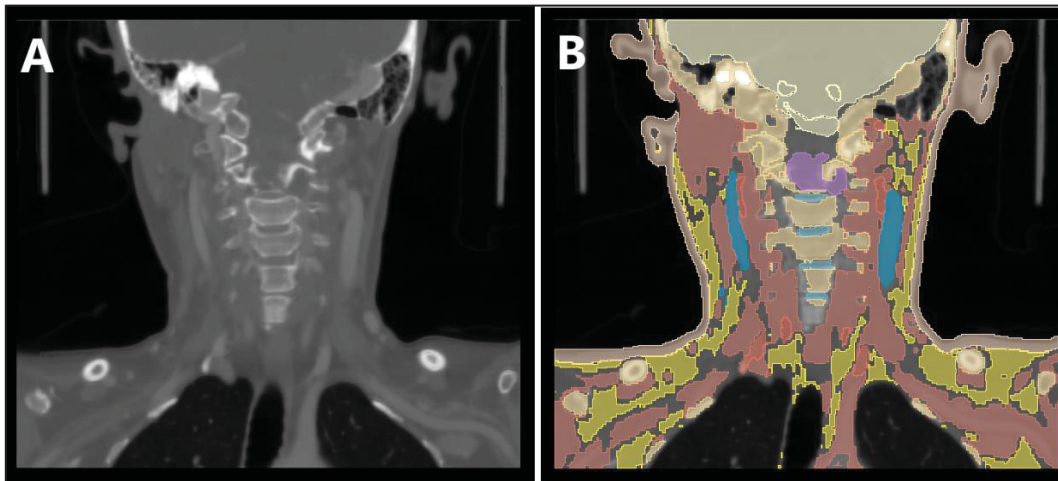


Figure 3.3. Plan frontal d'un TDM du cou; (A) Sans segmentation (B) Avec segmentation, avec la tumeur bien visible en mauve, les veines jugulaires en bleu, les os vertébraux en beige

Une fois que le participant avait bien identifié la tumeur, il mettait en place la voie d'approche chirurgicale et procédait à la modification de la ligne du trajet jusqu'à ce qu'il obtînt une voie d'approche optimale. Une voie d'approche est dite optimale si le trajet ne traverse pas des structures anatomiques importantes telles que les gros vaisseaux ou les nerfs.

Avant de passer au prochain cas clinique, le participant devait répondre au questionnaire post-cas (QPC) pour indiquer les structures anatomiques identifiées essentielles à la planification chirurgicale ainsi que les structures anatomiques traversées pour atteindre la tumeur.

À la fin de la première phase, le participant a été invité à répondre au questionnaire post-expérimental (QPoE) afin d'évaluer leur perception des informations anatomiques et fonctionnelles dans le domaine de travail en neurochirurgie. Le participant a également rempli un questionnaire de satisfaction pour recueillir leur rétroaction et pour évaluer le système de visualisation à l'aide d'un questionnaire de mesure de l'utilisabilité des systèmes interactifs ou SUS (System Usability Scale).

3.2.1.2 Phase de planification en réalité virtuelle

Afin de minimiser le biais de mémorisation, un intervalle de trois semaines a été mis en place entre la phase 1 et la phase 2. Ce délai était conçu afin de diminuer la probabilité que les participants se rappellent de leurs choix spécifiques ou des détails de la planification réalisée lors de la première phase. Notre but était d'assurer que les deux phases soient indépendantes et objectives sans être influencées par leurs expériences précédentes et de garantir ainsi l'intégrité et la validité des résultats.

La deuxième phase consistait à simuler la planification chirurgicale en utilisant le deuxième mode de visualisation des images médicales : en RV avec des images dérivées du TDM et de l'IRM que nous avons segmentées et modélisées en 3D (Figure 3.4).

Chaque participant devait visualiser les mêmes cas cliniques qu'à la première phase dans le même ordre, pour s'assurer que toutes les variations observées sont attribuables aux méthodes de planifications utilisées.

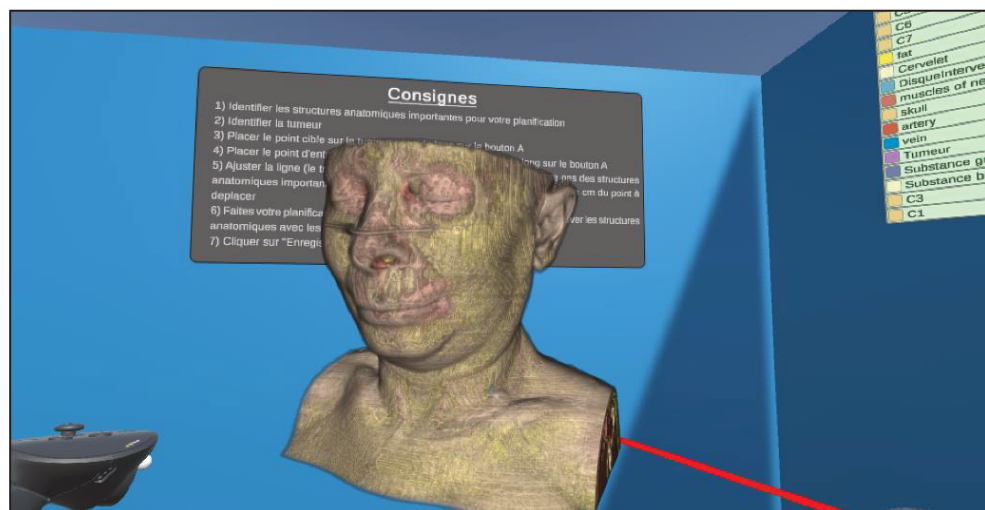


Figure 3.4. Vue des participants avec le mode de visualisation en VR; Au milieu le modèle anatomique 3D d'un cas clinique ; en arrière sont affichés les consignes pendant l'étude usager ; à droite s'affiche une liste des segments ou des structures anatomiques du modèle anatomique

Pour se familiariser avec l'environnement de la RV, les participants ont reçu une initiation à la manipulation des manettes et l'utilisation des outils spécialement conçus pour cette planification. Après cette initiation, les neurochirurgiens ont réalisé un cas pratique guidé par l'équipe de recherche avant de procéder à la planification des six cas cliniques en RV.

Par la suite, les neurochirurgiens devaient réaliser la planification chirurgicale en RV pour atteindre la tumeur cible. Ils avaient pour tâche d'explorer les images médicales modélisées en 3D dans l'environnement virtuel, d'identifier les structures anatomiques essentielles et de déterminer la meilleure voie d'approche chirurgicale tout en tenant compte des structures traversées. Pour avoir une meilleure perspective immersive des structures anatomiques, les neurochirurgiens avaient la possibilité de découper les segments avec un outil en forme de sphère invisible. Cette découpe permettait de visualiser les structures anatomiques en profondeur sans perdre de vue le contexte des structures anatomiques environnantes, comme le montre la Figure 3.5. Cette fonctionnalité de découpe offrait une vue des différentes couches de segments anatomiques, aidant ainsi à planifier de manière optimale la voie d'approche chirurgicale après identification de la tumeur.

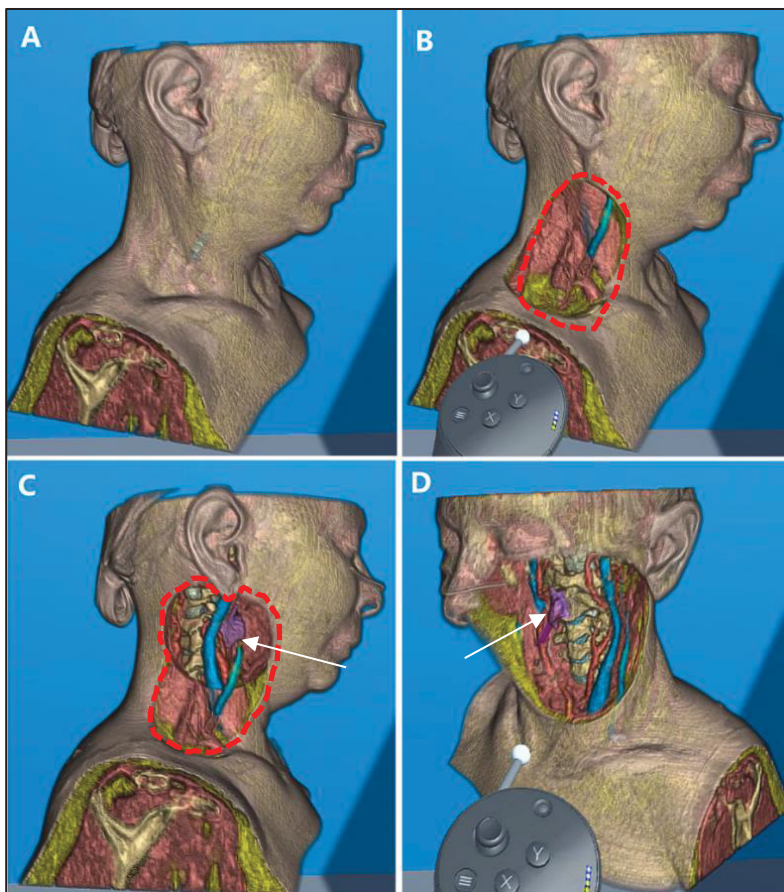


Figure 3.5. Identification des structures anatomiques par découpage des segments en RV; (A) Modèle anatomique à l'état initial sans découpe; (B) Découpe de la peau (avec une sphère invisible manipulée avec la manette) révélant les muscles en marron et la veine jugulaire en bleu; (C) Découpe des muscles permettant d'identifier la tumeur en mauve (flèche blanche) et les structures anatomiques environnantes telles que les vaisseaux sanguins et les os vertébraux; (D) Autre perspective montrant la tumeur et les structures anatomiques

Contrairement à la première phase, le processus de planification chirurgicale était plus interactif. Une fois la tumeur identifiée, le participant utilisait la manette de RV pour placer un « point cible » sur la tumeur. En déplaçant la manette, un ensemble de points se déplaçait pour former une ligne droite représentant la trajectoire de la voie d'approche. La ligne formée permettait de visualiser en temps réel les structures anatomiques traversées jusqu'à atteindre la surface de la peau (point d'entrée). Le participant pouvait alors ajuster la trajectoire de la ligne à tout moment si une structure anatomique critique est traversée par la ligne

(comme montré sur la Figure 3.6), assurant ainsi une planification précise de la voie d'approche chirurgicale.

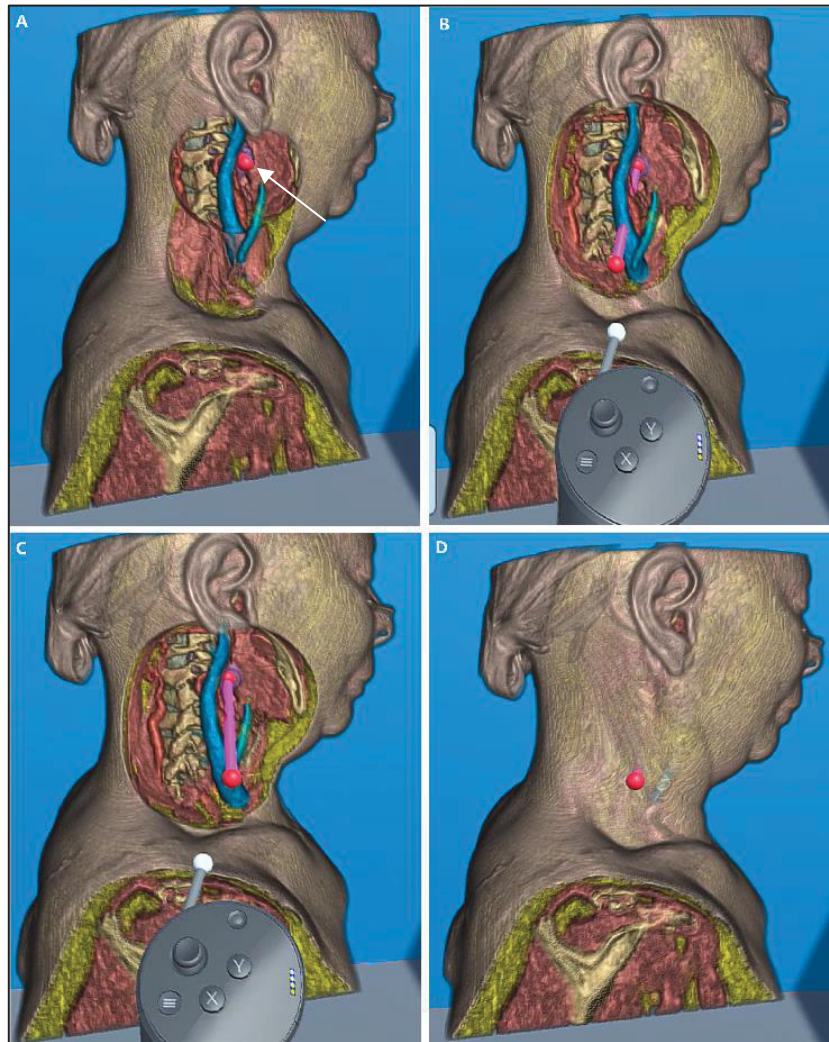


Figure 3.6. Visualisation des structures anatomiques traversées et mise en place de la voie d'approche chirurgicale; (A) Mise en place du « point cible » de couleur rouge (pointé par la flèche blanche) au niveau de la tumeur; (B) La ligne en rose traverse une structure anatomique critique : la veine jugulaire en bleu; (C) Ajustement de la ligne du trajet de la voie d'approche chirurgicale; (D) Le « point d'entrée » à la surface de la peau

Comme dans la première phase, les neurochirurgiens répondaient aux QPC après chaque cas clinique pour recueillir les structures anatomiques identifiées essentielles à la planification chirurgicale ainsi que les structures anatomiques traversées pour atteindre la tumeur. Et à la fin

de la deuxième phase, le QPoE a été rempli afin d'évaluer la perception des informations anatomiques et fonctionnelles des neurochirurgiens avec le mode de visualisation en RV. Le questionnaire SUS pour le mode de visualisation en RV a été également rempli.

Après avoir exposé les détails du protocole expérimental, nous allons décrire dans les sections suivantes les détails sur le recrutement des participants et sur la sélection des cas cliniques utilisés dans l'étude usager.

3.2.2 Les participants

Les participants ont été recrutés au centre hospitalier universitaire de Montréal (CHUM). Afin de recruter ces experts cliniques, le protocole de l'étude d'usager a fait l'objet d'une évaluation par le comité d'éthique de la recherche (CÉR) du CHUM et de l'école de technologie supérieure (ÉTS).

Comme critère d'inclusion, les participants devaient être des chirurgiens spécialisés en neurochirurgie : soit des neurochirurgiens séniors, soit des résidents en neurochirurgie. Ils devaient aussi être familiers avec l'utilisation des imageries médicales dans leur pratique. Les chirurgiens dans les autres spécialités ont été exclus de l'étude.

3.2.3 Les cas cliniques

Pour cette étude usager, six cas cliniques de tumeurs de la colonne vertébrale ont été sélectionnés afin d'évaluer l'impact de la RV sur la planification chirurgicale par rapport à l'utilisation du mode de visualisation sur ordinateur. Ces cas cliniques représentaient plusieurs types de tumeurs de la colonne vertébrale localisée sur différentes régions du rachis, incluant trois tumeurs au niveau du rachis dorsal, deux au niveau du rachis cervical et un intra-médullaire. L'utilisation d'une variété de tumeurs de la colonne vertébrale dans notre étude visait à mettre en évidence que l'impact de la RV sur la visualisation des structures anatomiques lors de la planification chirurgicale est indépendant du type de la tumeur et de la complexité des cas cliniques.

Les cas cliniques ont été extraites à partir des dossiers médicaux des patients opérés pour une tumeur au niveau de la colonne vertébrale. Un dossier médical comprend une observation médicale, le compte rendu du protocole opératoire (CRPO) et les imageries médicales de TDM, d'IRM et d'angiographies.

Avant d'acquérir les dossiers médicaux, le protocole de l'étude a été évalué par la Commission d'accès à l'information (CAI). Puis, une approbation d'utilisation des dossiers médicaux sans consentement du patient à des fins des études de recherche a été émise par le comité de transfert et accès des données du CHUM.

Les dossiers médicaux utilisés dans cette étude ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Les patients du service de neurochirurgie du CHUM entre janvier 2019 et septembre 2023
- Les patients ayant été opérés d'une tumeur au niveau de la colonne vertébrale
- La tumeur de la colonne vertébrale envahissait les structures anatomiques voisines de manière latérale, postérieure ou antérieure
- La position de la tumeur avait un accès difficile
- La tumeur comprimait ou pas la moelle épinière
- Les imageries médicales répondant aux critères de haute résolution spatiale :
 - TDM avec une épaisseur de coupe inférieure à 2 mm pour avoir une bonne reconstruction en 3D (González-López et al., 2024)
 - IRM en séquence T1 et T2 avec injection de produit de contraste et une épaisseur de coupe inférieure à 3 mm

Au total, 136 dossiers médicaux sur 5845 étaient des cas de tumeurs de la colonne vertébrale. Après application des critères de sélections, 11 dossiers ont été retenus, parmi lesquels 6 cas cliniques distincts ont été choisis pour l'étude.

Après avoir exposé les détails du protocole expérimental, les participants et les cas cliniques utilisés dans l'étude usager, nous allons décrire dans les sections suivantes les éléments techniques qui ont permis la mise en œuvre de cette expérimentation, notamment la préparation

des données et l'établissement des questionnaires ainsi que la conception des interfaces utilisateur pour l'expérimentation.

3.3 Préparation des données pour l'étude usager

Après avoir acquis les six dossiers médicaux. Une analyse du domaine du travail a été réalisée afin d'établir une échelle d'évaluation des modes de visualisation pour l'étude usager. Ensuite, nous avons conçu des questionnaires permettant d'évaluer les modes de visualisation. Enfin, nous avons élaboré les modèles anatomiques 3D qui ont été utilisés pour générer la visualisation lors de l'expérience.

3.3.1 Analyse du domaine de travail

Les informations issues des dossiers médicaux (observations médicales et CRPO) ont été analysées selon la méthode d'analyse du domaine de travail (ADT). Cette analyse nous a permis de mettre en évidence des données pertinentes à intégrer dans les divers concepts de l'ADT tels que les structures anatomiques à identifier, les structures à traverser, les structures à préserver et la tumeur cible. Ces données ont été également classées en fonction de leur niveau d'abstraction dans l'ADT comme l'objectif fonctionnel, la fonction abstraite, le processus, la fonction physique et la forme physique. La méthodologie pour élaborer un ADT a été précédemment abordée dans la section 1.4 du CHAPITRE 1.

Afin d'élaborer l'ADT approprié au contexte de notre étude (Tableau 3.1), nous avons appliqué ces méthodologies après avoir examiné en détail les bases théoriques de la conception de l'ADT selon Rasmussen (1987) et Morineau et al., (2013).

Tableau 3.1. Analyse du domaine de travail pour la planification neurochirurgicale

	Structure identifiée	Structure traversée	Structure préservée / contournée	Cible à extraire
Objectifs fonctionnels	Identification des structures anatomiques essentielles à la planification	Identification des structures anatomiques traversées	Préservation des structures anatomiques importantes et vitales	Exérèse de la tumeur
Fonctions abstraites	<ul style="list-style-type: none"> - Connaissance de l'anatomie de la colonne vertébrale - Précision, certitude, exhaustivité de l'information - instruments, médicaments utilisés 	<ul style="list-style-type: none"> - Trajectoires possibles - Compromis « exploration/risque » - Compromis « trajet /risque » 	<ul style="list-style-type: none"> - Stratégie pour éviter les structures anatomiques critiques - Risques vitaux encourus - Risques fonctionnels encourus 	<ul style="list-style-type: none"> - Stratégies d'exérèse - Compromis « exérèse complète / risque »
Processus	<ul style="list-style-type: none"> - Impact de la structure pathologique sur la colonne vertébrale - Évolution de la structure pathologique - Position de la colonne vertébrale / chirurgien, instruments - Anamnèse et sémilogie du patient - Condition de l'acquisition des images 	<ul style="list-style-type: none"> - Distance entre structure pathologique et incision - Modification de la trajectoire 	Condition technique de préservation des structures anatomiques critiques (écarteur, coton chirurgical...)	<ul style="list-style-type: none"> - Circonstance possible d'exérèse - Circonstances possibles d'extraction, remplacement, reconstruction du corps vertébral sont réalisables - Circonstance possible de stimulation médullaire
Fonctions physiques	<ul style="list-style-type: none"> - Noms des structures anatomiques - Limites entre les structures anatomiques - structures anatomiques cachées - structures nerveuses, vasculaires, osseuses, graisseuses, tissulaires, musculaires, ligamentaires - Artères vertébrales, moelle épinière... 	<ul style="list-style-type: none"> - Obstacles - Détermination du point de départ : emplacement initial de l'incision et voie d'approche chirurgicale - Détermination du point d'arrivée au niveau de la lésion 	<ul style="list-style-type: none"> - Préservation des vaisseaux, des nerfs - Stabilité de la colonne vertébrale - Préservation de la fonction motrice, fonction sensitive 	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de tumeur à extraire - Volume d'exérèse - Marge d'exérèse
Forme physique	Formes, densité, volume, adhérence, couleur, consistance, taille des structures anatomiques identifiées			

Dans un premier temps, nous avons fait référence aux travaux réalisés par Morineau et al. en 2013 afin de conceptualiser l'ADT pour la planification chirurgicale. En même temps, nous avons cherché à maintenir l'intégrité de la structure générale du niveau d'abstraction hiérarchique (NAH) de leur ADT tout en ajustant certains termes pour les adapter à l'anatomie de la colonne vertébrale. Les principaux termes que nous avons conservés étaient situés au niveau du NAH « fonction abstraite » et « processus » pour les concepts de structures traversées, structures préservées et tumeur cible. Cependant, notre adaptation s'est concentrée sur le niveau d'abstraction « fonction physique ». Par exemple, Morineau et al. (2013) ont mentionné : « ...structures du crâne, méninge, gyri, cerveau... », mais dans notre étude, nous avons adapté ces termes pour ce même niveau en les définissant comme « ...artères vertébrales, moelle épinière... ».

Dans un second temps, nous avons analysé le CRPO des dossiers médicaux sélectionnés pour notre étude. L'analyse du CRPO nous a permis d'extraire des informations détaillées à intégrer dans l'ADT. Nous avons relevé et transcrit chaque terme décrit dans le CRPO afin de faire la correspondance avec le niveau partie – tout hiérarchique ou NPH (composé par les structures anatomiques identifiées, traversées et préservées et la tumeur cible) de l'ADT. Par exemple, nous avons relevé des informations telles que : « ... identification de l'artère vertébrale qui longeait la capsule de la tumeur de façon superficielle ... ». Le terme « identification de l'artère vertébrale » correspond au composant « structures identifiées » du NPH. Par ailleurs, les gestes chirurgicaux et les compromis effectués par les neurochirurgiens ont été aussi transcrits dans ce CRPO. Par exemple, on a trouvé des passages comme « ... on a fait une dissection ... en passant médialement à la carotide et la veine jugulaire... position initiale trop médiale... alors on a fait une dissection plus latérale... ». Le terme « passant médialement à la carotide » fait référence au composant « structures traversées » du NPH, et le fait qu'ils ont modifié le trajet de la dissection de médial à latéral pour préserver la carotide et la veine jugulaire font référence au composant « structures préservées » du NPH au niveau « fonction abstraite » du NAH.

L'établissement de l'analogie entre les termes issus du CRPO et les composants du NPH a été rendu possible en s'appuyant sur l'expertise clinique de l'auteur de ce mémoire, acquise en tant

que praticienne généraliste. De plus, notre ADT a été validé par un neurochirurgien référent qui n'a pas participé à l'étude usager.

Cette ADT, adaptée à la planification de la colonne vertébrale, basée sur le modèle de Morineau et al., (2013), a permis d'élaborer une échelle d'évaluation prenant la forme d'un questionnaire structuré en plusieurs niveaux hiérarchiques. Cette échelle a permis de comparer objectivement la qualité de la perception des informations anatomo-fonctionnelles dans les deux modes de visualisation.

En effet, deux questionnaires distincts ont été conçus pour cette étude. Le premier était un questionnaire posé à la fin de chaque phase : le QPoE, qui était basé sur l'ADT et qui évaluait la perception des neurochirurgiens sur les informations anatomo-fonctionnelles à différents niveaux de l'ADT. Le second était un questionnaire posé entre chaque cas clinique : le QPC, qui n'était pas lié à l'ADT. Le QPC avait pour but de mesurer après chaque planification de cas clinique la quantité et la nature des structures anatomiques identifiées essentielles à la planification, ainsi que la quantité des structures anatomiques traversées définissant la voie d'approche chirurgicale. Les sections suivantes présentent la conception de ces deux questionnaires.

3.3.2 Conception du questionnaire post-expérimentation

A partir de l'ADT construit précédemment, une échelle d'évaluation sous forme de questionnaire a été élaborée pour mesurer de manière objective la quantité d'informations observées. Ce questionnaire, appelé questionnaire post-expérimentation (QPoE), a été utilisé à la fin de chaque phase de l'étude usager.

L'élaboration des questions du QPoE a suivi une démarche systématique. En premier lieu, les quatre concepts NPH (structures identifiées, structures traversées, structures préservées et tumeur cible) ont été subdivisés en cinq niveaux NAH (objectif fonctionnel, fonction abstraite, processus, fonction physique et forme physique). Cette approche hiérarchique a permis de

structurer les questions de manière à couvrir l'ensemble des informations anatomo-fonctionnelles pour chaque mode de visualisation.

En second lieu, pour chaque combinaison NPH/NAH, des questions ont été formulées afin d'évaluer la capacité des participants à percevoir les structures anatomiques à différents niveaux de détail, selon le degré d'abstraction. Le nombre de questions dans chaque section variait en fonction des informations anatomo-fonctionnelles à chaque niveau de l'ADT. Les informations spécifiques pour chaque niveau NPH/NAH ont alors dicté le nombre de questions nécessaires pour évaluer correctement la perception des informations anatomo-fonctionnelles. Le Tableau 3.2 suivant présente un exemple des informations anatomo-fonctionnelles de l'ADT et les questions correspondantes.

Tableau 3.2. Correspondance des questions avec les informations dans l'ADT

Informations dans ADT (NPH : Structures traversées / NAH : Fonction abstraite)	Questions : Le mode de visualisation d'image proposé vous a montré ... <i>(Options de réponses : Directement, indirectement, non, ne sais pas)</i>
Trajectoires possibles	Les trajectoires possibles pour atteindre la tumeur
Compromis « exploration/risque »	Le compromis entre l'exploration de l'environnement pour identifier et mettre en place les points de repères d'une part, et la prise de risque associée à cette exploration d'autre part
Compromis « trajet /risque »	Le compromis entre la ligne de trajet et les risques associées avec les structures anatomiques traversées par cette ligne

Enfin, les options de réponses proposées (« directement », « indirectement », « non » ou « ne sais pas ») pour répondre aux questions ont été choisies pour capter les nuances de perception des informations par les participants. Ces options de réponses permettent d'évaluer si les

chirurgiens perçoivent les informations de manière directe, indirecte ou pas du tout selon les modes visualisations.

Nous avons illustré dans la Figure 3.7 la structuration générale du questionnaire QPoE pour résumer l'ensemble de ces éléments. Ce QPoE permettait d'évaluer, de manière globale, la quantité d'informations anatomo-fonctionnelle perçues par les neurochirurgiens selon les différents concepts NPH et selon les différents niveaux NAH (voir ANNEXE II).

Cependant, nous avons également exploré de manière approfondie deux des quatre concepts NPH de l'ADT, à savoir les « structures identifiées » et les « structures traversées », sur l'ensemble des cas cliniques de l'étude usager. Afin d'évaluer ces deux concepts, nous avons conçu un questionnaire post-cas. La section suivante présente en détail la conception de ce questionnaire.

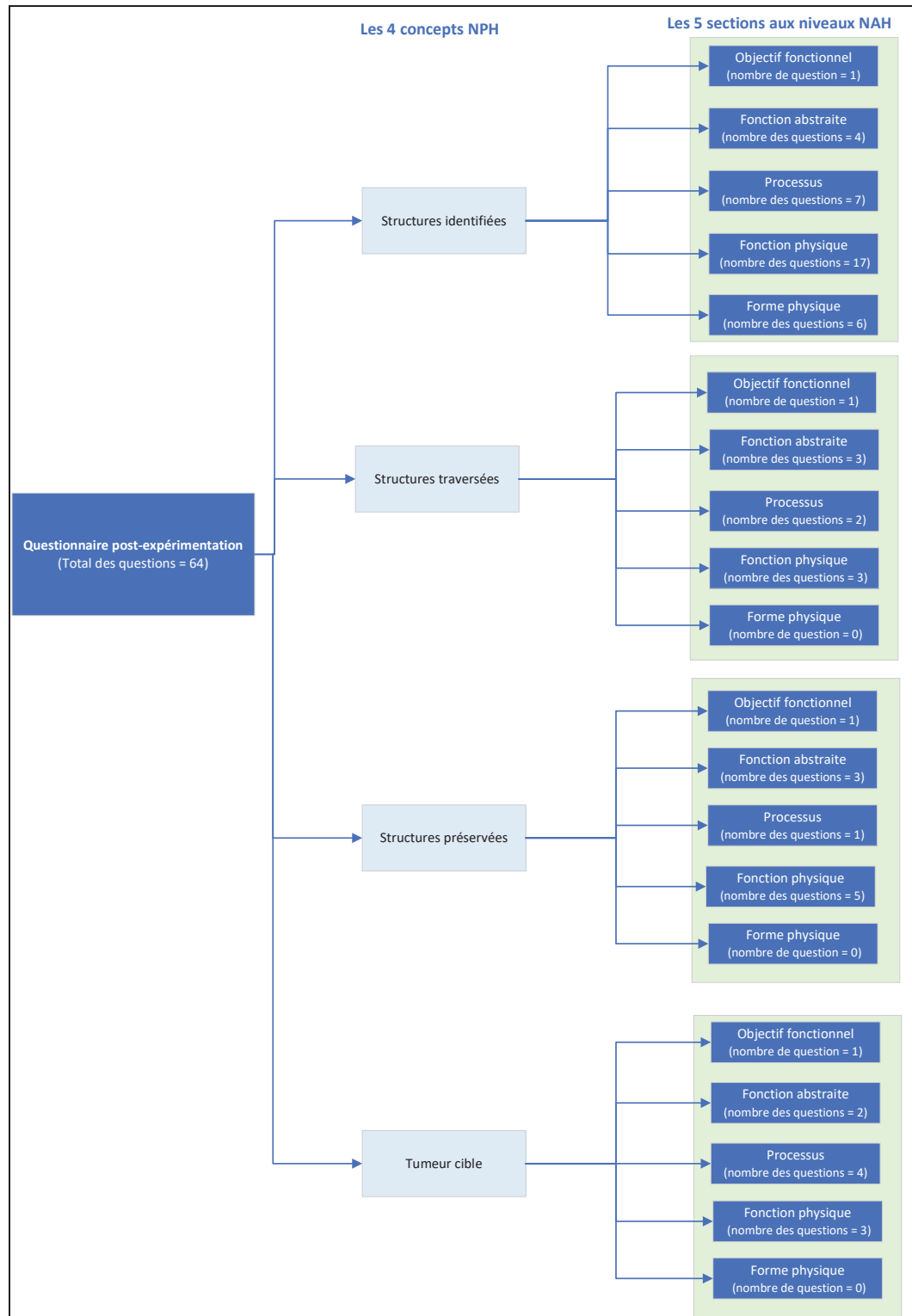


Figure 3.7. Représentation des composantes du questionnaire post-expérimentation (QPoE)

3.3.3 Conception du questionnaire post-cas

La conception du questionnaire post-cas (QPC) a été élaborée en se basant sur l'analyse des CRPO, de divers cas cliniques sélectionnés ainsi que sur les connaissances anatomiques et l'expertise clinique de l'auteur de ce mémoire, qui est un médecin généraliste. Les questions du QPC ont été par la suite validées par un neurochirurgien de référence qui n'a pas participé à l'étude usager.

Ce questionnaire comprenait plusieurs parties dont chacune est axée sur les concepts clés de notre étude. L'objectif du QPC était d'évaluer le nombre de structures anatomiques identifiées et le nombre de structures anatomiques traversées selon les modes de visualisation. La voie d'approche chirurgicale est définie dans notre étude par les structures anatomiques traversées.

Le participant devait sélectionner les structures anatomiques essentielles pour la planification chirurgicale qu'il avait identifiées dans chaque cas clinique. Pour choisir les structures anatomiques à intégrer dans le questionnaire, nous avons suivi plusieurs étapes. En premier lieu, une lecture des CRPO a été faite, puis nous avons relevé les mots clés qui correspondent aux différents concepts « structures identifiées » et « structures traversées » (méthode similaire à celle utilisée dans la section 3.3.1, paragraphe 4). En second lieu, nous avons répertorié les structures anatomiques entrant dans le contexte de la chirurgie de la colonne vertébrale.

En regroupant l'ensemble des structures recueillies issues de ces deux étapes, nous avons pu dresser une liste de 35 structures anatomiques identifiées (voir ANNEXE I) et 59 structures anatomiques traversées. Enfin, nous avons intégré ces listes dans deux questions du QPC (voir ANNEXE III) permettant ainsi aux participants de sélectionner les structures anatomiques identifiées et les structures anatomiques traversées pendant la planification chirurgicale selon le mode de visualisation.

3.3.4 Création des modèles anatomiques 3D

Afin de créer des modèles anatomiques 3D (Figure 3.8) nous avons utilisé le logiciel 3D Slicer. 3D Slicer est un logiciel à code source ouvert permettant la visualisation et le traitement des images médicales (Fedorov et al., 2012). Dans notre étude, le traitement des images médicales consistait à faire une segmentation des structures anatomiques à partir des images de TDM et d'IRM pour générer des modèles anatomiques 3D. Les critères spécifiques décrits dans la section 3.2.3 ont été suivis lors de la sélection des images médicales avant d'effectuer la segmentation. Ces images présentaient des coupes à haute résolution avec une épaisseur inférieure à 2 mm pour les TDM et inférieure à 3 mm pour les IRM, permettant une visualisation précise des structures anatomiques à segmenter.

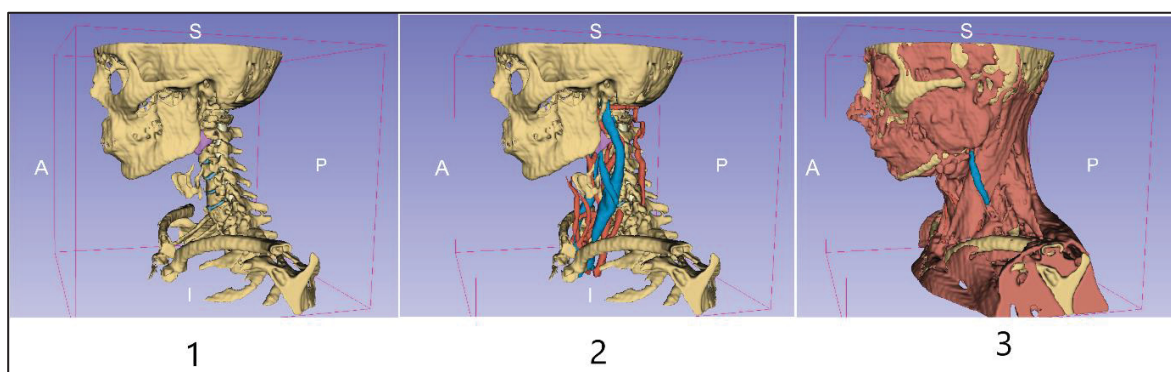


Figure 3.8. Modèles anatomiques 3D; (1) Structures osseux segmentés en jaune et tumeur segmentée en mauve; (2) Structures vasculaires segmentées : carotides en rouge, jugulaires en bleu; (3) Structures musculaires segmentées

Nous avons établi un protocole systématique pour l'ensemble des données d'imagerie sélectionnées dans le cadre de cette étude. Ce protocole consistait à utiliser une méthode de segmentation en fonction des structures anatomiques à mettre en évidence et aussi en fonction des types d'imagerie :

- Les structures osseuses et certains tissus mous ont été segmentés automatiquement en utilisant le module TotalSegmentator version 2 (Wasserthal et al., 2023) de 3D Slicer version 5.7.0 à partir des TDM.

- Les structures vasculaires telles que les carotides, les veines jugulaires et les artères vertébrales ont été segmentées de manière semi-automatique en utilisant l'outil « growCut » (Kikinis & Pieper, 2011) du module segment Editor de 3D Slicer.
- La tumeur a été également segmentée de manière semi-automatique avec l'outil « growCut » à partir des IRM.

Les structures anatomiques segmentées sont détaillées dans le Tableau 3.3 en mettant en évidence les méthodes de segmentations employées en fonction des types d'imageries utilisées.

Tableau 3.3. Les structures anatomiques segmentées

Types d'imageries	Méthode de segmentation	Structures segmentées
TDM	Automatique : outil Totalsegmentator V2	<ul style="list-style-type: none"> - Structures osseuses : os vertébraux, crâne, côtes - Structures musculaires : muscles profonds du dos, groupes de muscles - Structures tissulaires : cœur, poumons, et tous les autres organes internes - Structures vasculaires : Aorte, veine cave
	Semi-automatique : Outil growCut	Structures vasculaires : carotides, veines jugulaires, artères vertébrales
IRM	Semi-automatique : outil growCut	Tumeur

3.4 Conception des interfaces pour l'étude usager

Une fois les modèles anatomiques 3D obtenus, nous avons développé les interfaces utilisateurs qui permettaient aux neurochirurgiens d'interagir avec ces modèles 3D au cours de l'étude usager. Les sections suivantes détailleront l'implémentation d'un module permettant

d'effectuer la planification chirurgicale lors de la première phase de l'étude usager, ainsi que l'intégration d'une méthode de visualisation en RV utilisée pendant la deuxième phase de l'étude usager.

3.4.1 Implémentation du module pour la planification chirurgicale conventionnelle

Nous avons développé un module personnalisé dans le logiciel 3D Slicer. Ce module permettait une interaction fluide et intuitive avec les modèles anatomiques 3D et les fonctionnalités de 3D Slicer. Plus précisément, l'architecture modulaire de 3D Slicer permettait d'appeler et de contrôler d'autres modules au sein d'une même interface (Pieper, Halle, & Kikinis, 2004). De plus, les extensions dans 3D Slicer comprenaient des modules avec des scripts écrits en Python, où les paramètres d'initialisation et la logique du module pouvaient être spécifiés. Par ailleurs, la conception de l'interface graphique du module a été réalisée avec Qt Designer. Plusieurs fonctionnalités ont été ainsi intégrées pour répondre aux besoins de notre étude usager.

Des fonctions permettant de charger les volumes de TDM, d'IRM ainsi que les segmentations des modèles anatomiques ont été implémentées. Ces fonctions ont été associées à des cases à cocher telles qu'illustrées sur la Figure 3.9. Le module « Volume Rendering » de 3D Slicer a été aussi utilisé dans notre module afin de faciliter la visualisation du rendu volumétrique de l'image. La propriété de transfert d'opacité du « Volume Rendering » a aussi été implémentée pour permettre à l'utilisateur d'ajuster de manière dynamique la transparence des structures anatomiques.

Par la suite, le module « Markup » de 3D Slicer a été utilisé afin de tracer une ligne reliant un point de départ et un point d'arrivée sur l'image. Cette ligne représentait la voie d'approche chirurgicale.

Finalement, nous avons ajouté des boutons qui permettaient d'accéder aux questionnaires QPE et QPC. Chaque bouton déclenche l'ouverture d'une fenêtre intégrant le questionnaire,

permettant à l'utilisateur de répondre sans quitter 3D Slicer. Les principales caractéristiques de notre module sont représentées dans la Figure 3.9.

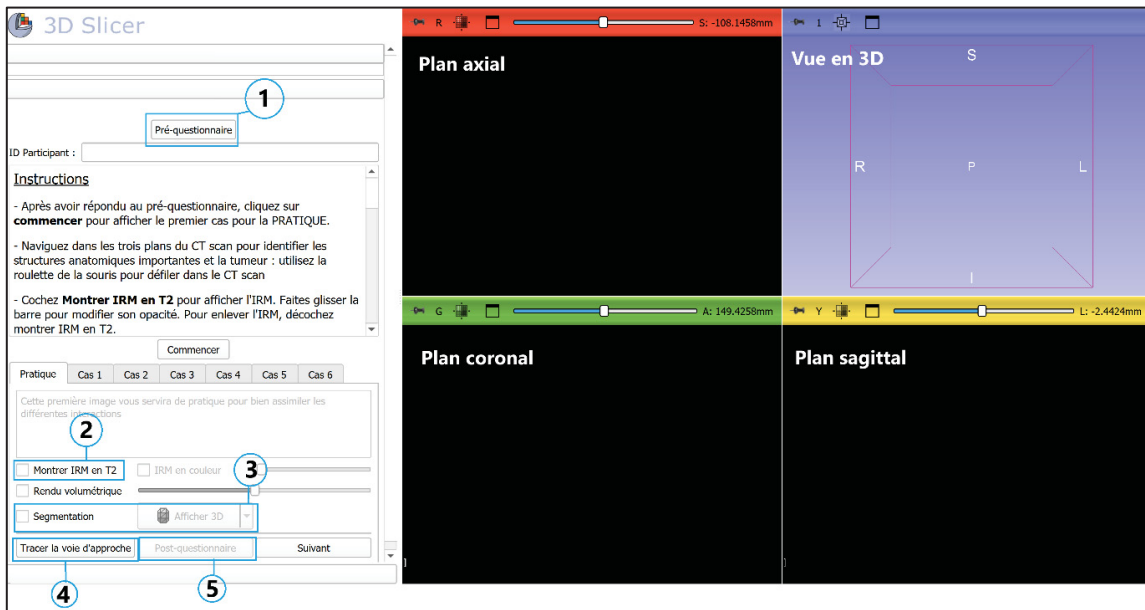


Figure 3.9. Interface du module implémenté sur 3D Slicer; (1) et (5) représentent les boutons pour QPE et QPC; (2) et (3) sont les cases à cocher pour charger le volume d'IRM et le modèle anatomique segmenté; (4) représente le bouton pour tracer la voie d'approche chirurgicale

3.4.2 Intégration d'une méthode de visualisation en réalité virtuelle

Afin de réaliser la deuxième phase de l'étude, une méthode de visualisation en RV (travaux en cours de publication) développée par Andrey Titov, candidat au doctorat à l'ÉTS a été utilisée. L'objectif principal de ses travaux était de permettre de gérer de manière interactive l'occlusion dans les volumes anatomiques segmentés, optimisant ainsi leur visualisation en RV.

À l'aide d'un outil de découpe virtuel en forme de sphère invisible, l'utilisateur pouvait choisir précisément quels segments anatomiques révéler ou masquer. Comme illustré sur la Figure 3.10 à gauche, le segment de la peau est découpé, révélant le segment des structures musculaire en marron et masquant les structures internes. Sur la même figure à droite, la tumeur en mauve et les structures vasculaires en bleu et rouge vive sont révélées après avoir découpé les

structures musculaires. Cette approche permettait de créer des représentations détaillées des structures internes et profondes, tout en préservant les relations entre les structures anatomiques environnantes.

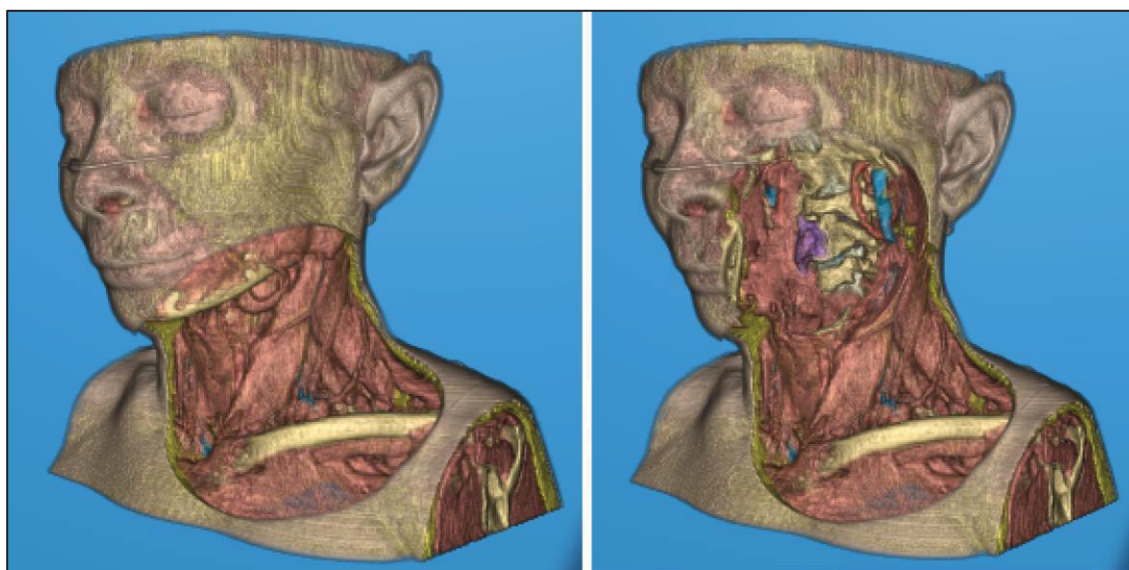


Figure 3.10. Visualisation en réalité virtuelle du modèle anatomique 3D

3.5 Analyses et traitements des données de l'expérimentation

Cette section présente les détails des méthodes d'analyses et traitements des données recueillies à la suite des deux phases de l'expérimentation. Ces analyses et traitements comprennent deux parties distinctes. La première partie se focalise sur l'analyse des données obtenues à travers le QPoE, tandis que la deuxième partie consiste en l'analyse des réponses obtenues à travers les QPC.

3.5.1 Préparation des données du QPoE

Précédemment, nous avons abordé la méthodologie pour élaborer l'ADT (section 3.3.1) ainsi que l'échelle d'évaluation des informations du domaine de travail (section 3.3.2). Cette échelle d'évaluation sous forme de questionnaire était la base du QPoE auquel les participants devaient répondre à la fin de chaque phase de l'expérience : que ce soit en utilisant le mode

de visualisation par ordinateur ou le mode de visualisation en RV. Les données recueillies à partir de ce QPoE ont été par la suite traitées avant d'effectuer les analyses statistiques qui nous permettaient de vérifier nos hypothèses de recherche.

Un score est attribué pour chaque réponse du QPoE en se basant sur la méthode de notation utilisée dans les travaux de Morineau et al. (2013). De manière plus précise :

- 1 point si le participant percevait directement les informations anatomo-fonctionnelles du domaine de travail via le mode de visualisation
- 0.5 point si les informations n'étaient pas directement visibles, mais pouvaient être déduites à partir de l'image.
- 0 point si les informations n'étaient pas présentes sur l'image ou si le participant ne disposait pas d'assez d'informations sur l'image pour répondre.

Le score total pour chaque niveau NAH variait d'un concept NPH à un autre (voir Figure 3.7). Pour permettre une comparaison équitable entre les différents concepts NPH, les scores obtenus par les neurochirurgiens ont été mise à l'échelle en divisant chaque score de NAH par le score total correspondant, ramenant ainsi les résultats sur une échelle entre 0 à 1.

Après avoir traité les données du QPoE, nous avons procédé à des analyses statistiques pour évaluer la quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçues dans le domaine de travail neurochirurgical en fonction des différents modes de visualisation. Les tests statistiques ainsi que les résultats obtenus sont détaillés dans la section 4.3 du CHAPITRE 4.

3.5.2 Préparation des données du QPC

Rappelons qu'à chaque phase de planification chirurgicale en utilisant le mode de visualisation par ordinateur ou en réalité virtuelle, les participants devaient traiter six cas cliniques différents. Ensuite, entre chaque cas clinique, ils devaient remplir le QPC permettant à l'équipe de recherche de recueillir les informations suivantes :

- Les structures anatomiques identifiées dans l'image qui étaient essentielles à la planification chirurgicale
- Les structures anatomiques traversées pour atteindre la tumeur, reflétant la voie d'approche chirurgicale

Les informations recueillies à partir de ce QPC ont été par la suite traitées avant d'effectuer les analyses statistiques qui nous permettaient de vérifier nos hypothèses de recherche.

La première étape consistait à compter le nombre total de structures anatomiques traversées sélectionnées par les participants dans le QPC pour chaque cas clinique. Nous avons également recensé le nombre de structures anatomiques traversées comme indiqué dans le CRPO pour chaque cas clinique.

Ensuite, nous avons procédé à l'évaluation de la concordance entre les structures anatomiques traversées sélectionnées par les participants et celles mentionnées dans le CRPO. Cette évaluation a été réalisée en utilisant deux mesures de similarité: la distance de Hamming et la distance de Jaccard. Ces mesures permettaient une évaluation quantitative des divergences et des similitudes entre les réponses des participants et le CRPO. En outre, ces mesures permettaient également d'évaluer les divergences et les similitudes des structures anatomiques (sélectionnées par les participants) entre les modes de visualisation par ordinateur et par RV.

3.5.2.1 La distance de Hamming

La distance de Hamming est une métrique utilisée pour évaluer la différence entre deux ensembles de séquences binaires de taille égale. Théoriquement, la distance de Hamming entre deux chaînes binaires a et b , de longueur n , est définie comme le nombre de positions de i pour lesquelles $a_i \neq b_i$ (Hamming, 1950).

La formule est donnée par l'équation (3.1) suivante :

$$d(a, b) = \sum_{i=0}^{n-1} (a_i \oplus b_i) \quad (3.1)$$

Où a_i et b_i représentent les valeurs binaires des chaînes a et b , et \oplus l'opérateur « ou exclusif » (XOR), qui retourne 1 lorsque les valeurs à une position données sont différentes, et 0 lorsqu'elles sont identiques.

Dans le contexte de notre étude, nous avons utilisé la distance de Hamming pour comparer les structures traversées identifiées par les participants avec celles indiquées dans le compte rendu opératoire. En premier lieu, les 59 structures anatomiques traversées définies dans la section 3.3.3 ont été encodées en binaire. Par la suite, les réponses des participants pour chaque cas clinique ont été également encodées en binaire dans lequel les structures sélectionnées parmi les 59 étaient représentées par « 1 » et les structures non sélectionnées par « 0 ». Les structures anatomiques traversées décrites dans le CRPO de chaque cas clinique ont été encodées de la même manière.

Ensuite, les six cas cliniques encodés ont été regroupés en deux ensembles distincts de chaînes binaires: un ensemble en fonction des structures traversées identifiées par les participants (correspondant à la chaîne « a » de la formule), et un autre ensemble en fonction du protocole opératoire (correspondant à la chaîne « b » de la formule).

Enfin, la distance de Hamming a été calculée entre les deux ensembles de chaînes binaires. La distance calculée correspondait au nombre de positions différentes entre les deux ensembles. Pour faciliter l'analyse des distances obtenues, ces dernières ont été mise à l'échelle sur une échelle de 0 à 1, où une valeur proche de 0 indique une faible divergence voire aucune divergence, entre les structures traversées des deux ensembles tandis qu'une valeur proche de 1

reflète une divergence élevée. Les tests statistiques et les résultats obtenus sont détaillés dans la section 4.5.4 du CHAPITRE 4.

3.5.2.2 La distance de Jaccard

La distance de Jaccard est une métrique utilisée pour mesurer la similarité entre deux ensembles de séquence binaires (Jaccard, 1901). Théoriquement, la formule pour calculer la distance de Jaccard est donnée par l'équation (3.2) suivante :

$$d(A, B) = 1 - \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (3.2)$$

Où A et B représentent deux ensembles, $|A \cap B|$ est le nombre d'éléments en commun entre les deux ensembles, et $|A \cup B|$ est le nombre total d'éléments dans les deux ensembles.

Dans le contexte de notre étude, l'ensemble A correspond aux structures anatomiques traversées identifiées par les participants tandis que l'ensemble B correspond aux structures anatomiques traversées dans le protocole opératoire. Nous avons utilisé les mêmes encodages binaires que ceux employés dans la distance de Hamming.

La distance de Jaccard calculée correspondait à l'indice de similarité entre les structures traversées identifiées par les participants et celles décrites dans le protocole opératoire. Une valeur proche de 0 indique une forte similarité entre les structures traversées des deux ensembles tandis qu'une valeur proche de 1 reflète une faible similarité. Les tests statistiques et les résultats obtenus sont détaillés dans la section 4.5.4 du CHAPITRE 4.

3.5.3 Méthode d'analyse statistiques

Pour atteindre les objectifs de notre étude, plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées. Une analyse de variance multifactorielle à mesures répétées (ANOVA-MR) a d'abord été utilisée

pour examiner les effets principaux et les interactions entre les différents facteurs. Puis, une analyse à modèle linéaire mixte (MLM) a été utilisée pour capturer les variabilités des facteurs aléatoires (Muhammad, 2023).

Concernant les données du questionnaire QPoE qui vise à évaluer la perception des informations anatomo-fonctionnelles, l'ANOVA-MR a été utilisée pour examiner les effets principaux et les interactions entre les modes de visualisation, les NAH et les NPH. En ce qui concerne les données du questionnaire QPC qui vise à évaluer la quantité de structures anatomiques identifiées, la quantité de structures anatomiques traversées, l'ANOVA-MR a également été utilisée pour évaluer les effets principaux et les interactions entre les modes de visualisation, les niveaux d'expérience des neurochirurgiens et les cas cliniques.

Toutefois, l'ANOVA-MR ne permet pas de prendre en compte la variabilité interindividuelle des neurochirurgiens et la variabilité entre les cas cliniques. Le MLM a été alors réalisé pour capturer ces variabilités. Contrairement à l'ANOVA-MR, le MLM offre une estimation plus précise des effets fixes tout en prenant compte les effets aléatoires des cas cliniques et des neurochirurgiens. Cependant, concernant le niveau d'expérience des neurochirurgiens, bien qu'il ait initialement été inclus en tant qu'effet fixe dans l'analyse MLM, des problèmes de convergence ont été rencontrés lors de l'analyses portant sur la quantité des structures identifiées, traversées et le temps de planification. En conséquence, le facteur niveau d'expérience a été retiré du MLM mais a été évalué dans l'ANOVA-MR.

Avant d'interpréter les résultats, nous avons vérifié les hypothèses sous-jacentes à l'ANOVA-MR. La normalité des résidus a été testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, l'homogénéité entre les groupes de variances à l'aide du test de Levene et la sphéricité a été vérifiée par le test de Mauchly. En cas de violation de la sphéricité, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée. Lorsque les hypothèses de l'ANOVA-MR ont été violées, les résultats ont été interprétés avec prudence et le MLM qui est robuste face aux violations de l'hypothèse de l'ANOVA-MR a été utilisé.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Introduction aux résultats de l'étude usager

Les deux phases de l'étude usager ont été réalisées par des neurochirurgiens travaillant au sein du service de neurochirurgie du CHUM. Les prochaines sections présenteront en premier lieu les données démographiques des participants recueillies à la suite du QPE. En second lieu, les résultats des analyses des données obtenues à partir du QPoE, un questionnaire complété par les participants à la suite de chaque phase de l'expérimentation seront exposés. Ensuite, les résultats des analyses des réponses des QPC, rempli par les participants entre chaque cas clinique de chaque phase de l'expérimentation seront présentés. Enfin, les rétroactions subjectives des participants seront également présentées.

4.2 Statistiques sur les participants

L'échantillon des participants était composé de 8 neurochirurgiens, parmi lesquels 75% étaient des hommes et 25% des femmes. Les neurochirurgiens inclus dans l'étude étaient âgés de 26 à 46 ans, dont une moyenne d'âge de 34.8 ans.

En ce qui concerne l'expérience professionnelle des neurochirurgiens, 4 d'entre eux avaient entre 0 et 4 ans d'expérience en neurochirurgie, étant ainsi classés comme résidents. En revanche, les 4 autres neurochirurgiens avaient des années d'expérience allant de 9 à 17 ans, ce qui les classe parmi les praticiens seniors en neurochirurgie.

Par ailleurs, les neurochirurgiens présentaient d'autres variabilités inter-individuelles indépendamment de leur niveau d'expérience en neurochirurgie telles que :

- Leurs spécialités en neurochirurgie : rachis, cerveau, épilepsie

- Leurs conditions physiques : état de fatigue après une garde ou après une lourde chirurgie avant d'effectuer l'étude usager
- Leurs états de concentrations pendant l'étude usager

L'expérience des neurochirurgiens dans l'utilisation de la réalité virtuelle présentait des différences. Seulement 37,5% des participants utilisaient la RV moins d'une fois par mois, tandis que 62,5% d'entre eux n'ont jamais utilisé la RV.

4.3 Quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçue

Dans les sections suivantes, nous allons présenter les résultats des analyses portant sur les effets principaux et des interactions entre les facteurs pouvant faire varier la perception des informations anatomo-fonctionnelles, tels qu'évalués à l'aide du questionnaire QPoE. Les facteurs étudiés incluent :

- Les modes de visualisation pour la planification : sur ordinateur et en réalité virtuelle
- Les niveaux d'abstraction hiérarchique (NAH) du domaine de travail en neurochirurgie, incluant l'objectif fonctionnel (OF), la fonction abstraite (AF), le processus (P), la fonction physique (FoP) et la forme physique (FP),
- Les niveaux partie-tout hiérarchique (NPH) ou concepts clés de la planification chirurgicale, incluant les structures identifiées, les structures traversées, les structures préservées et la tumeur cible.

Rappelons que chaque combinaison entre les niveaux NAH et les concepts NPH a été évaluée en attribuant un score initial basé sur les réponses aux questions associées à ces niveaux. Les scores obtenus ont été ensuite ajustés sur une échelle de 0 à 1, en divisant le score de chaque participant par le score maximal possible pour chaque niveau NAH dans chaque NPH. Cette mise à l'échelle permet une comparaison équitable entre les différents concepts et niveaux, quel que soit le mode de visualisation utilisé.

4.3.1 Effets des modes de visualisation, des niveaux d'abstraction et des concepts clés

Une ANOVA-MR a été réalisée pour analyser les effets des modes de visualisation, des NAH et des NPH sur la quantité d'information anatomo-fonctionnelle perçues.

En premier lieu, nous avons procédé à la vérification des conditions d'application d'une ANOVA-MR, notamment l'homogénéité des variances, la normalité des résidus et l'hypothèse de sphéricité. La normalité des résidus a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk, et le résultat a révélé que les résidus ne suivaient pas une distribution normale pour certains groupes de facteurs ($p < 0.05$). Par conséquent, les résultats de l'ANOVA-MR devraient être interprétés avec prudence, et l'analyse MLM a été réalisé dans un second temps.

D'après les résultats de l'ANOVA-MR, le mode de visualisation avait un effet principal significatif, $F(1,7) = 10.704$, $p = 0.014$, $\eta^2_p = 0.605$. La quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçue par ordinateur ($M = 0.488$) est inférieure à celle perçue en RV ($M = 0.630$), telle qu'indiquée dans le Tableau 4.1. Ces résultats évoquent que la quantité d'informations perçue variait selon le mode de visualisation, et que la RV permettait de percevoir plus d'informations anatomo-fonctionnelles par rapport à l'ordinateur.

Tableau 4.1. Moyenne des quantités d'informations perçues selon le mode de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Mode de visualisation	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Ordinateur	0.488	0.387	0.590	0.043
Réalité virtuelle (RV)	0.630	0.489	0.771	0.060

Concernant le facteur NAH, le test de sphéricité de Mauchly a indiqué que l'hypothèse de sphéricité a été violée avec $\chi^2(5) = 14.768$, $p = 0.013$. Après l'application de la correction de

Greenhouse – Geisser ($\epsilon = 0.639$), les résultats ont montré un effet principal significatif des NAH avec $F(1.917, 13.420) = 33.625$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.828$. Ces résultats indiquent que les différents niveaux d'abstractions conduisent à des variations importantes pour la perception des informations anatomo-fonctionnelles. Les différences spécifiques entre les NAH ont été identifiées par le test post hoc avec ajustement de Bonferroni. Ce test a montré que le niveau OF ($M = 0.844$) a permis de percevoir une quantité d'informations significativement supérieure aux autres niveaux FoP ($M_{diff} = 0.249$, $p = 0.027$), P ($M_{diff} = 0.420$, $p = 0.001$) et AF ($M_{diff} = 0.470$, $p < 0.001$). La Figure 4.1 ci-dessous présente la quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçue pour chaque niveau d'abstraction et selon le mode de visualisation.

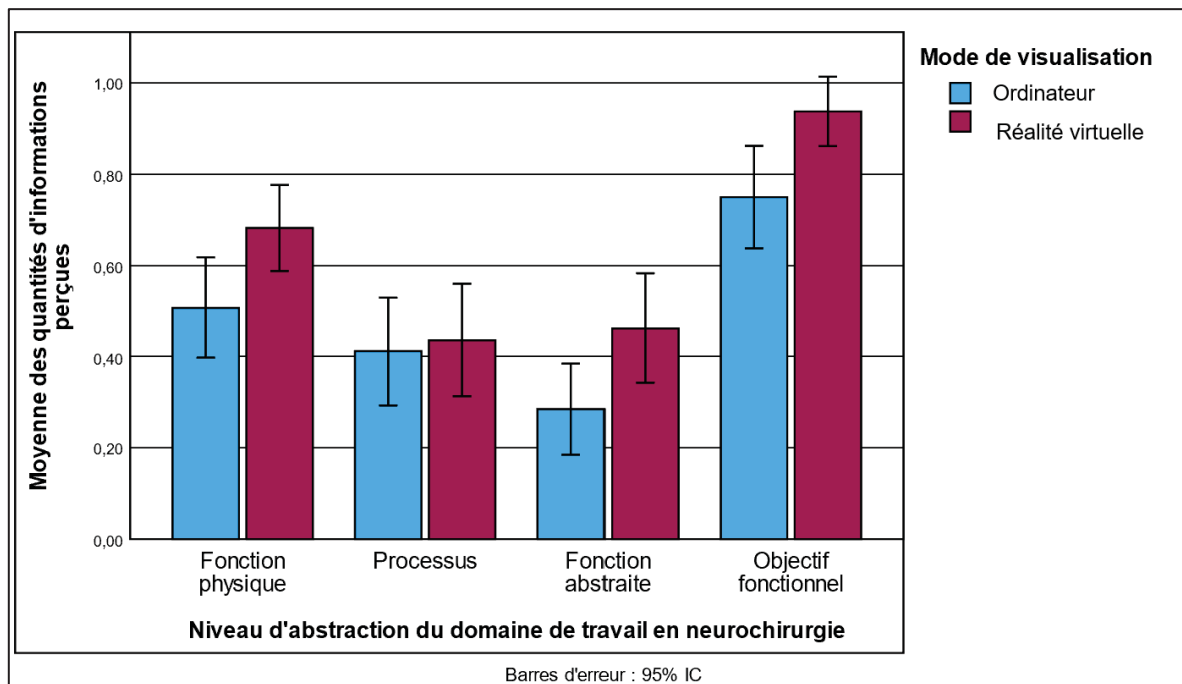


Figure 4.1. Quantité d'informations perçue pour chaque NAH et selon le mode de visualisation

Pour le NPH, les résultats ont montré également un effet principal significatif des concepts clés avec $F(3, 21) = 22.610$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.764$. Ces résultats indiquent que la perception des informations anatomo-fonctionnelles varie en fonction des concepts clés. Le test post Hoc avec correction de Bonferroni a été réalisé afin d'identifier les différences spécifiques entre les NPH.

Le concept « structures traversées » ($M = 0.746$) est significativement supérieur aux concepts « structures préservées » ($M_{\text{diff}} = 0.388$, $p < 0.001$) et « tumeur cible » ($M_{\text{diff}} = 0.212$, $p < 0.012$). Cependant, la différence n'est pas significative avec le concept « structures identifiées » ($M_{\text{diff}} = 0.147$, $p = 0.124$). La Figure 4.2 illustre la quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçue pour chaque niveau de concepts clés et selon le mode de visualisation.

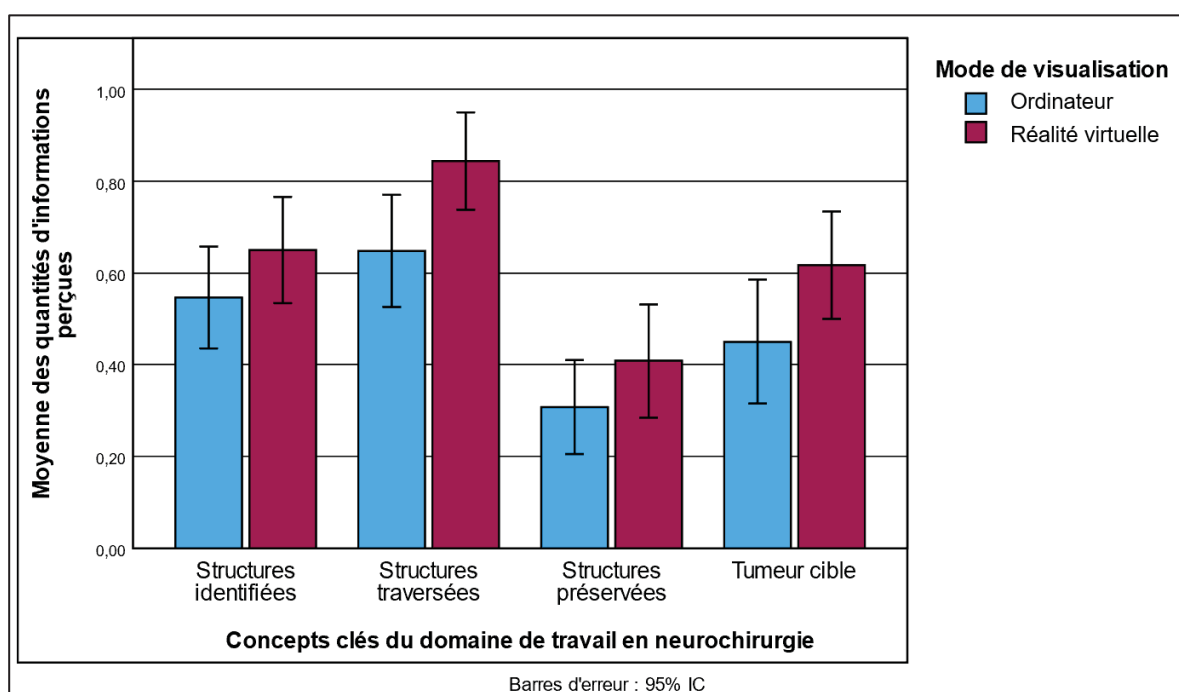


Figure 4.2. Quantité d'informations perçue pour chaque NPH selon le mode de visualisation

4.3.2 Interactions entre les modes de visualisations, les niveaux d'abstractions et les concepts clés

L'interaction entre les modes de visualisation et les niveaux d'abstractions n'était pas significative, $F(3, 21) = 1.830$, $p = 0.173$, $\eta^2_p = 0.207$. De même que pour l'interaction entre les modes de visualisation et les concepts clés, $F(3, 21) = 0.910$, $p = 0.453$, $\eta^2_p = 0.115$. Enfin, l'interaction à trois voies entre les modes de visualisation, le niveau d'abstraction, et le concept clé n'était pas significative, $F(9, 63) = 1.905$, $p = 0.067$, $\eta^2_p = 0.214$. L'absence de ces trois interactions évoque que l'effet des modes de visualisation sur la quantité d'informations

perçue est maintenu à travers tous les NAH et les NPH, notamment la RV est toujours supérieure à l'ordinateur (Figure 4.1 et Figure 4.2).

4.3.3 Estimation précise des effets du mode de visualisation, du NAH et du NPH

Une analyse à MLM a été réalisée afin de tenir compte de la violation des conditions de normalité de l'ANOVA-MR ainsi que de la variabilité entre les neurochirurgiens. Ce modèle permet une meilleure estimation des effets fixes du mode de visualisation, du NAH et du NPH en considérant les effets aléatoires dus aux variabilités des neurochirurgiens.

Le modèle a révélé un effet significatif du mode de visualisation sur la quantité d'informations anatomo-fonctionnelles perçues, $F(1, 217) = 6.565$, $p = 0.011$. Les NAH et les NPH ont aussi un effet significatif sur la quantité d'informations perçue ($p < 0.001$).

Ces résultats nous ont permis de vérifier l'hypothèse 1, qui cherche à démontrer que l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale permet une meilleure perception et identification des informations anatomiques et fonctionnelles par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle.

4.4 La quantité des structures anatomiques identifiées

Après avoir étudié de manière globale les effets des modes de visualisation sur la perception des informations dans l'ADT, nous allons maintenant faire une analyse détaillée de deux des quatre NPH (structures identifiées et structures traversées), en utilisant les données issues du questionnaire QPC.

4.4.1 Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et du niveau d'expérience

Avant de procéder à l'ANOVA-MR, nous avons vérifié que les conditions préalables à l'application de cette analyse étaient respectées. L'homogénéité des variances entre les différents groupes a été vérifiée par le test de Levene. Les résultats ont montré que les variances

entre les cas cliniques étaient homogènes ($p > 0.05$), tant pour le mode de visualisation sur ordinateur qu'en RV. En outre, le test de Shapiro-Wilk a montré que les résidus suivaient une distribution normale ($p = 0.321$).

Les résultats de l'ANOVA-MR ont révélé que l'effet principal des modes de visualisation n'étaient pas significatif, $F(1,6) = 3.288$, $p = 0.120$, $\eta^2_p = 0.354$. Cependant, les moyennes observées dans le Tableau 4.2 indiquent une tendance selon laquelle la RV permettrait d'identifier un plus grand nombre de structures anatomiques par rapport à l'ordinateur.

Tableau 4.2. Moyenne des quantités de structures anatomiques identifiées selon le mode de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Mode de visualisation	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Ordinateur	10.729	7.865	13.593	1.170
Réalité virtuelle (RV)	13.521	10.828	16.214	1.100

Pour le facteur cas clinique, le test de sphéricité de Mauchly a indiqué que l'hypothèse de sphéricité a été violée avec $\chi^2(14) = 30.613$, $p < 0.014$. Après, l'application de la correction de Greenhouse – Geisser ($\epsilon = 0.530$), les résultats ont montré que l'effet principal des cas cliniques n'était pas significatif, $F(2.650, 15.900) = 1.428$, $p = 0.272$, $\eta^2_p = 0.192$. Ces résultats indiquent que les performances des neurochirurgiens dans l'identification des structures anatomiques ne varient pas de manière significative d'un cas clinique à un autre.

D'ailleurs, les moyennes observées pour chaque cas clinique sont relativement proches les unes des autres, comme le montre le Tableau 4.3 ci-dessous.

Tableau 4.3. Moyenne des quantités de structures anatomiques identifiées selon les différents cas cliniques dans les deux modes de visualisation

Cas clinique	Marginal Mean	95% CI for Mean Difference		
		Lower	Upper	SE
Cas1	11.500	9.326	13.674	0.888
Cas2	11.500	8.929	14.071	1.051
Cas3	13.688	10.296	17.079	1.386
Cas4	12.062	8.372	15.753	1.508
Cas5	12.937	11.029	14.846	0.780
Cas6	11.063	8.611	13.514	1.002

Pour le facteur niveaux d'expérience des neurochirurgiens, les résultats ont révélé une absence d'effet principal significatif, $F(1,6) = 5.150$, $p = 0.064$, $\eta^2_p = 0.462$. Cependant, la Figure 4.3 et les moyennes observées dans le Tableau 4.4 montrent une tendance vers une meilleure performance en termes de structures anatomiques identifiées par les résidents ($M=14.021$) par rapport à celles des séniors ($M = 10,229$).

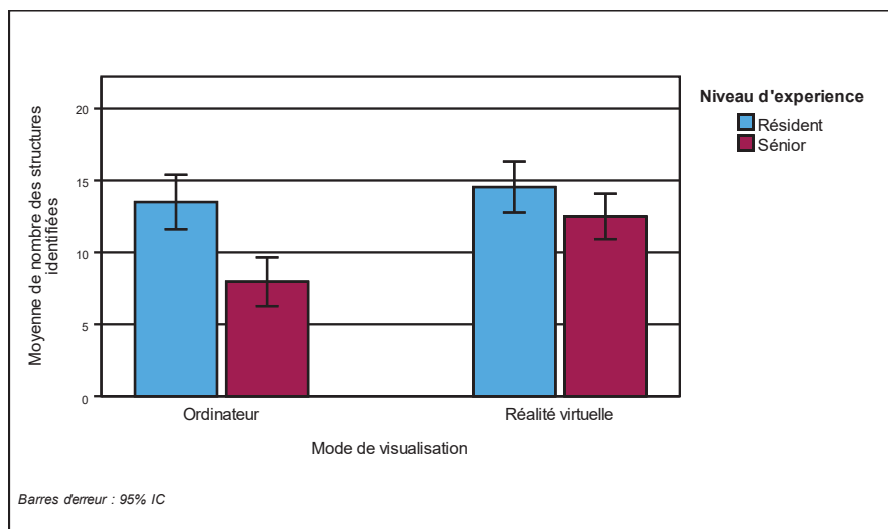


Figure 4.3. Quantité de structures anatomiques identifiées dans chaque mode de visualisation et selon le niveau d'expérience

Tableau 4.4. Moyenne de nombre de structures anatomiques identifiées selon le niveau d'expérience dans les deux modes de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Niveau d'expérience	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Résident	14.021	11.130	16.912	1.181
Sénior	10.229	7.338	13.120	1.181

4.4.2 Interactions entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience

L'interaction entre les modes de visualisation et les cas cliniques était significative, $F(5, 30) = 2.640$, $p = 0.043$, $\eta^2_p = 0.306$, cela indique que l'effet du mode de visualisation varie d'un cas clinique à un autre. Un test-t apparié a été réalisé pour comparer la quantité de structures anatomiques identifiées par les neurochirurgiens entre les deux modes de visualisation et selon les cas cliniques. Les résultats présentés dans le Tableau 4.5 ont montré une différence significative pour le cas clinique numéro 5 ($p = 0.007$), mais les autres cas cliniques n'ont pas révélé une différence significative ($p > 0.05$).

Tableau 4.5. Comparaison des effets des modes de visualisation sur le nombre de structures anatomiques identifiées dans chaque cas clinique

Cas clinique	Moyenne ordinateur	Moyenne RV	t	df	p
Cas1	10.125	12.875	-1.222	7	0.261
Cas2	9.625	13.375	-2.195	7	0.064
Cas3	11.625	15.750	-2.040	7	0.081
Cas4	12.250	11.875	0.170	7	0.870
Cas5	10.375	15.500	-3.781	7	0.007
Cas6	10.375	11.750	-0.613	7	0.559

L'interaction entre les modes de visualisation et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(1, 6) = 1.292$, $p = 0.299$, $\eta^2p = 0.177$. De même que l'interaction entre les cas cliniques et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(5, 30) = 1.173$, $p = 0.345$, $\eta^2p = 0.164$. Enfin, l'interaction à trois voies entre les modes de visualisation, les cas cliniques, et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(5, 30) = 2.224$, $p = 0.078$, $\eta^2p = 0.270$. L'absence de ces interactions évoque que l'effet des modes de visualisation et des cas cliniques sur le nombre de structures anatomiques identifiées est toujours maintenu pour tous les niveaux d'expérience des neurochirurgiens.

4.4.3 Estimation précise des effets du mode de visualisation

Afin de tenir compte de la variabilité entre les différents cas cliniques et entre les neurochirurgiens indépendamment de leurs niveaux d'expérience, nous avons fait également une MLM. Ce modèle permettait une meilleure estimation des effets fixes du mode de visualisation en considérant les effets aléatoires dus aux cas cliniques et aux neurochirurgiens.

Le MLM a révélé un effet significatif du mode de visualisation sur le nombre de structures anatomiques identifiées, $F(1, 82) = 13.334$, $p < 0.001$. L'estimation de l'effet fixe du mode de visualisation montre que les neurochirurgiens ont identifié en moyenne moins de structures anatomiques en utilisant l'ordinateur comparé à la réalité virtuelle (Estimate = -1.396, SE = 0.382, $p < 0.001$).

4.4.4 Niveau de similarité et de différence de structures anatomiques identifiées selon les modes de visualisation

Nous avons également analysé la similarité et la différence du nombre de structures anatomiques identifiées par les neurochirurgiens selon les deux modes de visualisations. Notre objectif était de déterminer la précision et l'efficacité de la RV. Nous avons ainsi vérifié si les structures identifiées à travers le mode de visualisation par ordinateur concordaient avec celles

identifiées en RV. En cas de discordance, nous avons cherché à évaluer l'ampleur de cette différence.

La distance de Jaccard a été utilisée pour évaluer la similarité des structures anatomiques identifiées par les neurochirurgiens dans les deux modes de visualisation, en comparant les éléments communs. En revanche, la distance de Hamming a été utilisée pour mesurer les différences en comptant le nombre de structures anatomiques identifiées de manière différente entre les deux modes de visualisation.

La Figure 4.4 présente la distribution des distances de Hamming entre les deux modes de visualisation pour les six cas cliniques utilisés dans l'étude. La distance de Hamming varie légèrement entre les cas, avec des médianes qui se situent globalement entre 0.157 et 0.271.

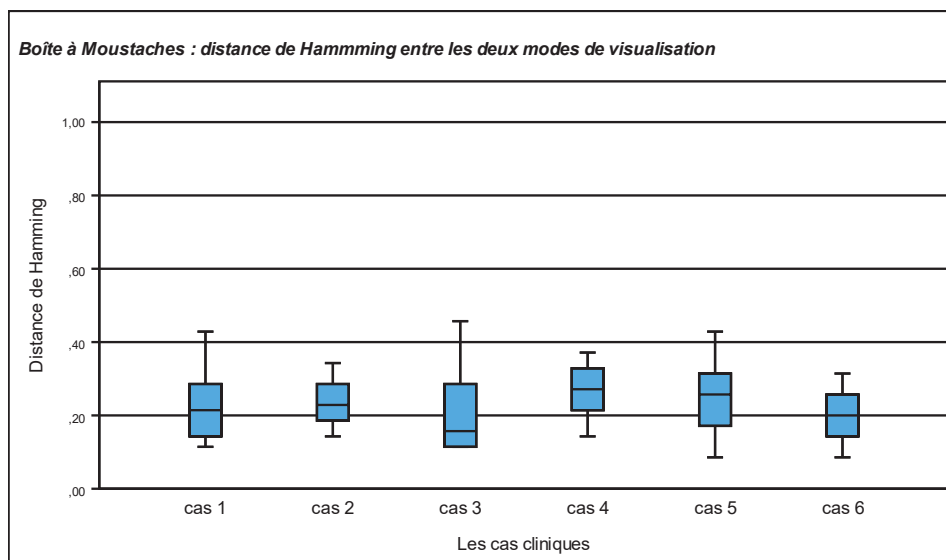


Figure 4.4. Distribution des distances de Hamming entre les modes de visualisation

La Figure 4.5 présente la distribution des distances de Jaccard entre les deux modes de visualisation pour les six cas cliniques utilisés dans l'étude. La distance de Jaccard varie entre les cas, avec des médianes qui se situent globalement entre 0.390 et 0.604.

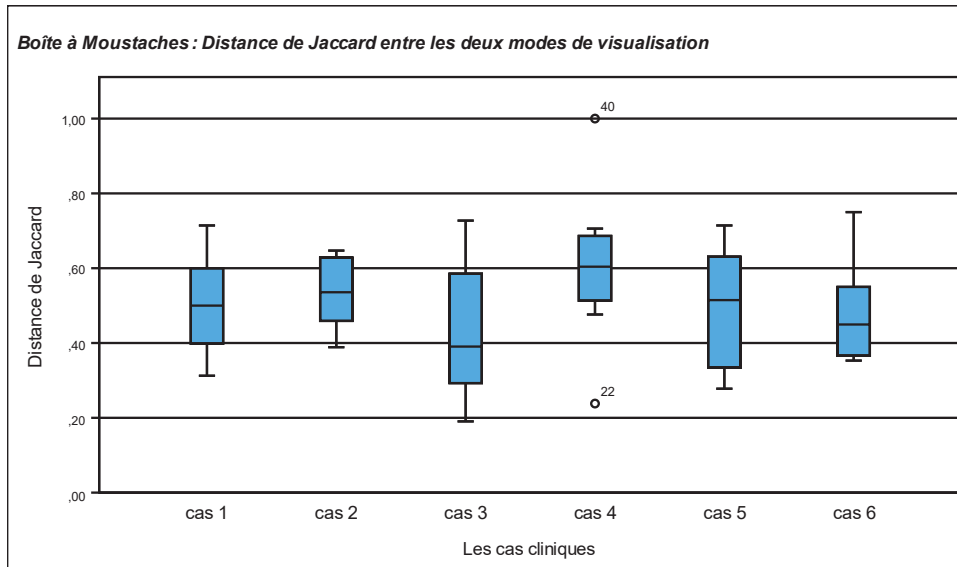


Figure 4.5. Distribution des distances de Jaccard entre les modes de visualisation

Ces résultats nous ont permis de vérifier l'hypothèse 2 que la réalité virtuelle a un impact sur l'identification des structures anatomiques essentielles à la planification chirurgicale.

4.5 La quantité des structures anatomiques traversées

Nous avons appliqué les mêmes méthodes statistiques que dans la section précédente. En premier lieu, une ANOVA-MR a été réalisée afin d'évaluer la quantité des structures anatomiques traversées pour atteindre la tumeur au cours de la planification chirurgicale selon les deux modes de visualisation. En second lieu, nous avons réalisé une MLM afin de capturer les variabilités entre les cas cliniques et entre les neurochirurgiens.

4.5.1 Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et des niveaux d'expérience des neurochirurgiens

Avant de procéder à l'ANOVA-MR, nous avons vérifié que les conditions préalables à l'application de cette analyse étaient respectées. Le test de Levene a été effectué pour évaluer l'homogénéité des variances entre les différents groupes. Les résultats ont révélé une violation de l'homogénéité des variances pour deux des six cas cliniques avec le mode de visualisation

par ordinateur (cas 1, $p = 0.011$ et cas 3, $p = 0.046$). En outre, le test de sphéricité de Mauchly a montré que l'hypothèse de sphéricité était respectée ($p = 0.901$). Le test de Shapiro-Wilk a montré que les résidus de trois cas cliniques ne suivaient pas une distribution normale ($p < 0.05$).

Bien que l'ANOVA-MR est généralement robuste face à de telles violations de normalité, surtout lorsque les groupes sont équilibrés (Oberfeld & Franke, 2013), les résultats ont été interprétés avec prudence. De plus, un MLM a été également effectué pour évaluer la robustesse de nos résultats (Muhammad, 2023).

Les résultats de l'ANOVA-MR ont montré que l'effet principal des modes de visualisation sur les structures traversées était significatif, $F(1,6) = 106.824$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.947$. Les moyennes observées ont montré une meilleure performance de la RV ($M = 14,458$) pour visualiser les structures anatomiques traversées par rapport à l'ordinateur ($M = 5.021$), comme illustré dans le Tableau 4.6. Ces résultats évoquent que le nombre de structures anatomiques traversées diffère selon le mode de visualisation, et que la RV permet de percevoir plus de structures traversées que l'ordinateur.

Tableau 4.6. Moyenne de nombre de structures anatomiques traversées selon le mode de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Mode de visualisation	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Ordinateur	5.021	2.550	7.492	1.010
Réalité virtuelle (RV)	14.458	12.155	16.762	0.941

Les différents cas cliniques ont également un effet principal significatif sur la visualisation des structures anatomiques traversées, $F(5,30) = 4.849$, $p = 0.002$, $\eta^2_p = 0.447$. Ces résultats indiquent des variations selon les cas cliniques. Le test post hoc avec correction de Holm a été

effectué pour explorer les différences entre ces cas. Le cas clinique numéro 2 ($M = 13.062$) a permis de visualiser un nombre de structures anatomiques traversées significativement supérieures à celui des cas cliniques numéro 3 ($M_{diff} = 4.687$, $p = 0.043$), numéro 5 ($M_{diff} = 4.625$, $p = 0.043$), numéro 6 ($M_{diff} = 5.313$, $p = 0.037$).

Pour le facteur niveau d’expérience des neurochirurgiens, les résultats ont révélé une absence d’effet principal significatif, $F(1,6) = 1.547$, $p = 0.260$, $\eta^2_p = 0.205$. Cependant, la Figure 4.6 et les moyennes dans Tableau 4.7 montrent une tendance que les résidents ($M=10.812$) visualisaient plus de structures anatomiques traversées par rapport aux seniors ($M = 8.667$).

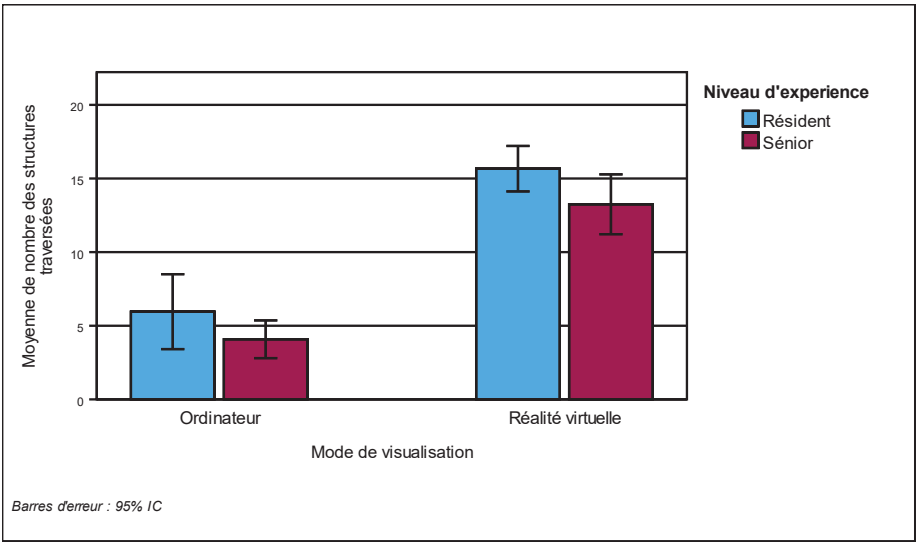


Figure 4.6. Quantité de structures anatomiques traversées selon le mode de visualisation et selon le niveau d’expérience

Tableau 4.7. Moyenne de nombre de structures anatomiques traversées selon le niveau d’expérience

		95% CI for Mean Difference		
Niveau d’expérience	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Résident	10.812	7.827	13.798	1.220
Sénior	8.667	5.681	11.652	1.220

4.5.2 Interactions entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience

L'interaction entre les modes de visualisation et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(1, 6) = 0.088$, $p = 0.777$, $\eta^2_p = 0.014$. De même, l'interaction entre les cas cliniques et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(5, 30) = 1.021$, $p = 0.423$, $\eta^2_p = 0.145$. En outre, l'interaction entre les modes de visualisation et les cas cliniques n'était pas non plus significative, $F(5, 30) = 2.166$, $p = 0.085$, $\eta^2_p = 0.265$. Enfin, l'interaction à trois voies entre les modes de visualisation, les cas cliniques, et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas non plus significative, $F(5, 30) = 0.800$, $p = 0.559$, $\eta^2_p = 0.118$.

L'absence de ces interactions évoque que l'effet des modes de visualisation sur le nombre de structures anatomiques traversées était toujours présent, indépendamment des cas cliniques et des niveaux d'expérience des neurochirurgiens.

4.5.3 Estimation précise des effets des modes de visualisation

Afin de tenir compte de l'hétérogénéité des cas cliniques, de la violation des conditions de normalité de l'ANOVA-MR ainsi que de la variabilité entre les neurochirurgiens, nous avons réalisé une analyse à MLM. Ce modèle permettait une meilleure estimation des effets fixes des modes de visualisation en considérant les effets aléatoires dus aux cas cliniques et aux neurochirurgiens.

Le modèle a révélé un effet significatif du mode de visualisation sur le nombre de structures anatomiques traversées, $F(1, 82) = 153.827$, $p < 0.001$. L'estimation de l'effet fixe du mode de visualisation montre que les neurochirurgiens ont visualisé en moyenne moins de structures anatomiques à traverser en utilisant l'ordinateur comparé à la réalité virtuelle (Estimate = - 4.719, SE = 0.380, $p < 0.001$).

4.5.4 Concordance des structures anatomiques traversées avec le CRPO

Dans cette section, nous avons évalué la concordance des structures traversées par les participants en utilisant les deux modes de visualisation par rapport aux structures traversées rapportées dans le CRPO. L'objectif est de vérifier si les structures traversées sélectionnées par les neurochirurgiens dans les deux modes de visualisation sont cohérentes avec celles décrites dans le CRPO qui sert de référence.

Le test de Shapiro-Wilk a révélé que les données de chaque groupe ne suivaient pas une distribution normale ($p = 0.002$). De plus, le Q-Q plot des résidus a montré une non-normalité dans les extrémités de la distribution. Par conséquent, nous avons opté pour un test de Wilcoxon pour données appariées.

Les résultats ont révélé une différence significative entre les deux modes de visualisation pour la distance de Hamming ($W = 795$, $p = 0.006$). La corrélation bisériale par rang de 0.471 suggère une corrélation modérée entre les deux modes de visualisation, indiquant que la différence de la distance de Hamming entre le mode de visualisation par ordinateur ($M = 0.179$) et en RV ($M = 0.138$) est modérée, comme le montre le Tableau 4.8.

Tableau 4.8. Comparaison des distances de Hamming et de Jaccard selon les modes de visualisation

Mode de visualisation	Distance	N	Mean	SD	SE	Coefficient of variation
Ordinateur	Hamming	48	0.179	0.082	0.012	0.457
	Jaccard	48	0.799	0.140	0.020	0.175
RV	Hamming	48	0.138	0.054	0.008	0.394
	Jaccard	48	0.495	0.149	0.022	0.301

Les résultats pour la distance de Jaccard ont également révélé une différence significative ($W = 1153.5$, $p < 0.01$). La corrélation bisériale par rang de 0.962 indique une forte corrélation entre les deux modes de visualisations, suggérant que la différence de la distance de Jaccard entre le mode de visualisation par ordinateur ($M = 0.799$) et en RV ($M = 0.495$) est très grande. Le Tableau 4.8 représente cette différence.

4.5.5 Niveau de similarité et de différence des structures anatomiques traversées selon les deux modes de visualisation

Dans cette section, nous cherchons à évaluer la similarité et la différence entre les structures anatomiques traversées sélectionnées par les neurochirurgiens dans les deux modes de visualisations, indépendamment du CRPO. Notre objectif était de déterminer dans quelle mesure les structures traversées diffèrent ou se ressemblent entre les deux modes de visualisation.

La Figure 4.7 présente la distribution des distances de Hamming entre les deux modes de visualisation pour les six cas cliniques utilisés dans l'étude. La distance de Hamming varie entre les cas, avec des médianes qui se situent globalement entre 0.144 et 0.314.

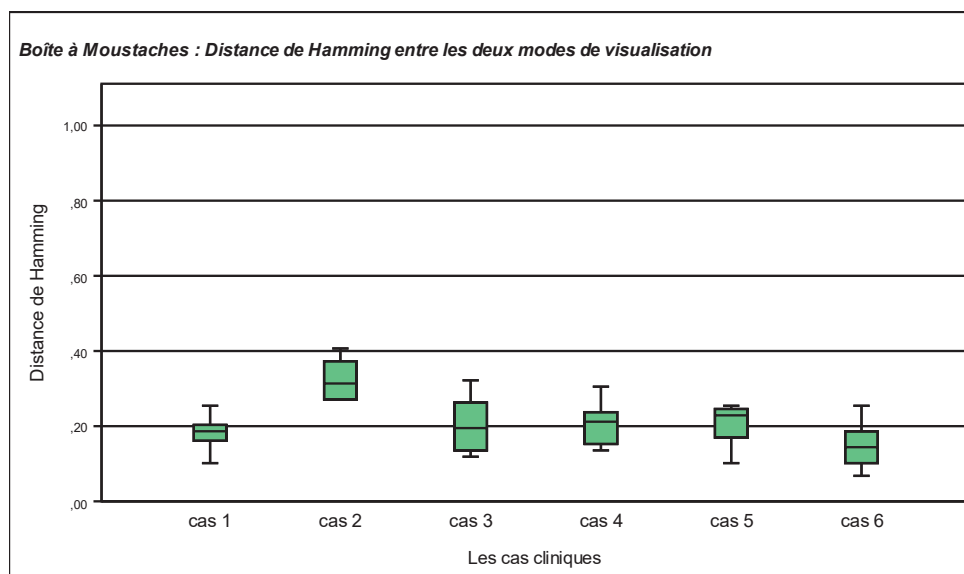


Figure 4.7. Distribution des distances de Hamming entre les modes de visualisation

La Figure 4.8 présente la distribution des distances de Jaccard entre les deux modes de visualisation pour les six cas cliniques utilisés dans l'étude. La distance de Jaccard variait entre les cas, avec des médianes qui se situent globalement entre 0.733 et 0.955.

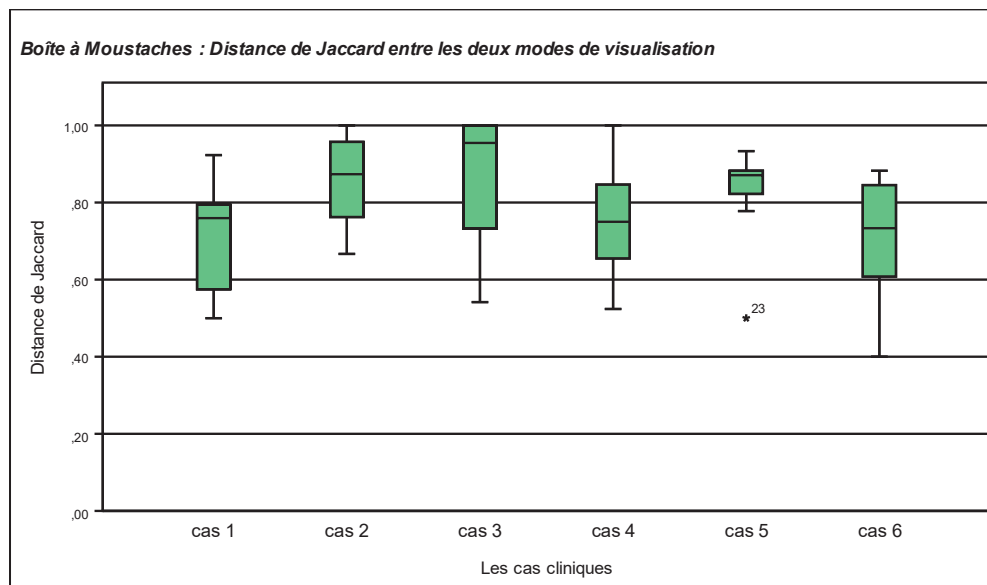


Figure 4.8. Distribution des distances de Jaccard entre les modes de visualisation

Ces résultats nous ont permis de vérifier l'hypothèse 3, que la réalité virtuelle a un impact sur le choix de la voie d'approche chirurgicale en fonction des structures anatomiques à traverser pour atteindre la tumeur.

4.6 Le temps de planification dans les deux modes de visualisation

Cette section compare le temps de planification chirurgicale effectué par les neurochirurgiens en utilisant les deux modes de visualisation. Les données sur le temps de planification ont été enregistrées automatiquement pendant que les neurochirurgiens réalisaient la planification chirurgicale dans les deux modes de visualisation.

4.6.1 Effets des modes de visualisation, des cas cliniques et des niveaux d'expérience

Avant de procéder à l'ANOVA-MR, nous avons vérifié que les conditions préalables à l'application de cette analyse étaient respectées. Le test de sphéricité de Mauchly a montré que l'hypothèse de sphéricité était respectée ($p = 0.488$), et le test de Shapiro-Wilk a montré que les résidus suivaient une distribution normale ($p = 0.146$). En outre, le test de Levene a été ont révélé une violation de l'homogénéité des variances pour deux des six cas cliniques avec le mode de visualisation par ordinateur (cas 1, $p = 0.037$ et cas 5, $p = 0.008$).

Bien que l'ANOVA-MR est généralement robuste face à de telles violations modérées surtout lorsque les groupes sont équilibrés (Oberfeld & Franke, 2013), les résultats ont été interprétés avec prudence. Une analyse MLM a été effectué pour évaluer la robustesse de nos résultats.

Pour les modes de visualisation, les résultats ont révélé un effet principal significatif, $F(1, 6) = 36.071$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.857$. Les moyennes observées dans le Tableau 4.9 ont montré un temps de planification chirurgicale inférieur pour le mode de visualisation en RV ($M = 120,036$) par rapport à l'ordinateur ($M = 467.050$).

Tableau 4.9. Moyenne de temps de planification chirurgicale selon le mode de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Mode de visualisation	Marginal Mean (en seconde)	Lower	Upper	SE
Ordinateur	467.050	355.442	578.658	45.612
Réalité virtuelle (RV)	120.036	61.352	178.721	23.983

Les différents cas cliniques ont également un effet principal significatif sur le temps de planification chirurgicale, $F(5,30) = 5.328$, $p = 0.001$, $\eta^2_p = 0.470$. Ces résultats indiquent des

variations selon les cas cliniques. Le test post hoc avec correction de Holm a été effectué pour explorer les différences entre ces cas. Les résultats ont révélé que le cas clinique numéro 1 ($M = 385.200$) a un temps de planification significativement supérieure à celui du cas clinique numéro 5 ($M_{\text{diff}} = 157.444$, $p = 0.009$). Le Tableau 4.10 ci-dessous représente les temps de planification pour tous les cas cliniques.

Tableau 4.10. Moyenne de temps de planification des cas cliniques dans les deux modes de visualisation

		95% CI for Mean Difference		
Cas clinique	Marginal Mean (en seconde)	Lower	Upper	SE
Cas1	385.200	272.975	497.425	45.864
Cas2	313.444	237.080	389.808	31.208
Cas3	246.497	161.901	331.093	34.573
Cas4	257.731	192.985	322.477	26.460
Cas5	227.756	159.115	296.397	28.052
Cas6	330.631	271.840	389.422	24.027

Pour le facteur niveau d'expérience des neurochirurgiens, les résultats ont révélé une absence d'effet principal significatif, $F(1,6) = 0.424$, $p = 0.539$, $\eta^2_p = 0.066$. Cependant, la Figure 4.9 montre une tendance que les moyennes de temps de planification par les résidents ($M=308.002$, $SE = 31.410$, IC 95% [231.146, 384.859]) sont plus élevées que celles des seniors ($M = 279.084$, $SE = 31.410$, IC 95% [202.228, 355.941]).

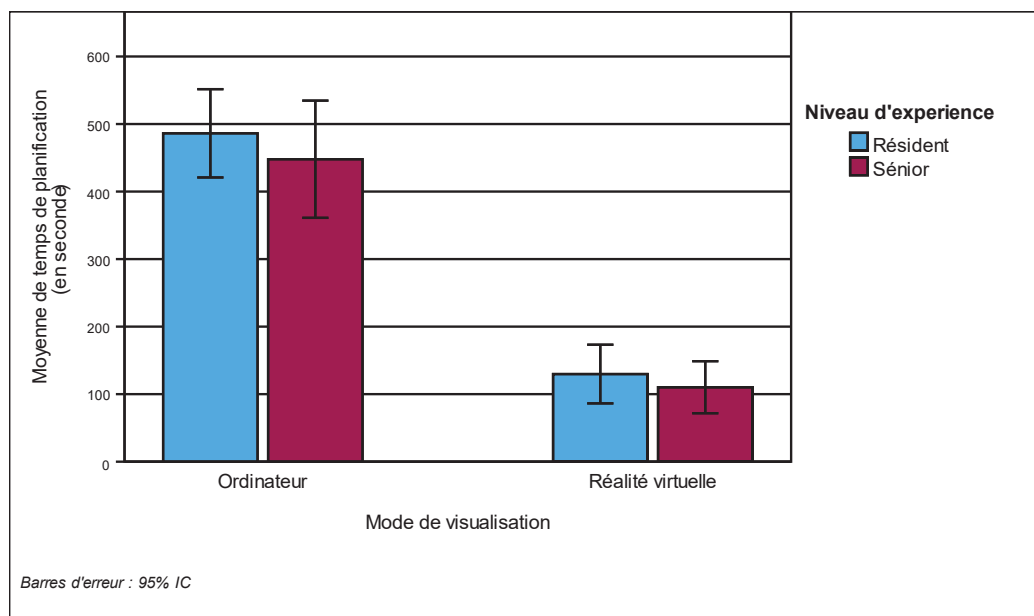


Figure 4.9. Temps de planification chirurgicale selon le mode de visualisation et selon le niveau d'expérience

4.6.2 Interaction entre les modes de visualisation, les cas cliniques et les niveaux d'expérience

L'interaction entre les modes de visualisation et les cas cliniques était significative, $F(5, 30) = 2.696$, $p = 0.040$, $\eta^2_p = 0.310$, indiquant que l'effet du mode de visualisation varie d'un cas clinique à un autre. Un test-t apparié a été réalisé pour comparer le temps de planification chirurgicale par les neurochirurgiens selon les deux modes de visualisation. Les résultats ont montré une différence significative pour tous les cas cliniques ($p < 0.05$). Le Tableau 4.11 suivant montre que les moyennes du temps de planification en RV sont significativement inférieures à celles de l'ordinateur pour tous les cas cliniques.

Tableau 4.11. Comparaison des temps de planification selon les modes de visualisation pour chaque cas clinique

			95% CI for Mean Difference		
Mode de visualisation	Cas clinique	Marginal Mean	Lower	Upper	SE
Cas1	Ordinateur	576.837	379.034	774.641	80.838
	RV	193.562	92.511	294.614	41.297
Cas2	Ordinateur	465.887	301.101	630.674	67.345
	RV	161.000	58.647	263.353	41.829
Cas3	Ordinateur	417.025	231.567	602.483	75.793
	RV	75.969	9.644	142.294	27.106
Cas4	Ordinateur	397.050	321.639	472.461	30.819
	RV	118.412	36.649	200.176	33.415
Cas5	Ordinateur	369.125	267.014	471.236	41.731
	RV	86.387	18.040	154.735	27.932
Cas6	Ordinateur	576.375	461.460	691.290	46.963
	RV	84.887	8.547	161.228	31.199

L'interaction entre les modes de visualisation et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(1, 6) = 0.027$, $p = 0.875$, $\eta^2_p = 0.004$. De même que l'interaction entre les cas cliniques et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(5, 30) = 1.809$, $p = 0.141$, $\eta^2_p = 0.232$. Enfin, l'interaction à trois voies entre les modes de visualisation, les cas cliniques, et les niveaux d'expérience des neurochirurgiens n'était pas significative, $F(5, 30) = 1.218$, $p = 0.325$, $\eta^2_p = 0.169$. L'absence de ces interactions évoque que l'effet des modes de visualisation et des cas cliniques sur le temps de planification chirurgicale est toujours maintenu pour tous les niveaux d'expérience des neurochirurgiens.

4.6.3 Estimation précise des effets du mode de visualisation

Afin de tenir compte de la violation des hypothèses de l'ANOVA-MR ainsi que de la variabilité entre les différents cas cliniques et entre les neurochirurgiens, nous avons fait également une

analyse MLM. Ce modèle permettait une meilleure estimation des effets fixes du mode de visualisation en considérant les effets aléatoires dus aux cas cliniques et aux neurochirurgiens.

Ce modèle a révélé un effet significatif du mode de visualisation sur le temps de planification chirurgicale, $F(1, 82) = 170.823$, $p < 0.001$. L'estimation de l'effet fixe du mode de visualisation montre que les neurochirurgiens ont mis beaucoup de temps pour faire la planification chirurgicale en utilisant l'ordinateur qu'en utilisant la RV (Estimate = 173.507, SE = 13.275, $p < 0.001$).

Les résultats nous ont permis de vérifier l'hypothèse 4 que le temps de planification chirurgicale est réduit avec le mode de visualisation en RV.

4.7 Rétroaction des participants

Nous avons demandé aux neurochirurgiens d'évaluer les deux modes de visualisation à l'aide du questionnaire « System Usability Scale » (Brooke, 1986). Ce questionnaire permet de mesurer l'utilisabilité des systèmes interactifs. Dans notre étude, nous avons utilisé la version française « F-SUS » (Gronier & Baudet, 2021). Les neurochirurgiens ont été invités à exprimer leur niveau d'accord ou de désaccord sur chaque énoncé du F-SUS en utilisant une échelle de Likert (1 = Pas du tout d'accord ; 5 = tout à fait d'accord).

Les résultats ont révélé un score moyen de 71.563 pour le mode de visualisation sur ordinateur, tandis que pour le mode de visualisation en RV, le score moyen était de 75.313.

Par la suite, une ANOVA-MR a été effectuée pour évaluer l'effet des modes de visualisation et du niveau d'expérience des neurochirurgiens sur la perception de l'utilisabilité (F-SUS). Les résultats ont montré que l'effet principal des modes de visualisation est non significatif, $F(1,6) = 0.797$, $p = 0.406$, $\eta^2_p = 0.117$. Cependant, presque la moitié des neurochirurgiens ont évalué l'utilisabilité de la RV avec un score F-SUS supérieur à 80 sur 100, ce qui témoigne une tendance vers une perception positive de son utilisabilité même en l'absence de l'effet

statistiquement significatif. Par ailleurs, le niveau d'expérience des neurochirurgiens n'a pas d'effet significatif également sur les scores F-SUS, $F(1,6) = 0.657$, $p = 0.449$.

Enfin, aucune interaction significative entre les modes de visualisation et les niveaux d'expérience n'a été observée, $F(1,6) = 1.085$, $p = 0.338$, $\eta^2_p = 0.153$.

Le Tableau 4.12 suivant représente les différents scores F-SUS des neurochirurgiens selon leur expérience et en fonction des modes de visualisation.

Tableau 4.12. Score du F-SUS entre les deux modes de visualisation

Participant	Niveau d'expérience	Ordinateur	Réalité virtuelle
1	Résident	67.5	75
2	Résident	75	82.5
3	Résident	52.5	45
4	Résident	67.5	92.5
5	Sénior	97.5	85
6	Sénior	72.5	70
7	Sénior	75	87.5
8	Sénior	65	65

Tous les résultats de notre étude ont été exposés. Dans le chapitre suivant, nous procéderons à l'analyse critique et à l'interprétation de ces résultats en tenant compte de nos hypothèses et tout en présentant les limites de notre étude.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 La quantité d'information anatomo-fonctionnelle perçue

Les résultats de notre étude confirmaient notre première hypothèse selon laquelle l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale améliore la perception des informations anatomo-fonctionnelles par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle sur ordinateur. Rappelons que les informations anatomo-fonctionnelles ont été conceptualisées dans l'ADT sous forme d'une matrice à deux dimensions. Cette matrice est composée par les niveaux NAH et NPH regroupant les informations anatomo-fonctionnelles (voir Tableau 3.1).

Au cours de nos analyses, nous avons constaté que les résidus de certaines variables ne suivaient pas une distribution normale, ce qui aurait pu affecter la validité des résultats de l'ANOVA-MR. Par conséquent, une analyse supplémentaire a été effectuée, notamment le MLM, reconnu pour sa robustesse face aux violations des hypothèses de normalité (Muhammad, 2023). Les résultats du MLM étaient en accord ceux de l'ANOVA-MR, indiquant que le mode de visualisation avait un effet significatif sur la perception des informations anatomo-fonctionnelles, avec les valeurs respectives de p à 0.011 et 0.014. Ces résultats mettaient en évidence l'efficacité de la RV par rapport à l'ordinateur dans la perception des informations anatomo-fonctionnelles.

Cette double approche permettait d'assurer la fiabilité de nos résultats concernant les différences observées entre la RV et l'ordinateur. Plus précisément, nous avons remarqué que la RV a permis de percevoir une plus grande quantité d'information anatomo-fonctionnelle par rapport à l'ordinateur et ceux dans tous les niveaux de NAH et NPH. La perception des neurochirurgiens était toujours améliorée par la RV indépendamment des variations des niveaux NAH et NPH. Cela confirme la supériorité de la RV en termes de visualisation des informations anatomo-fonctionnelle.

En outre, l'effet significatif du NAH indiquait que les neurochirurgiens percevaient de manière variable les informations anatomo-fonctionnelles. Rappelons que le niveau le plus élevé du NAH, notamment l'OF, englobe des informations telles que l'identification des structures anatomiques essentielles à la planification, l'identification des structures anatomiques traversées, la préservation des structures vitales et l'exérèse de la tumeur. Les résultats ont montré que l'OF a été supérieur face aux autres niveaux du NAH. Cette supériorité de l'OF suggère que les chirurgiens accordent une importance particulière aux objectifs de la planification chirurgicale, et que la RV pourrait faciliter cette focalisation en offrant une visualisation plus immersive et détaillée. Ce résultat peut être expliqué par le fait que ce niveau OF jouait un rôle central dans la perception et la prise de décision des neurochirurgiens au cours de la planification chirurgicale. De plus, la visualisation des images à travers la RV améliore la perception des informations nécessaire pour répondre aux objectifs de l'opération chirurgicale.

Par ailleurs, le score du troisième niveau de NAH, notamment le FoP était le plus élevé après l'OF avec le mode de visualisation RV. Le FoP inclut les informations telles que les structures anatomiques cachées, les obstacles, la détermination de la voie d'approche chirurgicale (le point de départ et le point d'arrivée), l'identification et la préservation des nerfs, des vaisseaux sanguins, la préservation de la fonction motrice et sensitive et enfin le volume de la tumeur à extraire. Le score élevé du FoP indique que les neurochirurgiens accordent une importance à la compréhension des détails anatomiques et fonctionnels nécessaire à l'intervention. De plus, ces informations sont essentielles pour la planification chirurgicale afin de minimiser les risques peropératoires et de garantir le succès de l'opération. La supériorité constante de la RV pour le FoP implique que les neurochirurgiens bénéficient particulièrement de cet outil lorsqu'ils traitent des détails anatomiques et fonctionnels complexes. En améliorant la perception de ces informations, la RV peut contribuer à une planification plus précise.

Finalement, nous avons observé un effet principal significatif des niveaux NPH ou concepts clés, indiquant que la perception des informations anatomo-fonctionnelles varie en fonction des concepts clés. Toutefois, la RV permettait une perception supérieure par rapport à

l'ordinateur face à cette variabilité des différents niveaux NPH. Rappelons que les différents niveaux NPH incluent « les structures identifiées », « les structures traversées », « les structures préservées » et « la tumeur cible ». Les résultats ont montré que les informations contenues dans le concept clé « structures traversées » avaient été perçues de manière significativement supérieure par rapport aux autres concepts. Cette différence met en évidence l'importance particulière accordée par les neurochirurgiens aux structures traversées lors de la planification chirurgicale. De plus, le fait que les structures traversées étaient mieux perçues en RV suggère que ce dernier offre un avantage majeur pour l'immersion et la visualisation en profondeur des structures anatomiques. La RV permet une exploration tridimensionnelle interactive, facilitant la compréhension des relations spatiales complexes entre les différentes structures traversées pour atteindre la tumeur. D'autres études ont trouvé le même résultat, stipulant que la RV a permis de comprendre les relations spatiales entre la tumeur et les structures neurovasculaires environnantes (González-López et al., 2024).

Cependant, bien que la RV ait toujours obtenu un score supérieur à l'ordinateur dans notre étude, les informations anatomo-fonctionnelles contenues dans le composant « structures identifiées » du NPH n'avait pas de différence significative. Cela peut s'expliquer par le fait que les structures identifiées sont souvent des structures superficielles ou bien connues des chirurgiens (structures osseuses, structures musculaires et les gros vaisseaux sanguins), pour lesquelles la visualisation sur ordinateur est déjà efficace.

Dans les sections suivantes, nous allons discuter en détail les deux concepts « structures identifiées » et « structures traversées ».

5.2 La quantité de structures anatomiques identifiées

Après une analyse globale de la perception des informations anatomo-fonctionnelle, nous avons analysé en profondeur deux des 4 composants du NPH, en utilisant six cas cliniques différents. Les résultats confirmaient notre deuxième hypothèse que la RV a un impact sur l'identification des structures anatomiques essentielles pour la planification chirurgicale.

Cette confirmation a été tirée après avoir utilisé deux méthodes statistiques : l'ANOVA-MR et le MLM

En premier lieu, les résultats de l'ANOVA-MR ont révélé que le mode de visualisation n'a pas eu d'effet significatif sur la quantité de structures anatomiques identifiées par les neurochirurgiens, bien que la RV ait permis d'identifier un nombre plus élevé de structures anatomiques par rapport à l'ordinateur. Ces résultats pourraient s'expliquer par les limites de l'ANOVA-MR, notamment son incapacité à prendre en compte les variations spécifiques entre les différents cas cliniques utilisés dans notre étude. En effet, chaque cas clinique présentait des caractéristiques anatomiques uniques, telles que la complexité des relations spatiales entre les structures anatomiques, la disposition de la tumeur et l'étendue de l'envahissement de la tumeur. Ces variabilités des cas cliniques pouvaient avoir un impact direct sur la performance des neurochirurgiens dans l'identification des structures anatomiques essentielles à la planification. Cependant, l'ANOVA-MR ne permet pas d'ajuster les résultats tout en considérant les différences spécifiques non incluses dans le modèle statistique. En outre, l'interaction significative entre les modes de visualisation et les cas cliniques suggère que l'effet des modes de visualisation varie selon les cas cliniques. En particulier, nous avons observé que seul le cas clinique numéro 5 a montré une différence significative entre l'ordinateur et la RV, ce qui pourrait s'expliquer par la haute résolution du TDM pour ce cas. En effet, avec une épaisseur de coupe à 1 mm, le TDM du cas 5 a offert une meilleure résolution, facilitant ainsi la perception des structures anatomiques surtout en RV. Comme l'a souligné González-López et al., (2024), une épaisseur de coupe inférieure à 2 mm est importante pour obtenir une reconstruction 3D précise, ce qui corrobore nos observations pour ce cas spécifique. Cependant, bien que ces résultats aient apporté des éléments intéressants, une analyse plus globale était nécessaire pour mieux comprendre l'effet général du mode de visualisation. C'est pourquoi le MLM a été utilisé pour prendre en compte la variabilité des cas cliniques et évaluer l'effet général de la RV par rapport à l'ordinateur.

En second lieu, nous avons effectué une analyse avec le MLM qui a révélé un effet significatif des modes de visualisation. Les résultats ont montré que la RV permettait aux neurochirurgiens

d'identifier de nombreuses structures anatomiques essentielles pour la planification. En effet, le MLM prenait en compte la variabilité entre les cas cliniques en les traitant comme des effets aléatoires. Par ailleurs, nous avons voulu démontrer que la RV avait un impact sur l'identification des structures anatomiques, peu importe les cas cliniques à traiter. De ce fait, le MLM a répondu à nos attentes en ajustant les résultats en fonction des spécificités de chaque cas clinique. Cet ajustement a permis de généraliser les conclusions à un éventail plus large de cas cliniques. Par ailleurs, nos résultats démontrent que les cas cliniques n'avaient pas d'effet principal significatif, indiquant que les performances des neurochirurgiens dans l'identification des structures anatomiques ne variaient pas d'un cas clinique à un autre. Ainsi, la RV avait toujours un impact supérieur à l'ordinateur indépendamment des spécificités des cas cliniques.

Finalement, nous avons voulu déterminer la similarité et la différence entre les structures anatomiques identifiées par les neurochirurgiens selon les modes de visualisation. La distance de Hamming, permettait de mesurer la différence en termes de présence ou absence de structures identifiées. La distance de Jaccard permettait de mesurer la similarité en termes de structures anatomiques en commun ou différentes dans les 2 modes de visualisation. Ces deux mesures offraient ainsi des perspectives complémentaires sur les différences observées entre l'ordinateur et la RV.

Nos résultats ont révélé d'une part que la distance de Hamming avait une médiane entre 0.157 et 0.271, indiquant peu de différence entre structures anatomiques identifiées par l'ordinateur et la RV. Plus précisément, des structures anatomiques supplémentaires ont été identifiées avec la RV qui ne sont pas repérées avec l'ordinateur. Cette différence, bien que modérée en termes de quantité met en avant la capacité de la RV à révéler des structures que les neurochirurgiens ne parvenaient pas à identifier avec l'ordinateur. D'autre part, la distance de Jaccard avait une médiane entre 0.390 et 0.604, indiquant une dissimilarité modérée entre les structures anatomiques identifiées par l'ordinateur et la RV. Plus précisément, les neurochirurgiens ont pu identifier des structures anatomiques non similaires à ceux identifiés par ordinateur. Ces structures peuvent être des structures critiques ou difficiles à percevoir à l'ordinateur.

La RV permet donc de découvrir des structures que l'ordinateur peut ne pas montrer ou montre de façon moins précise.

Les deux mesures convergent donc pour démontrer l'impact positif de la RV concernant la quantité et la qualité des structures anatomiques identifiées essentielles pour la planification chirurgicale.

5.3 La voie d'approche chirurgicale

L'analyse des structures anatomiques traversées permet de déterminer le choix de la voie d'approche chirurgicale lors de la planification chirurgicale. Les résultats confirmaient notre troisième hypothèse que la RV a un impact sur le choix de la voie d'approche chirurgicale en fonction des structures anatomiques traversées. Cette confirmation a été tirée après avoir utilisé deux méthodes statistiques : l'ANOVA-MR et le MLM.

Selon les résultats de l'ANOVA-MR, les modes de visualisation avaient un effet significatif sur le nombre de structures anatomiques traversées sélectionnées par les neurochirurgiens. Cependant, en raison de certaines violations des hypothèses de normalité et de l'homogénéité des variances dans certains cas cliniques, un MLM a été utilisé pour évaluer la robustesse de nos résultats. Le MLM a révélé que les modes de visualisation avaient un effet significatif, et la RV a permis de visualiser plus de structures anatomiques traversées par rapport à l'ordinateur. Cela montre que les résultats peuvent être généralisés indépendamment des différences spécifiques des cas cliniques.

L'efficacité supérieure de la RV par rapport à la vision en 3D sur ordinateur pourrait s'expliquer par ses capacités à reproduire l'effet de parallaxe et la vision stéréoscopique dynamique. Ces deux mécanismes jouent un rôle important dans la compréhension des relations anatomiques afin de planifier la voie d'approche chirurgicale. L'effet de parallaxe, par exemple, permet aux neurochirurgiens d'avoir différentes perspectives lorsqu'ils bougent la tête avec le casque de RV, offrant ainsi une perception plus fine des structures à différentes profondeurs.

Quant à la vision stéréoscopique dynamique, elle permet aux neurochirurgiens d'avoir une image légèrement différente à chaque œil à travers le casque de RV, ce qui permet d'avoir une perception précise des structures anatomiques à traverser et de leurs relations dans l'espace.

La similarité et la différence entre les structures traversées indiquées dans le CRPO et celles sélectionnées par les neurochirurgiens ont été analysées. Cette comparaison est importante, car le CRPO a été considéré comme une référence pour les structures effectivement traversées durant l'intervention chirurgicale. Les résultats ont montré une différence significative des structures anatomiques traversées entre les modes de visualisation et le CRPO, avec une corrélation modérée des deux modes de visualisation. La RV a permis d'identifier les structures traversées avec une différence minime au CRPO (distance Hamming = 0.138), tandis que l'ordinateur a montré une différence légèrement supérieure (distance Hamming = 0.179). Cette corrélation modérée signifie que les deux modes de visualisation ont permis de visualiser des structures similaires au CRPO dans une certaine mesure, mais la RV a permis une identification plus fidèle au CRPO. Cela est crucial pour la planification chirurgicale, car la capacité à reproduire avec précision les structures traversées, telles que rapportées dans le CRPO, permet une meilleure préparation et une réduction des risques d'erreurs pendant l'intervention.

Concernant la distance de Jaccard, les résultats ont révélé une différence significative avec une corrélation très forte, montrant une divergence entre l'ordinateur et la RV. La RV a permis d'identifier des structures traversées présentant une similarité modérée par rapport au CRPO (distance de Jaccard = 0.495), tandis que l'ordinateur a permis d'identifier des structures traversées très différentes au CRPO (distance de Jaccard = 0.799). La disparité entre ces deux modes de visualisation reflète l'impact de la vision stéréoscopique et de la perception immersive offertes par la RV, permettant aux neurochirurgiens de visualiser de manière précise et exhaustive les structures anatomiques à traverser.

Par ailleurs, nous avons également effectué une comparaison des différences entre les structures anatomiques traversées sélectionnées en utilisant l'ordinateur et la RV. Les résultats

ont montré des écarts significatifs entre les deux modes de visualisation. La distance de Hamming a révélé des variations importantes entre les cas cliniques avec des valeurs médianes allant de 0.144 et 0.314. Ces résultats indiquent que les structures traversées sélectionnées par l'ordinateur diffèrent modérément de celles sélectionnées par la RV. Ensuite, la distance de Jaccard, a révélé des variations importantes entre les cas cliniques avec des valeurs médianes allant de 0.733 et 0.955, indiquant une dissimilarité très marquée entre les structures traversées sélectionnées par l'ordinateur et par la RV.

En somme, la RV a permis de mettre en évidence des structures traversées supplémentaires et/ou différentes par rapport à l'ordinateur, ce qui confirme et renforce les résultats antérieurs obtenus par la comparaison avec le CRPO. Cela démontre que la RV, permet non seulement une meilleure approximation des structures traversées par rapport au CRPO, mais elle permet également d'identifier des structures supplémentaires que l'ordinateur ne parvient pas à détecter. Ce gain en précision est crucial pour la planification chirurgicale, notamment pour la détermination de la voie d'approche chirurgicale.

5.4 Le temps de planification chirurgicale

Les résultats confirmaient notre quatrième hypothèse que le temps requis pour effectuer une planification chirurgicale est réduit avec la RV par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle. Cette conclusion a été tirée après avoir utilisé deux méthodes statistiques : l'ANOVA-MR et le MLM.

Selon les résultats de l'ANOVA-MR, les modes de visualisation avaient un effet significatif sur le temps de planification chirurgicale ($p < 0.001$). Cependant, en raison de certaines violations des hypothèses de l'homogénéité des variances dans certains cas cliniques, un MLM a été utilisé pour évaluer la robustesse de nos résultats. Le MLM a révélé que les modes de visualisation avaient un effet significatif ($p < 0.001$). La RV se distingue par un temps de planification plus court (120 secondes), par rapport à l'ordinateur (467 secondes). De plus,

la RV continue à offrir un temps de planification réduite par rapport à l'ordinateur, même en tenant compte des variations spécifiques des cas cliniques.

Ces résultats soulignent une efficacité accrue de la RV dans l'optimisation du temps de planification chirurgicale. Nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature, notamment celle de Greuter et al., (2021), qui ont également montré une réduction significative du temps nécessaire pour identifier une structure anatomique lors de l'utilisation de la RV. Cela pourrait s'expliquer par la capacité de la RV à effectuer une exploration plus rapide et intuitive des structures anatomiques, et à visualiser les structures en profondeur de manière plus fluide et immédiate. En outre, la RV réduit la nécessité d'effectuer de multiples manipulations souvent requises avec une image en 3D sur ordinateur pour obtenir des perspectives différentes. Par conséquent, avec la RV, les neurochirurgiens sont en mesure de prendre une décision rapide et efficace lors de la planification chirurgicale.

5.5 Le niveau d'expériences des neurochirurgiens

Les résultats de l'étude n'ont pas montré d'effet principal significatif du niveau d'expérience des neurochirurgiens sur leurs performances en termes de sélection de structures anatomiques identifiées, traversées ainsi qu'en termes de temps de planification selon les deux modes de visualisation. Toutefois, il est important de souligner une tendance qui indique que les neurochirurgiens résidents ont identifié un plus grand nombre de structures anatomiques que les neurochirurgiens seniors, bien que cette différence ne soit pas significative du point de vue statistique.

Bien que les résidents aient eu tendance à identifier davantage de structures anatomiques avec les deux modes de visualisation, cela ne reflète pas nécessairement une performance supérieure en termes de planification chirurgicale. La tâche dans notre étude visait à sélectionner les structures anatomiques essentielles à la planification chirurgicale. De ce fait, les seniors avec leurs années d'expérience sont mieux équipés pour faire une sélection précise des structures anatomiques véritablement pertinentes. En parallèle, même si les seniors ont eu tendance à

identifier moins de structures que les résidents, les structures identifiées en RV restent supérieures à celles identifiées par ordinateur. Ainsi, la RV semble permettre aux séniors de maintenir une planification précise, même avec une quantité moindre de structures identifiées.

La RV a donc permis aux neurochirurgiens, quel que soit leur niveau d'expérience, de naviguer efficacement dans l'environnement immersif. Cependant, l'absence d'interaction significative entre les deux modes de visualisation et le niveau d'expérience suggère que la RV n'a pas offert d'avantage particulier aux résidents par rapport aux séniors. Ces résultats pourraient être liés à la petite taille de notre échantillon, ce qui limite la portée de ces conclusions. Des études futures avec un échantillon plus large seraient nécessaires pour mieux explorer ces interactions.

Par ailleurs, concernant le temps de planification chirurgicale, les résidents ont montré une tendance à prendre plus de temps que les séniors bien que cette différence ne soit significative. Cela peut s'expliquer par une prudence de la part des résidents, prenant plus de temps pour explorer et vérifier leur compréhension des structures anatomiques. Quant aux séniors, en ayant une meilleure maîtrise de la planification, ont pu naviguer plus rapidement, focalisant leur attention sur les éléments clés de la planification chirurgicale. Cependant, aucune interaction significative entre les modes de visualisation et le niveau d'expérience n'a été observée. La RV permettait de faire une planification rapidement par rapport à l'ordinateur indépendamment de niveau d'expérience.

En somme, l'hypothèse 5 selon laquelle la RV bénéficierait davantage aux résidents qu'aux séniors est rejetée. La RV a été bénéfique pour les deux groupes, mais elle ne favorise pas de manière inégale les résidents par rapport aux séniors. Une manière de vérifier cette hypothèse serait d'envisager une étude avec un échantillon plus large ou utiliser des méthodes d'évaluation de la RV plus avancées.

5.6 La rétroaction des neurochirurgiens

Les résultats du questionnaire F-SUS ont montré que les neurochirurgiens ont perçu les deux modes de visualisation comme ayant une bonne utilisabilité pour la planification chirurgicale. Le score moyen de 71.563 pour l'ordinateur et 75.313 pour la RV indiquait une perception positive de l'utilisabilité des deux systèmes. Cependant, nos analyses statistiques n'ont pas révélé de différence significative entre les deux modes de visualisation en termes d'utilisabilité ($p = 0.406$). Par conséquent, l'hypothèse 6 selon laquelle les neurochirurgiens ont une préférence pour l'utilisation de la RV dans la planification chirurgicale par rapport à la méthode de visualisation conventionnelle est rejetée.

Toutefois, la RV a obtenu un score légèrement supérieur, même si la différence n'est pas significative. Près de la moitié des participants ont attribué un score supérieur à 80 sur 100 pour l'utilisabilité de la RV. Cela suggère que certains neurochirurgiens ont trouvé la RV plus intuitive et immersive, facilitant ainsi la visualisation et l'interaction avec les structures anatomiques en 3D. Cependant, cette tendance n'est pas significative pour généraliser que la RV est préférée à l'ordinateur. Néanmoins, la perception globale montre que les deux modes de visualisation sont jugés utilisables, ce qui est positif pour l'intégration de la RV dans la pratique chirurgicale surtout pour la planification chirurgicale.

Une limite importante à souligner est que le F-SUS est un questionnaire général d'évaluation de l'utilisabilité, qui n'est pas spécifiquement conçu pour la spécificité de notre étude, notamment les tâches cliniques d'une planification chirurgicale. Pour obtenir des résultats précis, il serait pertinent de développer un questionnaire adapté en prenant compte la facilité d'interaction avec les structures anatomiques, la perception de la profondeur et la précision de la manipulation.

CONCLUSION

L'objectif principal de la présente recherche est d'évaluer l'utilisation de la RV en tant qu'outil de planification chirurgicale pour les tumeurs de la colonne vertébrale, en l'occurrence sur l'identification des structures anatomiques et sur le choix de la voie d'approche chirurgicale. Afin de réaliser cet objectif, une méthode se basant sur l'ADT en neurochirurgie a été utilisée. Par la suite, l'ADT a été adaptée pour la colonne vertébrale aboutissant à l'élaboration d'une échelle d'évaluation. Cette échelle a permis de comparer objectivement la RV avec la visualisation en 2D et 3D sur ordinateur pour mesurer la perception des informations anatomo-fonctionnelles véhiculées par les images médicales.

Les résultats de cette étude montrent que la RV offre des avantages significatifs par rapport au mode de visualisation conventionnelle sur ordinateur, notamment l'amélioration de la perception des informations anatomo-fonctionnelles des images médicales. De plus la RV permet d'identifier un grand nombre de structures anatomiques essentielles à la planification chirurgicale en un temps réduit, grâce à sa capacité immersive. Ainsi, les neurochirurgiens peuvent bénéficier d'une vision plus précise et exhaustive facilitant le choix de la voie d'approche chirurgicale lors de la planification préopératoire. En outre, les résultats montrent également que la RV présente un potentiel prometteur pour tous les neurochirurgiens pour faire la planification chirurgicale, quel que soit leur niveau d'expérience.

Toutefois, certaines limites doivent être à souligner, en particulier la taille relativement petite de l'échantillon dans cette étude. Bien que les conclusions soient prometteuses, des études à plus grandes échelles et multicentriques sont nécessaires afin d'obtenir des résultats plus généralisables à d'autres contextes de planification chirurgicale. En outre, bien que cette étude ait pris en compte certains aspects cognitifs à travers l'ADT lors de l'évaluation de l'utilisation de la RV, des futures recherches pourraient approfondir l'impact de la RV sur la charge cognitive et sur la prise de décision dans des contextes d'utilisation prolongée et répétée. Cela permettrait d'optimiser l'intégration de la RV dans la pratique clinique.

ANNEXE I

STRUCTURES ANATOMIQUES IDENTIFIEES

Tableau-A I-1 Liste des structures anatomiques identifiées
à sélectionner par les participants

STRUCTURE ANATOMIQUE	CODAGE
Corps vertébral	ST1
Disques intervertébraux	ST2
Processus épineux	ST3
Processus transverse	ST4
Canal rachidien	ST5
Lames vertébrales	ST6
Pédicules vertébraux	ST7
Moelle épinière	ST8
Tumeur	ST9
Artères vertébrales	ST10
Artères segmentaires	ST11
Artère carotide commune	ST12
Artère carotide externe	ST13
Artère carotide interne	ST14
Veines épidurales	ST15
Plexus veineux vertébrale	ST16
Veine jugulaire interne	ST17
Veine jugulaire externe	ST18
Nerfs spinaux	ST19
Racines nerveuses dorsales et ventrales	ST20
Muscles paraspinaux	ST21
Muscles interépineux	ST22
Muscle Longus colli	ST23
Muscle psoas	ST24
Muscle Sterno-cléido-mastoïdien	ST25
Muscle grand dorsal	ST26
Ligament jaune	ST27
Ligament interépineux	ST28
Ligament longitudinal antérieur	ST29
Ligament longitudinal postérieur	ST30
Ligament supra-épineux	ST31
Ligament intertransversaires	ST32
Peau	ST33
Fascia	ST34
Platysma	ST35

ANNEXE II

QUESTIONNAIRE POST EXPERIMENTATION (QPoE)

Cette annexe présente le QPoE (Tableau-A II-1) utilisé à la fin de chaque phase de l'expérimentation. Avant de répondre à ce questionnaire, les participants devaient lire et suivre les instructions suivantes :

« Évaluer le mode de visualisation d'image proposée en fonction de la facilité avec laquelle vous pouvez accéder aux informations décrites ci-dessous. Pour ce faire, cochez la case correspondante selon l'échelle d'évaluation suivante :

- Directement (D), signifie que l'information est directement visible sur l'image
- Indirectement (I), signifie que l'information n'est pas directement visible, mais peut être déduit à partir de l'image
- Non (N), signifie que l'information n'est pas disponible sur l'image
- Ne sais pas (NP), signifie que vous n'avez pas assez d'information sur l'image pour répondre »

Tableau-A II-1 Questionnaire QPoE utilisé à la fin de chaque phase de l'expérimentation

Identification des structures anatomiques et leurs relations spatiales (NPH « structures identifiées »)					
NAH	Le mode de visualisation d'image proposé vous a montré :	D	I	N	NP
OF	Les structures anatomiques essentielles à la planification				
FoP	Les structures vasculaires				
FoP	Les structures nerveuses				
FoP	Les structures graisseuses				
FoP	Les structures tissulaires				
FoP	Les structures musculaires				

FoP	Les structures ligamentaires				
FoP	Les structures osseuses				
FoP	L'artère vertébrale				
FoP	L'artère carotide commune				
FoP	L'artère carotide interne				
FoP	La veine jugulaire interne				
FoP	L'aorte				
FoP	Les racines nerveuses spinales				
FoP	La moelle épinière				
FoP	Les plexus nerveux				
FoP	Les noms des structures anatomiques				
FoP	Les limites entre les structures anatomiques				
P	Les structures anatomiques cachées ou difficile d'accès au cours de l'opération				
P	L'impact de la structure pathologique sur la colonne vertébrale et/ou les autres structures voisines (compression, hernie...)				
P	La position de la colonne vertébrale par rapport au chirurgien				
P	La position de la colonne vertébrale par rapport aux instruments tenus par le chirurgien				
P	La position de la colonne vertébrale par rapport au microscope optique				
P	Les signes neurologiques du patient				
P	Les conditions d'acquisition des images				
FA	Le degré de certitude de l'information présentée par rapport à la réalité (ex : 80% de chance que la lésion soit un schwannome)				

FA	Le degré de précision de l'information présentée par rapport à la réalité (niveau de détail de déformation de l'information, résolution de l'image...)				
FA	Le degré d'exhaustivité de l'information présentée par rapport à la réalité				
FA	Les types d'instruments chirurgicaux nécessaires pendant l'opération (procédures spéciales d'utilisation, instruments spécifiques...)				
FP	La forme des structures anatomiques				
FP	La densité des structures anatomiques (masse par unité de volume)				
FP	L'adhérence des structures anatomiques avec les structures voisines				
FP	La couleur actuelle de la structure anatomique				
FP	La taille de la structure anatomique				
FP	Le volume de la structure anatomique				
Voies d'approche chirurgicale (NPH « structures traversées »)					
<i>NAH</i>	Le mode de visualisation d'image proposé vous a montré :	D	I	N	NP
OF	Les structures anatomiques traversées pour atteindre la tumeur				
FA	Les trajectoires possibles pour atteindre la tumeur				
FA	Le compromis entre l'exploration de l'environnement pour identifier et mettre en place les points de repères d'une part, et la prise de risque associée à cette exploration d'autre part				
FA	Le compromis entre la ligne de trajet et les risques associées avec les structures anatomiques traversées par cette ligne				
P	La distance entre la tumeur (point cible) et l'incision (point d'entrée)				
P	Les modifications de trajectoire pour atteindre la tumeur				
FoP	Les obstacles (les structures anatomiques critiques) le long de la trajectoire				
FoP	La mise en place du point d'entrée				

FoP	La mise en place du point cible sur la tumeur				
Structures anatomiques à préserver ou à contourner (NPH « structures préservées »)					
NAH	Le mode de visualisation d'image proposé vous a montré :	D	I	N	NP
OF	La préservation des structures anatomiques importantes et vitales				
FA	Les stratégies pour éviter les structures critiques				
FA	Les risques vitaux encourus par le patient				
FA	Les risques fonctionnels encourus par le patient				
P	Les conditions techniques de préservation des structures critiques (cotons...)				
FoP	Les vaisseaux à préserver au cours de l'opération				
FoP	Les nerfs à préserver au cours de l'opération				
FoP	La stabilité de la colonne vertébrale au cours de l'opération				
FoP	La fonction motrice à préserver pendant l'opération				
FoP	La fonction sensitive à préserver pendant l'opération				
Exérèse de la tumeur (NPH « cible à extraire »)					
NAH	Le mode de visualisation d'image proposé vous a montré :	D	I	N	NP
OF	La tumeur à enlever				
FA	Les stratégies d'exérèse à réaliser				
FA	Le compromis entre l'exérèse complète de la tumeur et les risques associées à prendre				
P	Les circonstances possibles où l'exérèse de la tumeur est possible				
P	Les circonstances ou modalités de remplacement du corps vertébrale (greffe osseuse, ciment...)				
P	Les circonstances ou modalités d'extraction du corps vertébrale				

P	Les circonstances ou modalités de reconstruction du corps vertébrale (pose de vis, de tige...)				
FoP	Volume de tumeur à extraire				
FoP	La marge d'exérèse tumorale				
FoP	Circonstance possible de stimulation médullaire				

ANNEXE III

QUESTIONNAIRE POST-CAS (QPC)

Post-questionnaire

Quelles sont les structures anatomiques qui vont être prises en compte pendant la planification chirurgicale, que vous avez identifiées ? (Sélection multiple possible)

Corps vertébral
Disques intervertébraux
Processus épineux
Processus transverse
Canal rachidien

Donnez les structures anatomiques que vous n'avez pas pu identifier mais qui sont importantes pour élaborer la planification chirurgicale

Quelle a été la voie d'approche chirurgicale choisie? (position du point d'entrée)

Antérieure cervicale

Quelles sont les structures anatomiques que vous planifiez de traverser pour atteindre la tumeur? (Sélection multiple possible)

C1
C2
C3
C4
C5
C6

Quelles sont les raisons qui vous a motivé à changer le trajet de la voie d'abord chirurgicale? (PC : point cible, PE : point d'entrée)

Je n'ai pas changé le trajet de la voie d'abord chirurgicale
La distance entre PC-PE est trop grande
La distance entre PC-PE est trop petite
Le trajet de la ligne PC-PE traverse un artère
Le trajet de la ligne PC-PE traverse un nerf
Le trajet de la ligne PC-PE traverse la moelle épinière

Décrivez de façon succincte les étapes chirurgicales pour réaliser la planification d'ablation de la tumeur.

Envoyer

Figure-A III-1 Présentation du questionnaire post-cas implémenté dans 3D Slicer pour la phase de planification conventionnelle

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allam, K. E., Abd Elkhalek, Y. I., Hassan, H. G. E. M. A., & Emara, M. A. E. (2022). Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in differentiation between different vertebral lesions using ADC mapping as a quantitative assessment tool. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 53(1), 155. <https://doi.org/10.1186/s43055-022-00827-8>
- Alsofy, S., Nakamura, M., Suleiman, A., Sakellaropoulou, I., Saravia, H., Shalamberidze, D., ... Stroop, R. (2021). Cerebral Anatomy Detection and Surgical Planning in Patients with Anterior Skull Base Meningiomas Using a Virtual Reality Technique. *Journal of Clinical Medicine*, 10, 681. <https://doi.org/10.3390/jcm10040681>
- Alsofy, S., Sakellaropoulou, I., & Stroop, R. (2020). Evaluation of Surgical Approaches for Tumor Resection in the Deep Infratentorial Region and Impact of Virtual Reality Technique for the Surgical Planning and Strategy. *The Journal of craniofacial surgery, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000006525>
- Alsofy, S. Z., Nakamura, M., Ewelt, C., Kafchitsas, K., Lewitz, M., Schipmann, S., ... Stroop, R. (2021). Retrospective Comparison of Minimally Invasive and Open Monosegmental Lumbar Fusion, and Impact of Virtual Reality on Surgical Planning and Strategy. *Journal of Neurological Surgery Part A: Central European Neurosurgery*, 82(5), 399-409. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1719099>
- Amato, A. C. M., & Stolf, N. A. G. (2015). Anatomy of spinal blood supply. *Jornal Vascular Brasileiro*, 14, 248-252. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.0004>
- Aminoff, H., Meijer, S., Arnelo, U., & Groth, K. (2021). Modeling the Implementation Context of a Telemedicine Service: Work Domain Analysis in a Surgical Setting. *JMIR formative research*, 5(6), e26505. <https://doi.org/10.2196/26505>
- Atesok, K., Galos, D., Jazrawi, L., & Egol, K. (2015). Preoperative Planning in Orthopaedic Surgery Current Practice and Evolving Applications. *Bulletin of the Hospital for Joint Disease (2013)*, 73, 257-268.
- Bakhuis, W., Sadeghi, A. H., Moes, I., Maat, A. P. W. M., Siregar, S., Bogers, A. J. J. C., & Mahtab, E. A. F. (2023). Essential Surgical Plan Modifications After Virtual Reality Planning in 50 Consecutive Segmentectomies. *The Annals of Thoracic Surgery*, 115(5), 1247-1255. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2022.08.037>

- Bitar, R., Leung, G., Perng, R., Tadros, S., Moody, A. R., Sarrazin, J., ... Roberts, T. P. (2006). MR pulse sequences: what every radiologist wants to know but is afraid to ask. *Radiographics: A Review Publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 26(2), 513-537. <https://doi.org/10.1148/rg.262055063>
- Blohm, J. E., Salinas, P. A., Avila, M. J., Barber, S. R., Weinand, M. E., & Dumont, T. M. (2022). Three-Dimensional Printing in Neurosurgery Residency Training: A Systematic Review of the Literature. *World Neurosurgery*, 161, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.10.069>
- Bogduk, N. (2016). Chapter 32 - Functional anatomy of the spine. Dans J. C. Masdeu & R. G. González (Éds), *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 136, pp. 675-688). (S.l.) : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53486-6.00032-6>
- Bogomolova, K., Hierck, B. P., Looijen, A. E. M., Pilon, J. N. M., Putter, H., Wainman, B., ... Van Der Hage, J. A. (2021). Stereoscopic three-dimensional visualisation technology in anatomy learning: A meta-analysis. *Medical Education*, 55(3), 317-327. <https://doi.org/10.1111/medu.14352>
- Bredow, J., Boese, C. K., Werner, C. M. L., Siewe, J., Löhner, L., Zarghooni, K., ... Scheyerer, M. J. (2016). Predictive validity of preoperative CT scans and the risk of pedicle screw loosening in spinal surgery. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 136(8), 1063-1067. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2487-8>
- Brooke, J. (1986). SUS - A quick and dirty usability scale.
- Chen, P.-C., Chang, C.-C., Chen, H.-T., Lin, C.-Y., Ho, T.-Y., Chen, Y.-J., ... Hsu, H.-C. (2019). The Accuracy of 3D Printing Assistance in the Spinal Deformity Surgery. *BioMed Research International*, 2019, e7196528. <https://doi.org/10.1155/2019/7196528>
- Choi, D., Crockard, A., Bungert, C., Harms, J., Kawahara, N., Mazel, C., ... Tomita, K. (2010). Review of metastatic spine tumour classification and indications for surgery: the consensus statement of the Global Spine Tumour Study Group. *European Spine Journal*, 19(2), 215. <https://doi.org/10.1007/s00586-009-1252-x>
- DeSai, C., & Agarwal, A. (2024). Neuroanatomy, Spine. Dans *StatPearls*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing. Repéré à <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK526133/>
- Drappé, J. L., Anract, P., Rodallec, M. H., Larousserie, F., Feydy, A., Babinet, A., ... Guerini, H. (2008). Tumeurs spécifiques du rachis : aspects diagnostiques et thérapeutiques. Dans *Le rachis : pathologie discale, rachis neuroradiologique, rachis* (pp. 257-283). (S.l.) : SAURAMPS MEDICAL.

- Dubrana, F., Le Nen, D., Gunepin, F.-X., Lefèvre, C., Buisson, P., Guillemot, E., & Guyot, X. (2014). *Voies d'abord en chirurgie orthopédique* (Elsevier Masson). (S.l.) : (s.n.). Repéré à <https://www.vg-librairies.fr/specialites-medicales/2881-manuel-des-voies-dabord-en-chirurgie-orthopedique-et-traumatologique.html>
- Durrani, S., Onyedimma, C., Jarrah, R., Bhatti, A., Nathani, K. R., Bhandarkar, A. R., ... Bydon, M. (2022). The Virtual Vision of Neurosurgery: How Augmented Reality and Virtual Reality are Transforming the Neurosurgical Operating Room. *World Neurosurgery*, 168, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.10.002>
- Emilie, S., Zeller, V., Fautrel, B., & Aubry, A. (2016). Espondilodiscitis. *EMC - Tratado de Medicina*, 20, 1-10. [https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(16\)76385-9](https://doi.org/10.1016/S1636-5410(16)76385-9)
- Essert, C., & Joskowicz, L. (2020). Chapter 32 - Image-based surgery planning. Dans S. K. Zhou, D. Rueckert, & G. Fichtinger (Éds), *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention* (pp. 795-815). (S.l.) : Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816176-0.00037-5>
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.-C., Pujol, S., ... Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, 30(9), 1323-1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Fiani, B., De Stefano, F., Kondilis, A., Covarrubias, C., Reier, L., & Sarhadi, K. (2020). Virtual Reality in Neurosurgery: “Can You See It?”—A Review of the Current Applications and Future Potential. *World Neurosurgery*, 141, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.06.066>
- Fletcher, J., & Miskovic, D. (2021). Digital and 3D Printed Models for Surgical Planning. Dans S. Atallah (Éd.), *Digital Surgery* (pp. 95-110). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49100-0_8
- Gaillard, F. (2015). MRI sequences (overview) | Radiology Reference Article | Radiopaedia.org. *Radiopaedia*. <https://doi.org/10.53347/rID-37346>
- González-López, P., Kuptsov, A., Gómez-Revuelta, C., Fernández-Villa, J., Abarca-Olivas, J., Daniel, R. T., ... Nieto-Navarro, J. (2024). The Integration of 3D Virtual Reality and 3D Printing Technology as Innovative Approaches to Preoperative Planning in Neuro-Oncology. *Journal of Personalized Medicine*, 14(2), 187. <https://doi.org/10.3390/jpm14020187>
- Greuter, L., Rosa, A. D., Cattin, P., Croci, D. M., Soleman, J., & Guzman, R. (2021). Randomized study comparing 3D virtual reality and conventional 2D on-screen teaching of cerebrovascular anatomy. *Neurosurgical Focus*, 51(2), E18. <https://doi.org/10.3171/2021.5.FOCUS21212>

- Gronier, G., & Baudet, A. (2021). Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(16), 1571-1582. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828>
- Guerriero, L., Quero, G., Diana, M., Soler, L., Agnus, V., Marescaux, J., & Corcione, F. (2018). Virtual Reality Exploration and Planning for Precision Colorectal Surgery. *Diseases of the Colon and Rectum*, 61(6), 719-723. <https://doi.org/10.1097/DCR.0000000000001077>
- Gunal, V., Savardekar, A. R., Devi, B. I., & Bharath, R. D. (2018). Preoperative functional magnetic resonance imaging in patients undergoing surgery for tumors around left (dominant) inferior frontal gyrus region. *Surgical Neurology International*, 9, 126. https://doi.org/10.4103/sni.sni_414_17
- Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *The Bell System Technical Journal*, 29(2), 147-160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>
- Hattab, G., Hatzipanayioti, A., Klimova, A., Pfeiffer, M., Klausning, P., Breucha, M., ... Speidel, S. (2021). Investigating the utility of VR for spatial understanding in surgical planning: evaluation of head-mounted to desktop display. *Scientific Reports*, 11(1), 13440. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92536-x>
- Heinrich, F., Apilla, V., Lawonn, K., Hansen, C., Preim, B., & Meuschke, M. (2021). Estimating depth information of vascular models: A comparative user study between a virtual reality and a desktop application. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 98, 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.05.014>
- INRS. (s.d). Identifier risques liés à l'activité physique. Repéré à https://www.esst-inrs.fr/ressources/prap/02_identifier_risques_act_physique.pdf
- Jaccard, P. (1901). Distribution de la Flore Alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. *Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles*, 37, 241-72. <https://doi.org/10.5169/seals-266440>
- Jannin, P., Raimbault, M., Morandi, X., Riffaud, L., & Gibaud, B. (2003). Model of surgical procedures for multimodal image-guided neurosurgery. *Computer Aided Surgery: Official Journal of the International Society for Computer Aided Surgery*, 8(2), 98-106. <https://doi.org/10.3109/10929080309146044>
- Kaloostian, P. E., Zadnik, P. L., Etame, A. B., Vrionis, F. D., Gokaslan, Z. L., & Sciubba, D. M. (2014). Surgical Management of Primary and Metastatic Spinal Tumors. *Cancer Control*, 21(2), 133-139. <https://doi.org/10.1177/107327481402100205>

- Kaminski, L., & Lengelé, B. (2022). Anatomie radiologique et neuroanatomie du rachis. (S.l.) : service d'orthopédie et de traumatologie de l'appareil locomoteur des Cliniques universitaires Saint-Luc (Bruxelles). (Accepted: 2023-01-24T14:20:23Z). Repéré à <https://oer.uclouvain.be/jspui/handle/20.500.12279/848>
- Kikinis, R., & Pieper, S. (2011). 3D Slicer as a tool for interactive brain tumor segmentation. Dans *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 6982-6984). <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091765>
- Klein, J. P. (2015). A Practical Approach to Spine Imaging. *CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology*, 21(1), 36. <https://doi.org/10.1212/01.CON.0000461083.33500.ec>
- Knafo, S., Penet, N., Gaillard, S., & Parker, F. (2021). Cognitive versus virtual reality simulation for evaluation of technical skills in neurosurgery. *Neurosurgical Focus*, 51(2), E9. <https://doi.org/10.3171/2021.5.FOCUS201007>
- Kosterhon, M., Gutenberg, A., Kantelhardt, S. R., Conrad, J., Nimer Amr, A., Gawehn, J., & Giese, A. (2017). Three-dimensional Cross-Platform Planning for Complex Spinal Procedures. *Clinical Spine Surgery*, 30(7), E1000-E1009. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000477>
- Li, L., Yu, F., Shi, D., Shi, J., Tian, Z., Yang, J., ... Jiang, Q. (2017). Application of virtual reality technology in clinical medicine. *American Journal of Translational Research*, 9(9), 3867-3880.
- Little, A. S., & Wu, S. J. (2021). Cognitive bias and neurosurgical decision making. <https://doi.org/10.3171/2021.9.JNS212058>
- Liu, J., Li, X., Leng, X., Zhong, B., Liu, Y., & Liu, L. (2022). Effect of 3D Slicer Preoperative Planning and Intraoperative Guidance with Mobile Phone Virtual Reality Technology on Brain Glioma Surgery. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2022, 9627663. <https://doi.org/10.1155/2022/9627663>
- Luksanaprukha, P., Buchowski, J. M., Zebala, L. P., Kepler, C. K., Singhatanadgige, W., & Bumpass, D. B. (2017). Perioperative Complications of Spinal Metastases Surgery. *Clinical Spine Surgery*, 30(1), 4. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000000484>
- Lyuksemburg, V., Abou-Hanna, J., Marshall, J. S., Bramlet, M. T., Waltz, A. L., Pieta Keller, S. M., ... Orcutt, S. T. (2023). Virtual Reality for Preoperative Planning in Complex Surgical Oncology: A Single-Center Experience. *The Journal of Surgical Research*, 291, 546-556. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.07.001>
- Marieb, E. N., & Hoehn, K. (2010). *Anatomie et physiologie humaine* (8^e éd.). Paris : Nouveaux Horizons.

- McCloskey, K., Turlip, R., Ahmad, H. S., Ghenbot, Y. G., Chauhan, D., & Yoon, J. W. (2023). Virtual and Augmented Reality in Spine Surgery: A Systematic Review. *World Neurosurgery*, 173, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.02.068>
- Mikhail, M., Mithani, K., & Ibrahim, G. M. (2019). Presurgical and Intraoperative Augmented Reality in Neuro-Oncologic Surgery: Clinical Experiences and Limitations. *World Neurosurgery*, 128, 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.04.256>
- Miller, A. (2004). A work domain analysis framework for modelling intensive care unit patients. *Cognition, Technology & Work*, 6(4), 207-222. <https://doi.org/10.1007/s10111-004-0151-5>
- Mishra, R., Narayanan, M. D. K., Umana, G. E., Montemurro, N., Chaurasia, B., & Deora, H. (2022). Virtual Reality in Neurosurgery: Beyond Neurosurgical Planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1719. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031719>
- Mohme, M., Mende, K. C., Pantel, T., Viezens, L., Westphal, M., Eicker, S. O., ... Stangenberg, M. (2021). Intraoperative blood loss in oncological spine surgery. *Neurosurgical Focus*, 50(5), E14. <https://doi.org/10.3171/2021.2.FOCUS201117>
- Morineau, T., Morandi, X., Le Moëllic, N., & Jannin, P. (2013). A cognitive engineering framework for the specification of information requirements in medical imaging: application in image-guided neurosurgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 8(2), 291-300. <https://doi.org/10.1007/s11548-012-0781-7>
- Morineau, Thierry, Morandi, X., Le Moëllic, N., Diabira, S., Riffaud, L., Haegelen, C., ... Jannin, P. (2009). Decision Making During Preoperative Surgical Planning. *Human Factors*, 51(1), 67-77. <https://doi.org/10.1177/0018720809332847>
- Morris, J. M., Wentworth, A., Houdek, M. T., Karim, S. M., Clarke, M. J., Daniels, D. J., & Rose, P. S. (2023). The Role of 3D Printing in Treatment Planning of Spine and Sacral Tumors. *Neuroimaging Clinics of North America*, 33(3), 507-529. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2023.05.001>
- Muhammad, L. N. (2023). Guidelines for repeated measures statistical analysis approaches with basic science research considerations. *The Journal of Clinical Investigation*, 133(11). <https://doi.org/10.1172/JCI171058>
- Mussi, E., Mussa, F., Santarelli, C., Scagnet, M., Uccheddu, F., Furferi, R., ... Genitori, L. (2020). Current Practice in Preoperative Virtual and Physical Simulation in Neurosurgery. *Bioengineering*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7010007>

- Netter, F. H., & CO, J. S. &. (2019). *Atlas d'anatomie humaine*. (S.l.) : Elsevier Health Sciences. (Google-Books-ID: XKegDwAAQBAJ).
- Oberfeld, D., & Franke, T. (2013). Evaluating the robustness of repeated measures analyses: The case of small sample sizes and nonnormal data. *Behavior Research Methods*, 45(3), 792-812. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0281-2>
- Pieper, S., Halle, M., & Kikinis, R. (2004). 3D Slicer. Dans *2004 2nd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Nano to Macro (IEEE Cat No. 04EX821)* (pp. 632-635 Vol. 1). <https://doi.org/10.1109/ISBI.2004.1398617>
- Pipolo, D. O., Luzzi, S., Baldoncini, M., Di Pietrantonio, A., Brennan, W., Asmus, H., ... Campero, A. (2023). Virtual preoperative planning and 3D tumoral reconstruction with Horos open-source software. *Surgical Neurology International*, 14. https://doi.org/10.25259/SNI_1075_2022
- Presti, G. L., Carbone, M., Ciriaci, D., Aramini, D., Ferrari, M., & Ferrari, V. (2015). Assessment of DICOM Viewers Capable of Loading Patient-specific 3D Models Obtained by Different Segmentation Platforms in the Operating Room. *Journal of Digital Imaging*, 28(5), 518-527. <https://doi.org/10.1007/s10278-015-9786-4>
- Rasmussen, J. (1987). *Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering*. New York : North-Holland.
- Research, A. V. L. C. (2018, 30 mai). Vertèbre thoracique. *v.l.c. research - OPHYS*. Repéré à <https://blogglophys.wordpress.com/2018/05/30/vertebre-thoracique/>
- Roberts, S., Evans, H., Trivedi, J., & Menage, J. (2006). Histology and pathology of the human intervertebral disc. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 88 Suppl 2, 10-14. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.00019>
- SAURAMPS MEDICAL (Éd.). (2008). *Le rachis : pathologie discale, rachis neuroradiologique, rachis*. (S.l.) : (s.n.).
- Schlegel, L., Ho, M., Fields, J. M., Backlund, E., Pugliese, R., & Shine, K. M. (2022). Standardizing evaluation of patient-specific 3D printed models in surgical planning: development of a cross-disciplinary survey tool for physician and trainee feedback. *BMC Medical Education*, 22(1), 614. <https://doi.org/10.1186/s12909-022-03581-7>
- Sharma, R. (2023). Role of CT Scans in Preoperative Planning: Enhancing Surgical Precision. Repéré à <https://www.ganeshdiagnostic.com/blog/role-of-ct-scans-in-preoperative-planning-enhancing-surgical-precision>
- Soler, L. (2023). Anatomie virtuelle et augmentée pour la chirurgie. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 207(1), 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.07.030>

- Tanitame, N., Tanitame, K., & Awai, K. (2017). Clinical utility of optimized three-dimensional T1-, T2-, and T2*-weighted sequences in spinal magnetic resonance imaging. *Japanese Journal of Radiology*, 35(4), 135-144. <https://doi.org/10.1007/s11604-017-0621-3>
- Thawait, G. K., Chhabra, A., & Carrino, J. A. (2012). Spine Segmentation and Enumeration and Normal Variants. *Radiologic Clinics of North America*, 50(4), 587-598. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2012.04.003>
- Tokuhashi, Y., Uei, H., & Oshima, M. (2017). Classification and scoring systems for metastatic spine tumors: a literature review. *Spine Surgery and Related Research*, 1(2), 44-55. <https://doi.org/10.22603/ssrr.1.2016-0021>
- Tomita, K., Kawahara, N., Kobayashi, T., Yoshida, A., Murakami, H., & Akamaru, T. (2001). Surgical strategy for spinal metastases. *Spine*, 26(3), 298-306. <https://doi.org/10.1097/00007632-200102010-00016>
- Tucker, N., Sutton, B. P., Duncan, C., Lu, C., Koyejo, S., Tsung, A. J., ... Bramlet, M. T. (2022). Fully Automated Conversion Of Glioma Clinical MRI Scans Into A 3D Virtual Reality Model For Presurgical Planning. Dans *2022 Annual Modeling and Simulation Conference, ANNSIM 2022, July 18, 2022 - July 20, 2022* (pp. 392-403). San Diego, CA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.23919/ANNSIM55834.2022.9859317>
- Vayssiere, P., Constanthin, P. E., Herbelin, B., Blanke, O., Schaller, K., & Bijlenga, P. (2022). Application of virtual reality in neurosurgery: Patient missing. A systematic review. *Journal of Clinical Neuroscience*, 95, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2021.11.031>
- Wasserthal, J., Breit, H.-C., Meyer, M. T., Pradella, M., Hinck, D., Sauter, A. W., ... Segeroth, M. (2023). TotalSegmentator: Robust Segmentation of 104 Anatomic Structures in CT Images. *Radiology: Artificial Intelligence*, 5(5), e230024. <https://doi.org/10.1148/ryai.230024>
- Watson, M., & Sanderson, P. (1998). Work domain analysis for the evaluation of human interaction with anaesthesia alarm systems. Dans *Proceedings 1998 Australasian Computer Human Interaction Conference. OzCHI'98 (Cat. No.98EX234)* (pp. 228-235). <https://doi.org/10.1109/OZCHI.1998.732219>
- Weinstein, J. N., Rydevik, B. L., & Rauschnig, W. (1992). Anatomic and Technical Considerations of Pedicle Screw Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 284(284), 34-46.

- Welch, M. B., Brummett, C. M., Welch, T. D., Tremper, K. K., Shanks, A. M., Guglani, P., & Mashour, G. A. (2009). Perioperative peripheral nerve injuries: A retrospective study of 380,680 cases during a 10-year period at a single institution. *Anesthesiology*, *111*(3), 490-497. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181af61cb>
- Yan, C., Wu, T., Huang, K., He, J., Liu, H., Hong, Y., & Wang, B. (2021). The Application of Virtual Reality in Cervical Spinal Surgery: A Review. *World Neurosurgery*, *145*, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.09.040>
- Zhou, S. H., McCarthy, I. D., McGregor, A. H., Coombs, R. R., & Hughes, S. P. (2000). Geometrical dimensions of the lower lumbar vertebrae--analysis of data from digitised CT images. *European spine journal*, *9*(3), 242-248. <https://doi.org/10.1007/s005860000140>