



كلية الطب
والصيدلة - مراكش
FACULTÉ DE MÉDECINE
ET DE PHARMACIE - MARRAKECH

Année 2020

Thèse N°109

**L'utilité de l'échographie peropératoire en
neurochirurgie. Expérience préliminaire du service de
neurochirurgie de l'hôpital Errazi et revue
de la littérature**

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 22 /07 /2020

PAR

Mme. Sara HADDOUGA

Né le 29/06/1994 à marrakech

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS

Echographie peropératoire – neurochirurgie – tumeur cérébrale – tumeur spinale

JURY

M.	A. RAJI Professeur d'ORL	PRESIDENT
M.	S. AIT BENALI Professeur de Neurochirurgie	RAPPORTEUR
M.	H. GHANNANE. Professeur de Neurochirurgie	} JUGES
Mme.	M.Ouali Idrissi Professeur de Radiologie	



فَتَبَسَّ ضَاحِكًا مِّن قَوْلِهَا وَقَالَ

رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ

الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ

وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ

وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ

النمل : ١٩

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Serment d'Hippocrate

Au moment d'être admis à devenir membre de la profession médicale, je m'engage solennellement à consacrer ma vie au service de l'humanité.

Je traiterai mes maîtres avec le respect et la reconnaissance qui leur sont dus.

Je pratiquerai ma profession avec conscience et dignité. La santé de mes malades sera mon premier but.

Je ne trahirai pas les secrets qui me seront confiés.

Je maintiendrai par tous les moyens en mon pouvoir l'honneur et les nobles traditions de la profession médicale.

Les médecins seront mes frères.

Aucune considération de religion, de nationalité, de race, aucune considération politique et sociale, ne s'interposera entre mon devoir et mon patient.

Je maintiendrai strictement le respect de la vie humaine dès sa conception.

Même sous la menace, je n'userai pas mes connaissances médicales d'une façon contraire aux lois de l'humanité.

Je m'y engage librement et sur mon honneur.

Déclaration Genève, 1948



LISTE DES PROFESSEURS



UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
MARRAKECH

Doyens Honoraires

: Pr. Badie Azzaman MEHADJI

: Pr. Abdelhaq ALAOUI YAZIDI

ADMINISTRATION

Doyen

: Pr. Mohammed BOUSKRAOUI

Vice doyen à la Recherche et la Coopération

: Pr. Mohamed AMINE

Vice doyen aux Affaires Pédagogiques

: Pr. Redouane EL FEZZAZI

Secrétaire Générale

: Mr. Azzeddine EL HOUDAIGUI

Professeurs de l'enseignement supérieur

Nom et Prénom	Spécialité	Nom et Prénom	Spécialité
ABKARI Imad	Traumato- orthopédie	FAKHIR Bouchra	Gynécologie- obstétrique
ABOU EL HASSAN Taoufik	Anesthésie- réanimation	FINECH Benasser	Chirurgie - générale
ABOUCHADI Abdeljalil	Stomatologie et chir maxillo faciale	FOURAJI Karima	Chirurgie pédiatrique
ABOULFALAH Abderrahim	Gynécologie- obstétrique	GHANNANE Houssine	Neurochirurgie
ABOUSSAIR Nisrine	Génétique	GHOUNDALE Omar	Urologie
ADALI Imane	Psychiatrie	HACHIMI Abdelhamid	Réanimation médicale
ADERDOUR Lahcen	Oto- rhino- laryngologie	HAJJI Ibtissam	Ophtalmologie
ADMOU Brahim	Immunologie	HAROU Karam	Gynécologie- obstétrique
AGHOUTANE EI Mouhtadi	Chirurgie pédiatrique	HOCAR Ouafa	Dermatologie
AIT AMEUR Mustapha	Hématologie Biologique	JALAL Hicham	Radiologie
AIT BENALI Said	Neurochirurgie	KAMILI EI Ouafi EI Aouni	Chirurgie pédiatrique
AIT BENKADDOUR Yassir	Gynécologie- obstétrique	KHALLOUKI Mohammed	Anesthésie- réanimation
AIT-SAB Imane	Pédiatrie	KHATOURI Ali	Cardiologie
AKHDARI Nadia	Dermatologie	KHOUCHANI Mouna	Radiothérapie
ALAOUI Mustapha	Chirurgie- vasculaire péripherique	KISSANI Najib	Neurologie
AMAL Said	Dermatologie	KOULALI IDRISSE Khalid	Traumato- orthopédie
AMINE Mohamed	Epidémiologie- clinique	KRATI Khadija	Gastro- entérologie
AMMAR Haddou	Oto-rhino-laryngologie	KRIET Mohamed	Ophtalmologie
AMRO Lamyae	Pneumo- phtisiologie	LAGHMARI Mehdi	Neurochirurgie
ANIBA Khalid	Neurochirurgie	LAKMICH I Mohamed Amine	Urologie
ARSALANE Lamiae	Microbiologie -Virologie	LAOUAD Inass	Néphrologie

ASMOUKI Hamid	Gynécologie- obstétrique	LOUHAB Nistrine	Neurologie
ASRI Fatima	Psychiatrie	LOUZI Abdelouahed	Chirurgie - générale
BASRAOUI Dounia	Radiologie	MADHAR Si Mohamed	Traumato- orthopédie
BASSIR Ahlam	Gynécologie- obstétrique	MANOUDI Fatiha	Psychiatrie
BELKHOUS Ahlam	Rhumatologie	MANSOURI Nadia	Stomatologie et chiru maxillo faciale
BEN DRISS Laila	Cardiologie	MAOULAININE Fadl mrabih rabou	Pédiatrie (Neonatalogie)
BENCHAMKHA Yassine	Chirurgie réparatrice et plastique	MATRANE Aboubakr	Médecine nucléaire
BENELKHAIA BENOMAR Ridouan	Chirurgie - générale	MOUAFFAK Youssef	Anesthésie - réanimation
BENHIMA Mohamed Amine	Traumatologie - orthopédie	MOUDOUNI Said Mohammed	Urologie
BENJILALI Laila	Médecine interne	MOUFID Kamal	Urologie
BENZAROUEL Dounia	Cardiologie	MOUTAJ Redouane	Parasitologie
BOUAITY Brahim	Oto-rhino- laryngologie	MOUTAOUAKIL Abdeljalil	Ophtalmologie
BOUCHENTOUF Rachid	Pneumo- phtisiologie	MSOUGGAR Yassine	Chirurgie thoracique
BOUGHALEM Mohamed	Anesthésie - réanimation	NAJEB Youssef	Traumato- orthopédie
BOUKHANNI Lahcen	Gynécologie- obstétrique	NARJISS Youssef	Chirurgie générale
BOUKHIRA Abderrahman	Biochimie - chimie	NEJMI Hicham	Anesthésie- réanimation
BOUMZEBRA Drissi	Chirurgie Cardio- Vasculaire	NIAMANE Radouane	Rhumatologie
BOURRAHOUS Aicha	Pédiatrie	NOURI Hassan	Oto rhino laryngologie
BOURROUS Monir	Pédiatrie	OUALI IDRISSE Mariem	Radiologie
BOUSKRAOUI Mohammed	Pédiatrie	OULAD SAIAD Mohamed	Chirurgie pédiatrique
CHAFIK Rachid	Traumato- orthopédie	QACIF Hassan	Médecine interne
CHAKOUR Mohamed	Hématologie Biologique	QAMOUSS Youssef	Anesthésie- réanimation
CHELLAK Saliha	Biochimie- chimie	RABBANI Khalid	Chirurgie générale
CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	Radiologie	RADA Noureddine	Pédiatrie
CHOULLI Mohamed Khaled	Neuro pharmacologie	RAIS Hanane	Anatomie pathologique
DAHAMI Zakaria	Urologie	RAJI Abdelaziz	Oto-rhino-laryngologie

DRAISS Ghizlane	Pédiatrie	ROCHDI Youssef	Oto-rhino- laryngologie
EL ADIB Ahmed Rhassane	Anesthésie- réanimation	SAIDI Halim	Traumato- orthopédie
EL ANSARI Nawal	Endocrinologie et maladies métaboliques	SAMKAOUI Mohamed Abdenasser	Anesthésie- réanimation
EL BARNI Rachid	Chirurgie- générale	SAMLANI Zouhour	Gastro- entérologie
EL BOUCHTI Imane	Rhumatologie	SARF Ismail	Urologie
EL BOUIHI Mohamed	Stomatologie et chir maxillo faciale	SORAA Nabila	Microbiologie – Virologie
EL FEZZAZI Redouane	Chirurgie pédiatrique	SOUMMANI Abderraouf	Gynécologie- obstétrique
EL HAOURY Hanane	Traumato- orthopédie	TASSI Noura	Maladies infectieuses
EL HATTAOUI Mustapha	Cardiologie	TAZI Mohamed Illias	Hématologie- clinique
EL HOUDZI Jamila	Pédiatrie	YOUNOUS Said	Anesthésie- réanimation
EL IDRISSE SLITINE Nadia	Pédiatrie	ZAHLANE Kawtar	Microbiologie – virologie
EL KARIMI Saloua	Cardiologie	ZAHLANE Mouna	Médecine interne
EL KHAYARI Mina	Réanimation médicale	ZAOUI Sanaa	Pharmacologie
EL MGHARI TABIB Ghizlane	Endocrinologie et maladies	ZIADI Amra	Anesthésie – réanimation
ELFIKRI Abdelghani	Radiologie	ZOUHAIR Said	Microbiologie
ESSAADOUNI Lamiaa	Médecine interne	ZYANI Mohammed	Médecine interne
FADILI Wafaa	Néphrologie		

Professeurs Agrégés

Nom et Prénom	Spécialité	Nom et Prénom	Spécialité
ABIR Badreddine	Stomatologie et Chirurgie maxillo facial	HAZMIRI Fatima Ezzahra	Histologie – Embryologie – Cytogénétique
ADARMOUCH Latifa	Médecine Communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)	IHBIBANE fatima	Maladies Infectieuses
AISSAOUI Younes	Anesthésie – réanimation	KADDOURI Said	Médecine interne
AIT BATAHAR Salma	Pneumo- phtisiologie	LAHKIM Mohammed	Chirurgie générale
ALJ Soumaya	Radiologie	LAKOUICHMI Mohammed	Stomatologie et Chirurgie maxillo faciale
ATMANE El Mehdi	Radiologie	MARGAD Omar	Traumatologie – orthopédie
BAIZRI Hicham	Endocrinologie et maladies métaboliques	MEJDANE Abdelhadi	Chirurgie Générale

BELBACHIR Anass	Anatomie- pathologique	MLIHA TOUATI Mohammed	Oto-Rhino - Laryngologie
BELBARAKA Rhizlane	Oncologie médicale	MOUHSINE Abdelilah	Radiologie
BENJELLOUN HARZIMI Amine	Pneumo- phtisiologie	NADER Youssef	Traumatologie - orthopédie
BENALI Abdeslam	Psychiatrie	OUBAHA Sofia	Physiologie
BSISS Mohamed Aziz	Biophysique	RBAIBI Aziz	Cardiologie
CHRAA Mohamed	Physiologie	SAJIAI Hafsa	Pneumo- phtisiologie
DAROUASSI Youssef	Oto-Rhino - Laryngologie	SALAMA Tarik	Chirurgie pédiatrique
EL AMRANI Moulay Driss	Anatomie	SEDDIKI Rachid	Anesthésie - Réanimation
EL HAOUATI Rachid	Chirurgie Cardiovasculaire	SERGHINI Issam	Anesthésie - Réanimation
EL KHADER Ahmed	Chirurgie générale	TOURABI Khalid	Chirurgie réparatrice et plastique
EL MEZOUARI EI Moustafa	Parasitologie Mycologie	ZARROUKI Youssef	Anesthésie - Réanimation
EL OMRANI Abdelhamid	Radiothérapie	ZEMRAOUI Nadir	Néphrologie
FAKHRI Anass	Histologie- embyologie cytogénétique	ZIDANE Moulay Abdelfettah	Chirurgie Thoracique
GHAZI Mirieme	Rhumatologie		

Professeurs Assistants

Nom et Prénom	Spécialité	Nom et Prénom	Spécialité
ABDELFETTAH Youness	Rééducation et Réhabilitation Fonctionnelle	ELOUARDI Youssef	Anesthésie réanimation
ABDOU Abdessamad	Chiru Cardio vasculaire	ELQATNI Mohamed	Médecine interne
AIT ERRAMI Adil	Gastro-entérologie	ESSADI Ismail	Oncologie Médicale
AKKA Rachid	Gastro - entérologie	FDIL Naima	Chimie de Coordination Bioorganique
ALAOUI Hassan	Anesthésie - Réanimation	FENNANE Hicham	Chirurgie Thoracique
AMINE Abdellah	Cardiologie	GHOZLANI Imad	Rhumatologie
ARABI Hafid	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle	HAJJI Fouad	Urologie
ARSALANE Adil	Chirurgie Thoracique	HAMMI Salah Eddine	Médecine interne
ASSERRAJI Mohammed	Néphrologie	Hammoune Nabil	Radiologie
AZIZ Zakaria	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale	JALLAL Hamid	Cardiologie

BAALLAL Hassan	Neurochirurgie	JANAH Hicham	Pneumo- phtisiologie
BABA Hicham	Chirurgie générale	LAFFINTI Mahmoud Amine	Psychiatrie
BELARBI Marouane	Néphrologie	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Hématologie clinique
BELFQUIH Hatim	Neurochirurgie	LAHMINE Widad	Pédiatrie
BELGHMAIDI Sarah	OPhtalmologie	LALYA Issam	Radiothérapie
BELHADJ Ayoub	Anesthésie – Réanimation	LOQMAN Souad	Microbiologie et toxicologie environnementale
BELLASRI Salah	Radiologie	MAHFOUD Tarik	Oncologie médicale
BENANTAR Lamia	Neurochirurgie	MILOUDI Mohcine	Microbiologie – Virologie
BENNAOUI Fatiha	Pédiatrie	MOUNACH Aziza	Rhumatologie
BOUCHENTOUF Sidi Mohammed	Chirurgie générale	NAOUI Hafida	Parasitologie Mycologie
BOUKHRIS Jalal	Traumatologie – orthopédie	NASSIH Houda	Pédiatrie
BOUTAKIOUTE Badr	Radiologie	NASSIM SABAH Taoufik	Chirurgie Réparatrice et Plastique
BOUZERDA Abdelmajid	Cardiologie	NYA Fouad	Chirurgie Cardio – Vasculaire
CHETOUI Abdelkhalek	Cardiologie	OUERIAGLI NABIH Fadoua	Psychiatrie
CHETTATI Mariam	Néphrologie	OUMERZOUK Jawad	Neurologie
DAMI Abdallah	Médecine Légale	RAISSI Abderrahim	Hématologie clinique
DOUIREK Fouzia	Anesthésie–réanimation	REBAHI Houssam	Anesthésie – Réanimation
EL- AKHIRI Mohammed	Oto- rhino- laryngologie	RHARRASSI Isam	Anatomie–patologique
EL AMIRI My Ahmed	Chimie de Coordination bio–organnique	SAOUAB Rachida	Radiologie
EL FADLI Mohammed	Oncologie médicale	SAYAGH Sanae	Hématologie
EL FAKIRI Karima	Pédiatrie	SEBBANI Majda	Médecine Communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
EL HAKKOUNI Awatif	Parasitologie mycologie	TAMZAOURTE Mouna	Gastro – entérologie
EL HAMZAOUI Hamza	Anesthésie réanimation	WARDA Karima	Microbiologie
EL KAMOUNI Youssef	Microbiologie Virologie	ZBITOU Mohamed Anas	Cardiologie
ELBAZ Meriem	Pédiatrie	ZOUIZRA Zahira	Chirurgie Cardio-vasculaire

LISTE ARRÊTÉE LE 24/09/2019



DÉDICACES



*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude,
Mon amour, mon respect, et ma reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que...*



Je dédie cette thèse à...

Au bon Dieu, Tout puissant qui m'a inspiré et m'a guidé dans le bon chemin. Je vous dois ce que je suis devenue Louanges et remerciements pour votre clémence et miséricorde.

A mon chère Père Abdellatif Haddouga :

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soit-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. C'est à travers tes encouragements que j'ai opté pour cette noble profession, et c'est à travers vos critiques que je me suis réalisé. J'espère avoir répondu aux espoirs que tu as fondés en moi et réalisé aujourd'hui l'un de tes rêves les plus précieux. Je te rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon amour infini.

A ma chère Mère Najat Aïssaoui :

Aucune dédicace ne saurait être assez élocuente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A la mémoire de ma grande mère Paternelle :

Tes prières et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études, je te dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, t'accueille dans son éternel paradis.

A mon frère Anas Haddouga et ma soeur Fatimzahra Haddouga :

Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et mon attachement en vous souhaitant beaucoup de bonheur, de santé et de réussite. Que Dieu nous unisse pour toujours.

À mes chères tantes Latifa Haddouga, Nadia Aïssaoui, Khadija Aïssaoui, Fatima Aïssaoui :

Veillez accepter l'expression de ma profonde gratitude pour vos encouragements, soutien et affection. Je ne saurais oublier le soutien dont vous m'avez doté. Que Dieu vous accorde joie, santé et bonheur.

A toute la famille Haddouga :

J'espère que vous trouverez à travers ce travail l'expression de mes sentiments les plus chaleureux. Que ce travail vous apporte l'estime, le respect que je porte à votre égard et soit la preuve du désir que j'aie depuis toujours pour vous honorer. Tous mes vœux de bonheur et de santé.

A toute la famille Aïssaoui :

Je vous remercie pour tout ce que vous m'avez apporté vous souhaitez le meilleur dans la vie. Avec tout mon respect et toute mon affection .J'espère que vous trouverez ici le témoignage de tout mon amour et toute ma reconnaissance pour votre intarissable soutien.

A ma meilleure amie Dr Mariem Galuía :

Ma sœur et ma confidente, qui a toujours été présente pour moi, pour sa générosité, sa bonté, sa gentillesse et toutes ces belles choses qui la rendent spéciale et unique. Merci Mariem d'être ce que tu es, merci d'être mon amie , j'espère que notre amitié durera éternellement .

A tous mes amis : Fatimz Zahra Ghlalou , Fatima Guidouni , Najwa Imad , Rim Lemtouni, Elmehdi Hadiri , Mohammed Houbayli :

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et sœurs sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

A toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

A tous ceux à qui je pense et que j'ai omis de citer.



REMERCIEMENTS



A NOTRE MAÎTRE ET PRÉSIDENT DE THÈSE PROFESSEUR A.Rají

Professeur de l'Enseignement Supérieur et chef de service d'Oto-Rhino-Laryngologie (ORL) à l'hôpital ERRAZI au CHU Med VI
Pour le grand honneur que vous nous faites en acceptant de juger et de présider ce travail de thèse. Nous vous exprimons notre profonde admiration pour la sympathie et la modestie qui émanent de votre personne. Veuillez considérer ce modeste travail comme expression de notre reconnaissance.

A NOTRE MAÎTRE ET RAPPORTEUR DE THÈSE PROFESSEUR S.Ait Benali

Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service de neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI au CHU Med VI :
Malgré vos multiples préoccupations, vous avez bien voulu nous confier ce travail et le diriger. Vos qualités humaines et professionnelles nous ont toujours marqué. Votre disponibilité et votre acharnement nous inspirent un grand respect. Veuillez trouver, ici, l'expression de notre respectueuse considération et notre profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines .

A notre maître et juge de Thèse Professeur H.Ghannane professeur agrégé de Neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI au CHU Med VI

Nous vous remercions vivement de l'honneur que vous nous faites en acceptant de siéger parmi notre jury de thèse. Nous sommes très reconnaissants de la spontanéité avec laquelle vous avez accepté de juger notre travail. Veuillez croire, cher maître, à l'assurance de notre respect et notre considération.

A notre maître et juge de thèse Professeur M.Ouali Idrissi Professeur de Radiologie à l'hôpital ERRAZI au CHU Med VI :

Nous vous remercions d'avoir voulu répondre à notre souhait de vous voir parmi nos membres de jury. Vos qualités humaines et professionnelles seront pour nous un modèle à suivre. Je vous dédie ce travail en témoignage du grand respect que je vous porte .



ABBREVIATIONS



Liste des abréviations

- US** : Ultrasons
- IOUS** : échographie per opératoire
- hfioUS** : échographie peropératoire à haute fréquences
- TDM** : Tomodensitométrie
- IRM** : Imagerie par résonance magnétique
- iMR** : Imagerie par résonance magnétique en peropératoire
- HCG** : Gliome de haut grade
- LCG** : Gliome de bas grade
- DNET** : tumeur neuroépithéliale dysembryoplasique
- GTR** : Résection totale brute
- EOR** : Étendu de la résection
- OS** : Survie globale
- PFS** : Survie sans progression
- MAVc** : Malformation artérioveineuse cérébrale
- FAVd** : Fistule artérioveineuse durale
- MAVg** : Malformation anévrysmale de la veine Galien
- AVD** : anomalie veineuse de développement



PLAN



INTRODUCTION	1
PATIENTS, MATÉRIELS ET MÉTHODES	4
I. L'étude prospective :	5
1. Type d'étude, Lieu d'étude :	5
2. Durée et Cas cliniques :	5
3. Les populations étudiées et recueil des données :	5
4. Considérations éthique :	7
II. La revue de la littérature :	8
RÉSULTATS	9
cas 1	10
cas 2	13
cas 3	15
DISCUSSION	17
I. Rappels sur les tumeurs cérébrales et la neuropathologie :	18
1. Les tumeurs cérébrales :	18
2. ÉPIDÉMIOLOGIE :	20
3. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES TUMEURS INTRACRÂNIENNES	22
II. Le diagnostic des tumeurs cérébrales :	27
1. LES MANIFESTATIONS CLINIQUES DES TUMEURS CEREBRALES :	28
2. Les signes radiologiques:	32
3. Diagnostic différentiel des tumeurs cérébrales :	33
4. COMPLICATIONS DES TUMEURS CEREBRALES :	33
5. TRAITEMENT :	34
6. LES PRINCIPAUX TYPES DE TUMEURS PRIMITIVES INTRACRÂNIENNES :	40
7. LA DÉTECTION PEROPÉRATOIRE DES TUMEURS CÉRÉBRALES	43
III. Les tumeurs spinales et les malformations artérioveineuses (MAV) :	44
1. Les tumeurs intramedullaires :	44
2. Les tumeurs intradurales extra médullaires :	46
3. LES MALFORMATIONS ARTÉRIOVEINEUSES :	48
IV. LES DIFFÉRENTS TECHNIQUES D'IMAGERIE UTILISÉES EN PEROPÉRATOIRE EN NEUROCHIRURGIE :	54
1. La neuronavigation :	54
2. L'IRM per-opératoire :	54
3. L'Échographie per opératoire (IOUS) :	55
V. RAPPEL SUR LES BASES PHYSIQUES DES ULTRASONS , ET APPLICATIONS CLINIQUES	57
1. Historique de l'imagerie ultrasonore et son application en neurochirurgie :	58
2. BASES PHYSIQUES DES ULTRASONS ET APPLICATION CLINIQUE :	60
3. Les principes généraux des ultrasons dans l'imagerie du cerveau :	65
4. L' Applications transcrânienne de l'échographie :	67
5. L'utilité de l'échographie peropératoire (IOUS) en neurochirurgie :	67

VI. Sémiologie échographique Cérébrale et l'anatomie topographique, Selon les approches chirurgicales :	68
1. Équipement et usage de l'échographie peropératoire :	70
2. Examen par échographie peropératoire IOUS :	73
3. La Sémiologie cérébrale par échographie peropératoire :	75
4. Anatomie chirurgicale par ultrasons :	77
VII. Échographie peropératoires dans la chirurgie des tumeurs cérébrales	81
1. Les transducteurs à ultrasons pour usage intracrânien :	85
2. LA REPRÉSENTATION DES TUMEURS :	88
3. Artefacts et optimisation des images	95
4. Échographie peropératoire lors de la résection de gliomes cérébraux en état de veille	98
VIII. L'utilité de l'échographie peropératoire dans lésions spinale :	99
1. Technique et cadre opérationnel :	100
2. Détection des tumeurs spinales :	102
IX. L'utilité de IOUS dans les malformations artérioveineuses (MAV)	110
1. La détection des MAV par IOUS :	111
X. L'APPORT DE L'ÉCHOGRAPHIE PEROPÉRATOIRE EN NEUROCHIRURGIE : REVUE DE LA LITTÉRATURE :	114
XI. Le développement future de l'échographie peropératoire en Neurochirurgie :	155
CONCLUSION	156
RÉSUMÉS	158
BIBLIOGRAPHIE	162



INTRODUCTION



Voir, c'est croire : l'imagerie peropératoire a toujours été d'une grande aide pour découvrir et définir les différentes lésions du cerveau et de la colonne vertébrale, et les neurochirurgiens ont toujours eu un grand intérêt pour son développement. De nombreux outils sont disponibles : La neuronavigation a été pendant des années un outil standard dans presque toutes les unités de neurochirurgie, mais elle a les limites d'être basée sur l'imagerie préopératoire qui ne peuvent pas être mises à jour.

L'objectif en neurochirurgie est d'opérer les lésions cérébrales sans traumatisme chirurgical sur le tissu cérébral sain. La région opérée est souvent un tissu pathologique amovible ou une cible fonctionnelle traitable.

Pour atteindre cet objectif, les neurochirurgiens utilisent différentes méthodes d'imagerie et de guidage en plus des repères anatomiques classiques. Les informations préopératoires issues des études d'imagerie ont été utilisées pour l'évaluation des risques et la planification de l'opération.

De même, l'imagerie peropératoire a été utilisée pour la prise de décision et pour guider l'opération, en particulier pour confirmer l'emplacement et la délimitation de l'objet.

Les étapes les plus importantes dans le développement de la neurochirurgie ont été les nouvelles modalités d'imagerie basées sur différents phénomènes physiques et les façons d'utiliser ces modalités pour la neurochirurgie : ventriculographie 1920, angiographie 1930, ultrasons 1950, microscope peropératoire 1960, tomographie assistée par ordinateur 1970 et imagerie par résonance magnétique 1980 (1). La stéréotaxie, la navigation chirurgicale et l'endoscopie ont été d'importantes innovations habilitantes.

Il existe trois différentes modalités d'imagerie sous la surface régulièrement utilisées en peropératoire en neurochirurgie guidées par l'image (IGS). Il s'agit de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), de l'imagerie par ultrasons (US) et de la tomographie assistée par ordinateur (CT). Toutes sont basées sur des phénomènes physiques différents.

L'imagerie par ultrasons (US) est basée sur des ondes mécaniques qui sont diffusées en retour depuis les surfaces ou les interfaces à l'intérieur de l'objet scanné. Malgré les limites d'interprétation des images échographiques, cette méthode joue un rôle important en neurochirurgie en tant que méthode d'imagerie peropératoire. Les changements peropératoires peuvent être vérifiés rapidement et facilement avec l'US.(1)

Les ensembles de données d'images obtenus à partir de différentes modalités d'imagerie sont exploités pour le guidage des images par des systèmes assistés par ordinateur appelés neuronavigateurs. Grâce au neuronavigateur, le patient imagé et l'ensemble des données d'image obtenues peuvent être co-enregistrés et l'ensemble des données d'image peut être visualisé pour montrer la position et la direction d'un instrument pendant l'opération. Ainsi, la région opérée peut être visualisée et la région d'intérêt chirurgical (2) peut être localisée, caractérisée et délimitée en utilisant une méthode de localisation appropriée. La littérature fait état de preuves croissantes de l'impact clinique de la résection macroscopique brute totale des gliomes sur la croissance récurrente et la survie des patients (3,4)


À Marrakech, l'introduction de l'échographie peropératoire au service de Neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI au CHU Med VI en 2019 a été instauré par le professeur Ait Ben Ali, ce qui a constitué une première au Maroc.

Le but de notre travail est d'exposer l'expérience du service de Neurochirurgie de l'hôpital ERRAZI Mohamed VI en matière de l'exploitation de l'échographie peropératoire en Neurochirurgie et apporter une étude bibliographique à travers des cas cliniques.

L'objectif de cette étude est d'illustrer l'apport de l'échographie peropératoire dans la neurochirurgie en particulier dans la chirurgie des tumeurs cérébrales, rapporter ces résultats à la lumière de la littérature et l'expérience du service ; et rapporter aussi l'état actuel et le développement en cours de la technique dans la littérature..



*PATIENTS,
MATÉRIELS ET MÉTHODES*



I. L'étude prospective :

Il s'agit du plan de déroulement méthodologique de la présente étude, il est constitué des éléments suivants : (a) type d'étude et lieu d'étude, (b) Durée d'étude et cas cliniques, (c) la population étudiée et recueil des données, (d) considérations éthiques.

1. Type d'étude, Lieu d'étude :

C'est une étude prospective concernant 3 cas qui a pour but d'évaluer l'utilité de l'échographie peropératoire en Neurochirurgie introduite pour la première fois en 2019 au Maroc et à l'hôpital ARRAZI au CHU Mohammed VI à Marrakech .

2. Durée et Cas cliniques :

Cette étude prospective recensée au service de Neurochirurgie à l'hôpital ARRAZI au CHU Mohammed VI entre Février 2019 et Décembre 2019, incluant 3 cas de tumeurs cérébrales âgés de 11 ans à 58 ans dont l'échographie peropératoire a été pratiquée comme moyen thérapeutique.

3. Les populations étudiées et recueil des données :

Notre étude prospective porte sur les patients présentant des tumeurs cérébrales ayant bénéficiés l'échographie peropératoire comme méthode d'imagerie pour le diagnostique thérapeutique dans la chirurgie des gliomes cérébraux.

3.1. Critères d'inclusion :

Les patients suivis pour une pathologie tumorale ou malformation vasculaire du système nerveux ; les patients ont été sélectionnés pour être inclus dans l'étude sur la base de la taille et de la localisation de leur lésion.

3.2. Critères d'exclusion :

Les patients pour lesquels dont la chirurgie est contre-indiqué.

3.3. Le recueil des données :

Le recueil de l'ensemble d'informations nécessaires pour répondre aux objectifs de notre étude : Age, le diagnostique, la localisation de la lésion, les patients qui ont subi a subi des examens physiques et neurologiques complets, y compris une IRM avant l'opération.

❖ Équipement échographie peropératoire :

Le dispositif échographique au service de Neurochirurgie à l'hôpital Errazi au CHU Mohamed 6 est prédisposé pour échographie à contraste renforcé, élasto sonographie, et l'imagerie de fusion entre l'imagerie préopératoire et l'IOUS pour la navigation virtuelle, utilisant un logiciel de navigation virtuelle dédié ; Et doté généralement une sonde multifréquence à réseau linéaire (1-5) MHz) à vue trapézoïdale pour les lésions lésions superficielles, un réseau linéaire haute fréquence (15 MHz) pourrait être utilisée . (Figure 1)

Un petit micro-convexe multifréquence peut être utilisée pour les petites craniotomies ou pour explorer les cavités chirurgicales.(Figure 2)



Figure 1 : L'appareil d'échographie per opératoire au service de Neurochirurgie à l'hopital ERRAZI au CHU Med VI



Figure 2 : Les différents type de sondes utilisés en échographie per opératoire au service de Neurochirurgie à l'hôpital Errazi .

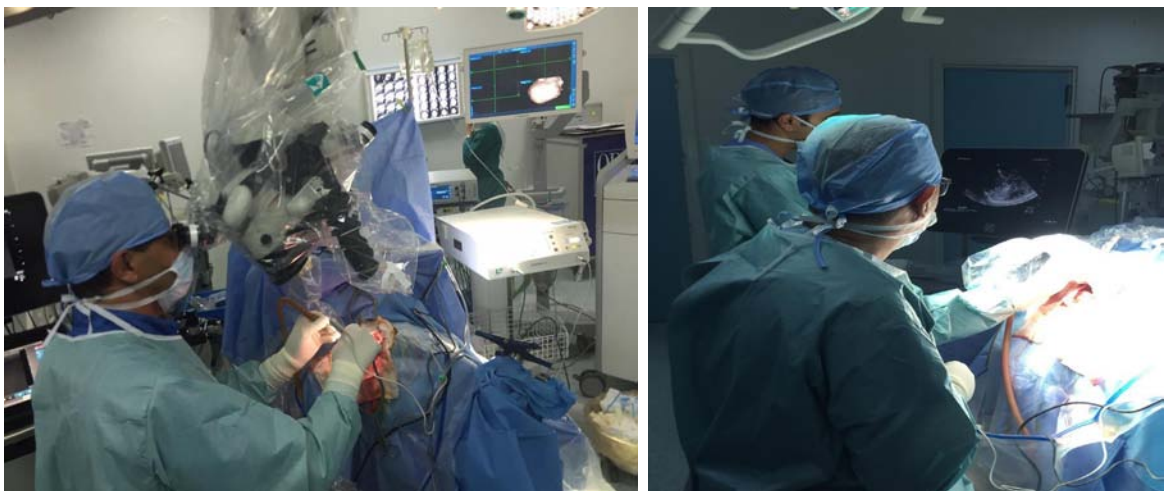


FIG : Images de l'équipe chirurgicale au service de Neurochirurgie à l'hôpital Errazi CHU Med V illustrant le cadre opérationnel par la technique d'échographie peropératoire dans la chirurgie des tumeurs cérébrales .

4. Considérations éthique :

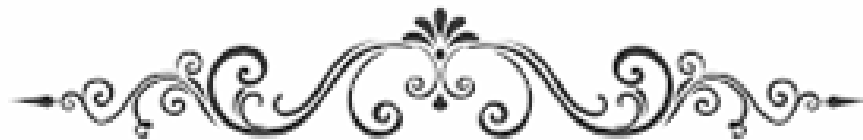
Cette étude exige un respect total des considérations éthique à savoir l'anonymat et la confidentialité de tous les outils de recueils des données.

II. La revue de la littérature :

La littérature médicale a été largement consultée au cours de cette étude , en commençant par des recherches de base dans le service MEDLINE/PubMed en utilisant les termes MeSH (Medical Subject Heading) "ultrasound", "image guidance", "glioma", "brain", "high grade glioma", "low grade glioma", "neurosurgery" et "surgery" dans diverses combinaisons. En outre, la base de données Web of Knowledge, les aperçus BIOSIS, la bibliothèque Cochrane et le Web of Science ont été consultés.

Chaque article intéressant a été examiné et sa liste de référence a été vérifiée deux fois pour s'assurer qu'aucun article pertinent n'avait été oublié.

L'Internet lui-même a été utilisé pour rechercher des pistes d'articles apparaissant dans des revues non indexées dans ces bases de données. Nous avons limité l'analyse documentaire aux quinze dernières années (2000 à 2018) .



RÉSULTATS



Notre étude prospective établi sur une période d'un an au sein du service de neurochirurgie à l'hopital ERRAZI comprend 3 cas , présentant la pathologie tumorale cérébrale: 1 cas de glioblastome de bas grade , 1 cas de DNET , 1 cas d'oligodendrogliome.

❖ Cas 1 :

Il s'agit d'un patient de sexe masculin âgé de 55 ans sans antécédents pathologique qui a consulté pour des vertiges intenses et étourdissement avec des céphalées non calmées par des antalgiques, sans d'autres signes associés notamment pas de troubles visuels ni de crises comitiales.

L'examen clinique neurologique a montré une préservation des fonctions intellectuel et de la force des membres.

L'IRM cérébrale a été établi et a révélé un processus expansif pariétal profond gauche mesurant 3,8*6*5,4 cm de diamètre. (figure 4)

Une biopsie stéréotaxique a été réaliser pour confirmer le diagnostique, l'étude anatomopathologique a révélé qu'il s'agit d'une tumeur un glioblastome de haut grade.

Le patient ensuite a bénéficié d'une chirurgie pour une résection exérèse complète sous contrôle de l'échographie peropératoire sous anesthésie général. Le déroulement opératoire :

Dans un premier temps avant l'incision de la dure mère il faut évaluer la lésion cible qui doit être centré dans la craniotomie ; après l'exposition de la dure mère sous jacente, on irrigue par une solution saline stérile pour faciliter la transduction acoustique ; ensuite on introduit la sonde échographique en modifie la fréquence de la sonde jusqu'à l'obtention d'une résolution d'images adéquate montrantes la lésion tumoral hyperéchogène centré par une zone hypoéchogène qui traduit une tumorale nécrose centrale. Après la résection tumorale total , on évalue par échographie peropératoire la présence ou pas d'une tumeur résiduelle .(figure 5)

Aucune complication n'a été révélé en post opératoire et pas déficit neurologique ; Ensuite une IRM cérébrale a été établi 48h après la résection chirurgicale . Le patient a ensuite bénéficié d'une chimiothérapie concomitante .

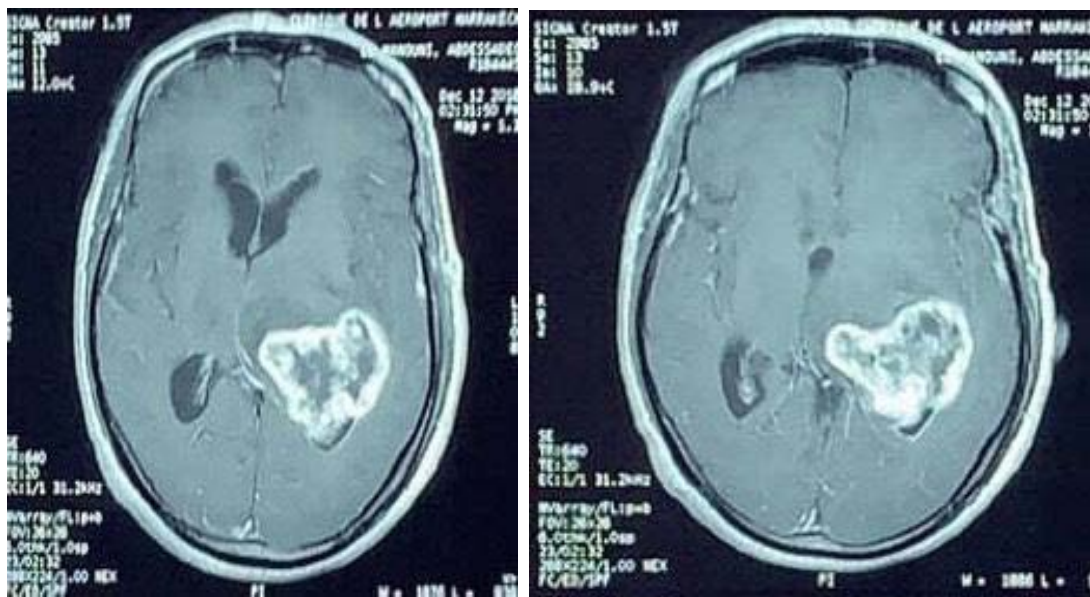


Figure 4 : PROCESSUS EXPANSIF PARIÉTAL PROFOND GAUCHE REHAUSSÉ DE FACON ANNULAIRE en séquence T1 IRM

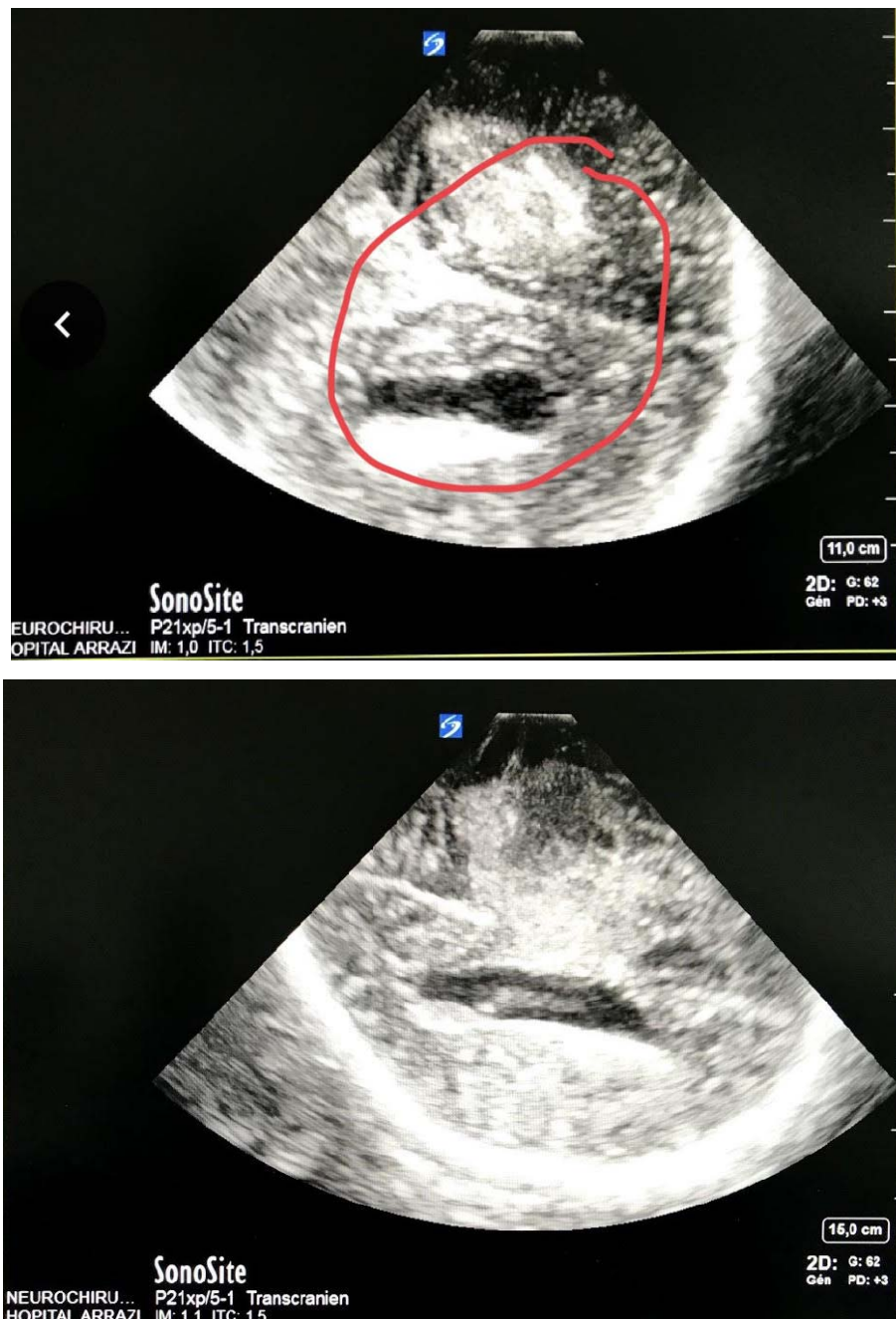


Figure 5 : Échographie per opération coupe coronale après ouverture de la dure mère montrant un gliome de haut grade (masse tumorale entourée en rouge) une lésion hyperéchogène avec une région hypoéchogène au centre qui traduit une nécrose centrale .

❖ *Cas 2:*

Il s'agit d'un fille âgée de 11 ans suivie pour épilepsie généralisé sous traitement épiléptique (Valproate de sodium) sans autres antécédents pathologiques particuliers.

La patiente a été admise au urgences pour crise d'épilepsie généralisé, sans déficit moteur ni sensitif le reste de l'examen est sans particularité

Après la patiente a été hospitalisée au service de neurochirurgie à l'hôpital Errazi pour complément de prise en charge , avec un bilan biologique (NFS , Biochimie) normale ; l'IRM cérébrale a révélé un processus lésionnel pariétal gauche cortico sous cortical bien limité 24,4*21,3*36,3 mm, d'après ce processus lésionnel évoquant une tumeur neuroépithéliale dysembryoplasique (DNET) .(figure 6)

Ensuite la patiente a bénéficié d'une résection chirurgical complète de la tumeur ; L'intervention chirurgical se déroule sous anesthésie générale sur une durée de 6H, le geste consiste à réséquer la tumeur en sa globalité. IRM post opératoire a été établi 48H après a montré une absence de lésion .

L'échographie peropératoire a révélé une lésion hypoéchogène bien limitée par rapport au parenchyme sain avec des lésions minimales hyperéchogènes traduisant l'aspect kystique de la tumeur neuroépithéliales dysembryoplasiques (DNET) . L'échographie peropératoire a guidé la résection et a été utile pour vérifier l'absence de tumeur résiduelle à la fin de la résection.

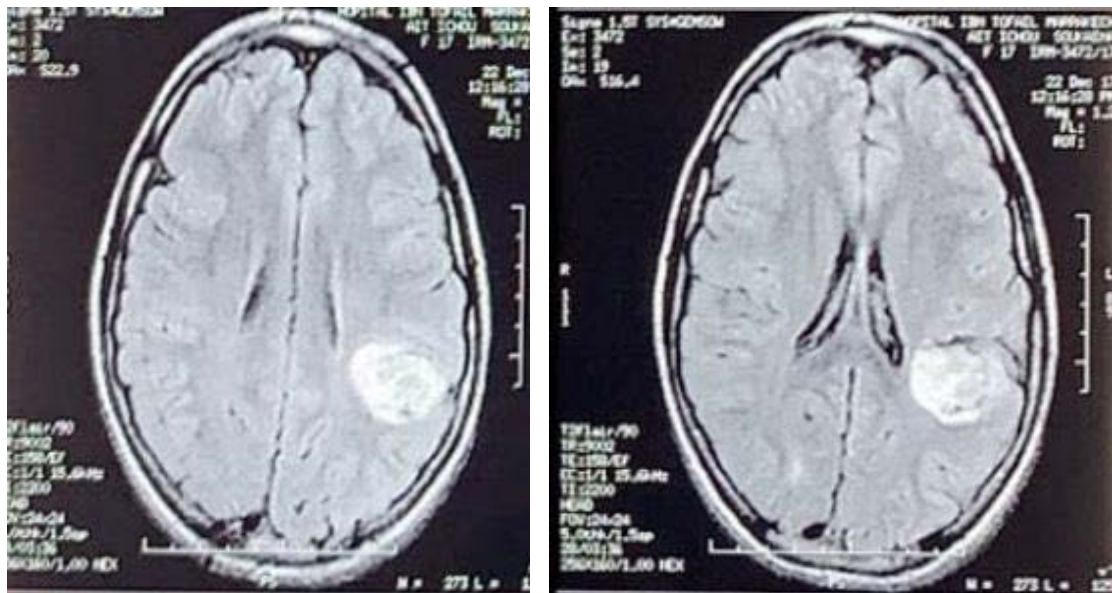


Figure 6 : Images IRM en T1 processus lésionnel pariétal gauche cortico sous cortical , avec prise de contraste significative et aspect microkystique en bulle de savon .



Figure 7 : Image échographique en coupe coronal , montrant une lésion hyperéchogène bien limitée par rapport au parenchyme sain avec des petites zones hypoéchogènes traduisons les lésions kystiques de la tumeur DNET

❖ Le cas 3 :

Il s'agit d'une patiente âgée de 22 ans qui présentait des crises d'épilepsie (manque de données cliniques) hospitalisée au service de neurochirurgie pour une tumeur cérébrale à type oligodendrogliome (les données radiologiques et cliniques sont incomplètes).

La patiente a bénéficié d'une résection totale de la tumeur sous anesthésie générale, l'échographie peropératoire a révélé une lésion bien définie hyperéchogène avec une absence de zone de nécrose, après la résection tumorale totale l'échographie peropératoire a été utile pour confirmer l'absence de tumeur résiduelle. (figure 8) (figure 9)

on a noté une absence de complication clinique en postopératoire. L'IRM postopératoire établi 48h après révélant une absence de lésion tumorale.

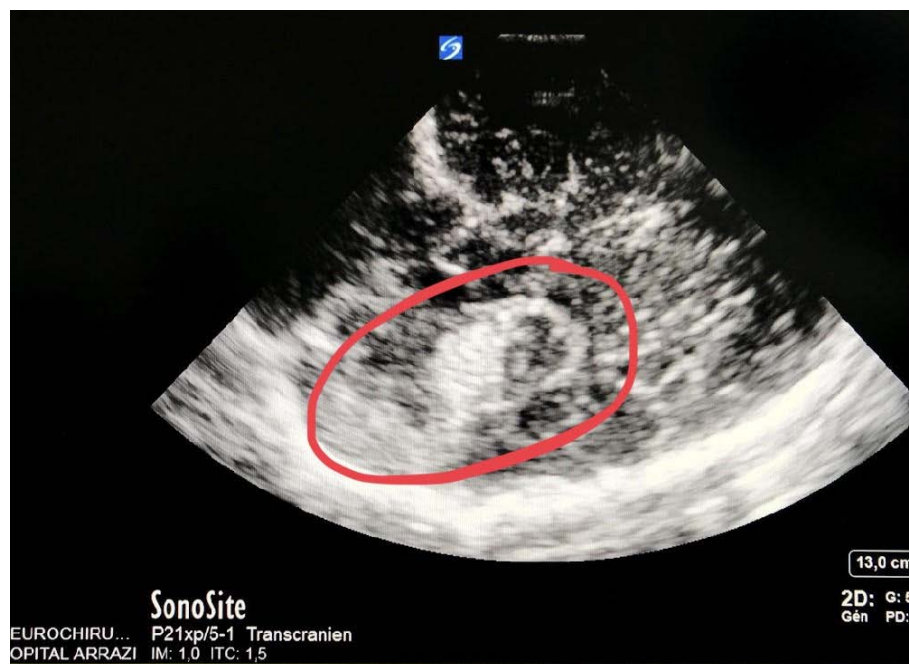


Figure 8 : Image échographique en coupe coronale montrant une lésion bien définie (entourée en rouge) hyperéchogène

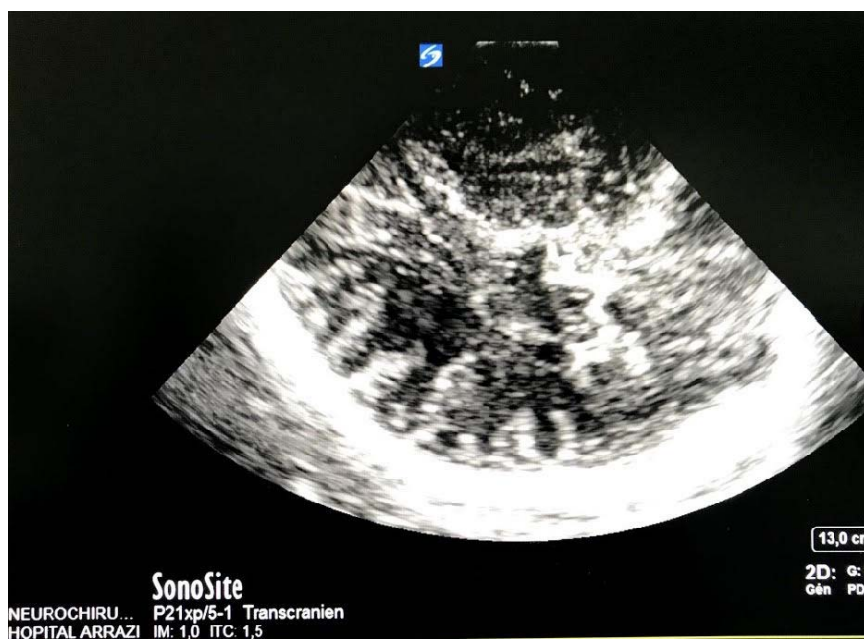
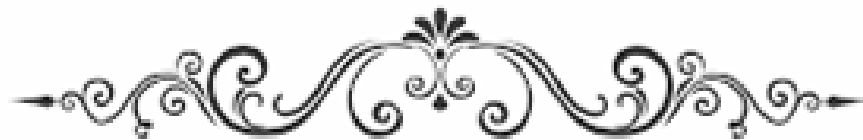


Figure 9 : image échographique montrant l'absence de la lésion tumorale après la résection tumorale complète



DISCUSSION



I. Rappels sur les tumeurs cérébrales et la neuropathologie :

1. Les tumeurs cérébrales :

Les tumeurs cérébrales constituent un groupe très hétérogène de tumeurs quant à leur type cellulaire, leur apparence morphologique et leur profil génétique. Cette diversité rend difficile l'établissement d'un diagnostic précis et d'une stratégie thérapeutique adéquate. Les tumeurs cérébrales correspondent à un groupe mixte de néoplasmes provenant des tissus intracrâniens et des méninges avec des degrés de malignité allant de bénins à agressifs. Chaque type de tumeur a sa propre biologie, son traitement et son pronostic et chacun est susceptible d'être causé par différents facteurs de risque.

Même les tumeurs bénignes peuvent être mortelles en raison de leur localisation dans le cerveau, de leur capacité à s'infiltrer localement et de leur propension à se transformer en tumeur maligne. Cela rend la classification des tumeurs cérébrales une science difficile et crée des problèmes pour décrire l'épidémiologie de ces conditions.

Les éléments cellulaires du système nerveux comporte la substance grise est formée de cellules ; la substance blanche est formée de fibres. La cellule et la fibre ne sont que les deux parties d'un même élément essentiel du système nerveux : le neurone. A côté existe un tissu de soutien et des cellules nourricières : les cellules gliales qui comportent plusieurs types cellulaires : Les astrocytes (macroglie) , oligodendrocytes , les cellules épendymaires , les cellules de schwann .

Les tumeurs cérébrales peuvent être classées en deux catégories, les tumeurs dites primitives se développant directement à partir d'une cellule du cerveau et les tumeurs secondaires ou métastases cérébrales. Les métastases sont plus nombreuses : 20 à 40% des malades atteints d'un cancer développent des métastases cérébrales (5). L'incidence totale des

tumeurs cérébrales n'est donc pas négligeable. La prise en charge des patients atteints de métastases cérébrales varie en fonction de la tumeur d'origine mais reste semblable à celui des patients atteints de tumeurs primitives .

Les causes de survenue d'une tumeur cérébrale primitive sont encore méconnues mais de façon générale, une tumeur se développe lorsque les gènes codant la division cellulaire subissent des altérations et provoquent une prolifération incontrôlée. Ces altérations peuvent conduire soit à l'inhibition de gènes . Si les causes de ces altérations génétiques ne sont encore pas élucidées, il existe cependant une large variété de facteurs de risque dont le rôle a été plus ou moins établi.

Les tumeurs cérébrales primaires constituent un ensemble hétérogène de tumeurs associées à des comportements variables, Les symptômes, les origines et la malignité. Ils se caractérisent par le type de cellule dont ils se développent et sont dominés par des gliomes, issus des cellules gliales. Les gliomes sont classés par l'Organisation Mondiale De la Santé (OMS) en 4 grades de malignité basée sur leurs propriétés histologiques (6).

La suspicion d'une tumeur cérébrale se manifeste généralement quand survient une série de symptômes cliniques comme l'hypertension intracrânienne, les crises d'épilepsie ou les déficits focaux (7). En fonction de la localisation tumorale, ils peuvent se manifester par des troubles sensitivo-moteurs, une hémiparésie ou une hydrocéphalie.

Le diagnostic initial est primordial dans la prise en charge du patient car c'est lui qui permet de définir la stratégie thérapeutique la mieux adaptée et d'établir un premier pronostic. Ce diagnostic a notamment pour but de classer les tumeurs selon leur nature histologique, qui correspond au type de cellule dont dérive la tumeur, et leur malignité. Ces informations sont obtenues soit par l'imagerie médicale, soit par l'analyse anatomopathologique d'un fragment tumoral qui conduit de plus en plus à l'établissement du profil génétique de la tumeur. La

classification de référence des tumeurs cérébrales primitives est celle de l'Organisation Mondiale de la Santé qui les classe suivant six principaux types histologiques et quatre grades. Ces derniers s'échelonnent, en fonction de l'agressivité de la tumeur, du grade I (tumeur bénigne) au grade IV (tumeur hautement maligne). Les tumeurs de grades I et II définissent les tumeurs cérébrales dites de bas grade, celles de grade III et IV les tumeurs dites de haut grade .

Avec plus de 40% des cas diagnostiqués, les gliomes, qui se développent à partir des cellules gliales, sont les tumeurs cérébrales primitives les plus fréquentes. Suivent ensuite les méningiomes, qui se développent à partir des méninges, avec 10 à 19% des cas puis les médulloblastomes, tumeurs du cervelet touchant particulièrement les enfants entre 3 et 8 ans, avec 3 et 5% des cas. (Ali-Osman 2004). (8)

2. ÉPIDÉMIOLOGIE :

L'incidence des tumeurs cérébrales est difficile à estimer avec précision car les séries de la littérature sont très hétérogènes, les chiffres habituellement fournis situent l'incidence des tumeurs primitives du système nerveux autour de 6 à 20 par 100000 personnes par an, l'apparente augmentation d'incidence des tumeurs cérébrales au cours des derniers décennies, observée par certains auteurs, semble principalement être liée à l'amélioration du diagnostic précoce depuis l'avènement du scanner et de l'IRM (9,10)

Les tumeurs cérébrales représentent la première cause de mortalité par tumeurs chez l'enfant et la deuxième pathologie tumorale en fréquence après les leucémies , les tumeurs cérébrales chez l'enfant représentent 20% des urgences neurochirurgicales et 150 interventions annuelles. (14)

La répartition selon l'âge ; Chez l'adulte, l'incidence des tumeurs cérébrales augmente régulièrement avec l'âge, avec un pic d'incidence entre 65 et 74 ans. (11,12) Chez l'enfant, les tumeurs cérébrales représentent environ 20% des tumeurs solides et viennent juste derrière les

leucémies. Environ 10% des tumeurs cérébrales primitives surviennent chez l'enfant avec un pic d'incidence avant l'âge de 5 ans. (14) . Chez l'adulte l'âge moyen est de 42 ans, avec des extrêmes de 2 à 80 ans.

La Répartition selon le sexe : Dans l'ensemble, les tumeurs cérébrales sont légèrement plus fréquentes chez l'homme que chez la femme avec un sexe ratio de 1,1 à 1,6 la seule exception concerne les méningiomes, beaucoup plus fréquents chez la femme avec un sexe ratio de 0,1 à 0,4. (13,15)

2.1. Tumeurs intracrâniennes de l'enfant

Les tumeurs du système nerveux central sont les plus fréquentes des tumeurs solides de l'enfant, représentant 20 % des cancers et venant juste derrière les leucémies (30 % des cancers). Les tumeurs les plus fréquemment rencontrées sont à l'étage sus-tentorial les gliomes et les crâniopharyngiomes, à l'étage sous-tentorial les astrocytomes pilocytiques et les médulloblastomes cérébelleux , un cas sur six concerne les enfants, les adolescents et les adultes jusqu'à 30ans, un cas sur trois des personnes de 30 à 60 ans et un cas sur deux des personnes de plus de 60 ans.(14)

2.2. Tumeurs intracrâniennes de l'adulte

a. Les Tumeurs primitives :

L'incidence des tumeurs intracrâniennes primitives de l'adulte est d'environ 10/ 100 000 habitants par an. Les tumeurs cérébrales malignes représentent 1 à 2 % de l'ensemble des cancers. Environ 40 % des tumeurs primitives intracrâniennes sont des méningiomes, 30 % des gliomes et 10 % des adénomes hypophysaires. Deux tiers sont bénignes (gliomes de bas grade, méningiomes, adénomes de l'hypophyse).

b. Les Métastases :

Les métastases cérébrales de cancers systémiques sont un problème fréquent, puisqu'elles compliquent 25 % des cancers systémiques environ (séries autopsiques) ; cependant, un tiers restent asymptomatiques.

2.3. Les facteurs de risques :

En ce qui concerne les facteurs de risques ; Il n'est pas douteux que des facteurs génétiques interviennent dans l'appréciation de certaines tumeurs cérébrales, ainsi que la survenue de tumeurs cérébrales chez deux ou plusieurs membres d'une même famille est connue. L'existence d'une immunodépression augmente le risque de survenue d'un lymphome cérébral. On estime qu'environ 2% des patients présentant une immunodépression prolongée et 5 à 8% des malades du sida développent un lymphome malin cérébral primitif. (16) En dehors de l'immunodépression, les radiations ionisantes sont le seul facteur de risque indiscutable pour l'apparition d'une tumeur cérébrale.

Les critères retenus pour considérer qu'une tumeur est radio induite sont l'existence d'une longue période de latence (de 1 à 26 ans ; 10 ans et demi de moyenne), la localisation de la tumeur dans le champs d'irradiation, et enfin le fait que la nature histologique de la tumeur soit différente de celle de la lésion pour laquelle le patient a été irradié. Il est difficile de dégager avec certitude d'autres facteurs de risque environnementaux. (17)

3. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES TUMEURS INTRACRÂNIENNES

3.1. Neuropathologie :

a. Tumeurs primitives :

Le diagnostic de tumeur cérébrale primitive repose avant tout sur l'analyse histologique d'un fragment tumoral obtenu par biopsie chirurgicale stéréotaxique ou lors d'un geste d'exérèse. La classification des tumeurs cérébrales primitives utilisée actuellement est celle de l'OMS (tableau I). (18)

Tableau I . Classification des tumeurs cérébrales (d'après Kleihues et al 2000)(18)

Tumeurs du tissu neuroépithélial
Gliomes – <i>Tumeurs astrocytaires</i> : – astrocytome pilocytique (grade I) – astrocytome diffus (grade II) – astrocytome anaplasique (grade III) – glioblastome (grade IV) – <i>Tumeurs oligodendrogiales</i> – <i>Gliomes mixtes</i> : oligoastrocytomes
Autres tumeurs – <i>Tumeurs épendymaires</i> – <i>Tumeurs mixtes glio-neuronales</i> – gangliocytome, gangliogliome – tumeur neuroépithéliale dysembryoplasique (DNET) – <i>Tumeurs pinéale</i> – Tumeurs embryonnaires : – médulloblastome – tumeurs neuroectodermiques primitives (PNET)
Tumeurs méningées primitives – Méningiome
Lymphole primitif du système nerveux central
Tumeurs de la région sellaire – Adénome et carcinome hypophysaire – Crâniopharyngiome
Métastases intracrâniennes – cérébrales – dures – méningées

b. La classification topographique des tumeurs cérébrales :

Les tumeurs supratentorielles (ou sus-tentorielles), situées au-dessus de la tente du cervelet, comprennent les tumeurs des lobes cérébraux (tumeurs frontales, pariétales, temporales et occipitales), les tumeurs hémisphériques profondes (tumeurs du centre ovale, des noyaux gris centraux et des ventricules latéraux), et les tumeurs hémisphériques médianes (tumeurs du corps calleux, de la région sellaire, du III ème ventricule et de la région pinéale). Les tumeurs infratentorielles (ou sous -tentorielles, ou tumeurs de la fosse cérébrale postérieure), peuvent être distinguées en tumeurs de la ligne médiane (tumeurs du vermis et tumeurs du IVème ventricule), des lobes cérébelleux, du tronc cérébral et extra-axiales antérieures et

latérales (tumeur du ganglion de Gasser, tumeurs de l'angle ponto cérébelleux). Les tumeurs du foramen ovale sont situées à cheval entre l'étage sus-tentorial et la fosse cérébrale postérieure. Les tumeurs du trou occipital siègent à cheval entre la fosse cérébrale postérieure et le canal rachidien. Il existe un intérêt surtout pronostique retentissant sur le geste chirurgical et le résultat fonctionnel. Il est important d'avoir toujours à l'esprit les principales corrélations qui peuvent exister entre la topographie et la variété histologique des tumeurs du système nerveux central, et de se rappeler les localisations électives habituelles des tumeurs les plus fréquentes.(Figure 10)

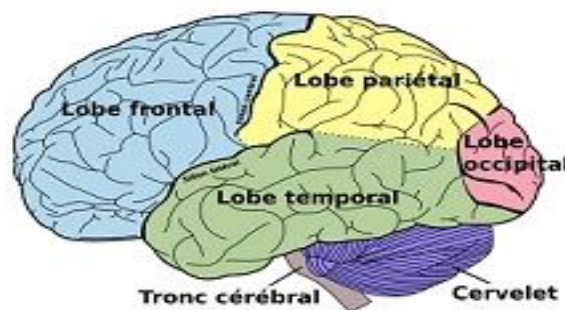


Figure 10 : Les différents zones topographiques cérébrale

c. La classification histologique :

La précédente classification, OMS 2007, des tumeurs du système nerveux central (SNC) était essentiellement basée sur un concept histogénétique, c'est-à-dire sur la ressemblance microscopique des cellules tumorales avec un constituant du tissu cérébral normal et leur degré de différenciation. Cette caractérisation était fondée sur des critères morphologiques en coloration standard (Hématoxyline-Eosine, HE), souvent complétés par des études immunohistochimiques (IHC), voire ultrastructurales. Suite aux avancées majeures de ces dernières années dans le domaine de la génétique des tumeurs, la nouvelle classification OMS 2016 des tumeurs du SNC ne se base plus seulement sur des critères morphologiques, mais incorpore également des paramètres moléculaires aboutissant à un «diagnostic intégré» en plusieurs strates.(19) (TABLEAU II)

Cette classification 2016 des gliomes sépare les tumeurs diffuses astrocytaires ou oligodendrogiales et les autres tumeurs astrocytaires (astrocytome pilocytique, astrocytome pilomyxoïde, astrocytome à cellules géantes épendymaires et xanthoastrocytomes pléomorphes). Les tumeurs épendymaires et celles glioneuronales (gliomes choroïdes du 3^e ventricule, gliomes angiocentriques et astroblastomes) sont également reclassées. Dans cette nouvelle classification des tumeurs du SNC, la définition du grade histopronostique des tumeurs a également été modifiée, mais pas celle des gliomes diffus qui reste basée sur des notions de cellularité, nombre de mitoses, présence de vaisseaux anormaux et de foyers de nécrose.

Tableau II : La classification OMS 2016 des tumeurs gliales (19)

Type tumoral	Sous-types
Gliomes	Astrocytome pilocytique et autres (grade I) Astrocytome diffus (grade II) Astrocytome anaplasique (grade III) Glioblastome (grade IV) Gliome diffus de la ligne médiane (mutation H3 K27-M) Tumeurs oligodendrogiales (avec codélétion 1p19q) : oligodendrogliome (grade II), oligodendrogliome anaplasique (grade III)
Tumeurs épendymaires	Subépendymome, épendymome, épendymome myxopapillaire
Tumeurs neuronales et neurogliales mixtes	Gangliocytome, gangliogliome, tumeur neuroépithéliale dysembryoplasique (DNET), neurocytome central et autres
Tumeurs de la région pinéale	Pinéalocytome, pinéaloblastome, tumeur du parenchyme pinéal, tumeur papillaire de la région pinéale
Tumeurs du plexus choroïde	Papillome, carcinome du plexus choroïde
Tumeurs embryonnaires	Médulloblastome, tumeur thératoïde, rhabdoïde et autres
Tumeurs germinales	Germinomes, carcinome embryonnaire, choriocarcinome, tératome...
Méningiomes et tumeurs mésenchymateuses non méningothéliales	Tumeur fibreuse solitaire, hémangioblastome, sarcome, PNET, lipome et autres
Tumeurs de la région sellaie	Adénome et carcinome hypophysaire Craniopharyngiome
Lymphome primitif du système nerveux central	

DNET, *Dysembryoplastic NeuroEpithelial Tumors*; PNET, *Primitive NeuroEctodermal Tumors*.
(Source : OMS.)

❖ Les Gliomes :

Les gliomes dérivent des trois types de cellules gliales présentes dans le système nerveux central : *les astrocytes*, *les oligodendrocytes* et *les épendymocytes*. Ces tumeurs sont donc de nature histologique très diverse, mais possèdent des caractéristiques communes comme

l'infiltration plus ou moins rapide du parenchyme cérébral sain environnant et l'évolution progressive mais quasi systématique vers la malignité au cours du temps. Dans le cas des gliomes de bas grade, cette évolution a lieu sur une échelle de temps d'une dizaine d'année. Le gliome acquiert alors une forte composante de prolifération et l'infiltration s'effectue de façon beaucoup plus rapide. (20)

Les astrocytomes sont des tumeurs se développant à partir des astrocytes, ils peuvent être plus ou moins agressifs selon leur degré de prolifération et d'invasion dans les tissus sains. L'astrocytome de grade I appelé astrocytome pilocytique est la seule forme bénigne des astrocytomes. L'astrocytome de grade II appelé astrocytome diffus est la forme la moins agressive d'astrocytomes. Il connaît toutefois une progression lente vers la malignité en termes de diffusion et de prolifération en se transformant en astrocytome de grade III appelé astrocytome anaplasique puis en astrocytome de grade IV appelé glioblastome dit secondaire. Celui-ci est à différencier du glioblastome primaire dit de novo qui se développe sans subir d'évolution dans son grade de malignité.

Les glioblastomes représentent 60% des gliomes avec un pic d'incidence se situant sur la tranche d'âge 65-74 ans (8). Le glioblastome, qui se caractérise par une étendue centrale nécrosée, demeure la forme de tumeur cérébrale la plus agressive du fait de son caractère extrêmement invasif dans le parenchyme sain, ce qui limite l'efficacité des traitements associés.

Les oligodendrogliomes sont des tumeurs dérivant des oligodendrocytes, cellules dont le prolongement forme la gaine de myéline des axones qui assure l'efficacité et la rapidité de la conduction de l'influx nerveux. Ils représentent 5 à 12% des gliomes (8) et sont caractérisés par une évolution plus lente que les astrocytomes. Il en existe deux formes : l'oligodendrogliome de grade II évoluant vers la forme maligne de l'oligodendrogliome, l'oligodendrogliome anaplasique de grade III.

Les épendymomes sont des tumeurs dérivant des épendymocytes, cellules assurant la circulation du liquide céphalo-rachidien dans les ventricules cérébraux. Ils représentent entre 3 et 7% des tumeurs cérébrales et touchent plus fréquemment l'enfant que l'adulte.

❖ Les méningiomes :

Les méningiomes, tumeurs se développant à partir des méninges, représentent entre 10 et 19% des tumeurs cérébrales primitives (8). Plus de 90% des méningiomes sont bénins et asymptomatiques, donc généralement découverts soit après 50 ans soit par hasard. La chirurgie d'exérèse combinée à une radiothérapie permet une survie à 5 ans de 60% pour sa forme de grade II et 38% pour sa forme de grade III (21).

❖ Les médulloblastomes:

Le médulloblastome est une tumeur du cervelet qui représente 3 à 5% des tumeurs cérébrales primitives. Il représente 25% des tumeurs chez l'enfant et est donc classé parmi les cancers pédiatriques, même s'il atteint également les adultes (8).

3.2. Métastases :

Les métastases cérébrales ne font pas nécessairement l'objet d'une biopsie, si le cancer systémique est connu et a fortiori s'il existe d'autres sites métastatiques. En l'absence de tumeur primitive connue, un examen histologique est nécessaire quand un bilan comprenant un examen cutané, un scanner thoracoabdominal, une mammographie, une étude des marqueurs tumoraux ne permet pas de détecter la néoplasie primitive.

II. Le diagnostic des tumeurs cérébrales :

En cas de suspicion de tumeur cérébrale, la première étape du diagnostic repose systématiquement sur la réalisation d'un examen d'imagerie médicale qui renseigne sur la position précise, la morphologie (taille, extension locale et régionale, aspect,...) et le métabolisme de la tumeur. Si le diagnostic initial d'une tumeur cérébrale est confirmé, notamment par l'absence d'argument pour un diagnostic différentiel, l'analyse anatomopathologique d'un fragment tumoral obtenu par biopsie ou par chirurgie d'exérèse est

ensuite réalisée afin de statuer définitivement sur la nature et le grade histologique de la tumeur. La précision du diagnostic est cruciale car la réponse d'une tumeur aux diverses stratégies thérapeutiques dépend fortement de sa classification . (Tableau III)

1. LES MANIFESTATIONS CLINIQUES DES TUMEURS CEREBRALES :

1.1. Le syndrome d'hypertension intracrânienne (HIC) :

Lié à la croissance du processus expansif intracrânien ou consécutif à un blocage des voies d'écoulement du LCR responsable d'une hydrocéphalie, il est caractérisé par l'association de :

- *Céphalées* typiquement matinales, siégeant le plus souvent du côté de la tumeur c'est le signe le plus fréquent ; la toux, les changements de position, les efforts physiques les accentuent.
- *Nausées et vomissements* dans la moitié des cas environ ; vomissements de type central c'est à dire non précédés de nausées.
- *Œdèmes papillaires à rechercher au fond d'œil* ; dans les formes sévères, des signes visuels (baisse de l'acuité visuelle, diplopie) peuvent être présents ; en l'absence de traitement, les troubles peuvent évoluer vers la cécité avec atrophie optique.

Chez le nourrisson, le syndrome d'HIC comporte plusieurs signes spécifiques :

- une macrocrânie : toujours présente dans les hydrocéphalies chroniques se révélant avant l'âge de deux ans, elle est caractérisée par un périmètre crânien > 2 DS au-dessus de la normale ; souvent révélatrice, elle peut être remarquée à l'occasion d'une rupture de la courbe de croissance du périmètre crânien .
- la tension marquée de la fontanelle antérieure et la disjonction des sutures, perceptibles à l'examen.

- le regard « en coucher de soleil » correspond à une déviation permanente vers le bas des globes oculaires ; la paupière supérieure est rétractée. Une baisse d'acuité visuelle pouvant conduire à la cécité par atrophie optique peut être une conséquence dramatique de l'hydrocéphalie méconnue.

1.2. Les Troubles cognitifs et de la vigilance :

Réalisant un tableau d'encéphalopathie diffuse pouvant évoluer vers un coma. Chez l'enfant un fléchissement des acquisitions, avec modifications du comportement et retard scolaires doivent attirer l'attention. la progression tumorale peut entraîner par la suite une évolution vers un engagement. Chez le nourrisson, le syndrome d'hypertension intracrânien comporte plusieurs signes spécifiques : Une macrocrânie : toujours présente dans les hydrocéphalies chroniques se révélant avant l'âge de 2 ans, elle est caractérisée par un périmètre crânien augmenté.

1.3. Les manifestations déficitaires focales :

Elles sont liées directement à la compression (méningiome, neurinome) ou à l'infiltration (gliome) du parenchyme cérébral par la tumeur. Elles sont souvent considérablement aggravées par un œdème vasogénique péri tumorale en rapport avec la rupture de la barrière hémato-encéphalique au sein et au voisinage immédiat de la tumeur. Le mode d'apparition du déficit est généralement plus ou moins progressif, s'étendant « en tâche d'huile » son type dépend de la localisation tumorale. Les manifestations spécifiques dépendent de la localisation du processus.

1.4. La comitialité :

Une crise comitiale partielle (importance de l'interrogatoire pour orienter le diagnostic de localisation) ou généralisée est révélatrice de 20% à 40% des tumeurs cérébrales. La comitialité est plus fréquente pour les néoplasies corticales et d'évolution lente (gliome de bas grade, méningiome) ; Certaines tumeurs peuvent ainsi se manifester par une longue histoire d'épilepsie. La survenue d'une première crise chez un patient adulte justifie la réalisation systématique d'une IRM cérébrale sans et avec injection de gadolinium à la recherche d'un processus expansif.

a. Syndrome cérébelleux :

Il se voit essentiellement dans les localisations au niveau de la fosse cérébrale postérieure. L'atteinte vermienne est fréquente, responsable d'un syndrome statique.

b. Atteinte Ophtalmomologique:

Ils sont très souvent retrouvés au moment du diagnostic s'ils sont cherchés de manière systématique. Ces signes peuvent être en rapport avec l'HIC déjà vue ou en rapport avec une lésion envahissant ou comprimant les voies optiques comme le réalise les tumeurs de la région sellaire ou suprasellaire. Le fond d'œil peut révéler la présence d'un flou papillaire débutant, d'une dilatation veineuse, alors que l'acuité visuelle est normale.

1.5. Atteinte des nerfs crâniens :

L'atteinte du nerf optique par HIC représente une cause de cécité inacceptable, ce qui souligne l'intérêt de la dépister au cours de tout syndrome d'HIC

1.6. Signes endocriniens :

Ils se voient surtout dans les tumeurs se développant au niveau de la région sellaire, ils sont à type de :

- Un syndrome hypothalamo-hypophysaire : Le plus fréquent chez l'enfant est un retard de croissance et un retard pubertaire, moins souvent une obésité. Le diabète insipide est présent dans environ 18% des cas.
- Un déficit antéhypophysaire : aménorrhée, troubles sexuels, déficit endocrinien portant sur une ou plusieurs lignes .

L'observation des symptômes permet une forte suspicion, mais le diagnostic de certitude est donné par les examens complémentaires (imagerie médicale).

Tableau III :Les Principaux signes déficitaires en fonction de la localisation tumorale.

Principales localisations	Principaux signes cliniques	Remarques
Frontale	Syndrome frontal avec apragmatisme ou désinhibition, trouble de l'attention et de la concentration, amnésie des faits récents, Hémiparésie controlatérale dans les atteintes de la région pré-rolandique Syndrome d'HIC isolé	Apparition des signes cliniques souvent tardive
Pariétale	Hémi hypoesthésie, hémi astéréognosie, quadranopsie inférieure controlatérale homonyme Aphasie, apraxie (hémisphère dominant)	Manifestations cliniques précoces
Temporale	Aphasie (hémisphère dominant) Troubles mnésiques Quadranopsie supérieure controlatérale homonyme	Dans les atteintes du lobe temporal droit, la tumeur est longtemps silencieuse
Occipitale	Syndrome d'HIC isolé, agnosie visuelle, syndrome de Balint,	Manifestations précoces
Noyaux gris et capsule interne	Déficit sensitivomoteur controlatéral Hydrocéphalie Hémiparésie proportionnelle (capsule interne)	
Cérébelleuse	Syndrome cérébelleux statique (vermis) ou cinétique (hémisphères cérébelleux)	
Intra ventriculaire	Hydrocéphalie	
Base du crâne	Paralysie des paires crâniennes	
Tronc cérébral	Atteinte des paires crâniennes (surtout VI et VII), nystagmus, hémi- ou tétra parésie, hypoesthésie, troubles de déglutition, dysarthrie	

2. Les signes radiologiques:

La réalisation d'un scanner cérébral sans et avec injection de produit de contraste iodé et surtout d'une IRM cérébrale sans et avec injection de gadolinium est systématique en cas de suspicion tumeur cérébrale. Ces examens vont permettre de : localiser le processus expansif (sus tentoriel, sous tentoriel, intra ou extra parenchymateux, uni ou multifocal). Préciser ses caractéristiques et apporter des arguments pour le diagnostic différentiel et diagnostiquer certaines complications (hémorragie, hydrocéphalie, engagement, méningite tumorale).

2.1. La tomodensitométrie cérébrale (TDM) :

Il s'agit généralement de la première exploration en imagerie effectuée devant une suspicion de pathologie tumorale intracrânienne , le scanner cérébral est habituellement l'examen qui va révéler l'existence d'une tumeur cérébrale, visible sous forme d'une anomalie de densité souvent associée à des signes indirects : effet de masse, œdème péri tumoral. L'injection de produit de contraste iodé pourra préciser le diagnostic si la densité de la tumeur se rehausse après injection. L'utilisation de fenêtres osseuses permet de visualiser une éventuelle déformation de la voûte crânienne, révélant ainsi l'évolution lente de la tumeur (22,23).

2.2. Imagerie par résonance magnétique cérébrale :

Le développement de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) couplée aux analyses de transfert et d'analyse d'images par ordinateur, permet de mieux définir le volume, la vascularisation (angio-IRM), le métabolisme (spectroscopie), l'état du parenchyme (diffusion et transfert de magnétisation), les zones fonctionnelles . Elle permet d'améliorer la qualité du repérage stéréotaxique, pour l'exérèse tumorale ou la radiothérapie en diminuant le risque iatrogénique. Les séquences en T1, T2 (sans et avec injection de Gadolinium) et en flair sont les plus couramment utilisées.

L'IRM permet une analyse beaucoup plus précise du volume tumoral et de son retentissement sur le parenchyme cérébral adjacent. Une prise de contraste après injection de Gadolinium peut exister soit dans le cas d'une tumeur hypervascularisée (bas ou haut grade), soit dans le cas d'une prolifération microcapillaire (tumeur de haut grade), soit dans le cas de rupture de la barrière hémato-encéphalique (visible principalement dans les tumeurs de haut grade).(24)

3. Diagnostic différentiel des tumeurs cérébrales :

Il dépend bien sûr du contexte clinique et de la localisation lésionnelle ; après réalisation de l'imagerie, les diagnostics suivants seront discutés de principe : Un abcès cérébral, un tuberculome , une malformation artérioveineuse , une forme pseudo tumoral d'une pathologie inflammatoire ou infectieuse (la sclérose en plaque , neuro sarcoïdose , neuro Behçet ,) .

4. COMPLICATIONS DES TUMEURS CEREBRALES :

- *Hypertension intracrânienne* : Une tumeur évolue sur des années, au pire sur quelques semaines, les phénomènes d'adaptation, de compensation des structures crâniennes (compliance cérébrale) sont fondamentalement différents de ce qu'ils peuvent être dans le cadre d'un hématome évoluant en quelques minutes, peut être en quelques heures..
- *Hydrocéphalies tumorales* : La plupart des hydrocéphalies tumorales sont de type obstructif, liées à une gêne directe de la circulation du liquide céphalo-rachidien au niveau des ventricules latéraux ou plus souvent au niveau des cavités axiales.
- *Engagement cérébral* : L'engagement cérébral est le témoin d'un processus expansif quel que soit origine (infectieuse, traumatique, ischémique ou tumorale).
- *Œdème cérébral* : Certains méningiomes, les gliomes malins et plus encore les métastases s'accompagnent d'une réaction œdémateuse, souvent considérable, qui ajoute son volume propre aux effets de masse de la néoplasie. Cet œdème peritumoral est bien connu sur le plan physiopathologique : comme tous les œdèmes péri-lésionnels

- *L'hémorragie intra tumorale* : Une hémorragie peut être responsable d'une aggravation rapide des déficits d'un patient ou de la survenue de crises comitiales. Elle est plus fréquente avec certains types de tumeur (métastases de mélanome, de carcinome ou de cancer du rein, oligodendrogliome) et peut être révélatrice.
- *La carcinomatose méningée* : Elle résulte de l'extension aux espaces sous-arachnoïdiens d'une tumeur cérébrale ou correspond à une métastase méningée d'un cancer systémique (s'accompagnant ou non de localisation cérébrale). Cliniquement, le diagnostic est suspecté devant une paralysie d'un nerf crânien, des douleurs cervicales ou dorso-lombaires et une aréflexie, ; des troubles de la marche, des céphalées.
- *L'hémorragie intra tumorale* : Une hémorragie peut être responsable d'une aggravation rapide des déficits d'un patient ou de la survenue de crises comitiales. Elle est plus fréquente avec certains types de tumeur (métastases de mélanome, de carcinome ou de cancer du rein, oligodendrogliome) et peut être révélatrice.
- *La pathologie thrombo-embolique* : Favorisée par les gestes chirurgicaux , l'immobilisation et l'état d'hypercoagulabilité .

5. TRAITEMENT :

5.1. Les différentes stratégies thérapeutiques contre les tumeurs cérébrales :

Il existe actuellement trois principaux axes de thérapie des tumeurs cérébrales qu'elles soient primitives ou secondaires la chirurgie, la radiothérapie et la chimiothérapie. L'emploi de l'une ou l'autre de ces stratégies ainsi que son efficacité varient sensiblement selon l'âge, L'état générale du patient , la localisation de la tumeur dans le cerveau et son grade de malignité. Bien souvent, ces différentes stratégies sont utilisées de façon complémentaire .

a. Traitement médical:

L'évaluation préopératoire, outre l'évaluation de l'état général et des grandes fonctions de l'organisme permet d'apprécier l'état neurologique et établir un inventaire précis des troubles engendrés par la lésion.

L'évaluation du risque lié au type tumoral : Les caractéristiques radiologiques de la tumeur, appréciées par la TDM et L'IRM, permettent d'établir un bilan complet et précis de la situation et d'élaborer une stratégie adaptée à même de minimiser le risque périopératoire.

La taille, la localisation de la tumeur, la richesse de sa vascularisation, son aspect, l'importance de l'œdème et de l'effet de masse qu'elle exerce sur les structures médianes, sont d'autant d'éléments précieux qui guident la conduite de la neuroréanimation périopératoire, le choix de la position chirurgicale et la technique anesthésique.

Une tumeur richement vascularisée comporte un risque opératoire hémorragique majeur. Elle impose donc le choix d'une stratégie transfusionnelle. L'embolisation vasculaire préopératoire réduit notablement les pertes sanguines, en particulier dans les volumineux méningiomes.

Prise en charge médicale périopératoire : Pendant l'anesthésie, l'objectif est de créer les conditions optimales pour la craniotomie et la résection tumorale avec un minimum de risque, en agissant sur deux facteurs : La réduction du volume intracrânien pour faire baisser la pression intracrânienne et une protection cérébrale pour assurer la tolérance du cerveau à l'ischémie.(25)

- *La corticothérapie : Les corticoïdes sont fréquemment utilisés en neuro-oncologie. Outre une action anti-tumorale propre (lymphome cérébral primitif), les corticoïdes agissent essentiellement sur l'œdème péri tumorale ; par ce biais, ils permettent une réduction de l'hypertension intracrânienne et une amélioration fonctionnelle rapide (réduction des déficits et des crises comitiales).*
- *Le traitement anti-épileptique : Un traitement anti-épileptique est nécessaire à titre prophylactique pendant la période péri opératoire et chez les patients ayant présenté une crise inaugurale.*

- *Autres traitements symptomatiques* : Divers traitements peuvent être nécessaires au cours de l'évolution d'une tumeur cérébrale maligne antidépresseurs, anxiolytiques, anticoagulants, antalgiques, antiémétiques, protecteurs gastriques, anti-œdémateux, cérébraux autres que les corticoïdes comme les diurétiques.

b. La chirurgie d'exérèse :

La chirurgie d'exérèse tumorale est le premier moyen thérapeutique des tumeurs cérébrales (26). Elle est contre-indiquée chez les patients dont l'état de santé est trop mauvais et dans le cas de tumeurs profondes inopérables (gliomes thalamiques ou du corps calleux) ou situées dans des zones fonctionnelles, si les risques de morbidité post-opératoire sont supérieurs aux bénéfices escomptés.

Une autre modalité thérapeutique doit alors être envisagée. *Le rôle de la chirurgie est double : fournir un échantillon tumoral pour l'étude anatomopathologique afin de définir le traitement post-opératoire le plus adapté mais également retirer la zone tumorale pour soulager les structures neurologiques adjacentes à la tumeur, compressées par l'effet de masse.*

L'objectif est d'aboutir à l'exérèse macroscopique la plus complète possible de la zone tumorale tout en limitant les risques de séquelles fonctionnelles post-opératoires. Plusieurs études ont montré qu'une exérèse totale de la tumeur conditionne directement la durée de survie et la qualité de vie du patient opéré notamment dans le cas des gliomes (27; 28 ; 29). L'exérèse totale est définie comme l'ablation de plus 95% du volume tumoral obtenu à l'aide de l'imagerie pré-opératoire et comparé au volume des résidus tumoraux mis en évidence par un examen post-opératoire.

La chirurgie permet d'obtenir une certitude diagnostique par biopsie stéréotaxique ou exérèse chez les patients opérables, d'effectuer une exérèse tumorale, elle permet d'obtenir l'exérèse complète, si elle est possible, est indiquée dans toutes les tumeurs bénignes et dans les tumeurs malignes à l'exception des lymphomes cérébraux primitifs. En ce qui concerne une exérèse incomplète s'accompagne un processus plus réservé.

Les nouvelles technologies d'imagerie, cartographie et planification les systèmes, les outils de navigation et les dispositifs d'imagerie utilisés pendant l'opération peut désormais fournir aux neurochirurgiens une photo de l'emplacement et de la taille précis d'une tumeur lors d'une biopsie ou d'une intervention chirurgicale .

Les types de chirurgie les plus courants pour Les tumeurs cérébrales sont énumérées ci-dessous:

b.1. LA BIOPSIE :

Une biopsie peut être effectuée dans le seul but de l'obtention d'un échantillon de tissu. Il peut également être effectué dans le cadre de biopsie exérèse.

b.2. Voies d'abord de la fosse cérébrale postérieur :

Craniectomie sous-occipitale médiane :(Voies d'abord de la fosse cérébrale postérieur)
Indiquer pour les lésions de la région médiane : Vermis et région paramédiane des hémisphères cérébelleux, IV ème ventricule, région pinéale (en cas de voie supra cérébelleux), lésions postérieurs du tronc cérébral. Elle peut être réalisée .

b.3. Craniectomie sous-occipitale latérale: Utilisée dans les lésions de l'angle ponto cérébelleux et d'une manière générale, dans les lésions antéro latérales par rapport au tronc cérébral.

b.4. Voies d'abord de la région sus-tentorielle :

- *Voie ptériorale* : Elle donne accès aux régions sellaire et parasellaire. La position de la tête est légèrement surélevée par rapport au thorax pour réduire la stase veineuse
- *Craniotomie frontale*
- *Craniotomie paramédiane*

b.5. Traitement de l'hydrocéphalie :

Elle est indiquée chaque fois que les signes de l'HTIC s'accompagnent de signes de souffrance cérébrale et de troubles de la conscience. C'est un geste palliatif pour l'HTIC et la dilatation ventriculaire en amont . L'hydrocéphalie symptomatique représente l'indication type de la dérivation du LCR en raison de ses effets néfastes sur le parenchyme cérébral notamment l'atrophie post hydrocéphalique .

b.6. Exérèse chirurgicale totale :

Elle est le plus souvent possible dans les tumeurs bénignes extra cérébrales , la nécessité du caractère radical de résection doit dans certains cas être évaluée en fonction du risque fonctionnel.

b.7. Exérèse subtotale ou partielle :

Elle sera faite pratiquement toujours dans le cas des tumeurs gliales. En effet, en dehors de certaines variétés comme l'astrocytome pilocytique, où existe une interface relativement nette avec le tissu cérébral avoisinant, l'organisation des tumeurs macroscopiquement délimitées, on trouve une infiltration périphérique s'étendant

b.8. LA CHIRURGIE TRANSPHÉNOÏDE :

La chirurgie transphénoïdale est une approche souvent utilisée avec les adénomes hypophysaires et les craniopharyngiomes.

Certaines techniques d'assistance à la chirurgie comme la neuronavigation, l'imagerie per-opératoire et la détection des tumeurs par radiomarquage ou technique optique se développent également , permettent des exérèses chirurgicales plus efficaces et plus sûres.(30)

5.2. LA RADIOTHÉRAPIE :

La radiothérapie est utilisée lorsqu'une partie de la tumeur ou que la tumeur dans son ensemble ne sont pas opérables . Etant donné que plus de 90% des glioblastomes récidivent à moins de 3cm des berges de la tumeur excisée (31), elle peut également être utilisée pour

stériliser les bords de la cavité opératoire de tumeurs infiltrantes (32). Enfin, elle est généralement recommandée pour le traitement des récurrences tumorales.

La radiothérapie consiste à irradier la tumeur à l'aide de rayonnements ionisants X de haute énergie (jusqu'à 25MeV) issus d'un accélérateur linéaire tout en évitant les tissus sains adjacents . Sur la base des images IRM, TDM ou TEP, le radiothérapeute va délimiter les limites anatomiques et métaboliques de la tumeur en y incluant des marges de sécurité allant jusqu'à 2cm pour tenir compte de son extension et des mouvements du patient. Il définit ainsi le volume tumoral à irradier.

Pour le traitement des gliomes de bas-grade, la dose prescrite au volume tumoral varie entre 50 et 54Gy et est délivrée par fractions journalières de 1,8Gy durant 5 à 6 semaines . La radiothérapie est une stratégie efficace dans le cas de tumeurs cérébrales telles que les métastases, les méningiomes et les cancers pédiatriques. Son utilisation pour les gliomes reste limitée en raison de leur caractère infiltrant.(33)

5.3. LA CHIMIOTHÉRAPIE

La chimiothérapie repose sur l'injection par voie systémique de substances chimiques cytotoxiques (Carmustine, Cisplatine ou Témazolomide) qui ont pour but de bloquer la division cellulaire , La chimiothérapie est souvent concomitante à la radiothérapie pour le traitement des tumeurs cérébrales. En effet, certaines substances (notamment les dérivés du platine) ont un rôle radiosensibilisant en bloquant les cellules dans la phase de leur cycle où elles sont le plus sensible aux radiations ionisantes (34). La barrière hémato-encéphalique ayant le rôle de bloquer la pénétration de substances extérieures, les résultats cliniques du traitement sont dépendants de l'état de cette barrière qui peut être ouverte temporairement grâce à la radiothérapie.

6. LES PRINCIPAUX TYPES DE TUMEURS PRIMITIVES INTRACRÂNIENNES :

6.1. Les Gliomes

Les gliomes sont des tumeurs qui infiltrent progressivement le parenchyme cérébral, causant effet de masse et perte neuronale. La classification actuelle considère selon l'origine cellulaire de la prolifération les astrocytomes, les oligodendrogliomes et les tumeurs mixtes (oligoastrocytomes). Très schématiquement, on divise les tumeurs gliales en deux grands groupes d'évolutivité différente (Gliomes de haut grade et bas grade)

Les gliomes de bas grade comprennent, outre les astrocytomes pilocytiques, les astrocytomes diffus, les oligodendrogliomes et les oligoastrocytomes. L'IRM est l'examen de référence ; il montre une lésion généralement hypointense en T1 et hyperintense en T2 ou en FLAIR, siégeant volontiers dans les régions frontale, temporale ou insulaire. Il n'existe généralement pas ou peu de prise de contraste ; celle-ci doit faire fortement suspecter une transformation anaplasique.

Les oligodendrogliomes peuvent comporter par ailleurs des calcifications (90 % des cas) périphériques, souvent gyriformes. L'œdème périlésionnel est généralement minime.

La stratégie thérapeutique dans les gliomes de bas grade fait encore aujourd'hui l'objet de controverses. Chirurgie et radiothérapie sont les principales modalités de traitement utilisées actuellement. Cependant, des études récentes suggèrent l'intérêt de la chimiothérapie au cours des oligodendrogliomes.

L'évolution des gliomes de bas grade est généralement indolente pendant plusieurs années ; il est cependant aujourd'hui démontré que leur croissance est constante. Les deux risques de l'évolution sont l'évolution vers une infiltration diffuse, plus fréquente avec les oligodendrogliomes, réalisant un aspect de gliomatose cérébrale secondaire ou le passage à l'anaplasie.

6.2. Astrocytome anaplasique et glioblastome multiforme (GBM):

Ce sont les tumeurs cérébrales primitives les plus fréquentes chez l'adulte. Les glioblastomes sont environ quatre fois plus fréquents que les astrocytomes anaplasiques et représentent environ 25 % des tumeurs cérébrales primitives de l'adulte. L'âge moyen de survenue est de 40 ans pour les astrocytomes anaplasiques et de 53 ans pour les glioblastomes.

Les astrocytomes de haut grade se présentent au scanner et à l'IRM comme des lésions mal limitées, hétérogènes, se rehaussant après injection et entourées d'un œdème péri-tumoral souvent important. La présence d'une zone de prise de contraste irrégulière en anneau entourant des foyers d'allure nécrotique plaide en faveur du diagnostic de glioblastome.

une exérèse aussi complète que possible sera proposée dans tous les cas possibles. Elle sera également discutée à la récurrence. La radiothérapie elle améliore significativement la survie. Chimiothérapie : elle présente un intérêt en adjuvant.

6.3. Méningiomes :

Au scanner, un méningiome apparaît comme une lésion isodense bien limitée, se rehaussant de manière homogène et massive après injection de produit de contraste. Il peut exister un épaississement de l'os en regard, bien mis en évidence sur les coupes en fenêtre osseuse. L'IRM permet de préciser les limites de la tumeur la lésion présente un signal hypo- ou isointense en T1, isointense en T2, avec là encore un rehaussement franc et diffus après injection de gadolinium avec prise de contraste dural. L'œdème péri-tumoral est souvent modéré, sauf dans les tumeurs sécrétantes ou volumineuses.

La prise en charge des méningiomes repose avant tout sur l'exérèse chirurgicale

6.4. Lymphomes cérébraux primitifs :

Le lymphome du sujet immunocompétent, seul envisagé ici, peut survenir à tout âge, mais avec un pic de fréquence autour de 60 ans, alors que l'âge moyen de survenue chez l'immunodéprimé se situe vers 30 ans. Dans 80 à 90 % des cas, le lymphome est de type B à grandes cellules.

Imagerie Scanner et IRM montrent typiquement des lésions périventriculaires se rehaussant de manière dense et homogène après injection de produit de contraste, d'aspect « cotonneux ». Le lymphome peut disparaître après une prise de corticoïdes, même minime. Pour cette raison, la prescription de corticoïdes doit être évitée si possible avant la biopsie. et les études actuelles visent à alléger les protocoles, en particulier en limitant les indications de la radiothérapie.

6.5. Tumeurs hypophysaires :

Les adénomes hypophysaires: Ces tumeurs sont fréquentes. Elles représentent 10 % des tumeurs cérébrales primitives de l'adulte, mais sont probablement largement sous-diagnostiquées. Les signes cliniques suivants, parfois associés, doivent faire rechercher une lésion hypophysaire :

un syndrome d'hypersécrétion hormonale, par exemple aménorrhée-galactorrhée, ou d'hyposécrétion hormonale ; dans quelques rares cas, celle-ci peut être aiguë et menacer le pronostic vital, par décompensation d'une insuffisance surrénalienne ; des signes neurologiques (hypertension intracrânienne, hémianopsie bitemporale, atteinte des paires crâniennes par envahissement du sinus caverneux...).

Le diagnostic repose sur une IRM. L'examen permet de visualiser la tumeur (généralement en isosignal T1, hypersignal T2 se rehaussant après injection) et surtout ses rapports avec les structures de voisinage, en particulier chiasma optique, sinus caverneux et artères carotides. Le traitement dépend du type de l'adénome. Globalement, il est chirurgical en première intention sauf pour l'adénome à prolactine pour lequel un traitement médical par agoniste dopaminergique

6.6. MÉTASTASES CÉRÉBRALES :

Les métastases cérébrales ont pour origine un cancer primitif bronchopulmonaire dans un tiers des cas et du sein dans un quart des cas. Un cancer digestif, du rein ou un mélanome

est retrouvé respectivement dans 7 % des cas environ. Quand les métastases cérébrales sont révélatrices, la tumeur primitive est très souvent un cancer du poumon.

Le scanner sans injection met en évidence une ou plusieurs lésions hypo-, iso- ou hyperdenses se rehaussant après injection de produit de contraste. L'IRM est plus sensible que le scanner. Le traitement il doit viser non seulement l'amélioration de la survie (souvent décevante dans les études, 3 à 6 mois contre 1 mois sans traitement), mais surtout l'amélioration de la qualité de vie (éviter les déficits neurologiques).

La chirurgie est indiquée chez les patients présentant une lésion accessible sans risque fonctionnel. En cas de métastases multiples (3 ou moins), un geste chirurgical est parfois envisagé.

7. LA DÉTECTION PEROPÉRATOIRE DES TUMEURS CÉRÉBRALES

La qualité de la chirurgie d'exérèse conditionne directement la qualité et la durée de survie des patients opérés. Si la localisation peropératoire de la tumeur et de ses contours avec la TDM ou l'IRM a permis de sécuriser l'abord chirurgical et la qualité du geste opératoire, la délimitation précise de l'extension de la tumeur pendant l'opération demeure toujours très difficile en se limitant à un simple contrôle visuel.

Les contrôles post-opératoires réalisés grâce au TDM et à l'IRM mettent ainsi en évidence la présence de résidus tumoraux dans 71% . L'examen extemporané d'échantillons prélevés au niveau des berges de la tumeur permet de s'assurer de la nature pathologique des tissus mais ces analyses sont coûteuses et rallongent considérablement la durée de l'intervention.

Un intérêt croissant est donc apparu pour des outils de contrôle miniaturisés capables de fonctionner en bloc opératoire et de suppléer ainsi les imageurs externes en permettant au chirurgien de différencier en temps réel les tissus sains des tissus pathologiques au cours d'une opération d'exérèse ou d'une biopsie.

Plusieurs techniques sont actuellement utilisées en routine clinique ou sont en cours d'évaluation pour renforcer le repérage per-opératoire des tumeurs cérébrales : la neuronavigation, les systèmes d'imagerie anatomique classiques telles que les ultrasons qui ont été adaptées à leur utilisation en bloc opératoire ,la TDM et IRM peropératoire . On va détailler plus dans les chapitres suivants l'utilité de l'échographie per opératoire dans les résections des tumeurs cérébrales. (35)

III. Les tumeurs spinales et les malformations artérioveineuses (MAV) :

1. Les tumeurs intramédullaires :

Les tumeurs intramédullaires sont rares. Mais en raison de leur contact très étroit avec la moelle épinière et les racines nerveuses, leur morbidité est considérable et elles doivent donc entrer dans le diagnostic différentiel des pathologies vertébrales.

Elles totalisent pratiquement 10% des tumeurs intradurales; histologiquement, il s'agit la plupart du temps d'épendymomes, astrocytomes ou hémangioblastomes bénins.(tableau III)

Les tumeurs intramédullaires sont par définition situées dans la moelle épinière, du trou occipital jusqu'au cône médullaire au niveau de la transition dorsolombaire. Elles se manifestent par des douleurs locales, des déficits sensitivomoteurs progressifs, rarement par des troubles sphinctériens ou des hémorragies avec symptomatologie transverse. La pose rapide du diagnostic par IRM est importante, avec et sans produit de contraste

La pose rapide du diagnostic par IRM est importante, avec et sans produit de contraste. L'exérèse chirurgicale la plus rapide possible est le traitement de choix dans la plupart des cas; elle donne le diagnostic histologique et supprime la compression de la moelle environnante par la tumeur. Le résultat dépend du type histologique et de la qualité de la résection; dans la plupart des cas de tumeurs intramédullaires bénignes, (36)

1.1. Les épendymomes :

Les épendymomes spinaux totalisent quelque 60% des tumeurs intramédullaires et se rencontrent généralement à l'âge adulte moyen. Les épendymomes intramédullaires sont des tumeurs bénignes, sans capsule. Ils compriment la moelle environnante généralement sans l'infiltrer.

L'IRM montre une tumeur intramédullaire nettement délimitée, souvent kystique avec concentration irrégulière de produit de contraste ; Le traitement de choix est l'exérèse tumorale microchirurgicale complète par abord postérieur.

1.2. Les astrocytomes :

Les astrocytomes sont les tumeurs intramédullaires les plus fréquentes de l'enfant et sont générale. Tout comme les épendymomes, la plupart du temps au niveau cervical ou à la transition cervicodorsale. 90% environ sont bénins environ sont bénins. Chez l'adulte, il s'agit presque toujours d'astrocytomes fibrillaires, et chez l'enfant et l'adolescent d'astrocytomes pilokystique et de ganglionomes.

L'IRM montre comme pour l'épendymome une tumeur intramédullaire nettement délimitée, souvent kystique, captant irrégulièrement le produit de contraste, qui comprime localement la moelle et peut provoquer une hydrosyringomyélie.

Pour l'astrocytome de bas grade le traitement est controversé, comme au moins une biopsie doit confirmer le diagnostic, une approche chirurgicale est recommandée par principe par la majorité des cas. Par rapport à l'astrocytome de haut grade l'exérèse radicale chirurgicale ou radiothérapeutique se pratique occasionnellement si la moelle épinière a déjà été lésée.

1.3. Hémangioblastome :

Les hémangioblastomes spinaux sont des tumeurs vasculaires bénignes, totalisant 5 à 10% de toutes les tumeurs intramédullaires. Ils sont nettement délimités et n'ont pas de capsule.

L'IRM montre une tumeur nettement délimitée, souvent kystique, captant irrégulièrement le produit de contraste, la plupart du temps à localisation postérolatérale dans la moelle épinière.

Le traitement de choix des hémangioblastomes symptomatiques est l'exérèse tumorale complète par microchirurgie .

Tableau III : Classification des tumeurs spinales intra – dures et leurs types histologiques les plus fréquents

Tumeurs intramédullaires (10%)	Tumeurs extramédullaires (90%)
Ependymome	Neurinome/neurofibrome
Astrocytome	Méningiome
Hémangioblastome	Ependymome du filum terminal
Cavernome*	
Métastases*	

2. Les tumeurs intradurales extra médullaires :

Les tumeurs intradurales sont rares. Mais en raison de leur contact très étroit avec la moelle épinière et les racines nerveuses, leur morbidité est considérable et elles doivent donc entrer dans le diagnostic différentiel des pathologies vertébrales.(TABLEAU IV)

Les tumeurs extramédullaires totalisent pratiquement 90% des tumeurs spinales intradurales. Histologiquement, il s'agit la plupart du temps de

- schwannomes/neurofibromes,
- méningiomes ou au niveau lombaire
- d'épendymomes du filum terminal, tous bénins.

Elles se manifestent par des douleurs locales et/ou radiculaires progressives et des déficits sensitivomoteurs. Le diagnostic est posé à l'aide de la tomographie par résonance magnétique.

2.1. Les tumeurs des gaines nerveuses :

Les tumeurs des gaines nerveuses sont avec les méningiomes les tumeurs intradurales les plus fréquentes (37)

et pratiquement toujours bénignes, vu qu'elles proviennent des cellules de la gaine de Schwann des racines postérieures, sensitives. 80 à 90% sont intradurales et 10 à 20% (intra- et) extradurales,

Histologiquement, il existe *les schwannomes* qui entourent le nerf, et *les neurofibromes* qui l'infiltrent (38)

Les neurofibromes peuvent dégénérer en tumeurs malignes des gaines des nerfs périphériques, mais ils sont extrêmement rares (4). Les tumeurs des gaines nerveuses spinales peuvent se rencontrer dans le cadre d'une neurofibromatose (NF), et elles sont caractérisées par une croissance plus invasive, des localisations multiples et une dégénérescence maligne plus fréquente .

Les tumeurs des gaines nerveuses donnent typiquement des douleurs radiculaires et déficits sensitifs progressifs; les déficits moteurs et symptômes de compression médullaire sont rares et tardifs dans l'évolution

L'IRM montre une tumeur nettement délimitée, captant uniformément le produit de contraste, avec parfois quelques zones kystiques.

Le traitement de choix des tumeurs des gaines nerveuses spinales symptomatiques est l'exérèse chirurgicale complète.

2.2. Méningiomes :

Les méningiomes sont issus de cellules arachnoïdiennes et totalisent un peu plus du tiers des tumeurs intradurales primitives de la colonne; 90% environ sont intradurales-extramédullaires, et 10% sont à la fois intra- et extradurales

Le diagnostic est posé par IRM, le méningiome se présentant comme un processus expansif iso-intense à la moelle en T1 et T2, avec captation très homogène du produit de contraste .

Le traitement de choix des méningiomes spinaux symptomatiques est l'exérèse chirurgicale complète par abord postérieur avec résection ou coagulation de la base durale . (39)

2.3.Ependymomes du filum terminal

Contrairement aux épendymomes intramédullaires cervico-dorsaux, ceux du filum terminal sont lombaires, intraduraux-extramédullaires. Ce sont des tumeurs bénignes (stade OMS I) Les épendymomes du filum terminal se manifestent cliniquement souvent entre 30 et 50 ans par des douleurs locales ou radiculaires, des déficits neurologiques lombosacrés et parfois par une hémorragie sous-arachnoïdienne spinale

L'IRM montre une tumeur nettement délimitée, encapsulée, captant le produit de contraste, impossible à différencier des tumeurs des gaines nerveuses

Le traitement de choix des cas symptomatiques est l'exérèse chirurgicale complète de la tumeur par abord postérieur (40)

Tableau IV : Pourcentage arrondi des différentes tumeurs intradurales-extramédullaires

Tumeurs des gaines nerveuses	45%
Méningiomes	40%
Ependymomes du filum terminal	10%
Rares (lipome, dermoïde, épidermoïde, métastases par égouttement)	5%

3. LES MALFORMATIONS ARTÉRIOVEINEUSES :

3.1.Les malformations artérioveineuses cérébrales :

Les malformations artérioveineuses cérébrales (MAVc) sont des pathologies vasculaires agressives présentant un risque hémorragique lourd de conséquence en terme de morbi-mortalité.

Les MAVc intracrâniennes sont des anomalies congénitales qui se développent entre les quatrièmes et huitièmes semaines de la vie intra-utérine de l'embryon. Elles consistent en la persistance d'une connexion entre artère et veine sans interposition du lit capillaire. (41) .

L'histoire naturelle des MAV intracérébrales est difficile à reconstituer compte tenu du peu de grandes séries de cas non opérés disponibles avec un recul suffisant. De plus, ces séries regroupent habituellement uniquement les cas contre-indiqués pour la chirurgie, ce qui représente un biais indiscutable. Toutefois, un certain nombre de faits sont maintenant connus : *Le risque hémorragique* des MAV non rompues est de l'ordre de 1 à 3 % par an (42) . Le taux de morbidité variant de 4 à 30% (43). Le risque de récurrence hémorragique semble plus important dans la première année suivant l'accident initial, de l'ordre de 7% (44) *La taille des MAVc* est variable dans le temps puisque l'on a observé des augmentations (surtout chez les sujets jeunes) ou des diminutions de taille, et même des disparitions spontanées (45) .

Les malformations cérébro-vasculaires sont subdivisées en 6 grandes catégories : les malformations artério-veineuses cérébrales (MAVc), les fistules artérioveineuses dures (FAVd), les malformations anévrysmales de la veine de Galien (MAVG), les anomalies veineuses de développement (AVD), les angiomes caverneux ou cavernomes, les sinus pericranii et les télangiectasies 1,2. Les trois premières d'entre elles (MAVc, FAVd et MAVG) sont caractérisées par la présence d'un « shunt » artério-veineux, c'est à dire d'une communication anormale entre les artères et veines cérébrales (Tableau V)

**TABLEAU V : Classification des malformations vasculaires
intra crâniennes d'après *chaloupka et huddle (45)***

Anomalies vasculaires prolifératives bénignes

Hémangiomes

Anomalies vasculaires non-prolifératives

Malformations capillaires (télangiectasies)

Malformations veineuses (anomalies veineuses de développement)

Malformations cavernueuses (cavernomes)

Malformations artérielles (angiodysplasies et anévrysmes)

Malformations avec shunt artério-veineux

Malformations artério-veineuses cérébrales

Fistules artério-veineuses piales

Fistules artério-veineuses dures

Fistules artério-veineuses de la veine de Galien

Malformations mixtes

La localisation des MAV est dans près de 90% supratentorielle. L'artère nourricière principale est dans la majorité des cas l'artère cérébrale moyenne, puis dans un ordre décroissant l'artère cérébrale antérieure et l'artère cérébrale postérieure. Près de 40% des MAV ont une taille qui est de 2,5 cm, 50% ont une taille comprise entre 2.5m et 5 cm et seulement 10% ont une taille supérieure à 5 cm. (Figure 11)

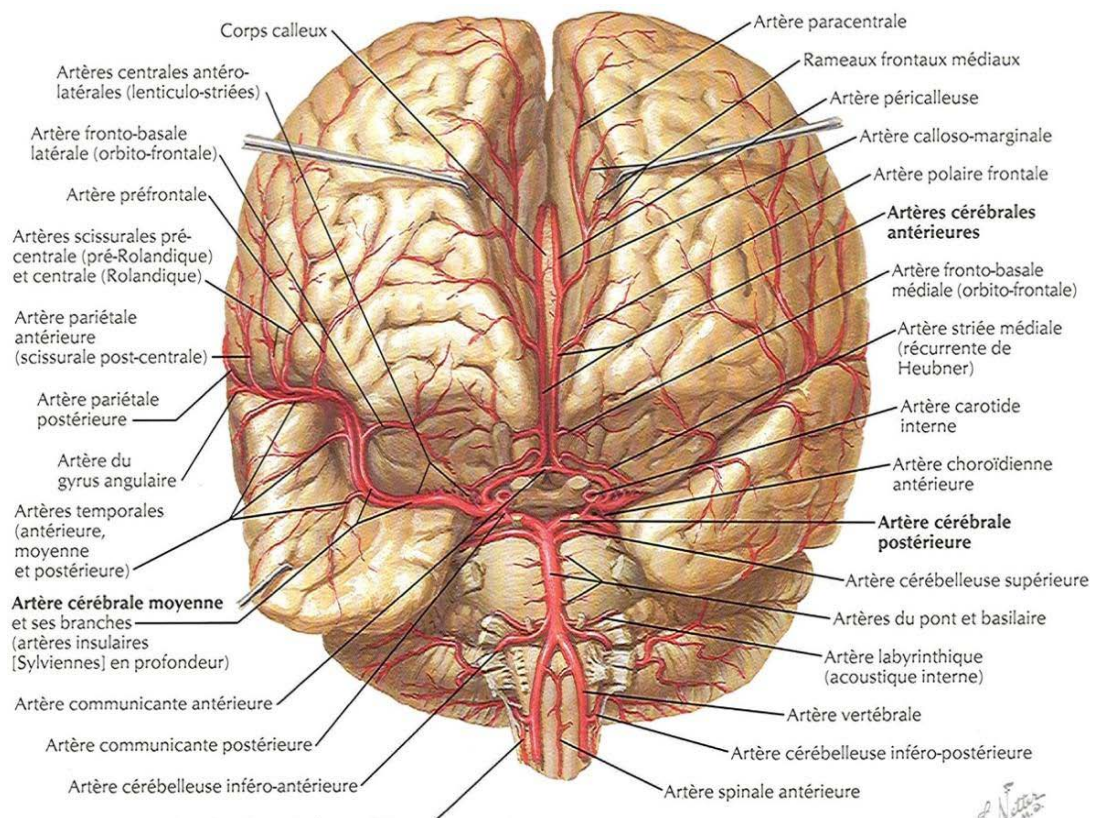


Figure 11: Coupe frontale montrant la vascularisation cérébrale

L'expression clinique des MAV est dans la majorité des cas un accident hémorragique intracérébral.

L'incidence de l'hémorragie est variable selon les séries : de 30% à 86% nécessairement liée à la localisation (46). En effet, il peut s'agir de crises induites par un dommage neural dû un un phénomène de vol sanguin induisant une ischémie à distance.

D'autres symptômes peuvent se développer mais sont beaucoup moins fréquent : décompensation cardiaque (chez les nourrissons et les jeunes enfants), hydrocéphalie obstructive, compression des nerfs crâniens, céphalées, bruit intracrânien, hypertension intracrânienne par perturbation du drainage veineux encéphalique. Le pic d'âge d'apparition des symptômes est la troisième décennie ; 20% s'expriment avant l'âge de 15 ans, 70% entre 15 et 50 ans et 10% au-delà.

Le diagnostic de MAV est évoqué par des examens complémentaires tels que le scanner ou l'I.R.M. Sur le scanner avec injection de produit de contraste, les MAV se caractérisent par un rehaussement d'aspect serpiginieux. L'image en est assez caractéristique.

L'I.R.M. est nécessaire avant toute chirurgie et permet de préciser la topographie exacte de la lésion et ses rapports avec les structures à risque .

Le diagnostic final repose sur *l'artériographie*. Cette dernière doit être faite dans d'excellentes conditions et de manière sélective. Les temps précoces permettent d'identifier clairement le nidus, de dénombrer les différents pédicules alimentant la MAV et d'observer les modifications de l'arbre artériel et veineux .

L'exploration du système carotidien externe permet de rechercher un éventuel pédicule dural.(47)

Au terme de l'artériographie un grade peut être établi. Le seul traitement d'une MAV est celui qui entraîne sa disparition totale. Dans cet esprit, la chirurgie est l'option la meilleure. Le deuxième aspect aspect du traitement des MAV est la radio chirurgie. Il est très important de préserver toutes les différentes artères nourrissant le cerveau adjacent.

Le troisième aspect du traitement des MAV est la radio chirurgie. Elle est réservée aux petites malformations de moins de 2,5 cm ou à des résidus non exclus après chirurgie ou embolisation, situés dans des zones difficilement accessibles sans risque majeur de séquelles opératoires. Mais la radio chirurgie agit avec lenteur ; la MAV ne sera oblitérée qu'après un à deux ans et durant cette période.

3.2.Les malformations vasculaires spinales :

Les malformations vasculaires spinales (MVS) sont des malformations vasculaires de la moelle épinière, de ses racines, du Filum Terminale et de leurs enveloppes méningée et osseuse ; la classification des MVS est la suivante :

- Les anévrysmes artériels
- Les malformations artério veineuse (intra-médullaires, dures et extradurales)

- Les cavernomes et hémangiomes .
- Les malformations veineuses .

Les MAS peuvent se manifester par cliniquement par :

- Une hémorragie méningée spinale, révélée par le classique coup de poignard rachidien ; la découverte de réflexes ostéo-tendineux abolis peut attirer l'attention vers une localisation basse. Néanmoins, des signes encéphaliques trompeurs ne sont pas exceptionnels (5 %).
- Une symptomatologie déficitaire, aiguë ou subaiguë, pouvant évoquer un hémato rachis :

Les radiographies standards Lorsque la malformation atteint un volume important, on peut observer un élargissement du canal rachidien, non spécifique, à l'image de ce que l'on observe pour les tumeurs. Pour le scanner sans injection permet d'apprécier la taille de la moelle, l'existence d'un hématome, d'une calcification ou d'une cavité intra-médullaire. L'injection intraveineuse de contraste, ou mieux encore l'angioscannographie séquentielle, éventuellement couplée à la myélographie, précise encore mieux la situation des vaisseaux anormaux par rapport à la moelle.

L'I.R.M. est sans conteste le premier examen, supérieur au scanner et à la myélographie, pour l'exploration des malformations vasculaires spinales. Elle retrouve les vaisseaux hypertrophiés, précisent leur localisation intra ou extra-médullaire et permet de différencier les MVS des tumeurs.

En ce qui concerne les MAV intramédullaire le traitement repose sur la chirurgie d'exérèse ; pour les MAV extra durales leur traitement relève d'une attitude combinée : embolisation et chirurgie complémentaire.

Pour les cavernomes, le traitement est fonction de la topographie en hauteur et largeur de la lésion et du terrain. Le traitement de choix est l'ablation totale de la lésion.

IV. LES DIFFÉRENTS TECHNIQUES D'IMAGERIE UTILISÉES EN PEROPÉRATOIRE EN NEUROCHIRURGIE :

1. La neuronavigation :

La neuronavigation est l'outil per-opératoire le plus utilisé lors de la chirurgie des tumeurs cérébrales . Elle combine un microscope et un système de repérage optique ou magnétique qui donne en temps réel la localisation 3D des outils chirurgicaux par rapport à la tumeur et aux différentes structures du cerveau . Pour cela, des images IRM obtenues avant l'opération sont entrées dans une console de neuronavigation puis affichées dans les trois directions de l'espace sur un moniteur. Le chirurgien peut alors planifier la chirurgie en déterminant la position de l'incision cutanée et les dimensions du volet de la craniotomie puis définir la voie d'accès optimale à la tumeur, ce qui lui permettra de préserver les tissus sains fonctionnels (48).

La neuronavigation est utilisée à plusieurs moments de l'intervention. Au-delà de la préparation de l'abord chirurgical, elle permet également en fin d'intervention de contrôler l'exérèse de la tumeur . La principale limite de la neuronavigation est le problème de la déformation des tissus mous durant la chirurgie d'exérèse appelé brain shift. Lors de l'exérèse du nidus de la tumeur, plusieurs phénomènes comme la variation de la pression intracrânienne et la gravité, vont induire des déplacements importants de la matière cérébrale bordant la lésion et donc des repères anatomiques obtenus avant l'intervention.

2. L'IRM per-opératoire :

L'IRM per-opératoire permet de générer des images de la tumeur et des différentes structures cérébrales pendant l'intervention. Il est alors possible de contrôler en temps réel l'excision des marges de la tumeur, de guider une biopsie ou de corriger les erreurs de

localisation liées au déplacement des tissus pendant l'intervention. Les images IRM pré-opératoires peuvent en effet être réactualisées afin de contrôler en temps réel les déformations de la matière cérébrale causées par la chirurgie. En pratique, les séquences IRM per-opératoires obtenues après injection d'un produit de contraste au gadolinium. (49)

Pour la prise d'images, la table du patient est généralement transportée dans une salle jumelle contenant le système d'imagerie. L'IRM per-opératoire peut également être placée à l'intérieur du bloc opératoire, mais la chirurgie s'effectuera alors au-delà de la ligne des 5 gauss afin que les instruments chirurgicaux puissent être utilisés en toute sécurité. Si la technique d'IRM per-opératoire est très performante, elle reste néanmoins contrainte par les limites intrinsèques de l'imagerie anatomique pour localiser précisément de petites zones d'infiltration de la tumeur primitive. Son utilisation est également freinée par un coût très élevé.

3. L'Échographie per opératoire (IOUS) :

L'échographie utilise les propriétés de réflexion d'une onde ultrasonore à l'interface entre deux milieux. L'écho mesuré dépend des propriétés mécaniques et de la densité des matériaux traversés. Dans le cas des tumeurs cérébrales, l'échographie per-opératoire utilise les différences de densité entre tissus tumoraux et tissus sains. Les tissus tumoraux apparaissent hyper-échogènes sauf les zones de nécrose qui apparaissent hypoéchogènes. Les impulsions générées par la sonde échographique se situent dans une gamme variant de 4 MHz pour les tumeurs les plus profondes à 10 MHz pour les tumeurs superficielles. La résolution spatiale, qui est inversement proportionnelle à la fréquence, est de l'ordre de 500µm à 10MHz et de 1mm à 5MHz (50). La technique ultrasonore est donc parfaitement adaptée à la localisation précise de lésions cérébrales profondes pendant l'intervention.

L'échographie per-opératoire est, en termes de coûts et de simplicité de mise en œuvre, une bonne alternative à l'IRM peropératoire et offre en temps réel une qualité d'image analogue (50) Contrairement aux autres modalités d'imagerie anatomique, l'échographie ne peut être

utilisée que de façon per-opératoire car elle nécessite une craniotomie : les ondes ultrasonores ne peuvent traverser la boîte crânienne. En pratique, cette technique est toujours utilisée en association avec la neuronavigation. La sonde échographique émettrice-réceptrice d'ondes ultrasonores, équipée de billes réflectrices infrarouges, est introduite dans la cavité opératoire puis acquiert une série d'images 2D en balayant l'ensemble du cerveau. L'image 3D du cerveau recalée dans le repère de l'arc de référence est obtenue en juxtaposant les images 2D entre elles. A tout moment de l'intervention, le neurochirurgien pourra répéter cette opération pour s'affranchir du brain shift (51). La modalité ultrasonore permet également de réaliser des images Doppler des vaisseaux sanguins qui bordent la tumeur et qui sont à préserver (50) .(Figure 12)

L'échographie per-opératoire peut aussi être utilisée pour planifier et guider la chirurgie d'exérèse ou pour guider une biopsie. Toutefois cette technique a montré des performances limitées en termes de sensibilité pour définir l'étendue des berges tumorales des gliomes de haut grade (52). Au cours de l'intervention chirurgicale, de nombreux artefacts tels que le sang, des débris cérébraux ou des bulles d'air apparaissent et dégradent la qualité de l'image ultrasonore.

Le risque infectieux due à la manipulation de la sonde échographique directement sur le parenchyme cérébrale est quasi absent . Ainsi, à la fin de l'exérèse, l'échographie per-opératoire ne différencie les berges tumorales d'un gliome d'une zone saine qu'avec une sensibilité de 26% (53).

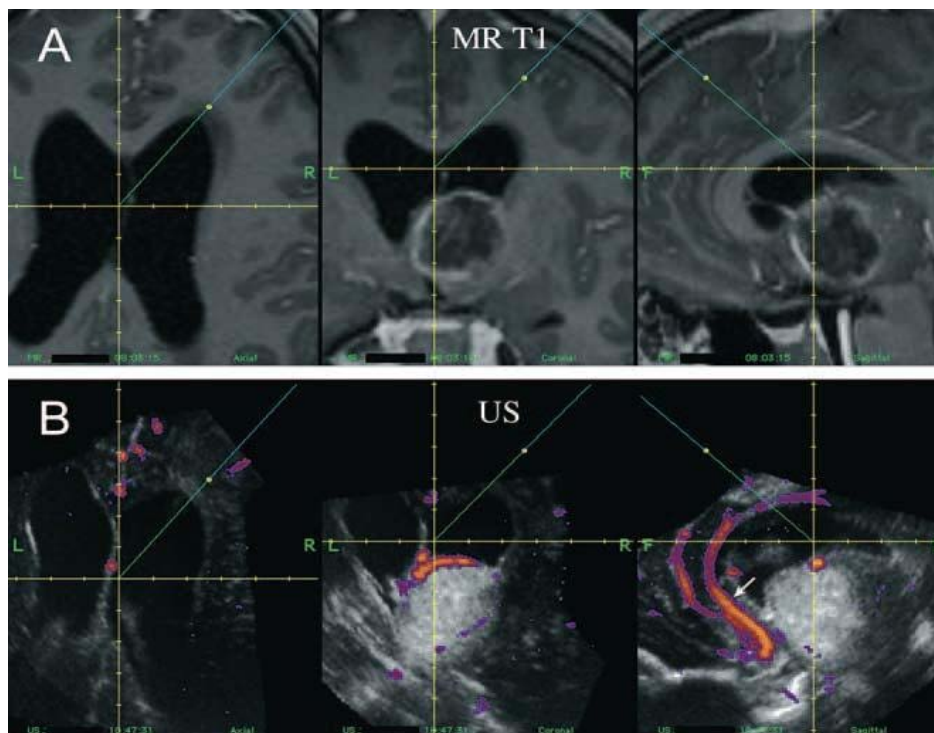


Figure 12 : Comparaison entre images IRM pré-opératoires (A) et échographie per-opératoire (B) (de gauche à droite : plan axial, coronal et sagittal) illustrant la compensation du brain shift et montrant une artère pericallosale à préserver (Unsgaard et al. 2006)

V. RAPPEL SUR LES BASES PHYSIQUES DES ULTRASONS , ET APPLICATIONS CLINIQUES

L'échographie est une méthode d'imagerie dont l'application en médecine a été développée à partir du mode A primitif et des systèmes statiques en mode B, empruntés à la métallurgie et aux technologies militaires, et mis en œuvre de façon exponentielle au cours des dernières décennies avec la réalisation d'équipements présentant de nombreuses caractéristiques intéressantes. Parmi celles-ci figurent la capacité de produire des images en temps réel rendues en échelle de gris et la possibilité d'effectuer des examens fonctionnels et morphologiques des phénomènes de flux sanguins avec l'analyse Doppler couleur et puissance ;

de fournir des volumes 3D et de les analyser en temps réel, et récemment, d'évaluer l'élasticité des tissus avec les systèmes élastographiques et en tirant parti des capacités d'analyse de la microcirculation et des lésions des organes dans les milieux de contraste et des algorithmes dédiés à leur analyse.

1. Historique de l'imagerie ultrasonore et son application en neurochirurgie :

L'histoire de l'échographie remonte au milieu du XIXe siècle. 1700 avec la postulation de l'existence de sons non audibles (Lazzaro), la découverte de l'effet piézoélectrique et du phénomène Doppler dans les années 1800 et le développement des balayages dynamiques en mode A (années 1950) puis en mode B (fin des années 1970) ont permis de mettre au point une technologie de pointe qui se développe rapidement (54).

Lazzaro Spallanzani (1729–1799), le premier à prouver l'existence de sons non audibles.

Johann Christian Doppler (1803–1853) a émis une hypothèse selon laquelle la fréquence observée d'une onde dépend de la vitesse relative de la source et de l'observateur. Selon cet effet (appelé par la suite effet Doppler), si la source se rapprochait de l'observateur, la fréquence observée de l'onde serait plus élevée, et si elle s'éloignait de l'observateur, elle serait plus faible.

Aujourd'hui, cet effet est couramment utilisé pour déterminer la vitesse et la direction du flux sanguin et aide à l'imagerie des vaisseaux sanguins à l'aide des ultrasons. En 1880, le physicien français Pierre Curie et Jacques Curie ont découvert la piézoélectricité. Ce principe important a été utilisé plus tard pour développer l'échographie des transducteurs qui produisent des ondes ultrasonores sur application d'un courant électrique et qui sont capables de convertir les ondes sonores réfléchies en ondes électriques des signaux pour la génération d'une image ultrasonore

Les premières images ultrasonores étaient des représentations graphiques sous forme de scan en mode A et ont ensuite évolué vers des modèles anatomiques reconnaissables tels que ceux observés dans l'imagerie par scan en mode B.

Karl Theodore Dussik a été un pionnier dans l'utilisation des ultrasons en 1941, il a présenté son idée d'utiliser les ultrasons comme outil de diagnostic. Les premières images ultrasonores du cerveau et des ventricules, obtenues à l'aide d'un premier prototype construit par Dussik et son frère Friedrich, ont été publiés en 1947. Ils ont appelé cette procédure "hyperphonographie". C'était la première tentative d'imagerie d'un organe humain.

Échographie en mode A (modulation d'amplitude) a été le premier graphique unidimensionnel d'imagerie par ultrasons. L'utilisation de l'échographie en mode A pour la localisation des tumeurs cérébrale a été étudiée par French et al. (1950) (55).

William Peyton, neurochirurgien, a été le premier à utiliser les ultrasons chez un patient souffrant d'un glioblastome pariétal en 1951 (56). De nombreux rapports de divers auteurs ont examiné l'utilisation possible de l'écho-encéphalographie dans la chirurgie des tumeurs cérébrales (57 - 58) .

Tanaka et al. (1965) ont pu réaliser des images échographiques des tumeurs dans les lobes frontaux et temporaux avant l'opération à travers le crâne intact à l'aide d'un transducteur de 2,25 MHz en utilisant la technique de réflexion (59).

Walker et Uematsu ont tenté de caractériser diverses lésions cérébrales en peropératoire à l'aide d'une sonde stérilisée au formol à 5 mHz. Ils ont constaté que la caractéristique acoustique en cas d'astrocytome de bas grade était similaire à celui du cerveau normal, et il était difficile de différencier les marges de la tumeur de bas grade qui était similaire à celui du cerveau normal (60)

D'autres tumeurs de haut grade, kystes, métastases et méningiomes ont produit des modèles acoustiques identifiables. Backlund (1975) a utilisé l'échographie avec le cadre stéréotaxique. Le développement des ultrasons à balayage sectoriel en temps réel en 2D a révolutionné l'utilisation de l'échographie dans le cadre peropératoire.

En 1980, Rubin a publié un rapport préliminaire sur l'échographie en temps réel utilisant un scanner à secteur rotatif dans deux cas de tumeurs cérébrales et a souligné le rôle des ultrasons dans la visualisation des structures cérébrales pendant l'opération (61)

Rubin et Dohrmann ont mis au point des sondes avec trois types d'imagerie différents (61). Les fréquences utilisées en neurochirurgie sont les suivantes : 3, 5 et 7,5 MHz. Parallèlement, d'autres ont également publié leurs observations sur l'utilisation des ultrasons en temps réel dans les opérations du cerveau (62 , 63) .

Cependant, c'est le développement et l'application de la technologie des ultrasons en échelle grise en temps réel qui a réellement donné une impulsion à l'échographie peropératoire (IOUS).

2. BASES PHYSIQUES DES ULTRASONS ET APPLICATION CLINIQUE :

Le son est une modalité de transmission de l'énergie, d'un point de vue physique, le son peut être décrit comme un phénomène ondulatoire, l'onde sonore, qui peut être définie en fonction des propriétés des phénomènes ondulatoires typiques . longueur d'onde (λ), la fréquence (f) l'amplitude qui exprime la quantité d'énergie transportée et la vitesse de propagation qui dépend de la nature et la température du milieu dans lequel le son se propage (64 , 65)

Les ultrasons sont un type particulier d'ondes sonores avec de très hautes fréquences ($>20\ 000$ Hz) ; Les systèmes à ultrasons appliqués à la médecine utilisent des ultrasons d'une fréquence comprise entre 2 et 18–20 MHz avec des longueurs d'onde très courtes et donc avec des caractéristiques qui permettent une étude des structures anatomiques avec une forte résolution . La longueur d'onde et donc sa fréquence réciproque sont, avec le milieu de propagation, les éléments déterminants d'une propriété importante des ultrasons, la capacité de propagation, qui est la distance à laquelle les ultrasons peuvent être transmis dans le milieu.

Cette capacité est liée au rapport 1 dB/cm/MHz à partir duquel il en découle que plus la fréquence des ultrasons est élevée, plus la capacité de transmission en profondeur est faible.

L'atténuation que le faisceau d'ultrasons subit va lors de la traversée d'un tissu, qui s'exprime par l'impédance acoustique de ce tissu particulier, dépend des phénomènes d'interaction entre le faisceau et le matériau dont le tissu est composé et notamment par l'inhomogénéité. À l'endroit où les différents composants d'un tissu entrent en contact, des variations brutales de l'impédance acoustique sont générées.

Ces phénomènes sont *la réflexion* : c'est-à-dire l'inversion du sens de propagation, de sorte que le faisceau d'ultrasons est se propageant vers la source d'émission, *la réfraction* à l'interface, le faisceau se propage dans la même direction mais avec un angle différent de l'incident. *La Transmission* : lorsque l'impédance acoustique est zéro ou négligeable et le faisceau conserve à la fois direction et énergie et *l' Absorption* : lorsque l'énergie des ultrasons est de l'ordre de grandeur du l'impédance acoustique et l'ensemble du faisceau s'efface en énergie thermique (66, 67).

Dans l'échographie clinique, le faisceau ultrasonore, dont nous avons décrit les principales caractéristiques, est générée par ce que l'on appelle des transducteurs ou des sondes [68]. Les sondes à ultrasons fonctionnent à la fois comme générateurs et comme récepteurs. de l'émission et comme récepteurs du retour et sont essentiellement constitués d'une interface électrique et d'un ensemble de cristaux de quartz ou de céramiques synthétiques capables de générer un "effet piézoélectrique". Les cristaux de la sonde sont capables de transtransformer les échos en impulsions électriques (69, 70) La largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude des échos renvoyés. (figure13)

L'image obtenue par ultrasons est naturellement inhomogène puisque les échos profonds, provenant des parties anatomiques plus éloignées de la sonde, sont évidemment plus atténués.

L'échographie étant une modalité d'imagerie principalement sur la base d'images en niveaux de gris, un tissu ou un organe peut être plus ou moins clair ou plus sombre d'un autre.

La luminosité intrinsèque d'un tissu ou d'un organe est généralement connue comme échogénicité . Dans le cadre de l'échographie conventionnelle terminologie, l'échogénicité d'un tissu doit être par rapport à celle d'une structure environnante différente.(figure 14)

On distingue ainsi différents types d'échogénéicités :

2.1. Hyperéchogène

Un tissu qui est plus brillant qu'un autre (par exemple, la graisse sous-cutanée est hyperéchogène par rapport au muscles sous-jacents). En général, il est utilisé comme synonyme de brillant.

2.2. Isoéchoïque

Un tissu aussi brillant qu'un autre (par exemple, le cortex rénal est isoéchogène au parenchyme normal du foie). En général, il est utilisé pour signaler l'apparition d'une lésion

2.3. Hypoéchogène

Un tissu plus foncé qu'un autre (par exemple, les muscles sont hypoéchogènes par rapport à la graisse sous-cutanée sus-jacente). En général, il est utilisé comme synonyme de sombre.

2.4. Anéchoïque

Comme les images échographiques sont la représentation graphique des ondes ultrasonores se réfléchissant sur les interfaces des tissus, les structures purement fluides ou la collecte n'ont aucun signal

Il est compréhensible que cette classification, bien que universelle, soit fortement dépendante des opérateurs. Est considéré comme anéchoïque tout ce qui ne produit pas d'écho en retour comme, par exemple, le fluide contenu dans un simple kyste .

Une caractéristique clé de l'image est la résolution spatiale. On peut la distinguer en résolution axiale (Figure 15), le long de l'axe de propagation des ultrasons et en résolution latérale (Figure 16), perpendiculaire à celui-ci.

La résolution axiale dépend de la fréquence en relation directe, et sa valeur maximale théorique ne peut être supérieure à la moitié de la longueur d'onde du faisceau.

Par conséquent, les sondes à plus grande fréquence permettent pour obtenir des résolutions plus élevées bien qu'elles soient limitée par le fait que leur capacité de pénétration est proportionnellement plus faible. Résolution latérale dépend de la taille des cristaux. Même dans ce les cristaux plus petits offrent une meilleure résolution au détriment de la capacité de pénétration.

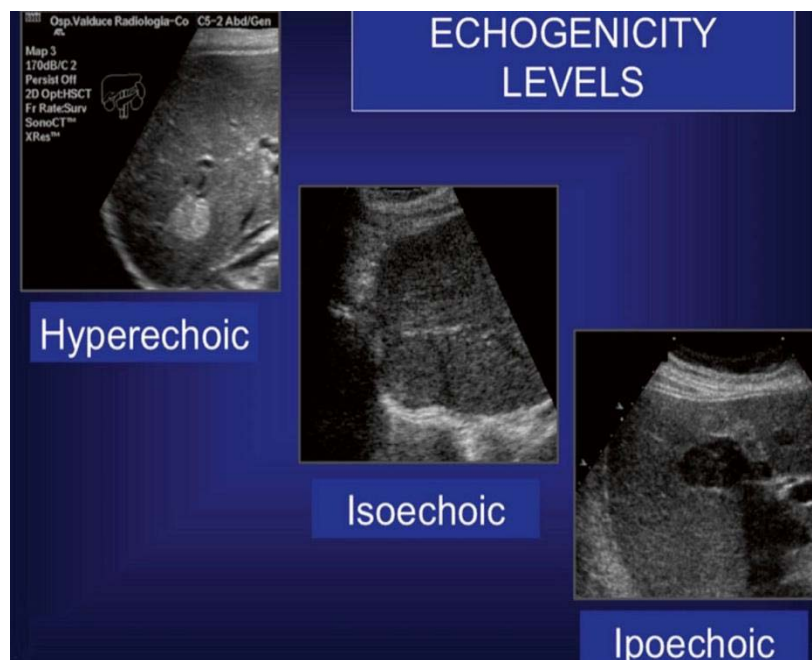


Figure 14 : montrant les différents types d'échogénéicité

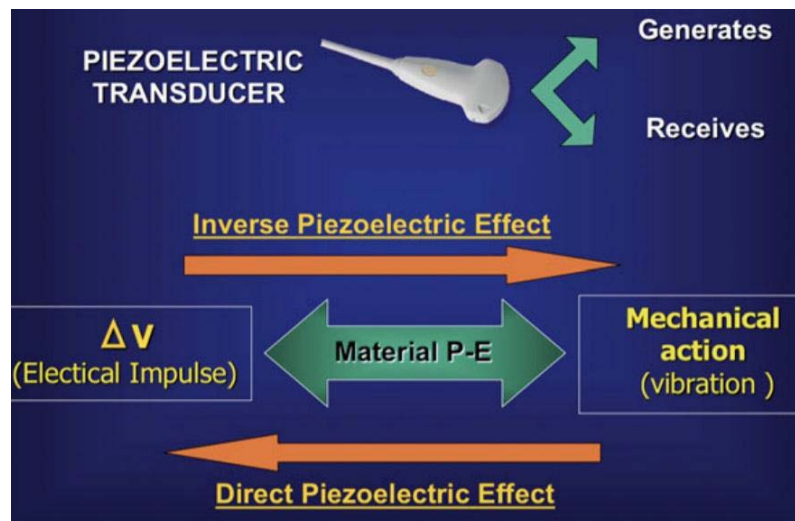


Figure 13: Les transducteurs à ultrasons génèrent et reçoivent des impulsions grâce aux propriétés piézoélectriques des cristaux : lorsqu'ils sont excités par une impulsion électrique, ils produisent une impulsion ultrasonore, et vice versa lorsque frappés par un écho de retour, ils génèrent une impulsion électrique, qui est ensuite convertie en une image numérique .

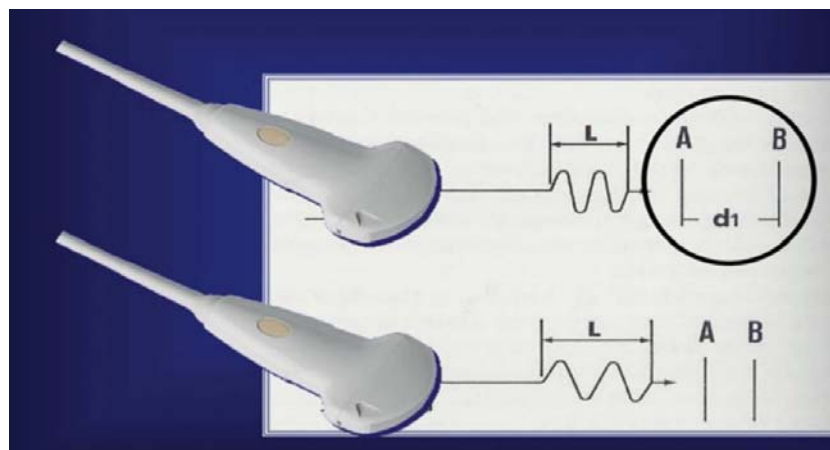


Figure 15: Résolution axiale : capacité du système à différencier deux structures qui se trouvent à des profondeurs différentes le long de l'axe du faisceau d'ultrasons et qui dépend de la longueur d'impulsion.

L fait référence à la longueur d'impulsion, A et B représentent 2 structures génératrices d'écho, d_1 est la distance entre ces 2 structures. Si d est $>1/2$ les 2 structures seront identifiées comme 2 structures distinctes ; si d est $<1/2$ longueur d'onde, les 2 structures seront identifiées comme une .

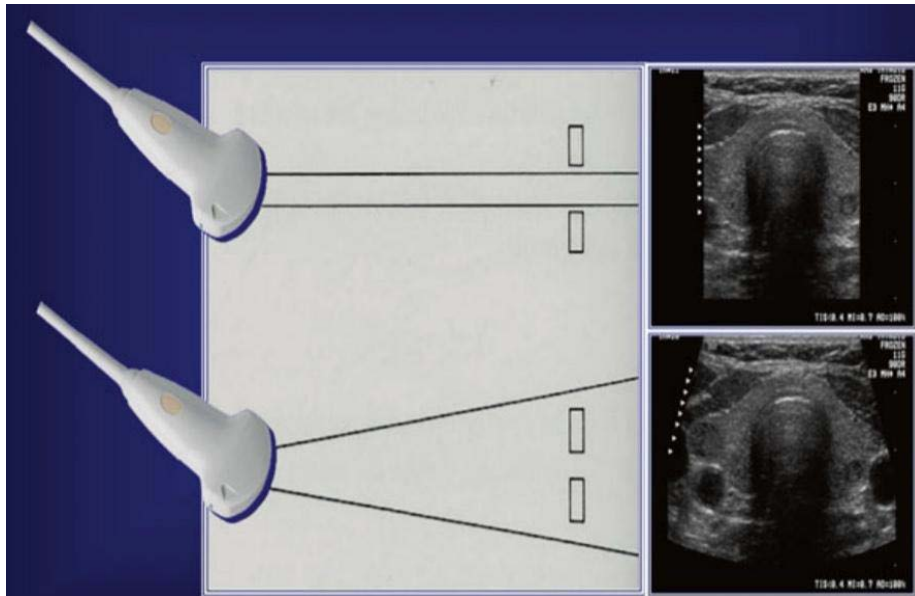


Figure 16: Résolution latérale : capacité du système à différencier deux structures qui se trouvent à la même profondeur perpendiculairement à l'axe du faisceau d'ultrasons et dépend de la largeur de l'impulsion

3. Les principes généraux des ultrasons dans l'imagerie du cerveau :

La connaissance des principes de base des ultrasons ainsi que la familiarité avec les aspects techniques est essentiel pour utiliser de manière optimale le dispositif l'échographie peropératoire (IOUS)

C'est important pour le neurochirurgien, parce que si l'échographie peropératoire (IOUS) doit être utilisé de manière systématique dans la pratique clinique, il est essentiel de bien connaître son fonctionnement et sa manipulation de base.

L'imagerie échographique utilise essentiellement les échos générés par des ondes ultrasonores réfléchies. Ces échos sont représentés en termes d'image en échelle de gris, la caractéristique du tissu régissant la "luminosité" de l (d'où "B" ou "mode de luminosité" ; plus l'écho est fort, plus l'image est lumineuse) ; et la distance de la sonde représentée par l'emplacement du point dans le plan insoné.

En utilisant des réseaux de transducteurs, des échos multiples dans le plan insonorisé sont alors analysés et convertie en une image composite plane (2 dimensions) tachetée en échelle de gris. Outre l'image, la morphologie, la couleur et les fonctions de flux Doppler permettent de représenter les informations vasculaires en temps réel.

En général les sondes avec des empreintes plus petites sont préférées pour une utilisation peropératoire afin de faciliter l'insertion dans l'exposition de la craniotomie. Cependant, les craniotomies pour la résection de tumeurs sont généralement grande et la plus grande sonde possible permettrait d'obtenir le meilleur champ de vision ainsi qu'une meilleure résolution d'image.

Des sondes spécialisées plus petites (lorsqu'elles sont disponibles) peuvent être plus approprié pour les procédures de trou de bavure ou les insonations intracavitaires.

Les sondes linéaires ont une fréquence plus élevée (et une longueur d'onde plus faible) et donc une faible pénétration en profondeur. Par conséquent,

ils sont les plus adaptés à l'insonation des lésions superficielles (généralement à 4–6 cm de la surface), pour lesquelles leur résolution est la meilleure.

D'autre part, les sondes à réseaux phasés (avec des longueurs d'onde plus élevées) ont une meilleure profondeur de pénétration et peuvent mieux insonoriser des structures plus profondes.

Les sondes les plus récentes peuvent combiner les caractéristiques des deux et disposent d'une option permettant de faire varier électroniquement le foyer pour ajuster la résolution de l'insonation sur une gamme de profondeurs. En outre ces sondes sont couramment utilisées, des sondes spécialisées telles que les sondes de bâton de hockey à petite empreinte pour usage intracavitaire, annulaire Les sondes matricielles à usage endoscopique et les sondes matricielles tridimensionnelles des ultrasons sont également disponibles.

La qualité de l'image est cruciale pour la précision et la fiabilité de l'IOUS lors de la chirurgie des tumeurs (71).

Le neurochirurgien doit également connaître les caractéristiques échographiques normales des structures (cortex, sillons, substance blanche, plis durs, ventricules et vaisseaux) ainsi que des lésions pathologiques. L'utilisation courante de l'IOUS permet de s'entraîner à visualiser les caractéristiques anatomiques.

4. L' Applications transcrânienne de l'échographie :

La plus grande limitation est sa capacité à pénétrer le crâne intact. La plupart des applications des ultrasons lors d'une opération chirurgicale se font après la craniotomie . Bien que l'échographie transcrânienne focalisée à haute intensité ait été testée avec succès pour des applications crâniennes thérapeutiques .

Une exception est l'utilisation du Doppler transcrânien (TCD). Le TCD a été utilisé depuis longtemps pour évaluer la dynamique vasculaire intracrânienne.

L'utilisation d'une basse fréquence de la sonde (avec une meilleure pénétration) et des fenêtres acoustiques osseuses suffisamment fines (comme la os temporal squameux) divers groupes ont signalé la visualisation de tumeurs cérébrales .

5. L'utilité de l'échographie peropératoire (IOUS) en neurochirurgie :

Les progrès réalisés dans les techniques d'imagerie peropératoire et de neuronavigation ont eu un effet positif en neurochirurgie ;

L'échographie peropératoire est utile pour localiser les lésions, sélectionner les approches appropriées , en contrôlant l'étendue de la résection et en affichant la répartition du système vasculaire. L'IOUS peut fournir des informations en temps réel sur l'ampleur de l'éloignement afin d'améliorer l'éloignement total .

Son utilisation pour guider la biopsie de la tumeur, l'aspiration des kystes et le placement du cathéter, ainsi que l'estimation du volume et la détermination de la complétude de la résection de la tumeur, sont décrites. (72)

Regelsberger et al a résectionné 28 gliomes avec l'aide de l'IOUS, parmi lesquels 23 gliomes (représentant 86%) présentant des marges claires dans l'IOUS (73). *Renner et al* a utilisé l'IOUS pour juger de l'étendue de la résection dans 36 cas (74) .

La relation entre la fréquence et la résolution est directe, en ce sens que plus la Plus la fréquence est élevée, meilleure est l'image. Cependant, il existe également une relation inverse entre la fréquence et la pénétration.

La sonde "idéale est donc un compromis entre l'image la qualité et la profondeur de champ.

Pour la plupart des procédures intracrâniennes, une sonde de 5 MHz donnera une qualité d'image satisfaisante, tout en conservant la capacité de visualiser jusqu'à une profondeur de 15 cm. Pour travail très superficiel à 7,5 MHz ou même 10 . La sonde MHz est mieux adaptée. Pour la plupart des l'échographie une sonde de 7,5 MHz donne une bonne qualité (75) .

Pour les gliomes et les malformations arterioveineuses MAV situés dans une région fonctionnelle, l'IOUS doit être associé à une technique de surveillance fonctionnelle afin de réduire les déficits neurologiques postopératoires. (76)

VI. Sémiologie échographique Cérébrale et l'anatomie topographique, Selon les approches chirurgicales :

L'imagerie peropératoire est aujourd'hui une pratique de routine dans presque toutes les procédures neurochirurgicales. Les principaux outils sont représentés par les systèmes de neuronavigation , qui sont basés sur l'imagerie préopératoire ; par conséquent, ils ne peuvent pas décrire les changements qui se produisent pendant la chirurgie (77 – 78).

La nécessité de ne pas s'appuyer uniquement sur l'imagerie préopératoire a conduit à introduire l'imagerie peropératoire telle que l'imagerie par résonance magnétique (IRM), la tomographie assistée par ordinateur (CT), et l'imagerie par fluorescence.

Chacune de ces techniques souffre d'une limitation majeure : L'IRM et la tomodensitométrie ne sont pas en temps réel et ne représentent que la situation au moment de l'acquisition des images, tandis que la fluorescence n'est pas une imagerie anatomique car elle ne peut être observée que sur la surface du lit chirurgical (79)

L'échographie peropératoire (IOUS) permet la visualisation directe en temps réel de l'exploration de la région. Son utilisation en neurochirurgie a été la première décrit en 1978 par Reid (80)

Au fil des ans, de nombreuses procédures neurochirurgicales ont été signalées comme étant guidées par l'IOUS : localisation de lésions dans le cerveau et la colonne vertébrale, guidage de la résection chirurgicale, placement de cathéters, aspiration d'abcès, contrôle de la décompression dans la malformation de Chiari I, et autres (81 – 82)

Théoriquement, le IOUS est particulièrement indiqué en neurochirurgie. Le parenchyme cérébral présente des caractéristiques viscoélastiques spécifiques qui permettent une propagation exceptionnelle des ultrasons , également parce que le faisceau n'est pas atténué par la peau interposée et les tissus conjonctifs sous-cutanés (83).

De plus, IOUS en temps réel se caractérise par une superbe résolution temporelle et spatiale (84).

L'échographie peropératoire (IOUS) génère une représentation tomographique inhabituelle c'est-à-dire la conséquence du positionnement de la sonde et des approches chirurgicales : l'orientation est généralement tournée et elle est sectorielle et généralement dans un plan inhabituel. En outre, L'IOUS est extrêmement exigeante en raison de nombre de paramètres et de réglages d'une et des différents phénomènes qui se produisent lors d'une opération IOUS est donc considéré comme une technique dépendante de l'opérateur avec une courbe d'apprentissage (85 , 86 , 87 , 88) .

1. Équipement et usage de l'échographie peropératoire :

La physique de la génération d'échographie par ultrasons explique que plus la fréquence des ultrasons est élevée, plus la résolution spatiale est élevée, mais plus la pénétration est faible, et vice versa. Pour cet aspect, il est vraiment pratique d'avoir des sondes multifréquences qui peuvent couvrir la fréquence la plus utilisée à la fois pour les lésions profondes et superficielles. (89)

Pour le choix de la sonde :

On devrait donc choisir la bonne sonde à haute fréquence pour une meilleure résolution d'image ; et à basse fréquence pour une meilleure pénétration :

Les fréquences à utiliser :

- 3 MHz – bonne pénétration mais faible résolution ; capable de pénétrer dans l'os ou le crâne chez les enfants .
- 7 MHz – bon équilibre entre la résolution et la pénétration et c'est la plus fréquente en neurochirurgie .
- 10-12 MHz – bonne résolution mais pénétration de seulement 2-3 cm.

Il faut tenir en compte la taille de la sonde est souvent plus grande et offre une meilleure qualité d'image mais peut faire accès difficile.

Trois sondes sont couramment utilisées en neurochirurgie : la sonde rachidienne (1463 mm), la sonde à trous (868 mm) et la sonde crânienne (30612 mm).

- Le cadre opérationnel et la mise en place :

La salle d'opération doit être suffisamment grande pour permettre que l'appareil d'échographie soit situé à gauche de chirurgien. Le dispositif doit être préparé pour être utilisé par l'opérateur pendant l'opération, et l'interface utilisateur (écran tactile et clavier) doit être accessible (par exemple, recouvert d'un drap transparent stérile) .(90)

La sonde est enveloppée dans une feuille plastique stérile avec des Gel compatible . Il est obligatoire que le chirurgien puisse facilement régler le dispositif d'échographie pendant toute l'opération (Figure 17).

Pour la mise en place il faut positionner le patient de manière à ce que la craniotomie ou l'approche vertébrale est au niveau du point le plus supérieur. Cela permet de remplir de solution saline, de réduire l'artéfact et d'étendre le champ visualisé par la sonde .

Le patient doit être positionné, si possible, de manière à ce que le champ opératoire soit horizontal dans pour être rempli par une solution saline pour un meilleur couplage d'ultrasons . La craniotomie doit être suffisamment importante pour abriter la sonde (diamètre maximal : 3,5 cm) et permettant son libre basculement et son orientation . (figure 17)

Une fois la craniotomie effectuée, l'échographie peropératoire IOUS peut être utilisé pour localiser la lésion et évaluer la configuration interne et l'échogénicité, les marges péri lésionnelles et l'emplacement des structures neuroanatomiques telles que les ventricule, la faux du cerveau et les vaisseaux principaux. À la fin de l'intervention, une fois la dure-mère fermée mais avant le remplacement de l'os, une deuxième échographie facilite l'évaluation d'une hémorragie précoce ou d'une hydrocéphalie .

En ce qui concerne la sonde , il faut utiliser suffisamment de gel entre la sonde et le couvercle du manchon et éviter l'air entre la sonde et le cerveau/la moelle épinière. Il est possible d'enregistrer la sonde échographique avec la neuronavigation peropératoire.

Pour faciliter la manipulation des commandes par le chirurgien, le panneau de contrôle peut être recouvert d'un sac stérile. Il est également possible d'utiliser un assistant qui connaît les boutons de l'appareil à ultrasons. La craniotomie doit être suffisamment grande pour permettre la visualisation de la lésion entière. Une ouverture légèrement plus grande (une 2 à 3 cm supplémentaires) permet une meilleure visualisation (il n'est pas nécessaire que toute la dure-mère exposée soit ouvert). Une alternative à la craniotomie plus importante consiste à utiliser une technique de double craniotomie. (91)

Pour l'orientation peropératoire : l'exploration initiale peut être facilitée par l'utilisation d'une imagerie standard plans : sagittal, coronal et axial. Une fois que l'image cible est obtenue, la sonde pourrait être déplacée pour visualiser la cible à partir de différents angles.

Commencez par un zoom arrière donne de meilleurs résultats l'orientation et la résolution anatomique. Une fois une région d'intérêt est localisée , il faut zoomer pour une image plus grande (mais pas en plus haute résolution).

Le Doppler couleur/angio de puissance peut être commuté pour identifier les vaisseaux . Il est important de noter que les couleurs rouge et bleue à l'écran indique la direction du flux, et ne signifie nécessairement que le flux est artériel ou veineux. (92)

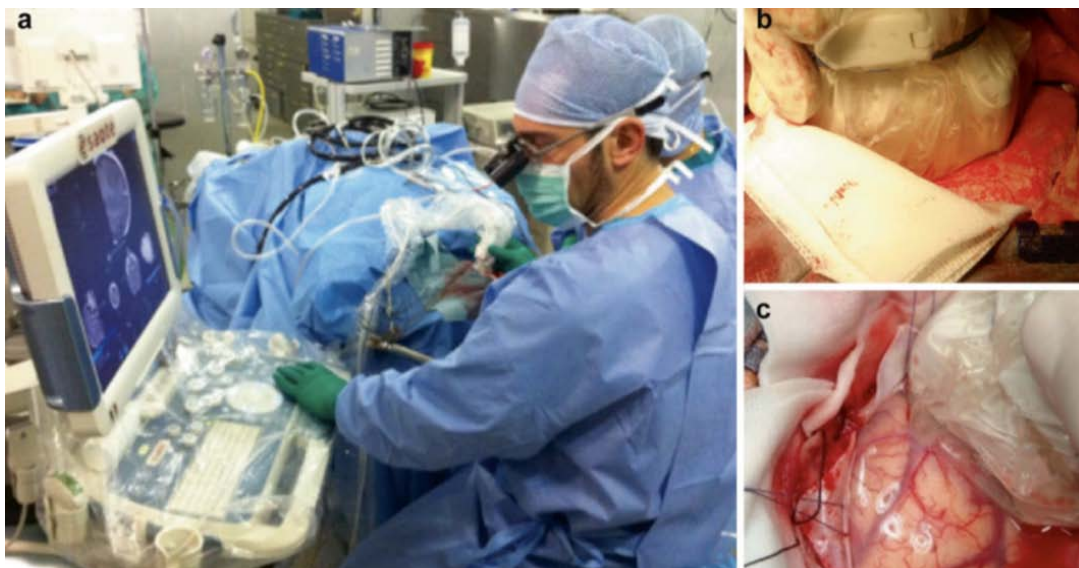


Figure 17: La mise en place peropératoire de l'appareil échographique :

(a) L'échographie peropératoire est placée sur le côté gauche du patient et le clavier est enveloppé dans une couverture plastique stérile pour permettre au chirurgien d'accéder directement à toutes les commandes pendant toute la procédure. Les principaux paramètres à modifier sont la fréquence, la profondeur et le gain. Les autres outils sont le Doppler, le contraste et l'élastographie. Grâce à la commande directe de l'appareil, il est également possible d'examiner les images acquises et de définir la stratégie chirurgicale. (b) La sonde est enveloppée dans une gaine plastique stérile avec du gel stérile et elle est utilisée pour effectuer un premier balayage sur la dure-mère intacte (c) et plusieurs balayages pendant l'opération. (89)

2. Examen par échographie peropératoire IOUS :

L'objectif principal de l'étude peropératoire du mode B est visualiser l'ensemble de la lésion et ses relations avec les structures neurovasculaires saines/parenchyme cérébral. Pour ce faire, il est essentiel d'utiliser le bon pouvoir d'agrandissement et, dans certains cas, une cale en gel-pad peut être utile. Il est utile d'effectuer le premier balayage avec un champ de vision large, ajuster la profondeur et l'angle d'insonation, afin de visualiser la cible principale ainsi que ses environs structures. Ensuite, la lésion doit être examinée avec plus de détails, en réduisant la profondeur, pour mieux analyser ses structures et les tissus environnants .

Les principaux paramètres qui doivent être ajustés et permettent de visualiser correctement la cible en fonction des changements de profondeur et de largeur de champ sont la fréquence, la puissance et la mise au point. Il est également très utile de préparer différents pré-réglages pour différentes lésions.

Le premier balayage en mode B doit être effectué avant l'ouverture de la dure-mère et plus tard, pendant l'opération, chaque fois qu'il est nécessaire, et à la fin de la résection de la tumeur pour vérifier la présence d'éventuels résidus (Figure 18).

En ce qui concerne le réglage peropératoire l'échographie est placé sur le côté gauche du patient et la clé est enveloppé dans une couverture plastique stérile pour permettre à la l'accès direct du chirurgien à toutes les commandes dans toute la procéder.

Les principaux paramètres à modifier sont la fréquence, la profondeur et le gain. Les autres outils sont le Doppler, le contraste et l'élastographie. Grâce au contrôle direct de la machine, Il est également possible d'examiner les images acquises et de définir la stratégie chirurgicale. (89)

L'inclinaison et le basculement de la sonde permet de trouver un plus grand nombre de points de repère et par conséquent de comprendre le plan , l'orientation et la sémiologie d'échographique .

En basculant la sonde sur deux axes orthogonaux, il est possible d'agrandir le champ de vision également en dessous des marges de la craniotomie.

En outre, en cas de lésions importantes, toutes les marges sont devenues examinables. Si l'opercule est suffisamment grand, il est possible de déplacer la sonde sur deux axes orthogonaux afin pour compléter l'étude, obtenir une la reconstruction tridimensionnelle du volume (Figure 19).

La variation de la position de la sonde doit être fait avec des mouvements lents de manière standardisée :

- De gauche à droite pour le plan sagittal
- De l'anérieur au postérieur pour le plan coronal
- De haut en bas pour le plan axial

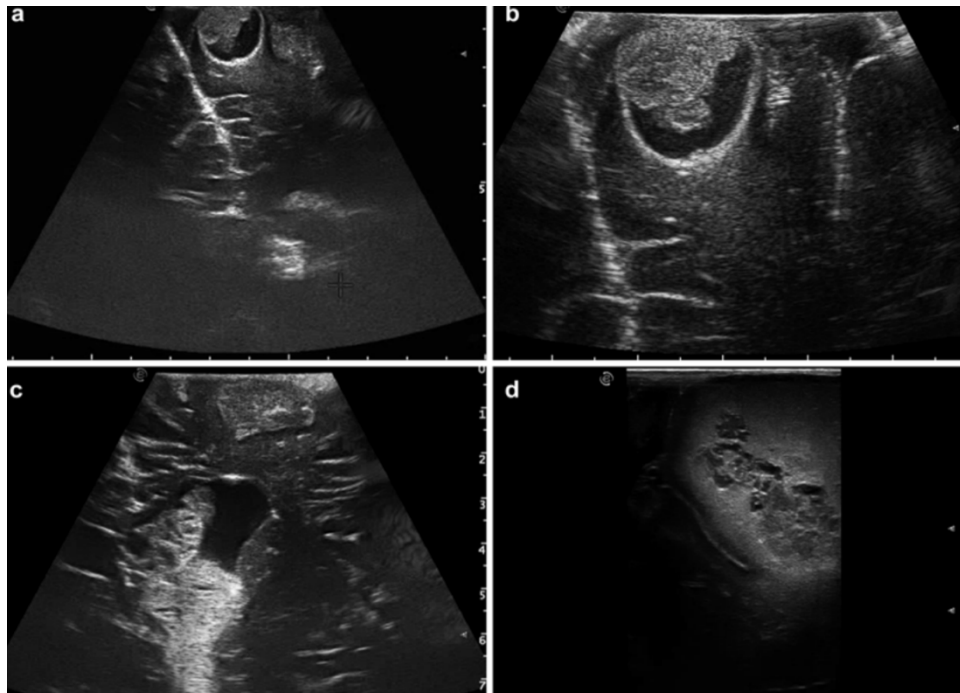


Figure 18 : Le premier balayage doit être effectué avec un champ de vision large afin de visualiser la cible principale ainsi que les structures environnantes (a). Ensuite, le pouvoir grossissant doit être augmenté afin de mieux comprendre la morphologie de la lésion et les tissus environnants (b). Plus la fréquence des ultrasons est élevée, plus la résolution spatiale est élevée, mais plus la pénétration est faible (d), et vice versa (c). Une sonde multifréquence peut couvrir la fréquence la plus utilisée, tant pour les tissus profonds que pour les lésions superficielles .

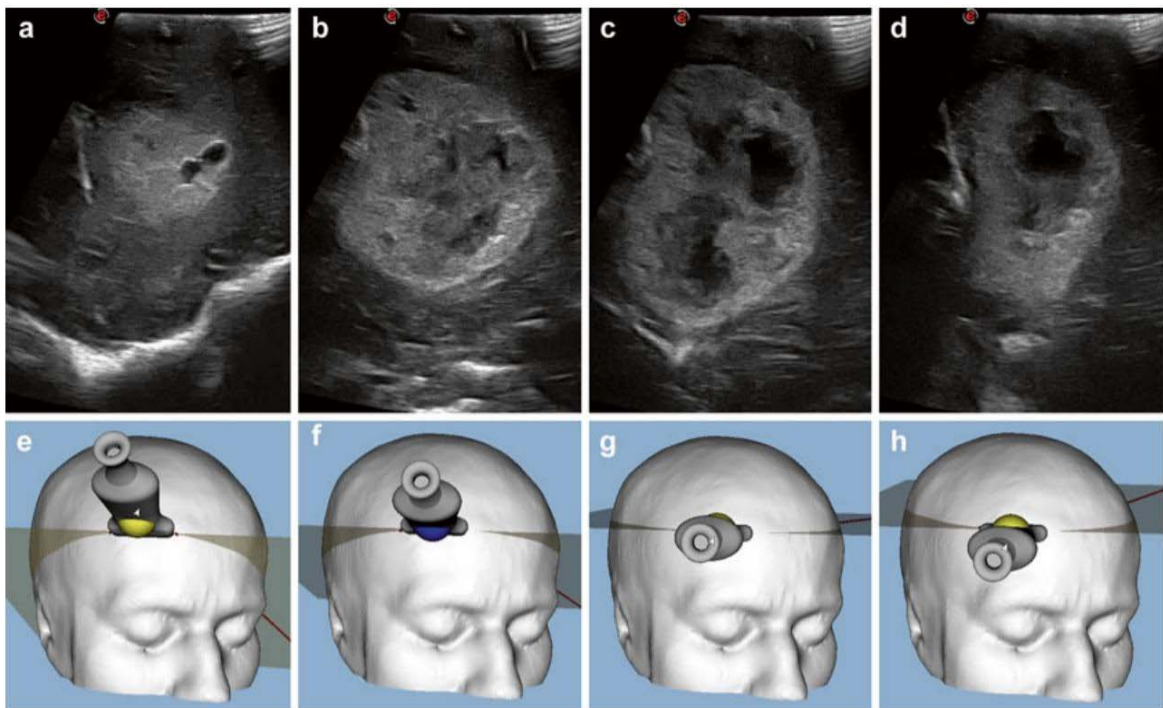


Figure 19 : Inclinaison de la sonde. Images échographiques d'une métastase frontale droite, obtenues en inclinant la sonde (a – d). Dans le panneau inférieur, un modèle tridimensionnel représente l'orientation correspondante de la sonde (e – h) (89)

3. La Sémiologie cérébrale par échographie peropératoire :

Les aspects échographiques normal des principales structures et des repères anatomiques pratiques (Figure 20) sont :

- Structures hyperéchogènes : crâne, paroi des vaisseaux, plexus choroïdes, plis arachnoïdiens, épendyme, pli dural, interface cerveau-limites
- Structures hypoéchogènes : liquide céphalo-rachidien, ventricules, fibres conjonctives.
- Structures isoéchoïques : parenchyme cérébral

Le parenchyme cérébral normal est généralement homogène et isohypoéchogène. Les surfaces du gyrus cortical apparaissent modérément hyperéchogènes sur une profondeur de quelques millimètres, correspondant à la matière grise, tandis que la substance blanche lobaire est plus hyperéchogène en raison de la présence des vaisseaux .

Les grandes structures de connexion, Les ganglions de la base semblent légèrement hyperéchogènes, probablement en raison d'une vascularisation plus importante et la présence de microcalcifications (Figure 20).

Les ventricules cérébraux semblent hypoéchogènes et typiquement entouré d'un mince bord hyperéchogène, correspondant à la paroi épendymaire, qui détermine une interface forte entre le parenchyme et le FCS.

Les plexus choroïdes sont hautement hyperéchogène et peut être visualisé dans le ventricules, représentant l'un des plus fiables des points de repère ainsi que les principaux plis durs.

La faux du cerveau et la tente du cervelet apparaissent comme des structures fines, linéaires et hyperéchogènes.

Dans la plupart des cas, le contraste entre la tumeur et structures saines est suffisant pour distinguer les tumeurs l'interface cérébrale, également en cas d'œdème périlésionnel.

L'œdème aigu est généralement plus hypoéchogène que les tumeurs, alors que l'œdème chronique peut être iso- ou hyperéchogène.

La plupart des tumeurs cérébrales primaires ou métastatiques sont hyperéchogènes par rapport au parenchyme cérébral normal environnant et aussi par rapport aux tissus oedémateux (hyperéchogènes). Certaines lésions peuvent présenter des portions extrêmement échogènes, comme les nodules calcifiés dans méningiome, tandis que les régions kystiques et nécrotiques apparaissent comme des cavités remplies de liquide hypoéchogène qui peuvent montrer le phénomène de renforcement du dos. Sur d'autre part, des lésions très infiltrantes telles que les gliomes de grade n'ont pas de marges bien définies, en particulier en cas d'œdème environnant (93).

Il est important de se rappeler que la sémiologie de l'IOUS n'est pas statique mais dynamique.

La manipulation chirurgicale de la tumeur et du cerveau entraîne une baisse de la précision du diagnostic, principalement due à l'apparition d'artefacts (94,95) . Les caillots de sang et les matériaux hémostatiques dans la cavité chirurgicale sont hyperéchogènes et créent une ombre acoustique qui ne permet pas d'étudier la paroi de la cavité pour trouver l'interface tumeur-cerveau.

De plus, le parenchyme environnant tend de devenir oedémateux à cause de la manœuvres ; cette caractéristique rend la tumeur et le contraste du cerveau est moins clair (94) .

Tous ces aspects doivent être soigneusement pris en compte afin de comprendre correctement l'examen à échographie peropératoire.

4. Anatomie chirurgicale par ultrasons :

Chaque approche neurochirurgicale conduit à l'exposition d'une zone et de structures spécifiques. La visualisation par l'échographie peropératoire IOUS varie en fonction de l'approche et n'a jamais été normalisée. Nous analysons ci-dessous l'imagerie IOUS obtenue au cours des approches neurochirurgicales les plus courantes, mettant en évidence les principaux repères anatomiques pour chaque approche telle que vue dans l'IOUS le long des deux principaux plan d'insonation (Figure 21 , 22, 23 , 24 , et 25).(89)

Dans chaque panneau sont affichés les deux principaux plans de l'échographie peropératoire IOUS, ainsi que l'image IRM correspondante et un modèle tridimensionnel qui explique le placement de la sonde et le plan d'insonation. Chaque approche peut bien sûr afficher seulement deux plans d'insonation, car il n'est pas possible d'obtenir un plan perpendiculaire au plan de la sonde .

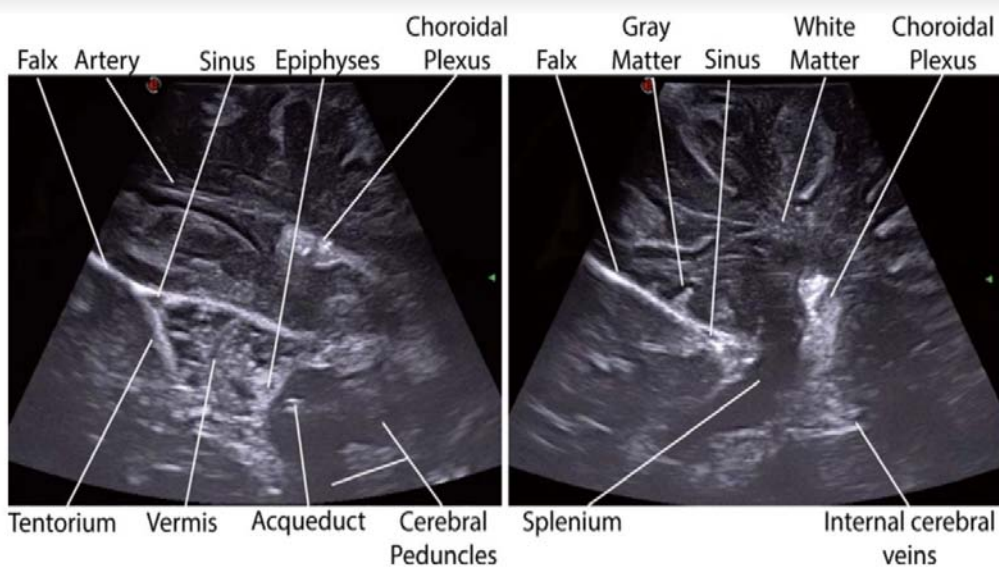


Figure 20: L'échographie peropératoire et sémiologique cérébrale et principaux points de repère le long des deux plans orthogonaux possibles dans une approche pariétale

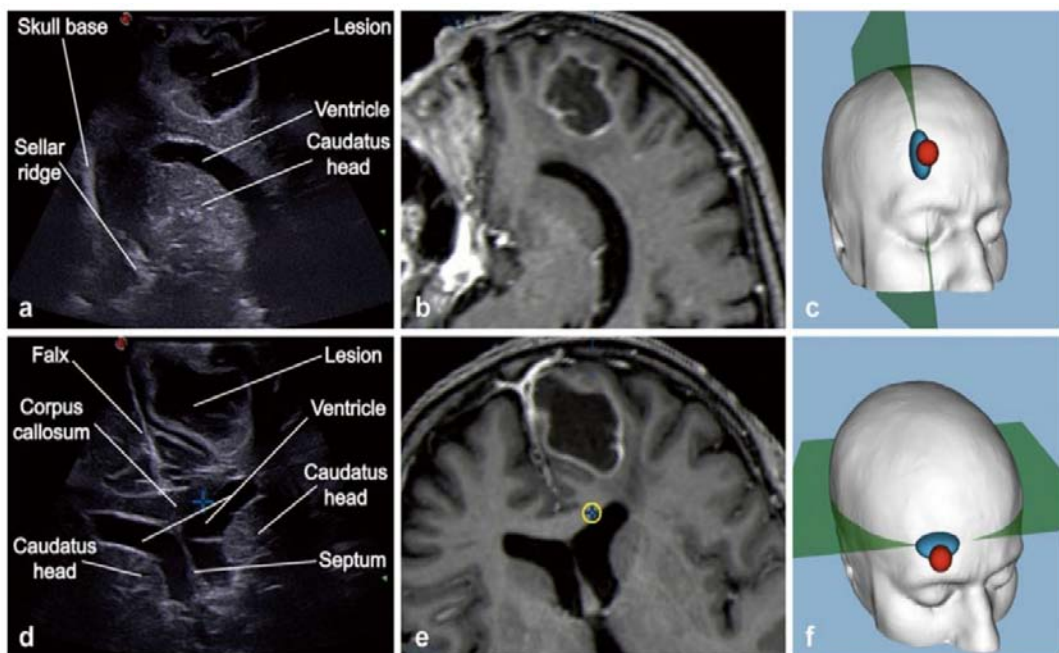


Figure 21 : Approche frontale. Un cas de métastase frontale est montré, qui apparaît sur l'échographie peropératoire comme une lésion kystique hypoéchogène entourée d'un bord hyperéchogène brillant. Avec l'approche frontale, aucune vue coronale n'est possible. (a, b) Vue sagittale de l'échographie et de l'IRM, (d, e) Vue axiale de l'échographie et du IRM. (c - f) Modèle tridimensionnel avec positionnement de la sonde le long des deux axes principaux

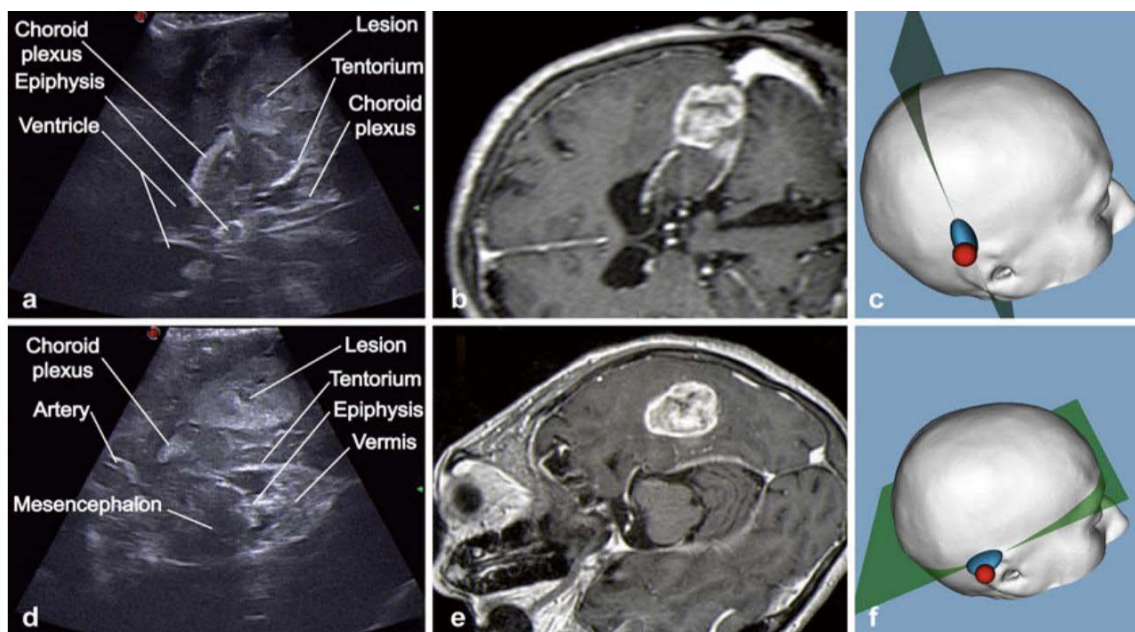


Figure 22 : Approche temporelle. Un cas de gliome de haut grade postéro-temporel droit est montré, qui apparaît sur l'échographie peropératoire comme une lésion hyperéchogène avec des calcifications et de petites zones kystiques. Avec l'approche temporelle, aucune vue sagittale n'est possible. (a, b) Vue coronale de l'échographie et IRM, (d, e) Vue axiale L'échographie et IRM. (c - f) Modèle tridimensionnel avec positionnement de la sonde .

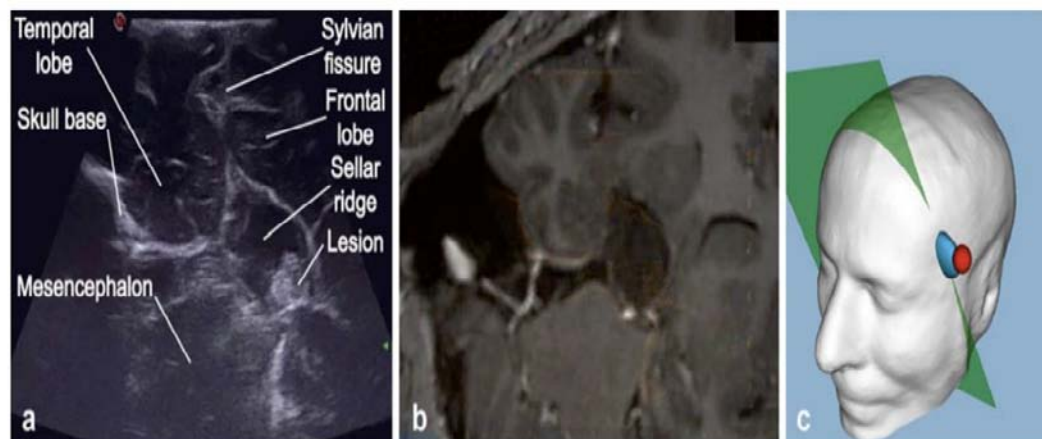


Figure 23 : Approche pariétale . Un cas de craniopharyngiome kystique est montré, qui apparaît sur l'échographie preopératoire comme une lésion kystique hypoéchogène avec une composante hyperéchogène nodulaire entourée d'un bord hyperéchogène brillant. Avec l'approche pariétale, aucune vue sagittale n'est possible. De plus, dans les petites approches pariétales, il est parfois difficile d'évaluer le plan axial. (a, b) Vue semi-coronale en échographie et d'IRM. (c) Modèle tridimensionnel avec positionnement de la sonde

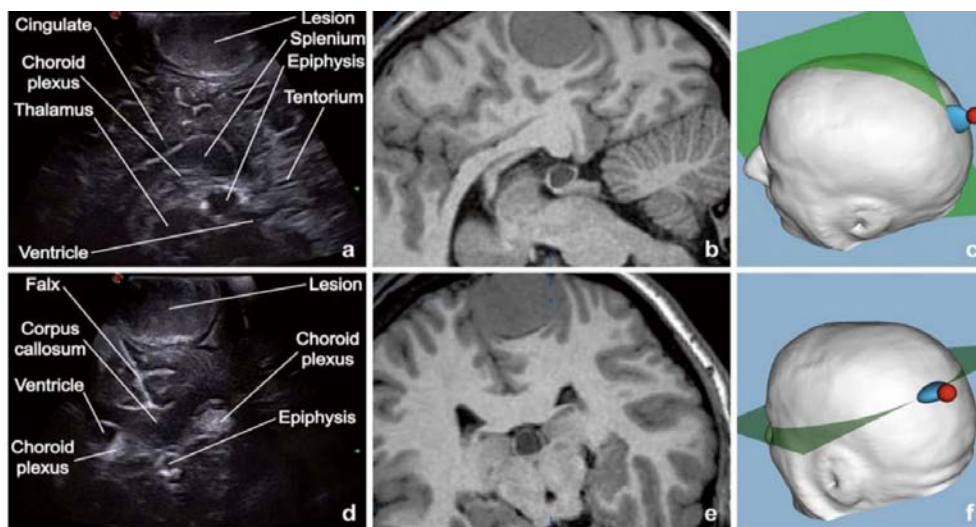


Figure 24: Approche pariétale. Un cas de parasagittale le méningiome, qui apparaît sur l'échographie peropératoire comme une lésion homogène isohypoéchogène entourée d'une capsule hyperéchogène. Avec l'approche pariétale, aucune vue coronale n'est possible. (a, b) Vue sagittale en échographie et IRM, (d, e) Vue axiale en échographie et IRM. (c - f) Modèle tridimensionnel avec positionnement de la sonde .

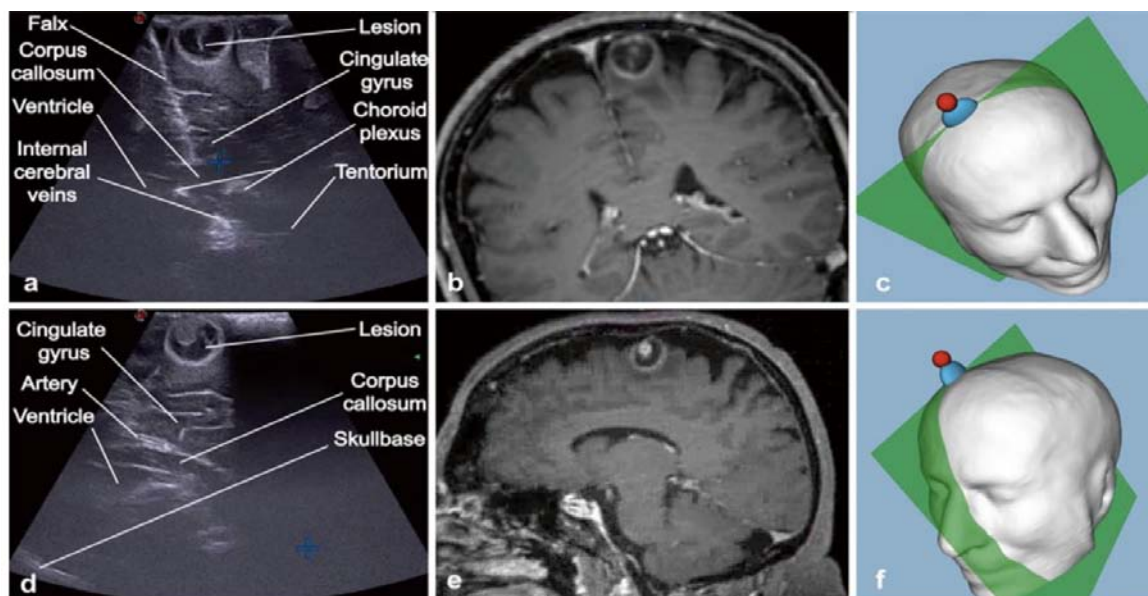


Figure 25: Approche coronale. Un cas de métastase pulmonaire frontale-médiale est montré, qui apparaît sur la SIUO comme une lésion kystique hypoéchogène avec une composante nodulaire entourée d'un bord hyperéchogène brillant. Avec l'approche coronale, aucune vue axiale n'est possible. (a, b) Vue coronale en échographie et IRM, (d, e) Vue sagittale en échographie et IRM. (c - f) Modèle tridimensionnel avec positionnement de la sonde

VII. Échographie peropératoires dans la chirurgie des tumeurs cérébrales

L'échographie peropératoire pour la chirurgie des tumeurs cérébrales est une application non invasive et peu coûteuse et peut être appliquée de manière répétitive à n'importe quel stade de la chirurgie sans aucun préjudice pour le patient (96). Depuis la première description de l'échographie peropératoire (IOUS) en 1982 par Chandler et al. (97), il a été principalement utilisé pour la chirurgie des tumeurs cérébrales.

En particulier lorsqu'on approche des lésions d'une tumeur intra-axiale invasive , les repères classiques sont souvent absents. iUS permet une bonne orientation dans ces situations.

En outre, le déplacement du cerveau peut modifier l'anatomie de manière significative. Jusqu'à l'introduction de l'IRM peropératoire (iMRI), l'IOUS était le seul moyen d'imagerie peropératoire décrivant la tumeur résiduelle pendant l'opération (98).

Depuis sa première utilisation en neurochirurgie jusqu'à aujourd'hui, la capacité d'imagerie s'est considérablement améliorée. Des sondes dédiées pour des indications est l'intégration de dispositifs à ultrasons dans les systèmes de neuronavigation (99).

Cette méthode permet de référencer les images de l'échographie peropératoire (IOUS) par rapport à un ensemble de données IRM préopératoires, qui est affiché dans le plan reconstruit de l'image échographique 2D.

Ainsi, l'interprétation des résultats de l'échographie devient beaucoup plus facile et le déplacement du cerveau peut être identifié rapidement en comparant les points de repère entre les images intra et préopératoires. Le principal défi de l'utilisation de l'IOUS est l'interprétation des résultats de l'imagerie. En particulier au cours de l'opération, les artefacts peuvent augmenter et l'identification de la tumeur résiduelle peut devenir difficile.

Dans le chapitre actuel, nous éluciderons les indications, les techniques et les dispositifs permettant d'optimiser les images qualité dans la chirurgie des tumeurs cérébrales assistée par ultrasons. il y a une indication pour l'utilisation des ultrasons dans chaque chirurgie de tumeur cérébrale intra-axiale.

Chaque étape chirurgicale a ses applications typiques. Dans un premier temps, avant l'incision de la dure-mère, les ultrasons permettent d'évaluer si la lésion cible est centrée dans la craniotomie (figure 26) . Ainsi, une simple vérification de la neuronavigation peut être effectuée, et si nécessaire, a besoin, sur la base des conclusions de l'IOUS, d'une extension sûre de la craniotomie peut être effectuée avant l'ouverture de la dure mère.

Deuxièmement, après l'ouverture durale par la libération de LCR ou d'un gonflement du cerveau, un changement peut se produire, qui change de manière inattendue l'anatomie chirurgicale. (89)

À cette étape de la chirurgie, un balayage rapide par ultrasons pourrait aider à identifier la lésion ciblée et les points de repère importants à proximité . En outre, l'échographie fournit des informations sur les gyrus qui sont infiltrés et ceux qui pourraient être épargnés. Étant donné que l'échographie peropératoire fournit des informations en temps réel, en cas de doute, l'échographie peropératoire fournit des informations plus fiables par rapport à la neuronavigation.

En cas de gonflement marqué du cerveau dû à de grosses tumeurs à composante kystique, l'échographie peropératoire permet d'économiser une ponction de kyste en ligne ou même une ponction ventriculaire avant l'ablation de la masse tumorale solide. Ce moyen permet de soulager beaucoup de tension, ce qui facilite la poursuite de la dissection. Si une lésion profonde est abordée, il est recommandé de planifier une trajectoire à l'aide d'ultrasons pour ne pas manquer la lésion. Ensuite, on peut vérifier le sillon approprié menant à une lésion (Figure 27).

Au cours de l'opération est recommandé d'utiliser la sonde à ultrasons de temps à autre pour le temps de s'adapter aux changements induits par la chirurgie de la tumeur ou surface du cerveau. Ainsi, il est plus facile de distinguer les artefacts de la tumeur résiduelle à un stade ultérieur de la chirurgie . En outre, les structures adjacentes comme le corps calleux ou les ventricules peuvent être identifiées et la distance restante peut être suivi (Figure 28) .

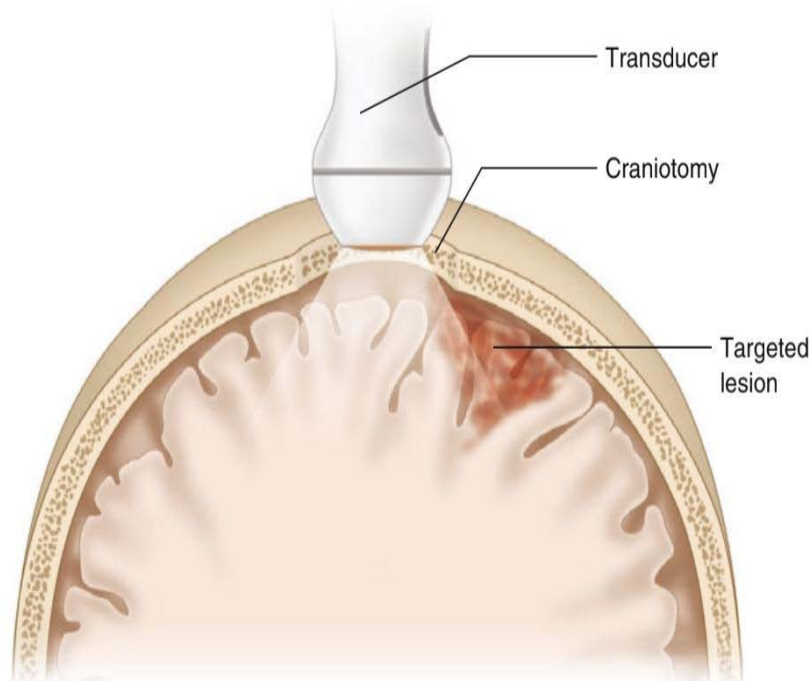


Figure 26 : L' application typique d'une échographie peropératoire avant l'ouverture durale : évaluation de la taille de la craniotomie par rapport à la lésion ciblée

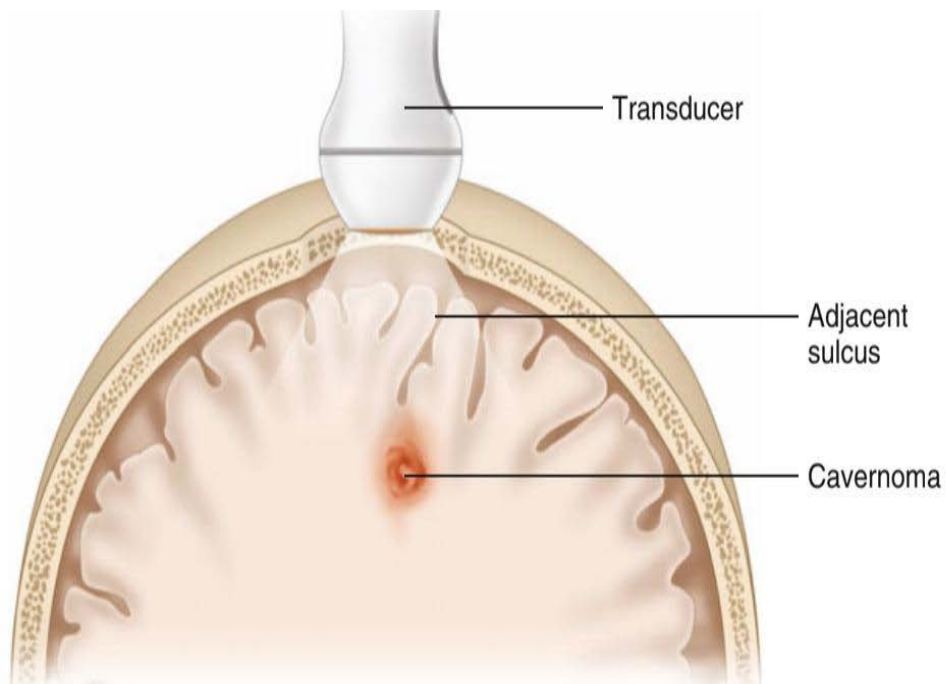


Figure 27: Illustration d'une petite lésion sous-corticale (cavernome). L'échographie permet de trouver le meilleur trajectoire vers la lésion.

La courte durée d'utilisation de l'échographie lors de la résection d'une tumeur est facilement compensée par l'augmentation de la vitesse après avoir acquis une idée précise des structures environnantes.

Malgré l'orientation peropératoire, la principale indication de l'échographie à l'approche d'une lésion intra-axiale est l'évaluation de la tumeur résiduelle. En particulier dans la chirurgie des gliomes de bas grade, la distinction entre les tissus les plus susceptibles d'être exempts de tumeur et les zones de gliome invasives est difficile. L'étendue de la résection est un prédicteur significatif de la survie globale dans les gliomes de bas et haut grade (100). L'échographie peropératoire permet d'augmenter l'étendue de la résection (89).

La plupart des sondes intracrâniennes contemporaines peuvent distinguer les tissus cérébraux tumoraux des tissus cérébraux normaux au moins le début de la chirurgie.

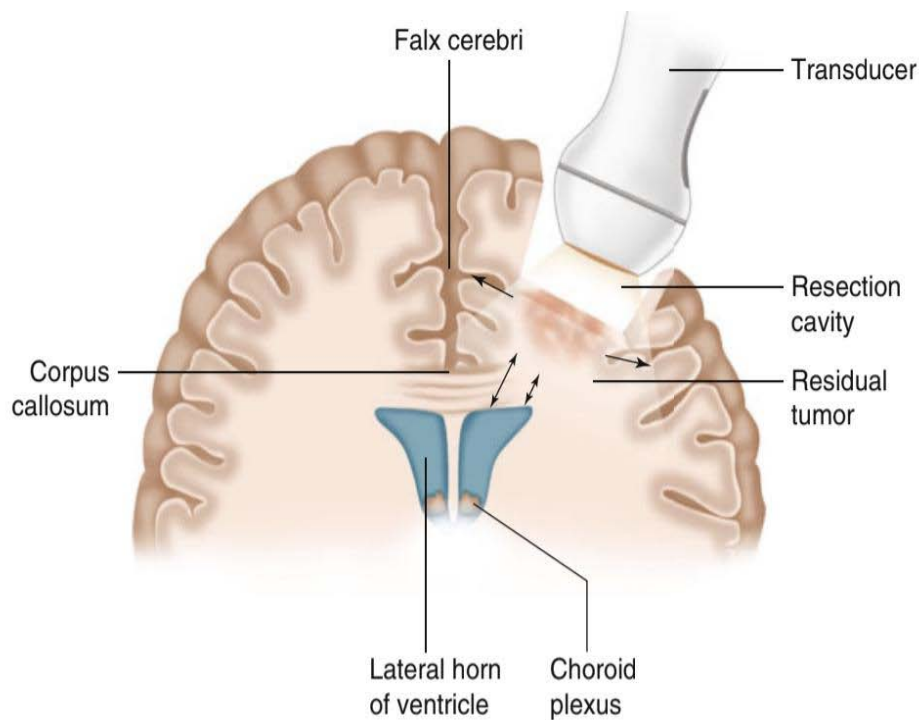


Figure 22 : Illustration de l'utilisation importante de échographie peropératoire pendant la résection. L'étendue de la résection et la distance par rapport aux structures éloquentes peuvent être évaluées en continu par ce moyen

1. Les transducteurs à ultrasons pour usage intracrânien :

Les transducteurs à ultrasons pour usage intracrânien doivent avoir une petite ouverture pour être positionnés dans les craniotomies typiques. En gros, il existe 3 types de des transducteurs à ultrasons. La dénomination est basée sur le positionnement des cristaux piézoélectriques dans la pointe des sondes (Figure 29)

Les transducteurs à réseau linéaire produisent des des ondes ultrasoniques, créant ainsi une image rectangulaire avec une haute résolution et de petits artefacts. Sur la base de les ondes sonores parallèles, la largeur de l'image est limité par l'ouverture du transducteur.

Par conséquent, La vue d'ensemble est limitée aux sondes à faible empreinte qui sont nécessaires à l'utilisation intracrânienne. On utilise généralement des fréquences élevées pour les transducteurs linéaires, ce qui permet d'obtenir une haute résolution d'image. Cependant, il existe une corrélation inverse entre la profondeur de pénétration et l'augmentation de la fréquence. Les fréquences typiques utilisées sont 7–15 Mhz permettant une profondeur de pénétration d'environ de 2 à 7 cm. Ces paramètres sont très variables en fonction du tissu et du transducteur utilisés. (89)

Les transducteurs à réseau sectoriel fournissent une image triangulaire, ce qui augmente le champ de vision et permet d'utiliser des fréquences ultrasonores plus basses en augmentant la profondeur de pénétration. Les fréquences typiques sont de 4 à 8 Mhz.

Un transducteur à réseau sectoriel a une petite empreinte ; il peut donc être utilisé même dans les petites craniotomies ou les trous de bavure tout en fournissant une vue d'ensemble utile du tissu sous-jacent (101) . Apparemment, la résolution est plus faible que celle des transducteurs à réseau linéaire.

En particulier, l'augmentation de la profondeur de pénétration s'accompagne d'une diminution de la de résolution car les ondes ultrasonores sont divergentes.

Les transducteurs matriciels sont un type spécial de transducteurs à réseau sectoriel avec des éléments piézoélectriques arrangée comme un échiquier. Ainsi, une 3D en temps réel La

visualisation d'images ou de plans croisés en direct peut être créé. Cela permet d'avoir une meilleure vue d'ensemble et d'améliorer la compréhension de l'environnement intracrânien respectif pathologie (100). Les transducteurs à réseau courbe utilisent des fréquences entre 2 et 10 Mhz. Le positionnement des éléments piézoélectriques fournit un compromis entre les deux types mentionnés ci-dessous .

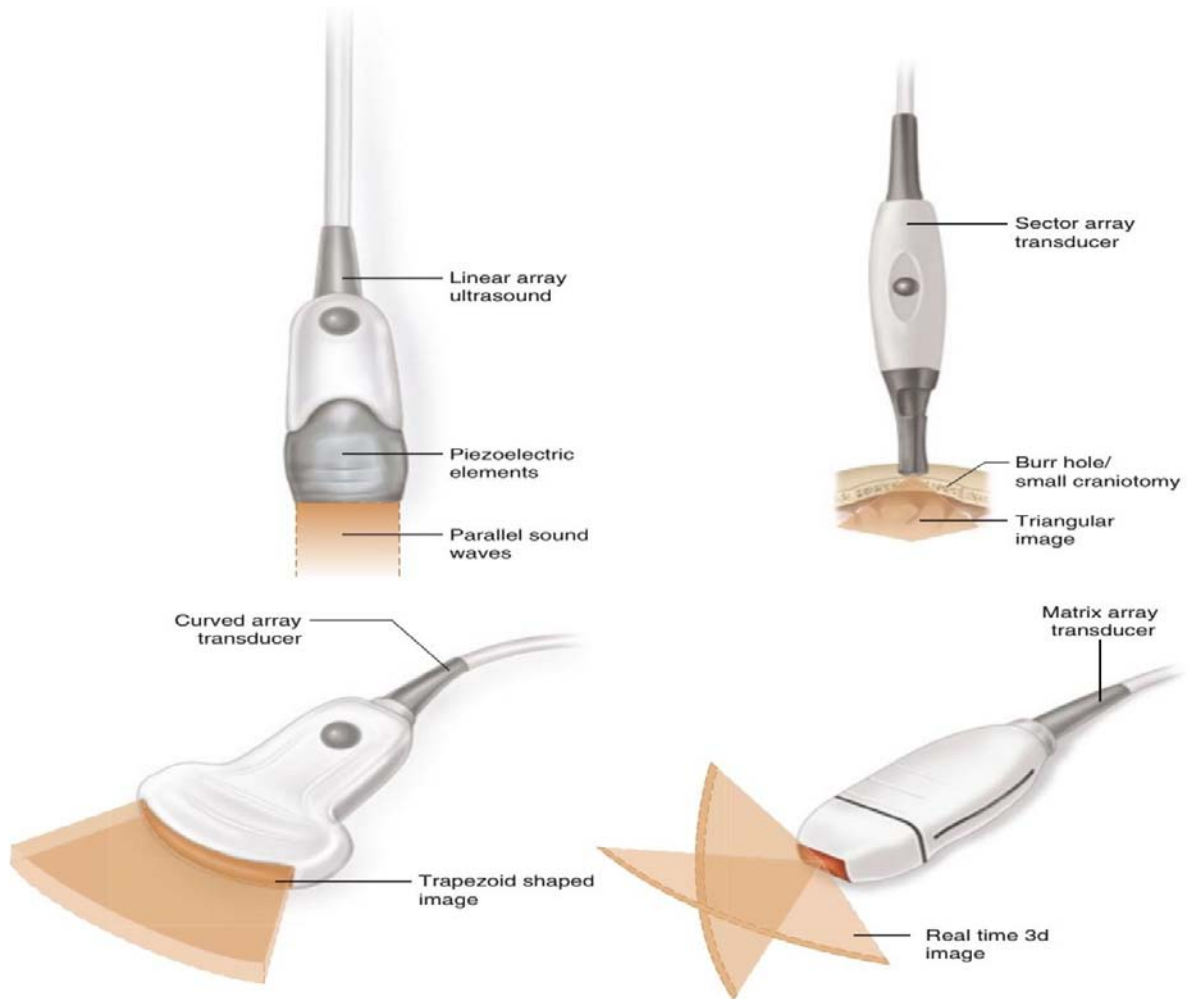


Figure 29 : L'illustration montre les types de transducteurs : (de gauche à droite)

Un transducteur à réseau linéaire produit des ondes sonores parallèles. Ainsi, la résolution reste théoriquement la même, indépendamment de la profondeur.

Cependant, la fréquence plus élevée entraîne une diminution de la profondeur de pénétration. Les transducteurs à réseau de secteurs ont une petite ouverture et fournissent une image trapézoïdale. La résolution est donc élevée à proximité du transducteur et diminue avec la profondeur ; cependant, le champ de vision est élargi dans la même matière. Ainsi, il est possible d'obtenir un large champ de vision à travers de petites ouvertures. Un transducteur à réseau courbe présente une disposition courbe des éléments piézoélectriques.

Il combine les types de transducteurs précédents. La profondeur de pénétration et le champ de vision sont augmentés, tandis que le champ de vision et la résolution à proximité de la sonde restent acceptables. Matrice Les transducteurs sont un type particulier de transducteurs à réseau sectoriel avec des éléments piézoélectriques disposés comme sur un échiquier. Ainsi, une image 3D en temps réel peut être créée .

Les transducteurs à réseau courbe utilisent des fréquences plus basses, entre 2 et 10 Mhz. Le positionnement des éléments piézoélectriques offre un compromis entre les deux types mentionnés ci-dessus . Avec les récents progrès techniques, des sondes plus petites pour l'usage intracrânien sont devenues disponibles capable, aussi. Alors que la résolution proche du transducteur est élevée, elle offre tout de même une bonne vue d'ensemble grâce à la forme trapézoïdale de l'image.

En outre, une profondeur de pénétration qui permet une bonne vue d'ensemble intracrânienne est fournie (Figure 30). Selon l'indication, plusieurs types de transducteurs peuvent être nécessaires. D'après les caractéristiques techniques, le meilleur compromis pour les lésions intra-axiales typiques est un petit transducteur à réseau incurvé. Ainsi, la profondeur de pénétration n'est pas un facteur limitant et l'avantage de la haute résolution locale peut être saisi (102) .

Dans la chirurgie des *gliomes de bas et haut grade*, la précision de la détection des tumeurs résiduelles s'est avérée nettement plus élevée que celle des sondes à réseau sectoriel conventionnelles [103].

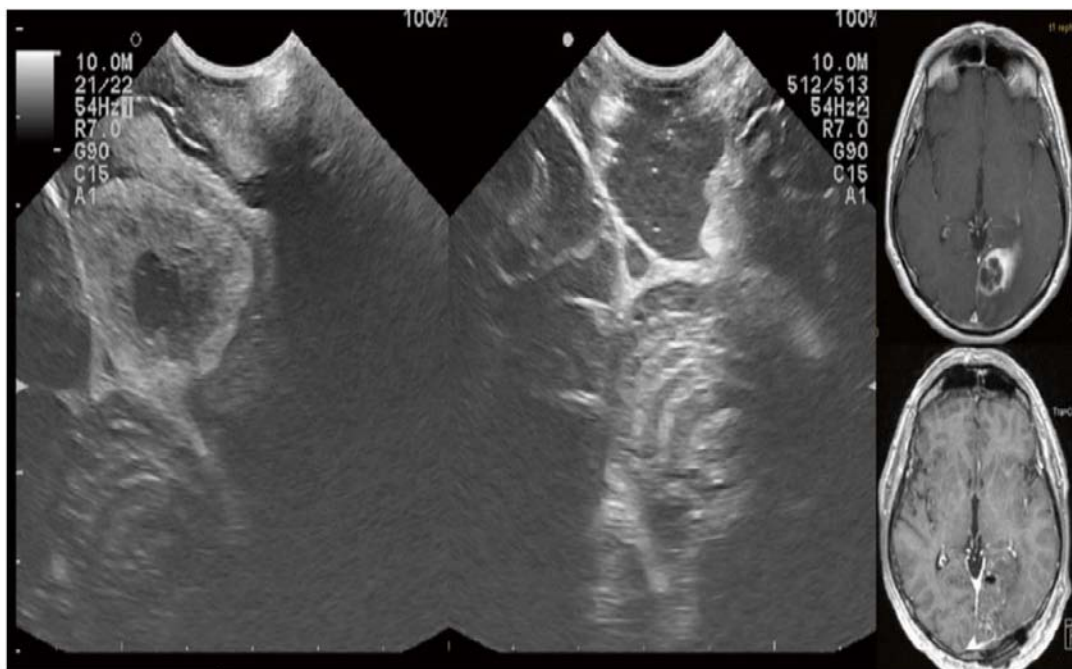


Figure 30: Image échographique tangentielle d'une métastase supratentorielle près de la faux du cerveau à l'aide d'un transducteur à réseau courbe. Représentation de la tumeur après l'ouverture durale avant le début de la préparation de la tumeur (gauche). Scanner final après l'ablation de la tumeur (droite).

Signaux typiques de sang résiduel au fond de la cavité de résection et le long du tentorium. La tumeur résiduelle peut être exclue uniquement lors de la comparaison avec des images précédentes (pas de tumeur le long du tentorium). Par rapport à la gauche on voit un artefact d'atténuation typique : L'écho l'intensité de la fosse cérébelleuse est augmentée (102)

2. LA REPRÉSENTATION DES TUMEURS :

L'échogénicité d'une tumeur intracrânienne dépend de la densité cellulaire. Si la densité cellulaire augmente, en particulier dans les gliomes de haut grade ou dans les métastases, un signal hyperéchogène fort peut être représenté. Par conséquent, dans les gliomes de bas grade, la différenciation de la limite de la lésion peut être plus difficile. Cet effet est plus prononcé dans les transducteurs à secteur ou à réseau courbe que dans les sondes à réseau linéaire .

Dans un premier temps, il est recommandé d'optimiser le contraste entre les tissus les plus susceptibles d'être exempts de tumeur et les tumeur avant même l'ouverture de la dure. Ainsi, en fonction des paramètres d'imagerie et de la profondeur du contraste de la lésion, la mise au point et les autres paramètres d'imagerie peuvent être optimisés avant que des artefacts n'obscurcissent pas la vision. En général, le contraste entre le tissu cérébral "non infiltré" et la tumeur est plus élevé lorsqu'on utilise un transducteur à réseau linéaire (104).

Utilisation d'un dispositif à réseau linéaire haute résolution, tissu sous-cortical normal ne renvoie que très peu de signaux et apparaît noirâtre.

La figure (31) présente un tableau schématique comparant l'intensité du signal des structures anatomiques typiques (en vert), des structures pathologiques (en rouge et en jaune) et des chirurgies, d'artefacts induits par la chaleur (en gris). Il est évident que, selon les conditions d'ultrasons et les transducteurs appliqués, une grande variabilité peut se produire. Par conséquent, les échelles de gris fournies doivent être utilisées comme une et non comme une échelle d'étalonnage.

Mair et al. ont établi un système de classement pour la visibilité échographique des lésions intracrâniennes typiques et sa discrimination à la frontière (105).

Le grade 0 décrit les lésions qui ne sont pas visibles. Le grade 1 décrit les tumeurs difficiles à visualiser sans frontière exacte avec le tissu cérébral normal. Le grade 2 est une lésion clairement identifiable

l'absence d'une frontière nette avec le tissu cérébral normal et le grade 3 est une lésion clairement identifiable avec une frontière nette avec les tissus normaux. (Figure 32) montre une illustration par les auteurs décrivant les lésions de grade I à III.

La figure (33) montre une caractéristique des lésions intracrâniennes typiques des mêmes auteurs et la visibilité respective en utilisant l'échographie peropératoire. L'intérêt spécifique de l'étude citée est que les auteurs ont utilisé des sondes sectorielles et à réseau

linéaire de 5 à 12 MHz. Par conséquent, les données fournissent un aperçu extraordinaire sur la représentation échographique de 105 lésions intracrâniennes.

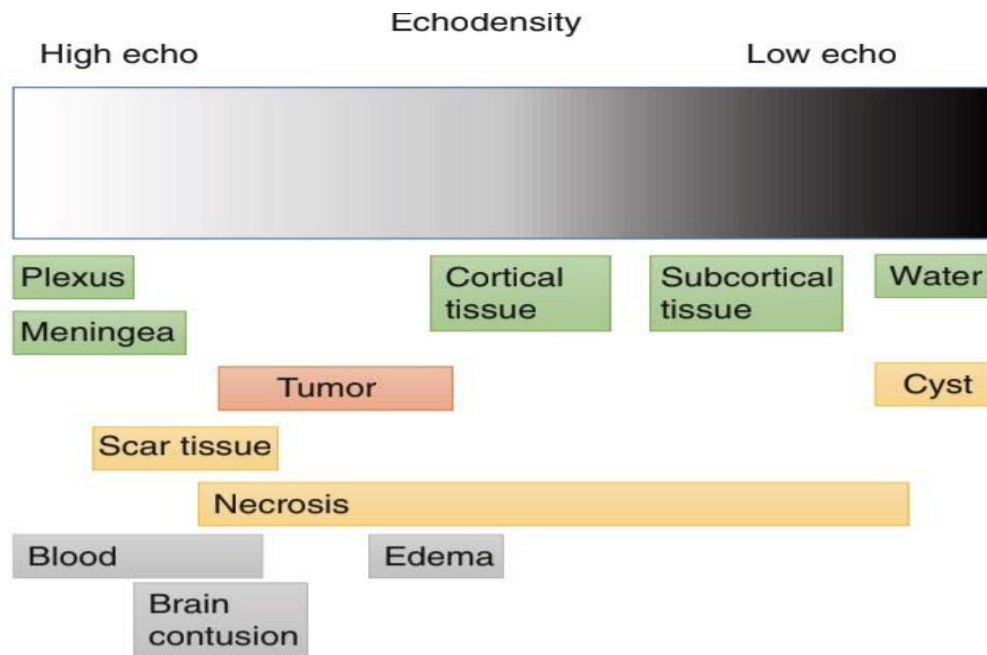


Figure 31: Illustration schématique comparant l'intensité du signal des structures anatomiques typiques (vert), des structures pathologiques (rouge et jaune), et des artefacts induits chirurgicalement (gris)

*

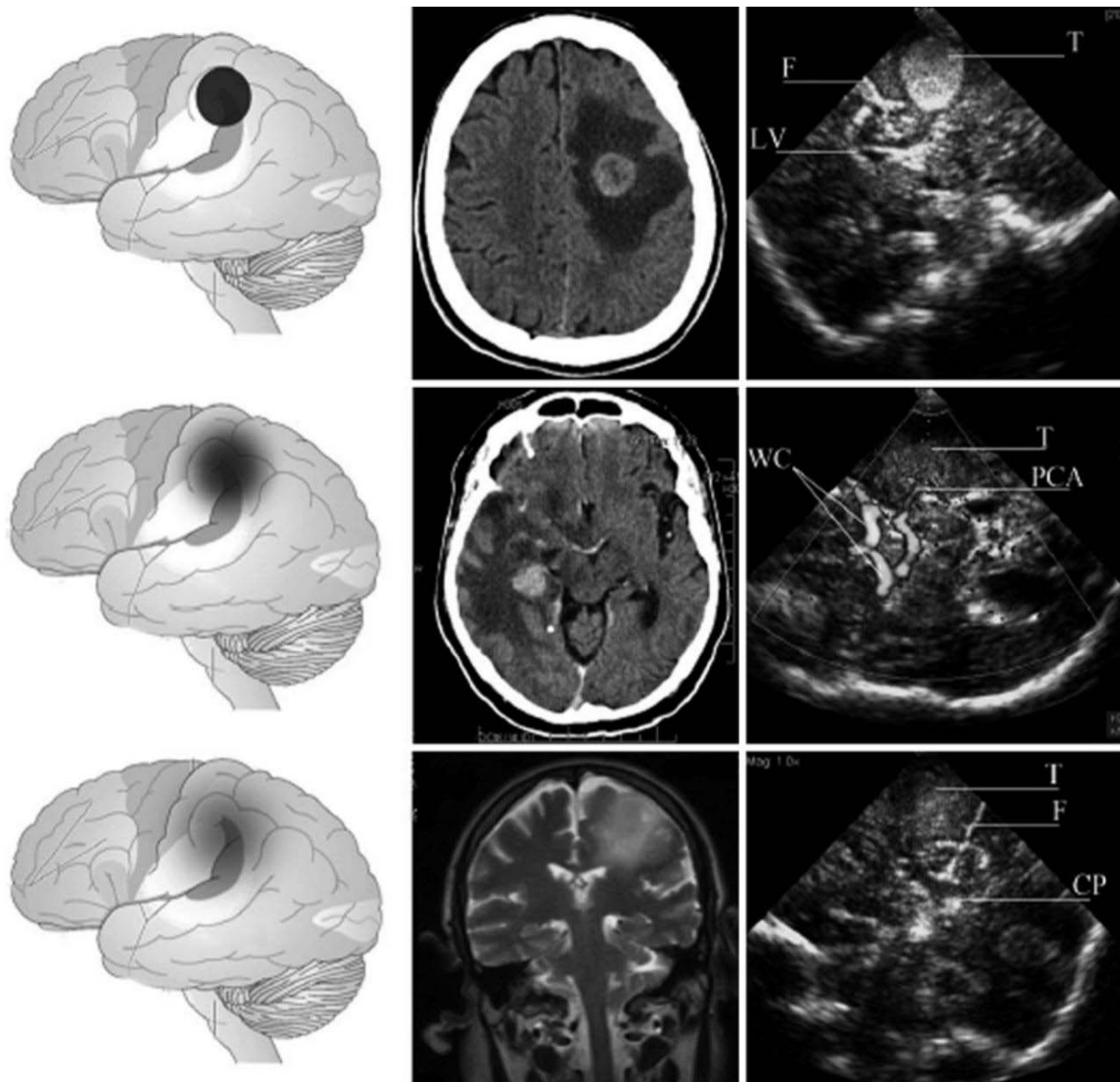


Figure 32 La visibilité échographique des lésions cérébrales.

(a) Grade III : la lésion est clairement identifiable et a une frontière nette avec les tissus normaux ; scanner préopératoire avec contraste, et échographie peropératoire ; image coronale. Tumeur T, F faux du cerveau, ventricules latéraux VL.

(b) La lésion est clairement identifiable mais n'a pas de frontière avec les tissus normaux ; CT avec tumeur temporale méssiale de contraste, mode angio de puissance. La tumeur et sa relation avec les vaisseaux voisins sont visibles. Tumeur T, cercle de Willis du WC, artère cérébrale postérieure PCA.

(c) La lésion est difficile à visualiser et n'a pas de frontière nette avec les autres vaisseaux. mais reste identifiable à l'IRM (T2). Tumeur T, F faux du cerveau , CP plexus choroïde dans les ventricules latéraux (105)

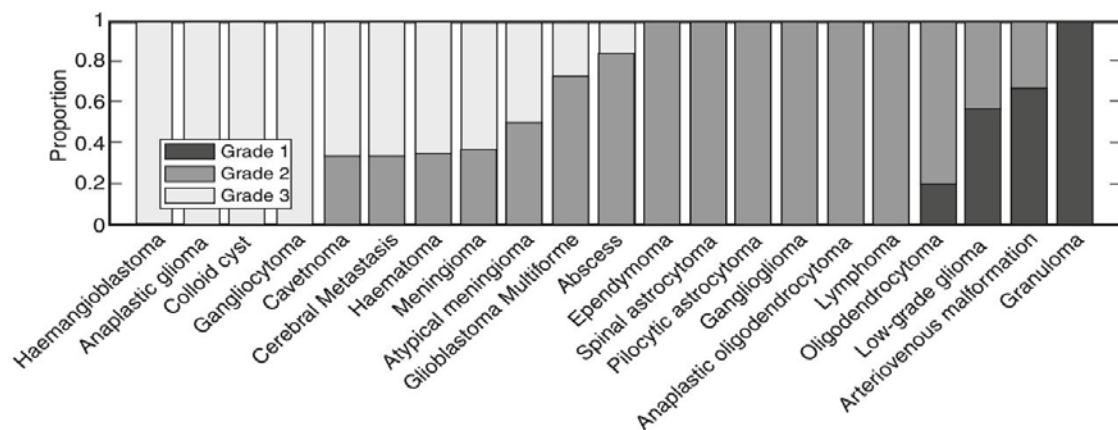


Figure (33) Caractérisation des lésions individuelles à l'aide le système de notation de Mair et al. : la note 0 décrit des lésions non visibles.

Le grade 1 décrit des lésions difficiles à visualiser et aucune frontière claire avec les tissus normaux.

Le grade 2 est une lésion clairement identifiable, mais sans bordure nette avec des tissus normaux, et le grade 3 est une lésion clairement identifiable avec une bordure nette avec des tissus normaux.(105)



Figure 34: Ultrasons à réseau linéaire haute résolution d'un glioblastome avant résection de la tumeur montrant une différenciation précise des parties "multiformes" de la lésion, y compris la nécrose et l'infiltration diffuse du cortex adjacent .

La représentation des limites de la tumeur ne dépend pas seulement de la qualité des images échographiques, mais aussi du type de lésion lui-même. Les gliomes et les lymphomes diffus de bas grade, en particulier, n'ont une frontière historiquement définie.

Dans *les gliomes de haut grade*, l'échographie peropératoire est capable d'identifier différents compartiments multiformes de la lésion solide (Figure 34) comme la nécrose, les kystes, les saignements, la tumeur dense irrégulière et la zone d'invasion.

Cette dernière est particulièrement difficile à différencier de l'œdème. Une comparaison directe de l'IRM peropératoire et des ultrasons à secteurs et à réseau linéaire a montré que les ultrasons à réseau linéaire sont plus efficaces que les ultrasons à secteur. Le son est plus sensible pour la détection des tumeurs que les deux autres techniques. Cependant, il permet également de détecter la zone d'infiltration des lésions

Histologiquement dans le glioblastome, 60–100 % de la densité des cellules tumorales peut être trouvée entre 6 et 14 mm de distance de la limite de l'augmentation du contraste [106]. Ainsi, une "surdétection" pourrait être favorisée par le chirurgien. Cependant, il faut être prudent à proximité des zones éloquentes : Même si le rehaussement de contraste au Gd–DTPA ne pénètre pas dans une zone éloquente, cela ne signifie pas que la tumeur . Les nouveaux déficits moteurs ou linguistiques ne sont pas uniquement associée à une diminution de la qualité de vie mais avec une diminution significative de la survie globale [107].

Ainsi, lors de l'utilisation de ces techniques d'imagerie très détaillées et sensibles dans des zones éloquentes, il est recommandé d'utiliser la surveillance peropératoire. Sinon, l'interprétation pourrait être difficile à un stade ultérieur de la chirurgie, lorsque la masse de la tumeur solide est presque supprimé.

Les métastases cérébrales sont généralement bien circonscrites et ont une bordure définie en IRM et dans les images échographiques correspondantes.

De nombreuses lésions métastatiques, principalement solides et circonscrites Les lésions présentent également des zones infiltrantes. Habituellement, dans ce dans ce type de lésions, les zones d'infiltration ne se trouvent que dans certaines parties de la lésion (Figure 35).

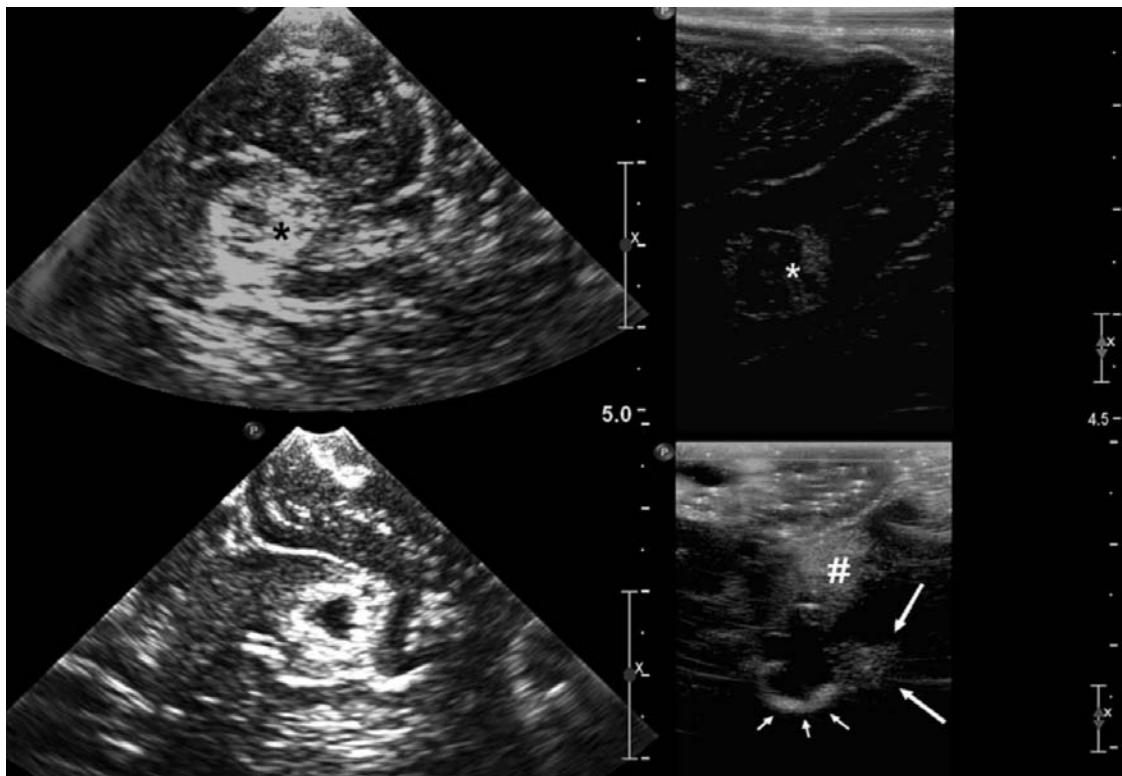


Figure 35 Rangée supérieure : images échographiques (US) d'une petite métastase (*) profondément enfoncée après l'ouverture durale avant la résection. A gauche : US à 7 MHz ; à droite : US à haute résolution de 15 MHz.

Rangée inférieure : US de la cavité de résection après ablation microchirurgicale complète; US 7 Mhz gauche montre la cavité de résection avec un sillon adjacent dû à un artefact de manipulation ; le tissu entourant la cavité de résection ne peut être évalué. A droite : 15 Mhz US haute résolution révèle la zone d'infiltration des métastases (grandes flèches, confirmées histologiquement).

Les artefacts typiques d'une opération chirurgicale sont représenté : sang au fond de la cavité de résection (petit flèches) et un gelfoam (#) qui a été inséré .

3. Artefacts et optimisation des images

Lors d'une échographie intracrânienne, une bonne connaissance des artefacts ultrasonores typiques est cruciale pour interpréter correctement les résultats d'imagerie. Le type et l'étendue des artefacts changent selon le type utilisé et basé sur le tissu évalué . Le problème le plus important est l'acoustique .

Les artefacts de renforcement (AEA) qui apparaissent au fond de la cavité de résection après une certaine réduction de la tumeur , lorsque les ultrasons pénètrent dans une colonne d'eau plus élevée (saline). L'apparition des AEA est due à une grande différence entre une très faible atténuation des ondes acoustiques dans la solution saline et une forte atténuation des ondes acoustiques dans le tissu cérébral . La représentation par ultrasons des bords médians de la tumeur après une certaine réduction de la tumeur peut donc être problématique ; les AEA peuvent même empêcher la détection de restes de tumeur au fond de la cavité de résection. *(89)*

Toutefois, il existe plusieurs méthodes permettant de différencier les AEA des restes de tumeur et d'estimer l'étendue de la résection. En temps réel, l'échographie 2D permet de localiser les AEA dans l'image se déplaceront lorsque la sonde est déplacé ou modifié dans sa position et son angle . Si la zone hyperéchogène est localisée dans une région où aucune tumeur n'était présente avant la résection, c'est la probablement pas un reste de tumeur .

Par conséquent, un changement de transducteur pendant l'opération peut entraîner un changement des artefacts rencontrés. Les artefacts de réverbération sont des réflexions d'ondes ultrasonores provoquant une image réfléchi ou de multiples objets réfléchissants.

Dans la chirurgie des tumeurs cérébrales, ce type d'artefact peut apparaître lors de la visualisation d'une cavité de résection remplie d'irrigation. Les images réfléchies se déplacent lorsque le transducteur est changé. Ainsi, ces artefacts sont facilement identifiables dans la plupart des cas.

Les distorsions et les artefacts de plage de phase sont moins fréquents en neurochirurgie car le cerveau est un organe plutôt homogène. Habituellement, ce type d'artefacts est provoqué par lorsque une modification de la vitesse de son se produit.

Les problèmes potentiels pourraient être une cavité de résection remplie avec du liquide, une lésion kystique ou le ventricule. Erreurs en profondeur pourrait se produire dans ce cas puisque le son se déplace plus rapidement dans l'eau que dans le tissu cérébral. Ainsi, des lésions derrière une cavité remplie d'eau pourraient apparaître plus proche que les lésions du tissu cérébral dans la même profondeur.

Un problème similaire se pose sur la base de différentes les atténuations entre les différents tissus. L'atténuation dans le tissu cérébral est relativement élevée.

Le tissu cérébral, même lorsqu'il est infiltré par une tumeur, est relativement homogène en ce qui concerne l'atténuation. C'est la raison de la haute qualité d'image des échographies peropératoires au début de la résection de la tumeur.

Ainsi, si une cavité de résection est remplie d'irrigation, on constate une différence significative d'atténuation entre le tissu cérébral des parois de la cavité de résection et le fond de la cavité de résection. Par conséquent, un signal différent au fond de la cavité pourrait être causé par ce type d'artefact . Cette zone peut sembler hyperéchogène et peut être confondue avec une tumeur résiduelle. De plus, le sang et les microcontusions peuvent provoquer des signaux hyperéchogènes. C'est pourquoi l'importance des balayages réguliers par ultrasons pendant le processus de formation de la tumeur.

Ainsi, les artefacts d'atténuation sont facilement identifiables puisque l'artefact se déplace plus profondément et augmente alors que la cavité de résection est agrandie.

Dans *les gliomes* on constate que l'utilisation intracavitaire d'un transducteur haute fréquence à réseau linéaire en forme de crosse de hockey est possible dans plus de 90 % des cas **(108)**. Une autre option pour éviter les artefacts d'atténuation facilement réalisable, même avec des transducteurs plus grands, est l'échographie transcorticale. La paroi latérale de la cavité de résection est utilisée comme une "fenêtre sonore" pour évaluer le fond et les parois pour détecter les tumeurs résiduelles . Unsgaard et al. ont même propagé un deuxième trou de bavure pour l'imagerie ultrasonore continue comme contrôle de la résection dans la chirurgie des gliomes **[109]**.

L'une des améliorations de la qualité de l'image est due à la capacité des des systèmes à ultrasons pour régler électroniquement et dynamiquement la gamme de fréquences de l'imagerie sonde . Une fréquence plus élevée signifie une meilleure résolution, c'est-à-dire une meilleure capacité à différencier deux cibles en tant qu'objets séparés .

Les ultrasons à réseau linéaire à haute fréquence ont montré un avantage significatif pour la détection des glioblastomes résiduels par rapport aux ultrasons à réseau courbe à basse fréquence . Pour les gliomes de bas grade, la précision de la détection de la tumeur résiduelle est comparable à celle de l'IRM peropératoire à champ élevé lorsqu'un une sonde linéaire à ultrasons de fréquence est utilisée .

Cependant, l'inconvénient des sondes à haute fréquence est la réduction de la pénétration des ondes acoustiques dans le tissu comme a recommandé Unsgaard et al (111),

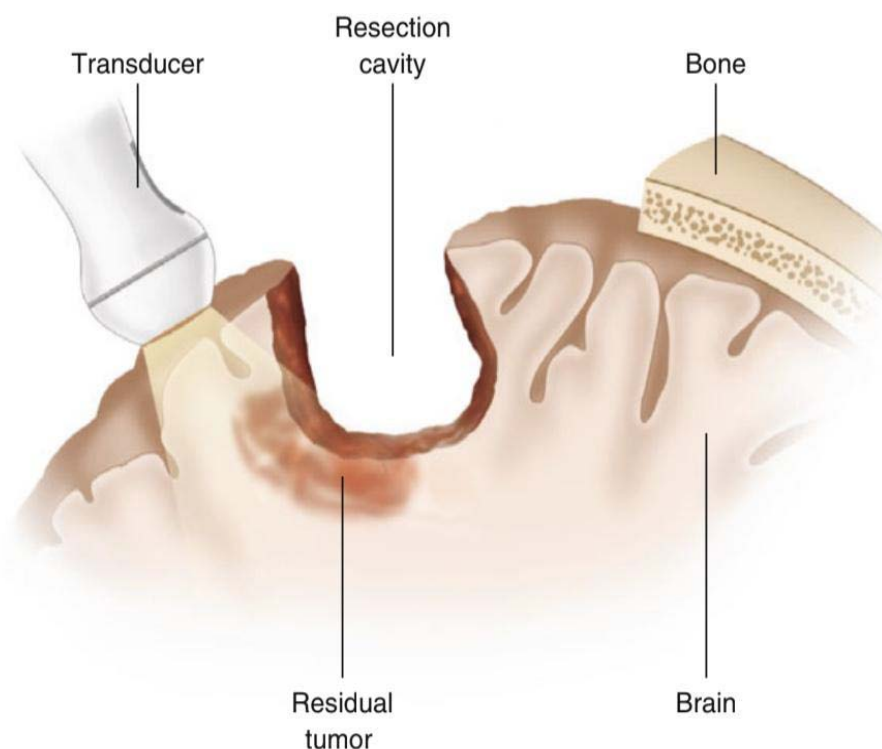


Figure 36 : Illustration d'une tangente transcorticale des ultrasons afin de diminuer l'atténuation artefacts .

4. Échographie peropératoire lors de la résection de gliomes cérébraux en état de veille

Les gliomes diffus peuvent s'infiltrer et incorporer des structures cérébrales importantes sur le plan fonctionnel [112], ce qui rend difficile la résection de tumeurs localisées dans des zones éloquentes.

Malgré les progrès réalisés dans la visualisation du cortex et de la substance blanche éloquents par l'IRM fonctionnelle et la tractographie basée sur l'imagerie du tenseur de diffusion, ces modalités ne sont pas totalement fiables pour identifier les structures éloquentes, surtout dans les cas où elles sont infiltrées par un gliome [111]. Par conséquent, lorsque les gliomes se développent à l'intérieur ou à proximité de régions éloquentes, une surveillance électrophysiologique peropératoire de l'intégrité et du fonctionnement de ces structures est obligatoire.

La stimulation électrique directe pendant la RA des gliomes est actuellement considérée comme la référence pour l'identification et la préservation des voies du langage [112–113] ; cette méthodologie est

efficace également dans les cas où les voies fonctionnelles infiltrées par le gliome ne peuvent être visualisées par tractographie . La stimulation électrique directe pendant la RA est également une forme utile de cartographie cérébrale du cortex du langage , du cortex moteur et des voies , cortex visuel et voies , etc. Localiser le tissu gliomateux [113]. Néanmoins,

comme mentionné précédemment, la précision de la neuronavigation est limitée en raison du déplacement du cerveau [28], et l'échographie 2D est sujette à des difficultés d'interprétation des images, en particulier après l'apparition de certains tissus tumoraux déboullage . En raison de ces inconvénients, l'IRM peropératoire [114] ou l'échographie 3D guidée [112] est utilisée dans plusieurs centres pendant la réanimation d'un gliome éloquentement localisé.

Les deux méthodes permettent une visualisation distincte des tissus normaux et pathologiques, ainsi qu'une mise à jour peropératoire des données de neuronavigation et une compensation du déplacement du cerveau, ce qui est essentiel pour la suite de l'opération. (115)

VIII. L'utilité de l'échographie peropératoire dans lésions spinale :

La tumeur spinale peut provenir de la moelle épinière, des nerfs, des racines, vertèbres et méninges. Plus de 2/3 des tumeurs de la colonne vertébrale sont des lésions non malignes.

En ce qui concerne leur origine et leur relation avec les structures neurales est concerné, les tumeurs spinales peuvent être divisées en extradurales, intradurales extra-médullaires ou intra-médullaires. Les méningiomes, les tumeurs de la gaine nerveuse et les épendymomes sont les histotypes les plus fréquemment rencontrés [116 -117].

Les tumeurs primaires de la moelle épinière sont l'un des types de tumeurs les plus rares, représentant environ 4 à 8 % de toutes les tumeurs du système nerveux central [116]. L'excision chirurgicale représente l'option de traitement standard, bien qu'elle entraîne toujours un risque considérable de déficits neurologiques.

Cela est particulièrement vrai pour l'ablation chirurgicale des tumeurs intramédullaires, où une myélotomie doit être effectuée [117].

Cinq à quarante pour cent des patients qui subissent une résection chirurgicale d'une tumeur intradurale peuvent développer de nouveaux déficits neurologiques. Récemment, l'introduction de nouveaux outils chirurgicaux, ainsi que la surveillance électrophysiologique peropératoire, ont contribué à réduire considérablement les risques de troubles neurologiques postopératoires [117,118].

Les outils d'imagerie peropératoire pour la chirurgie des tumeurs vertébrales pourraient améliorer cet aspect de la chirurgie en réduisant la manipulation des structures neurales, ce qui pourrait entraîner une aggravation des déficits neurologiques.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) représente l'étalon-or pour le diagnostic et l'évaluation des tumeurs intradurales. Néanmoins, l'IRM ne permet pas toujours de différencier avec précision des lésions intramédullaires et extramédullaires.

En outre, l'IRM peropératoire n'est pas encore un outil standardisé dans la chirurgie des tumeurs vertébrales, ce qui présente de nombreuses limites techniques.

Ces dernières années, l'utilisation des orientations de l'échographie peropératoire IOUS se généralisent progressivement au cours de les procédures neurochirurgicales pour l'ablation de tumeurs cérébrales [119 – 120].

Le premier cas de visualisation par ultrasons d'une tumeur de la colonne vertébrale a été signalée en 1978 par Reid, qui a décrit un astrocytome cervical spinal [121].

1. Technique et cadre opérationnel :

Diverses sondes peuvent être utilisées pour l'imagerie peropératoire de la colonne vertébrale, mais la localisation du site d'accès chirurgical nécessite une configuration de fin pour les sondes de l'échographie peropératoire (IOUS) . Pour l'évaluation de la moelle épinière, les très hautes fréquences de 10 MHz ou plus peuvent être utilisées efficacement et offrent une résolution spatiale et temporelle exceptionnelle.

Pour obtenir l'accès au canal rachidien en cas de tumeur l'ablation, les patients sont opérés en position couchée. La région vertébrale d'intérêt est généralement localisée et marqués avec un guidage radiographique avant l'incision de la peau.

L'hémilaminectomie, la laminectomie ou la laminotomie standard sont effectuées. Les patients sont ensuite examinés à l'aide d'une échographie transdurale et directe. La sonde est placée dans un plastique transparent gaine stérile chirurgicale , remplie de gel transducteur spécifique aux ultrasons , pour garantir le couplage acoustique au niveau de la membrane du transducteur. (121)

La sonde est ensuite placée dans la cavité chirurgicale qui est irrigué avec une solution saline. Contrairement aux examens IOUS du cerveau, seuls deux plans d'insonation majeurs (axes axial et sagittal) sont autorisés . L'imagerie standard en mode B est acquise avant

l'ouverture durale, afin de vérifier si la laminectomie est suffisante et la lésion est entièrement exposée. De plus, la lésion est identifiée et mesurée sur les deux axes. Les caractéristiques, les limites et les repères anatomiques spécifiques de la tumeur sont acquis.

Toutes les lésions peuvent être définies comme hyperéchogènes, isoéchogènes ou hypoéchogènes par rapport aux tissus environnants. Les autres caractéristiques des lésions qui sont prises en compte sont l'aspect diffus et circonscrit, l'homogénéité par rapport aux l'hétérogénéité, la présence de calcifications, et/ou les zones kystiques/nécrotiques ainsi que leurs relations avec les structures environnantes.

L'utilisation du Doppler US en mode couleur pourrait être utile pour identifier les principaux vaisseaux entourant les lésions .

Toutes les lésions intramédullaires sont également évaluées avec IOUS après ouverture durale, afin de placer correctement la myélotomie et d'ajuster sa longueur de manière à visualiser et à retirer complètement la lésion sans manipulation inutile du tissu neural.

En cas de lésions infiltrantes, l'aspect est isoéchogène pour la moelle épinière et la surface entre la tumeur et la myéline ne peut pas être clairement distingué.

L'intervention chirurgicale doit se limiter à une décompression interne et à l'obtention d'un diagnostic histologique définitif.

Il faut tenir compte de quelques limites techniques :

- la taille de la pointe de la sonde échographique actuellement utilisée (1 × 3,5 cm) peut parfois être plus grande que le champ chirurgical réel.
- En cas d'hémorragie diffuse ou d'utilisation excessive il est difficile de visualiser le parenchyme environnant.
- l'œdème périfocal empêche de différencier avec précision les des structures médullaires au tissu pathologique résiduel .
- La mobilité limitée de la sonde entrave également l'utilisation de l'imagerie Doppler, réduisant la possibilité de visualiser les vaisseaux qui sont perpendiculaires à l'angle d'insonation.

À ce jour, le rôle de l'échographie peropératoire est très limité dans l'évaluation des tumeurs de la moelle épinière, contrairement à son application sur les tumeurs cérébrales.

Les résultats de l'étude IOUS pour les lésions affectant le compartiment vertébral sont résumés dans le (tableau VI) .

On y trouve donc les descriptions des caractéristiques échographiques et l'histologie la plus fréquent pour tous les compartiments.(89)

Tableau VI : Caractéristiques échographiques des tumeurs vertébrales en mode B.

Histotype	B-mode features		
	Echogenicity	Appearance	Cystic-like areas and/or necrosis
Neurinoma	Often with low or isoechoic	Circumscribed	Sometimes microcystic or macrocystic appearance
Filum terminale ependymoma	Hyperechoic	Circumscribed	No
Meningioma	Hyperechoic	Circumscribed	Microcysts
Chordoma	Hypoechoic	Circumscribed	No
Metastasis	Variably hyperechoic	Nodular Heterogeneous	Large cysts/necrotic areas
Intramedullary ependymoma	Hyperechoic	Circumscribed Homogeneous	Small/microcysts, syrinx
Hemangioblastoma	Variably hyperechoic	Nodular Homogeneous	Perilesional cyst, macrocystic appearance
Cavernoma	Hyperechoic	Circumscribed	No
Glioma	Variably hyperechoic	Heterogeneous	Sometimes intralesional or perilesional cyst

2. Détection des tumeurs spinales :

2.1. Les tumeurs extradurales :

Les lésions extradurales proviennent de structures osseuses et conjonctives et comprennent de nombreuses tumeurs malignes des os et des tissus mous, mais les tumeurs extradurales les plus fréquentes admises dans les centres neurochirurgicaux sont représentées par des schwannomes de la gaine nerveuse.

Ce type de lésion est généralement complètement visible après laminectomie et le festonnage osseux dû à la croissance lente des tumeurs bénignes permet une bonne visualisation de la partie distale de la lésion.

Ces lésions semblent bien circonscrites, avec une capsule hyperéchogène et une texture homogène hypoéchogène.

Dans le cas de tumeurs extradurales, l'adjonction d'un examen Doppler représente une aide ultérieure pour clarifier la relation entre les lésions et les structures vasculaires.

2.2. Les tumeurs extra-médullaires intradurales :

Les tumeurs extramédullaires comprennent principalement :

les méningiomes et les schwannomes intraduraux ; les autres lésions, bénignes et malignes, sont représentées par des *lipomes*, des *dermoïdes* ou des métastases.

Tous peuvent être facilement reconnus en mode B car ils semblent plus échogènes que myéliniques structures. Elles sont généralement entourées, au moins dans les parties , par fluide sous-arachnoïdien, faisant les marges de la tumeur assez visible. La moelle épinière est souvent déplacée et peut parfois sembler de calibre réduit, mais le canal rachidien central sera maintenu. Ceci est utile pour distinguer une lésion intramédullaire d'une lésion extramédullaire.

a. Les méningiomes :

Les méningiomes spinaux sont plus fréquents dans la région thoracique , les méningiomes apparaissent comme des lésions discrètes, ovulaires, bien circonscrites, légèrement hyperéchogènes, par rapport à la moelle épinière et au liquide céphalo-rachidien normaux, avec un pour la présence de calcifications (Figure 37).

Dans la plupart des cas, l'attachement dural n'est pas visible car il est antérolatéral.

La moelle épinière et les racines sont visibles et déplacées vers le côté opposé.

b. Les schwannomes :

Les schwannomes intraduraux se présentent sous la forme de lésions ovulaires, circonscrites, légèrement hyperéchogènes, mais moins homogène par rapport aux méningiomes (en raison de la présence de certaines zones microkystiques).

Dans ces lésions, la moelle épinière est souvent déplacée antérolatéralement et contralatéralement, mais dans certains cas, les racines nerveuses sont apparues étirées à l'arrière de la lésion (Figure 38).

L'interface arachnoïdienne entre la tumeur et la moelle épinière est généralement intacte et visible comme une fine ligne hyperéchogène brillante, sauf pour certains des cas tels que les grands schwannomes ou un mélanome schwannoma. Cela est dû à la perturbation du plan arachnoïde par la tumeur.

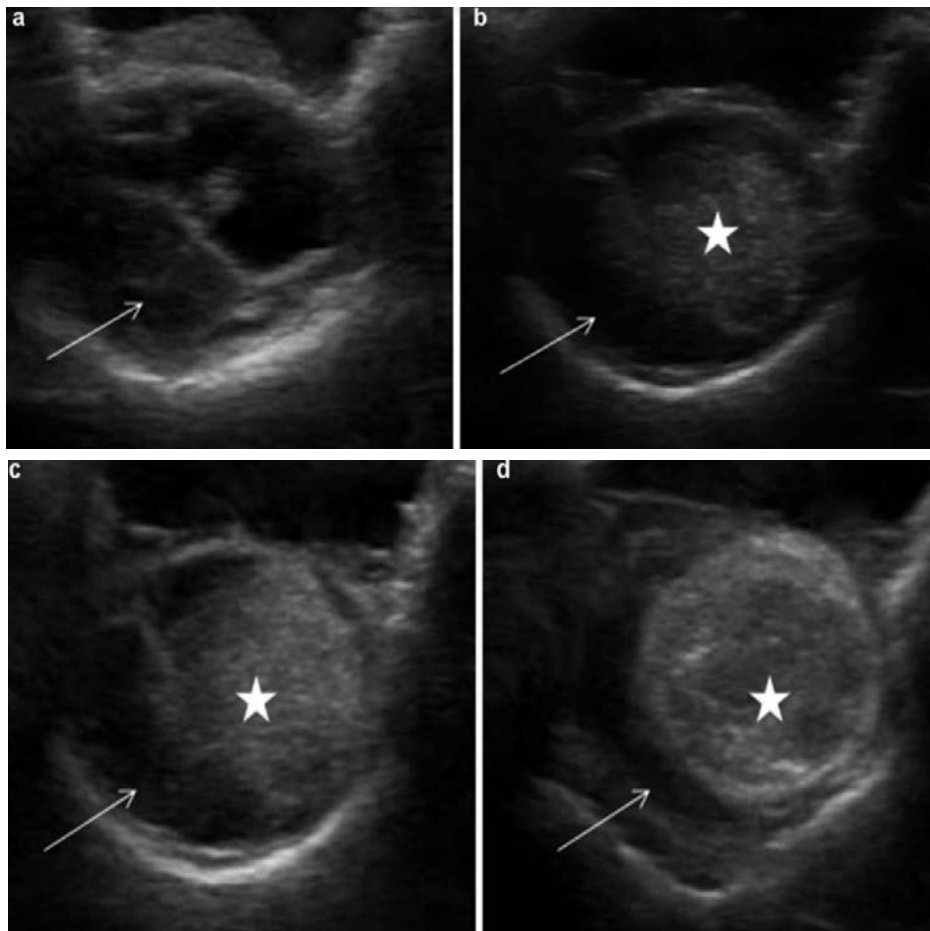


Figure 37 : Image échographique d'un méningiome : Séquence montrant les balayages axiaux (a – d) en mode B d'un méningiome (étoile) qui semble capsulé, homogène et de forme arrondie. La moelle épinière est poussée vers l'avant et latéralement (flèche), avec une distorsion de la structure arachnoïdienne (qui n'est pas reconnaissable en raison de la présence de la lésion). (89)

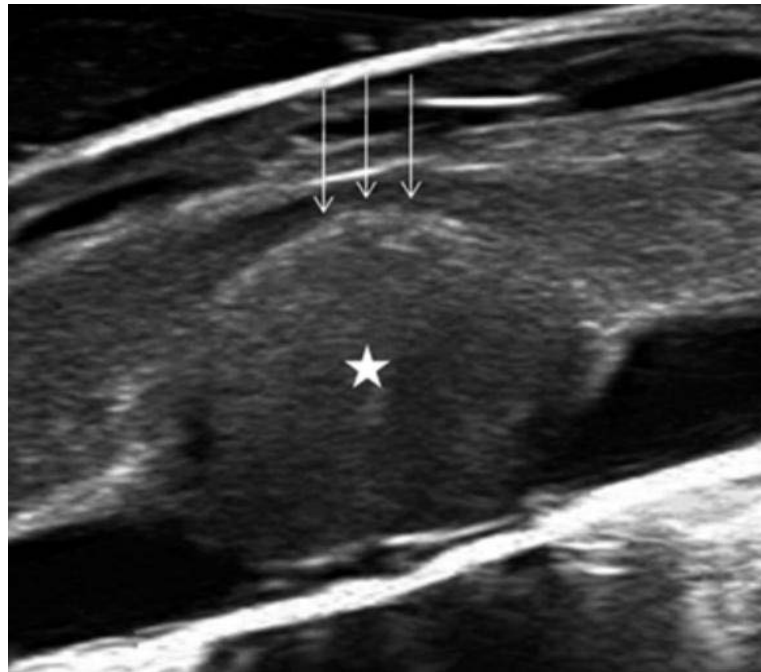


Figure 38 :Image échographique d'un Schwannome :
IOUS identifie la tumeur (étoile) qui comprime la moelle épinière environnante, qui semble légèrement agrandie et hyperéchogène en raison de l'œdème de la moelle épinière ; l'interface des structures tumormyéliniques est encore identifiable (triple flèches)(89)

2.3. Les tumeurs intramédullaires :

Les tumeurs intramédullaires se distinguent généralement de leurs homologues extramédullaires. Elles présentent généralement une hyperéchogène variable par rapport à la moelle épinière, avec un aspect circonscrit et homogène, parfois avec des kystes intralésionnels ou périlésionnels ou une dilatation du canal épendymaire central.

La moelle épinière, si elle est normale, apparaît généralement hypoéchogène et homogène. Parfois, elle peut apparaître comme hyperéchogène en raison de la présence d'un œdème tissulaire ; dans ces cas, il peut être difficile de distinguer entre la lésion et l'environnement une moelle épinière comprimée et/ou infiltrée.

Certaines tumeurs intramédullaires telles que l'*hémangioblastome* ou les *épendymomes* ont une l'apparence, y compris les structures kystiques intratumorales ou périlumorales.

L'intervention chirurgicale peut se limiter à une décompression interne et à l'obtention d'un échantillon pour une analyse histopathologique l'examen ; l'IOUS représente un guide pour l'obtention de tissus pathologiques.

a. Les épendymomes :

Les épendymomes intramédullaires apparaissent hyperéchogènes par rapport aux tissus neuronaux, avec un aspect homogène circonscrit. (figure 39)

b. Les Hémangioblastomes :

L'hémangioblastome est une lésion intramédullaire hautement vasculaire qui pourrait également s'étendre dans l'espace intradural. Elle apparaît hyperéchogène avec un aspect nodulaire homogène, souvent avec un kyste périlésionnel et un aspect macrokystique. (Figure 40).

c. Les cavernomes :

Les malformations cavernueuses intramédullaires sont des lésions très rares. Les cavernomes ont une présentation hyperéchogène, avec microkystique et les zones de microcalcification (Figure 41) .

d. Les astrocytomes :

Les astrocytomes sont des tumeurs très infiltrantes et parfois hypervasculaires. , il peut être très difficile de les distinguer de la moelle épinière environnante.

Habituellement, la frontière entre la myéline intacte et la tumeur n'est pas évidente à l'échographie. La moelle épinière semble agrandie. Ce type de lésions apparaît généralement avec une hyperéchogénicité fine et granuleuse et des marges floues. Dans ce cas, la SIO guide l'obtention d'un échantillon pour un examen histopathologique peropératoire (Figure 42).

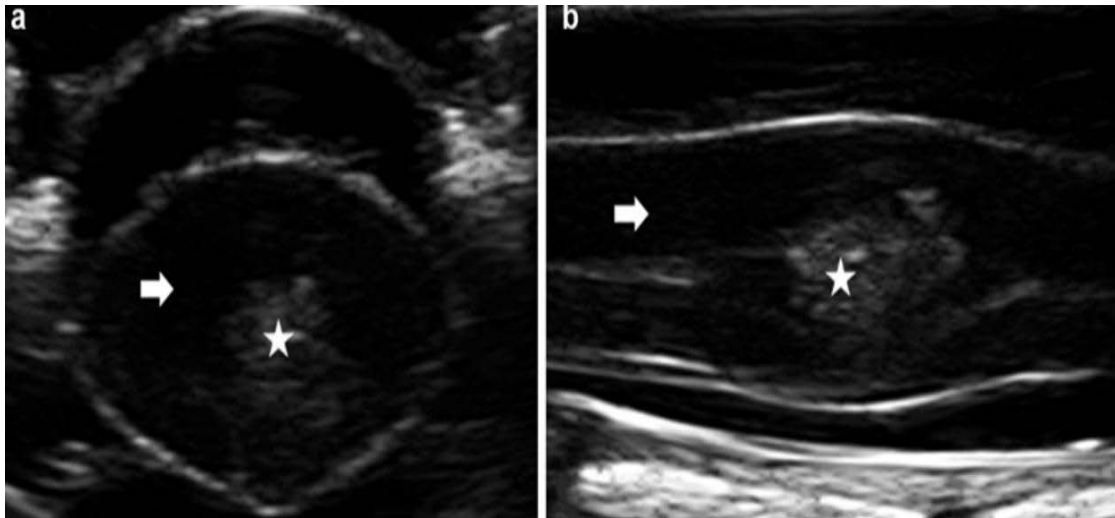


Figure 39: Image échographique d'un épendymome: Ependymome intramédullaire (étoile). Axial (a) et sagittale (b) Les résultats montrent une hypertrophie de la moelle épinière (flèches épaisses) sans œdème apparent de la moelle. Le canal épendymal central est également bien mis en évidence avec les IOUS . (89)

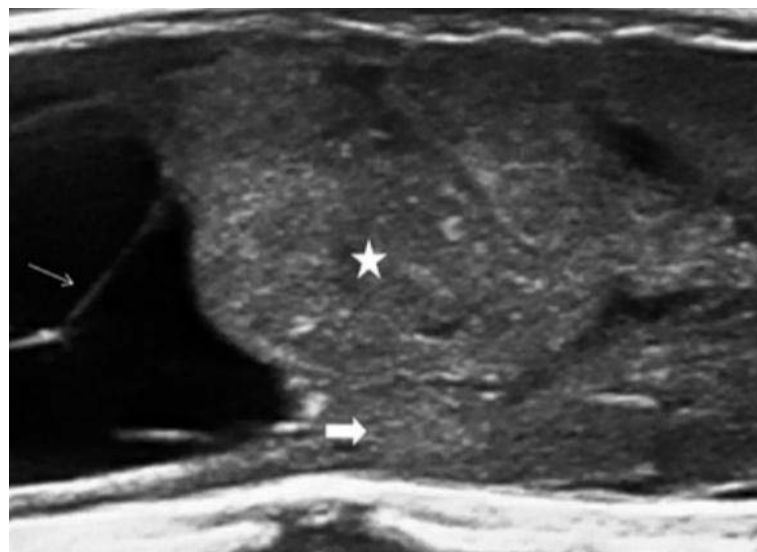


Figure 40 : Image échographique d'un hémangioblastome : échographie axiale en mode B d'un hémangioblastome, représentant une lésion ovale (étoile) entourée d'une cavité kystique avec des septations (flèche fine). La moelle épinière (flèche épaisse) apparaît assez hyperéchogène, en raison de l'œdème . (89)

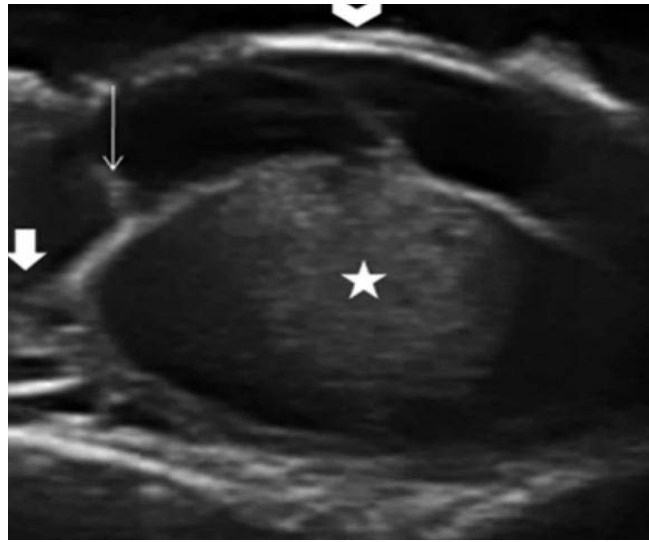


Figure 41: image échographique d'un cavernome :

Visualisation axiale d'un cavernome intramédullaire (étoile), incrusté dans la moelle épinière qui semble hypoéchogène. Les cavernomes ont généralement une présentation très hyperéchogène, avec des zones microkystiques et de microcalcification. D'autres structures sont visibles : la dure-mère (pointe de flèche), les radicelles postérieures (flèche fine) et le ligament denté (flèche épaisse).

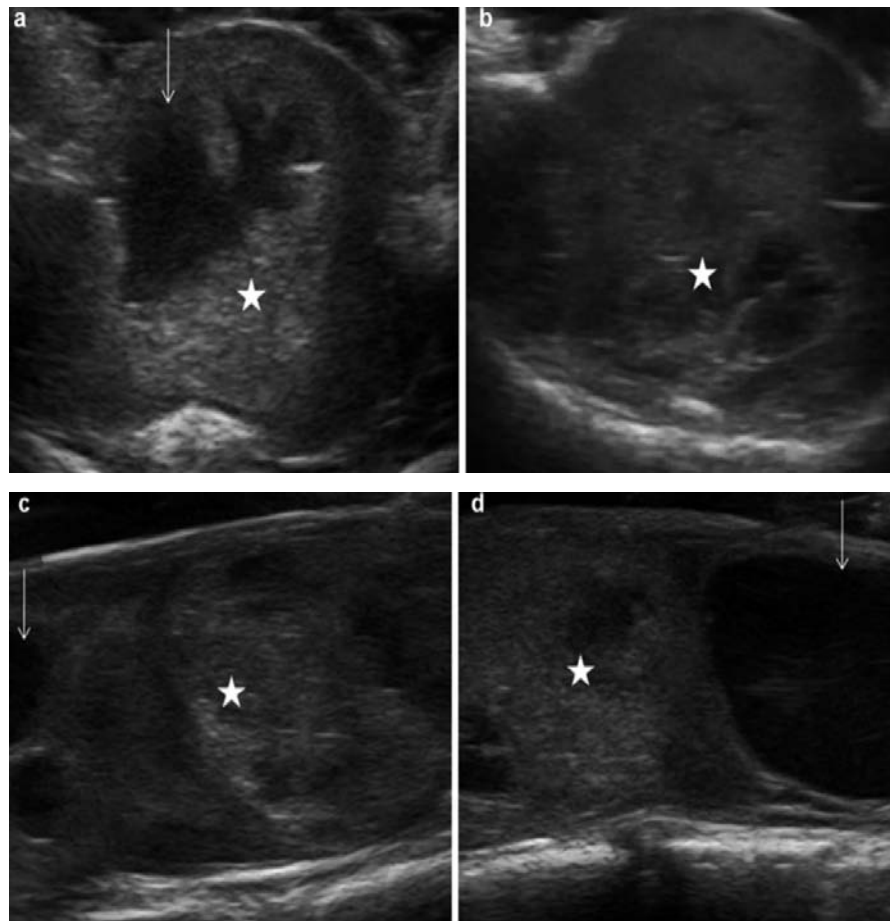


Figure 42 : Image échographique d'un astrocytome:
Échographies axials (a , b) et sagittals (c , d) de l'astrocytome intramédullaire de bas grade (étoile). La lésion, très infiltrante, apparaît avec une hyperéchogénicité fine et granuleuse et des marges floues. La frontière entre la myéline intacte et la tumeur n'est pas évidente. La moelle épinière est élargie. Certains kystes intratumoraux sont évident (flèches) . (89)

L'IOUS semble être une solution rapide, sûre et économique et représente une procédure dynamique en temps réel qui peut être effectuée lors de la chirurgie des tumeurs de la colonne vertébrale.

Cette technique permet une évaluation complète de la lésion avant l'ouverture durale et ajoute des informations précieuses en temps réel concernant les relations anatomiques entre la tumeur et les tissu sain et vasculaires environnants. IOUS permet également d'adapter l'extension de l'approche neurochirurgicale à l'étendue réelle de la tumeur.

Cela permet d'éviter la laminectomie supplémentaire alors que la dure-mère est déjà ouverte avec la moelle épinière œdémateuse qui dépasse par l'ouverture, évitant ainsi d'éventuelles complications chirurgicales. (89)

IX. L'utilité de IOUS dans les malformations artérioveineuses (MAV)

La chirurgie de la MAV reste un défi pour la plupart des chirurgiens ; On constate que l'IOUS peut aider à réduire les saignements et diminuer les risques de l'opération.

Les MAV présentent un enchevêtrement complexe d'artères anormales et veines, généralement en juxtaposition avec des vaisseaux normaux (114 -115). La résection de ces lésions pose un grand défi pour distinguer les vaisseaux sanguins normaux des vaisseaux anormaux. En outre, la résection de ces lésions pose un grand défi pour distinguer les vaisseaux sanguins normaux des vaisseaux anormaux, Les MAV de petite taille et profondes peuvent être difficiles à localiser en peropératoire par inspection ou visualisation directe.

L'échographie peropératoire a ces valeurs suivantes au terme de la chirurgie des MAV :

- Elle fournit des informations en temps réel sur la taille, la profondeur, les marges et la relation avec les structures environnantes et aide à concevoir une approche adéquate.
- Elle montre la répartition des artères d'alimentation et des veines drainantes et aide ainsi à éviter les saignements graves.(114)
- Elle fournit des informations en temps réel sur l'étendue de la résection et permet d'éviter de laisser des résidus lésion.
- Elle indique l'indice de résistance de l'artère d'alimentation qui doit être inférieur à 0,4 et déterminer si le nodulus a été totalement enlevé.

1. La détection des MAV par IOUS :

La résection des lésions des malformations artérioveineuse pose un grand défi pour distinguer les vaisseaux sanguins normaux des vaisseaux anormaux, Les MAV de petite taille et profondes peuvent être difficiles à localiser en peropératoire par inspection ou visualisation directe.

Les méthodes stéréotaxiques sans cadre facilitent cette localisation mais sont limitées par le déplacement du cerveau en peropératoire

Une fois la lésion localisée, la précision et l'exhaustivité de la résection sont essentielles. À mesure que la résection progresse, il devient de plus en plus difficile de distinguer correctement les vaisseaux anormaux de ceux qui alimentent le cerveau normal (ou l'artère en passant).

Le Doppler duplex couleur est utilisé depuis longtemps pour l'imagerie des vaisseaux cervicaux carotides et pour localiser grossièrement les MAV. Il utilise des ultrasons d'imager l'anatomie sur la base des ondes sonores renvoyées par des réflecteurs acoustiques dans le tissu. (figure 43)

L'utilisation du Doppler spectral pour mesurer la résistance à l'écoulement et l'indice de résistance (IR) des vaisseaux autour du nidus pour distinguer alimenter les artères à partir de vaisseaux en passant et de vaisseaux normaux. Ceci est particulièrement utile pour les petites MAV et aide à identifier les vaisseaux normaux et à compléter la résection en excluant un flux d'IR faible et persistant. (114)

La distinction entre une artère d'alimentation et une veine drainante peut être difficile sur le seul Doppler couleur. La couleur peut déterminer la direction de débit, mais dans une MAV, ce n'est pas une façon définitive de distinguer les artères d'alimentation des veines drainantes en raison une grande variation des trajets artériels et surtout veineux. La comparaison des formes d'onde des vaisseaux sur le Doppler spectral aide à distinguer les artères d'alimentation des veines de drainage.

Toutefois, il existe des cas dans que l'utilisation du signal Doppler couleur ne démontre pas MAV résiduelle. Rubin et al. (116) ont signalé dans leur série de a réséqué des MAV dont les résidus postopératoires sont inférieurs à 0,6 cm dans le diamètre ou les zones de résidus à faible vitesse d'écoulement peuvent être manquée par le Doppler peropératoire.

Dans l'AVM, la vitesse élevée de l'écoulement et les turbulences extrêmes permettent une visualisation saisissante du nidus AVM par couleur peropératoire Doppler de flux (114).

Ceci est particulièrement utile pour identifier la marge de résection d'une grande MAV à haut débit (*figure 44*) . L'IR est mesuré à partir la forme d'onde Doppler spectrale. En quantifiant la résistance comme RI pour les zones en question, d'après Dempsey et al le Doppler spectral peut fournir des informations plus précises que le seul Doppler couleur pour l'imagerie bidimensionnelle en temps réel pour localiser rapidement les MAV. (114,115)

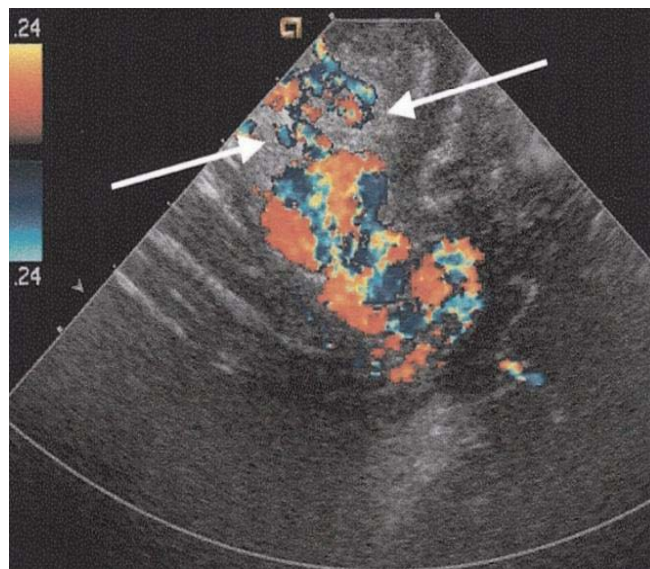


FIG 43 : Image Doppler couleur d'un nidus de MAV. L'échelle et le gain du Doppler couleur ont été optimisés pour montrer le flux complexe au sein de AVM.(Dempsey et al) .

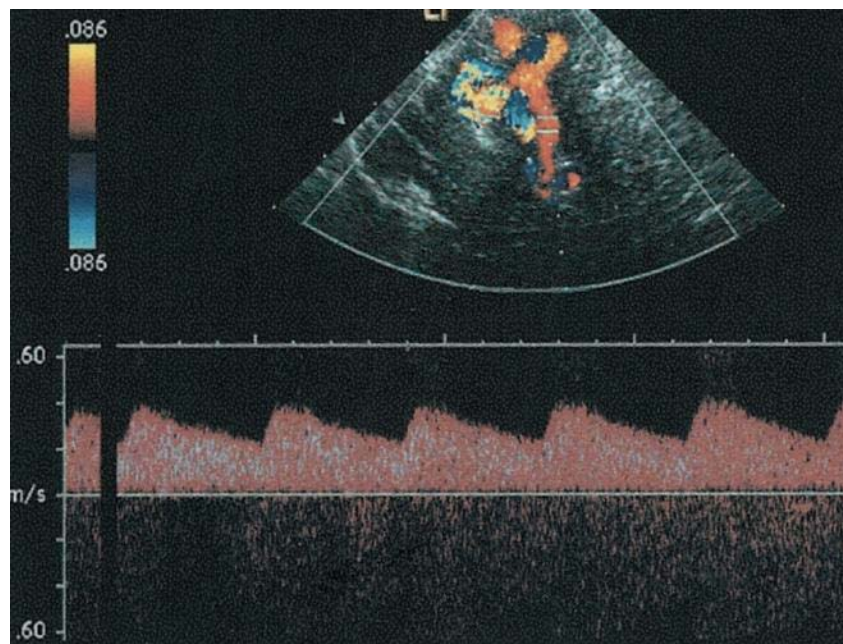


FIGURE 44. Tracé Doppler spectral d'une artère d'alimentation vers un grand AVM. Notez que le volume de l'échantillon est positionné carrément au-dessus d'un vaisseau avec un écoulement vers le transducteur. Un tracé RI obtenu sur cette artère montre un flux de résistance relativement faible (RI 0,40).(Dempsey et al) .(114)

L'ajout de la mesure de l'IR permet de distinguer non seulement le nidus mais aussi les vaisseaux qui alimentent le MAV comme se distingue des vaisseaux en transit vers le cerveau normal. C'est particulièrement important dans les petites MAV ou dans les petits résidus. On y parvient en mesurant la résistance peropératoire.

Cette mesure permet une dissection chirurgicale plus précise, en particulier dans les petites MAV ou celles qui sont adjacentes à des et une plus grande capacité à déterminer l'exhaustivité des résection avant l'angiogramme final.

En résumé, l'échographie per opératoire est un outil précieux pour localiser les lésions, sélectionner l'approche appropriée, et contrôler l'étendue de la résection aussi afficher la distribution des vaisseaux. L'IOUS peut fournir une approche plus une garantie fiable pour la neurochirurgie peu invasive.

Pour les gliomes et les MAV situés dans une région fonctionnelle, IOUS devrait être combinée avec une technique de surveillance fonctionnelle afin de réduire les troubles neurologiques postopératoires.

X. L'APPORT DE L'ÉCHOGRAPHIE PEROPÉRATOIRE EN NEUROCHIRURGIE : REVUE DE LA LITTÉRATURE :

Dans ce chapitre on discutera à la lumière de la littérature l'apport de l'échographie peropératoire en neurochirurgie en particulier les tumeurs cérébrales, on va rapporter les résultats de la littérature aux résultats de l'étude prospective qu'on a mené au sein du service de neurochirurgie hôpital ERRAZI au CHU Med V.

On a effectué une recherche documentaire dans la base de données PubMed en sélectionnant chaque article portant sur l'utilisation de l'échographie peropératoire (IOUS) en Neurochirurgie, en particulier dans la chirurgie des tumeurs cérébrales, et en , publié au cours des 18 dernières années (de 2000 à 2019).

L'échographie peropératoire a été utilisée dans de nombreuses années et constitue un complément d'imagerie efficace pour la neurochirurgie.

La résolution des images, est considérablement améliorées depuis 1978, date à laquelle *Reid et al (80)* a d'abord décrit l'utilisation de l'échographie pour le guidage neurochirurgical. L'échographie tridimensionnelle avec logiciel de navigation, qui a été introduite récemment, résout le problème d'orientation rencontré précédemment avec l'échographie bidimensionnelle en neurochirurgie .

L'échographie peropératoire a la capacité de représenter les données anatomiques en temps réel pendant une procédure chirurgicale est un complément précieux et influe sur la décision chirurgical ; L'échographie peropératoire est un moyen rapide et efficace de localiser et de caractériser les pathologies cérébrales et spinales permettant une localisation précise de l'anatomie et réduisant le risque de lésion de la moelle épinière ou du parenchyme cérébral environnant.

L'échographie peut également être utilisée pour le diagnostic et le traitement des lésions de la colonne vertébrale et l'utilisation de l'échographie peropératoire comme aide à la localisation des tumeurs de la moelle épinière ont été signalés . *Chaddock et al* (117) ont indiqué que l'échographie était utile pour déterminer l'emplacement de la moelle épinière dans les tissus néoplasiques et a grandement facilité la dissection chirurgicale de la tumeur.

Au cours de ces dernières années, de multiples études ont démontré la valeur de l'IOUS pour la chirurgie de la colonne vertébrale . L'IUS est utilisé pour localiser les régions sténosées dans les cas de dégénérescence et évaluer l'ampleur de la décompression (117), aussi localiser les tumeurs intramédullaires et effectuer le contrôle de la résection (118-119) et évaluer l'ampleur de la décompression de Chiari (120) .

La diastématomyélie est une lésion dysgraphique rare de la colonne vertébrale caractérisée par la division de la moelle épinière en deux segments avec ou sans interposition d'une cloison osseuse, cartilagineuse ou fibreuse . Selon *Glacier et al* (118) l'échographie présente l'avantage supplémentaire d'une utilisation peropératoire pour montrer le site exact et l'étendue de la lésion au moment de la laminectomie et avant l'ouverture du sac dural. L'échographie peropératoire a été utile lors de l'opération d'un nouveau-né atteint de diastématomyélie. (118)

Mimatsu et al (119) ont effectués chez 28 patients atteints de tumeurs extramédullaires de la colonne vertébrale. Le but était d'évaluer l'échographie des tumeurs extramédullaires de la colonne vertébrale et de déterminer si elles présentent des caractéristiques spécifiques.

Des images de 31 tumeurs ont été obtenues, car 2 patients avaient des tumeurs multiples. Il y avait 17 neurilemmomes, 9 méningiomes et 2 kystes dermoïdes.

Tous les images échographiques semblaient bien définis et hautement échogènes pas de difficulté de différencier les tumeurs extramédullaires de la colonne vertébrale des masses intramédullaires, sauf dans le cas d'un grand neurilemmome. Toutes les images étaient évalué par rapport à la surface des lésions, le l'existence de kystes, et le mouvement. Les

neurilemmomes avaient surfaces lisses, quelques kystes, et présentait un "flottement" mouvement. Les méningiomes avaient des surfaces irrégulières, étaient plus fortement échogène que les neurilemmomes, et adhérait étroitement à la dure-mère.

L'IOUS a donné des informations utiles sur la taille des tumeurs, le degré de déplacement de la moelle épinière, et même sur le type de tumeur dans certains cas.(119)

L'utilisation de l'échographie peropératoire s'est avérée efficace pour la prise de décision chirurgicale dans la chirurgie des pathologies du cervelet notamment les malformations Chiari , d'après *Yeh et al* l'échographie peropératoire a aidé à prendre la décision chirurgicale de pratiquer une craniotomie uniquement ou a une hémicraniotomie plus la duraplastie et le rétrécissement des amygdales pour le traitement des malformations Chiari type 1 (CM-I) chez les enfants (120).

En outre, l'échographie peropératoire(IOUS) s'est avéré d'une grande utilité dans la chirurgie des tumeurs cérébrales ; Le glioblastome est la tumeur cérébrale primaire la plus fréquente et la plus maligne chez l'adulte . Le guidage par IOUS pour la chirurgie des tumeurs cérébrales est précis pour distinguer la tumeur du parenchyme sain , et il permet une visualisation peropératoire en temps réel . L'objectifs des études élaborés ci-dessous est d'évaluer le rôle de l'IOUS dans la chirurgie des gliomes et de définir des stratégies spécifiques pour maximiser son efficacité

En raison de la nature infiltrante des tumeurs malignes cérébrales , la chirurgie ne parvient pas à retirer la totalité des cellules tumorales et, malgré une combinaison postopératoire de radiothérapie et chimiothérapie, la survie globale (OS) est faible .

En ce qui concerne la chirurgie des tumeurs cérébrales malignes, La résection totale brut (GTR) est associée à une survie plus longue que la résection ou la biopsie sous-totale . L'une des les principaux défis à relever pour parvenir à la plus grande étendue de résection (EOR) sans causer de dommages à l'environnement fonctionnel du parenchyme cérébral. (120)

Cette distinction est particulièrement difficile dans le cerveau pour les tumeurs primaire, qui présentent souvent un profil de croissance diffus, ce qui entraîne une zone de transition aux marges de la tumeur, où les tumeurs malignes et les cellules normales sont entremêlées. Beaucoup d'efforts ont été investis dans le développement de technologies susceptibles d'améliorer l'EOR. L'objectif d'une étude prospective selon *Neidert et al (120)* est d'analyser les impacts des modalités de contrôle de la résection peropératoire sur la survie globale (OS) et la survie sans progression (PSS) après une résection totale brute (GTR) de glioblastome.

D'après *Neidert et al* les patients atteints de glioblastome qui ont eu une résection total brut ont une survie globale OS et une survie sans progression SSP prolongées si l'on a utilisé l'échographie peropératoire ioUS. Des études de plus grande envergure (idéalement multicentriques et randomisées) devraient comparer l'ioMRI à l'ioUS et confirmer ces résultats avec une plus grande puissance statistique.

À ce stade, il est recommandé d'utiliser systématiquement de l'échographie peropératoire (IOUS) expérimentés dans les résections microchirurgicales des glioblastomes. L'utilisation expérimentée de (IOUS) moderne reste un dispositif d'imagerie peropératoire compétitif dans la chirurgie des glioblastomes (120).

Mair et al (105) ont évalué l'utilité des ultrasons modernes peropératoires dans la résection d'une grande variété de pathologies intracrâniennes dans une étude prospective portant sur 105 patients les images échographiques acquises en peropératoire ont été utilisées pour stratifier les lésions en quatre grades (grades 0-3) sur la base de leur échogénicité des ultrasons et la visibilité des marges de résection .

Quarante-deux des 105 lésions (40 %) étaient clairement identifiable et avait une frontière nette avec les tissus normaux (grade 3).

Cinquante-cinq des 105 lésions (52 %) étaient clairement identifiables mais avaient pas de frontière nette avec les tissus normaux (grade 2). Huit des 105 lésions (8 %) étaient difficiles à identifier et n'avaient pas de frontière nette avec des tissus normaux (grade 1). Aucune (0 %) des

lésions n'a pu être identifié (grade 0). Les gliomes de haut grade, métastases cérébrales, les méningiomes, les épendymomes et les hémangioblastomes ont tous montré un degré de visibilité échographique médian de 2 ou plus.(Tableau VIII)

Les astrocytomes et oligodendrogliomes de bas grade ont montré un degré de visibilité ultrasonore médian de 2 ou moins. Selon *Mair et al* le système de notation fournira un complément utile au neurochirurgien pour décider pour quelles lésions une échographie peropératoire serait utile.(105)

Tableau VIII: Le système de notation établi par Mair et al pour évaluer la visibilité des lésions peropératoires lors de l'utilisation des ultrasons (133)

Grade	Visibility	Borders	Description
0	None	None	Lesion not visible
1	Poor	Poor	Lesion difficult to visualise and no clear border with normal tissue
2	Good	Poor	Lesion clearly identifiable but no clear border with normal tissue
3	Good	Good	Lesion clearly identifiable and clear border with normal tissue

D'après *Policicchio et al* (121) l'objectif était d'évaluer l'utilité de l'utilisation systématique des ultrasons intra-opératoires lors de divers types de chirurgie intracrânienne, et évaluer la visibilité des ultrasons de différentes pathologies et des applications des ultrasons intra-opératoires au cours de la chirurgie.

162 patients qui ont subi une chirurgie intracrânienne avec l'aide de l'échographie per opératoire couplé a un du système de guidage. Les catégories pathologiques étaient les suivantes : néoplasiques (135), vasculaires (20), infectieuses (2) et liées au LCR (5).

La visibilité par l'échographie a été évaluée à l'aide de la classification Mair (133) , un système de notation à quatre niveaux qui prend en compte l'échogénicité de la lésion et la

visibilité de sa bordure (de 0 à 3 ; grade 0, pathologie non visible ; grade 3, visible avec une bordure claire avec les tissus normaux).

D'après *Policicchio et al* les applications de l'échographie peropératoire comprennent la localisation des lésions, planification de l'approche des lésions profondes et l'enlèvement des lésions.

Toutes les pathologies étaient visibles sur l'échographie peropératoire sauf un anévrisme. En moyenne, les tumeurs extra-axiales étaient plus facilement identifiées et présentaient des limites plus claires que les tumeurs intra-axiales (17 % des tumeurs extra-axiales de grade 2, 83 % de grade 3 ; 5,5 % des tumeurs intra-axiales de grade 1, 46,5 % de grade 2, 48 % de grade 3).

L'IOUS offrait des trajectoires transcorticales précises et sûres pour les lésions profondes (71 patients ; tumeurs, hémangiomes, ICH)

L'échographie per opératoire était jugé moins utile pour approcher les tumeurs de la base du crâne et les anévrismes. L'IOUS a été utilisé pour évaluer l'étendue de la résection dans 152 cas ; les artefacts chirurgicaux ont réduit la visibilité échographique dans 25 cas : l'étendue de la résection a été correctement vérifiée chez 127 patients (53 gliomes, 15 métastases, 39 méningiomes, 4 schwannomes, 4 tumeurs de la région de sellaie, 6 hémangiomes, 3 AVM, 2 abcès).(121)

D'après *Policicchio et al* l'échographie peropératoire était très sensible à la détection de tous les types de pathologies, sûr et précis dans la planification des trajectoires des lésions intraparenchymateuses (y compris les approches mini-invasives), et précis dans la vérification de l'étendue de la résection dans plus de 80 % des cas. Ça reste un outil polyvalent et réalisable ; il pourrait améliorer la sécurité et son utilisation peut être envisagée dans la chirurgie intracrânienne de routine.

L'utilité de l'échographie peropératoire (IOUS) est d'aider le chirurgien à se diriger vers la tumeur telle qu'elle apparaît lors de la résonance magnétique préopératoire , *Murasc et al*

(122) ont évalué si l'IOUS était capable de distinguer les marges de la tumeur de l'environnement du tissu cérébrale sain dans une étude rétrospective incluant vingt-cinq patients souffrant de gliomes de haut grade qui ont été traités auparavant par la chirurgie et la radiothérapie ont été inclus. Lors de l'opération de gliomes de haut grade irradiés en rechute, l'IOUS a fourni une méthode fiable pour se diriger vers le centre de la tumeur. Aux marges, elle ne permettait pas de distinguer de manière fiable les restes ou les tissus non tumoraux, mais les zones hypoéchogènes contenaient rarement tissu tumoral.(122)

Sun et al (123) dans 110 opérations, impliquant 68 gliomes, 7 méningiomes, 1 neurinome acoustique, 5 hémangioblastomes, 3 granulomes, 17 AVM et 9 angiomes caverneux. Un modèle Doppler couleur a été utilisé pour visualiser le flux sanguin. Les conditions préopératoires et postopératoires de tous les patients ont été enregistrées et analysées.

L'objectif était d'évaluer la valeur de l'échographie peropératoire (IOUS) dans les opérations neurologiques.

Toutes les lésions ont été bien localisées par l'IOUS, ce qui a été très utile pour le chirurgien de choisir la bonne approche et d'obtenir en temps réel des informations sur l'étendue de la résection.

Dans le Doppler couleur IOUS pourrait également afficher la répartition des vaisseaux ainsi que la taille et la structure de la malformation artérioveineuse (AVM) (*FIGURE 49*). Les 68 gliomes étaient tous totalement ou subtotalelement réséqués, dont 6 procédures

17 patients ont présenté des déficits neurologiques postopératoires, dont 11 cas d'hémiplégie, 4 d'aphasie et 2 d'hémianopsie. Les 7 méningiomes ont tous été totalement réséqués. Un seul d'entre eux présentait une hémianopsie postopératoire. Le patient atteint du neurinome acoustique a présenté une légère paralysie faciale après l'opération (123).

Parmi les 5 hémangioblastomes et les 3 granulomes, il n'y a pas eu de déficit neurologique postopératoire. Sur les 17 MAV, 5 patients se sont présentés avec des problèmes neurologiques postopératoires

dont 4 hémianopies et 1 hémiparésie. Pour les 9 patients atteints d'angiome caverneux, aucun déficit neurologique post-opératoire n'a été constaté.(123)

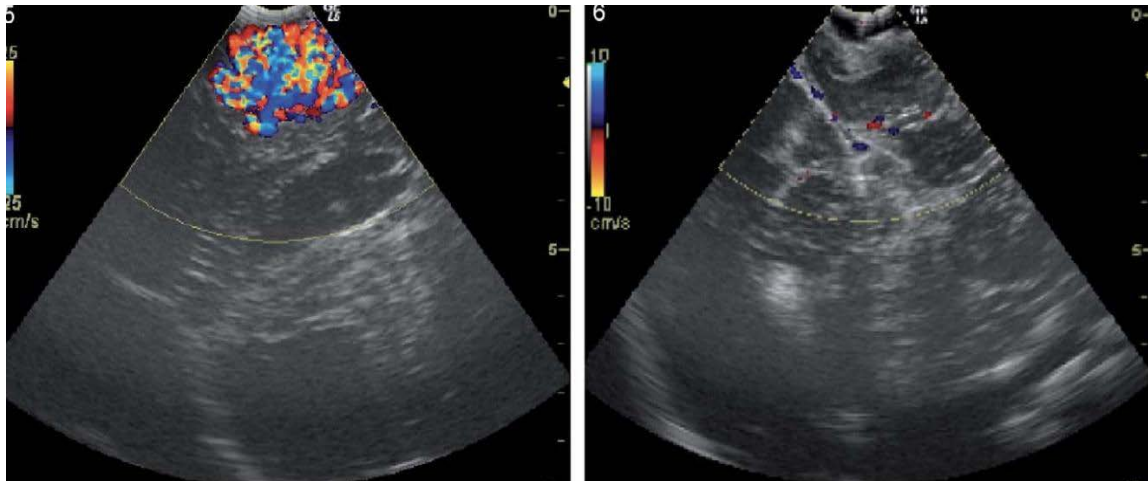


Figure 49 : Échographie peropératoire d'une MAV

Image échographique d'une malformation artérioveineuse (MAV) dans le lobe frontal et temporal droit chez un homme de 34 ans avant (fig. 5) et après (fig. 6) la résection. Elle a montré que la MAV a été totalement réséquée (123)

Sun et al ont démontré que l'IOUS a été un outil précieux pour localiser les lésions, sélectionner l'approche appropriée, contrôler l'étendue de la résection et afficher la distribution du système vasculaire. L'IOUS peut fournir une protection plus fiable pour la neurochirurgie mini-invasive. (123)

La localisation et la délimitation de l'étendue des lésions sont essentielles pour une résection maximale sûre du cerveau et des tumeurs de la moelle épinière . *Moiyadi et al* (124) ont évalué l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs du système nerveux dans une étude rétrospective .

Soixante-dix-sept études d'échographie peropératoire (IOUS) ont été menées chez des patients atteints de tumeurs cérébrales, et de la moelle épinière. Sept des paramètres ont été identifiés pour mesurer l'"utilité" du IOUS et un "score d'utilité" a été élaboré (minimum 0 et

maximum 7). Les paramètres individuels et les notes globales ont été calculés pour chaque cas.

(Tableau IX)

Pour les résultats *Moyadi et al* ont prouvé que IOUS s'est révélé être utile à bien des égards. Le score global médian était de 6 (score moyen de 5,65). Aucun score inférieur à 4 n'a été obtenu avec la majorité démontrant l'utilité dans 5 paramètres ou plus (91%) . L'utilisation du IOUS a influencé de manière significative l'exécution de l'opération dans ces cas sans prolonger significativement la chirurgie.

Tableau IX : Système de notation pour évaluer l'utilité de l'échographie peropératoire (IOUS) par Moyaidi et al (124)

Parameter	Interpretation	Score
Lesion identification	Lesion discernable	1
	Not discernable on IOUS	0
Lesion delineation	Well defined margins	1
	Poorly defined margins but discernably distinct from normal brain	1
	Imperceptibly diffuse. no use of IOUS	0
Utility in craniotomy/ laminectomy modification	IOUS prompted a modification/ extension in the craniotomy/ laminectomy	1
	No modification of bone removal needed	0
Use in durotomy planning	Useful/helped optimize the durotomy site and extent	1
	Not needed/useful	0
Use in corticectomy/ myelotomy planning	Useful to plan the entry site	1
	Not needed/useful	0
Use for assessment of extent of resection	Used for assessing extent of resection/residue	1
	Not needed/useful	0
Visualization of adjacent structures	Useful and needed	1
	Not needed/useful	0

Tableau X : Evaluation en scores sur l'utilité globale de l'échographie peropératoire .(124)

Overall score	Number of cases	Percentage
1-3	0	0
4	4	9.1
5	14	31.2
6	22	45.5
7	2	14.3

La IOUS a été utile dans la plupart des cas, sauf pour la planification de la craniotomie. Le score médian était de 6 et l'utilité globale moyenne le score était de 5,65. Aucun score n'a été inférieur à 4, c'est-à-dire que, dans chaque cas, et a été jugé utile dans à au moins 4 des 7 paramètres, la majorité démontrant l'utilité dans 5 paramètres ou plus (91%) (*Tableau X*).

D'après *Moiyadi et al* l'utilisation de l'IOUS a influencé de manière significative la performance de la chirurgie dans ces cas sans prolonger significativement la chirurgie . (124)

Dans une série de 35 patients, *Chacko et al* (125) ont rapporté que l'échographie peropératoire (IOUS) avait une valeur prédictive positive de 0,84 ; puisque L'excision radicale des tumeurs cérébrales parenchymateuses est généralement associée à un meilleur résultat à long terme ; cependant, il est difficile de déterminer l'ampleur de la résection lors de l'opération. *Chacko et al* ont utilisé l'échographie peropératoire pour détecter la tumeur résiduelle et définir l'interface tumeur-cerveau .

Trente-cinq patients présentant des lésions cérébrales parenchymateuses, dont 11 tumeurs de bas grade et 22 de haut grade, ainsi que 2 tumeurs inflammatoires Les granulomes ont été inclus dans l'étude. L'IOUS a été utilisé pour localiser les tumeurs non visibles à la surface, définir leurs marges et évaluer l'étendue de la résection à la fin de l'opération. Des échantillons multiples de l'interface tumeur-cerveau qui ont été signalés comme étant des tumeurs ou les tissus normaux sur l'IOUS ont été soumis à l'histopathologie. Les résultats ont été comparés à une tomodensitométrie (CT) post-opératoire avec contraste et à l'histopathologie.

Toutes les tumeurs, quelle que soit leur histologie, étaient hyperéchogènes sur l'échographie peropératoire .L' IOUS a été utile pour localiser les tumeurs non visibles sur le surface cérébrale . Dans 71,4% des cas, l'IOUS a été utile pour définir leurs marges, mais dans les autres cas, les marges étaient mal définies. Les marges des tumeurs étaient mal définies dans les cas traités précédemment par radiations. En ce qui concerne l'étendue de l'excision, après à l'exclusion des cas qui ont été irradiés, il a été constaté que dans la 28 patients qui avaient des néoplasmes parenchymateux, il y avait une concordance entre les résultats de l'échographie et la tomodensitométrie postopératoire dans 23 . (figure 50)

Sur les 79 échantillons prélevés à l'interface tumeur-cerveau qui ont été signalées comme des tumeurs à l'échographie, 66 avaient des signes histopathologies de tumeur alors que 13 échantillons étaient négatifs pour la tumeur. (125)

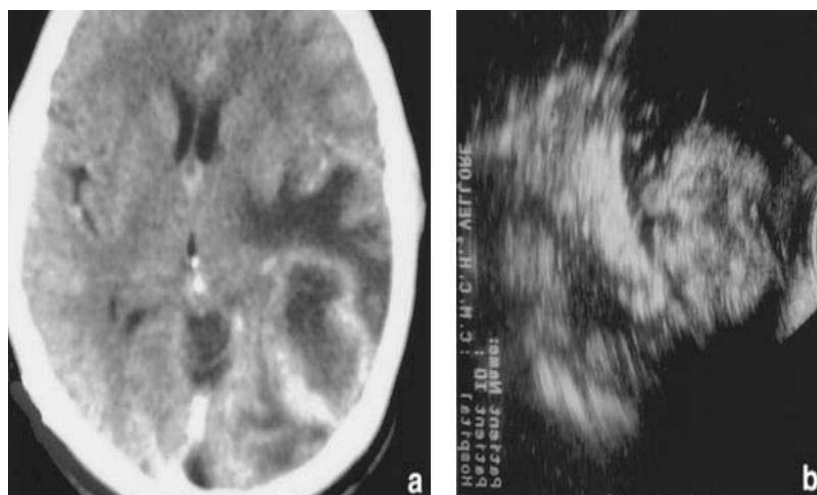


Figure 50 : (a) Un scanner à contraste axial amélioré d'un gliome de haut grade montrant une augmentation de la masse dans la région pariétale postérieure avec une nécrose centrale et une nécrose périphérique marquée (b) L'IOUS axial fait peu après l'ouverture de la dure-mère. La masse est hyperéchogène avec une zone hypo-échogène centrale correspondant à la nécrose centrale vue au scanner les marges sont bien définies (125)

En ce qui concerne la visualisation peropératoire de la tumeur et de ses résidus, l'efficacité de l'échographie peropératoire a été documentée dans une série de 192 patients HGG, chez lesquels la combinaison de la neuronavigation et l'IOUS était également liée à une augmentation de la survie globale . Dans une étude prospective portant sur 32 patients, *Erdogan et al (126)* ont constaté un bon niveau de concordance entre l'échographie peropératoire et l'IRM avec contraste postopératoire pour la détection des résidus de la tumeur ; ils ont conclu que la SIU donne des résultats similaires à ceux de l'IRM et peut donc être utilisée pour maximiser la résection de la tumeur. *Erdogan et al* ont déterminé l'accord inter-méthodes entre l'échographie peropératoire et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à contraste renforcé postopératoire pour la détection des résidus de tumeur .

Une fois la résection terminée, les bords des cavités de 32 tumeurs ont été examinés à l'aide de l'IOUS à 7 MHz sonde peropératoire. Toute région échogène d'une épaisseur de 5 mm s'étendant de la cavité chirurgicale à la substance cérébrale a été prise comme critère échographique pour la tumeur résiduelle. Un bord échogène continu de 5 mm a été considéré comme normal. Les résultats ont été corrélés avec l'IRM améliorée au gadolinium obtenue dans les 48 heures suivant l'opération.(Figure 51)

Dans quatre cas, l'IRM a montré des résidus malgré une échographie négative un œdème étendu le long des bords de la cavité (trois cas de glioblastome multiforme) et à proximité du liquide céphalorachidien (cas de macroadénome hypophysaire) peut être la raison pour laquelle le résidu n'est pas détecté. Dans un cas de glioblastome multiforme, l'augmentation résiduelle était de 5 mm d'épaisseur.(126)

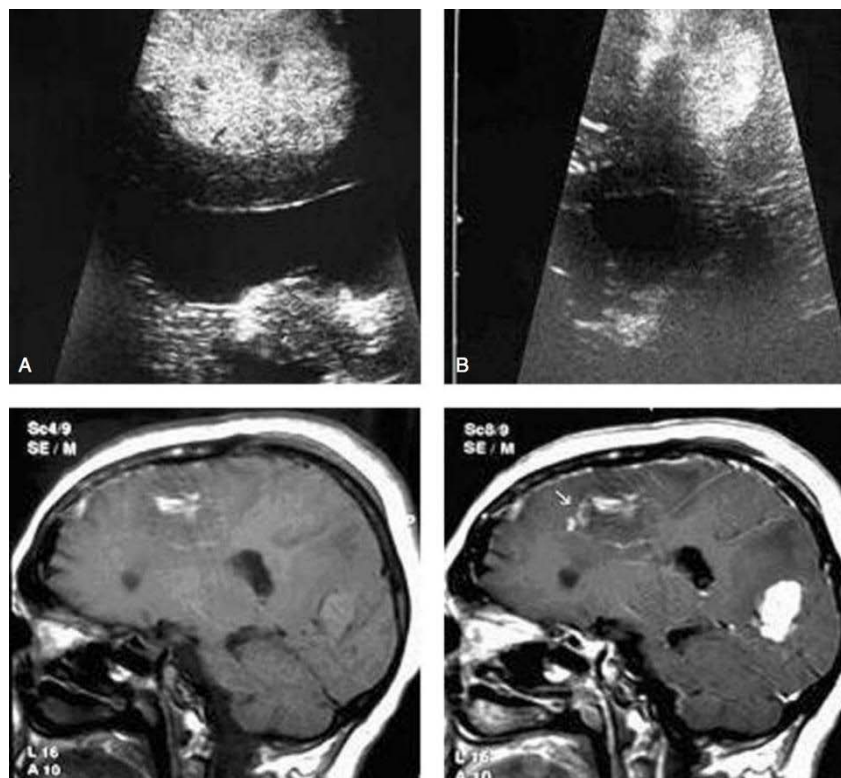


Figure 51 : Images d'échographie per opératoire et d'IRM postopératoire d'un carcinome métastatique cérébrale :

Résultats d'une échographie peropératoire dans un carcinome métastatique intracrânien avant (a) et après (b) la résection. Une tumeur résiduelle (flèche) de 2 cm dans la région frontale a été confirmée par des images IRM non renforcées (c) et renforcées au gadolinium (d) pondérées T1. L'image rehaussée de contraste montre une autre lésion métastatique dans la région parietooccipitale région (d) (126)

D'après *Moiyadi et al* (127) l'échographie tridimensionnelle (3D) est un nouvel outil pour planifier et guider ces résections. L'imagerie a été examinée pour classer les tumeurs en fonction de leur amélioration et de leur résécabilité. L'étendue de la résection a également été évaluée.

Quatre-vingt-dix cas ont été opérés et inclus dans cette analyse, 75 % étant des gliomes. Le mode d'échographie 3D a été utilisé dans 87 % des cas (seul dans 40 cas, et combiné dans 38

cas). L'utilisation de la fonction de mode combiné d'ultrasons (US) avec images par résonance magnétique (RM)] a facilité l'orientation des données anatomiques. (127)

En raison de son fonctionnement en temps réel l'échographie peropératoire en neurochirurgie permet de faire une mise à jour rapide en ligne par rapport à la lésion. Une autre question est celle de sa valeur en tant qu'instrument pour le contrôle de la résection pendant et après l'opération d'une tumeur cérébrale. Il est bien connu que l'étendue de la résection chirurgicale est une des principaux facteurs de pronostic de survie dans les gliomes. Afin d'obtenir le meilleur résultat possible .

En ce qui concerne le pronostic des patients subissant une opération pour des gliomes cérébraux, il a été démontré que l'IOUS améliore la prévalence de la résection tumorale totale (RGT) et augmente significativement la survie globale à 1 et 2 ans .(128)

HAMMOUD et al (128) en une étude prospective portant sur 70 patients présentant des lésions cérébrales intraparenchymateuses (36 gliomes et 34 métastases) a été réalisée pour évaluer l'efficacité des ultrasons peropératoires (IOUS) dans la localisation et la définition des limites des tumeurs et pour évaluer l'étendue de leur résection :

Dix-huit des 36 patients atteints de gliome n'avaient pas été traités auparavant. Tous ces 18 tumeurs étaient bien localisées par l'échographie peropératoire IOUS ; les marges étaient bien définies dans 15 cas et modérément définies dans trois cas. Tous les patients ont subi une imagerie IRM pré et postopératoire avec administration intraveineuse au gadolinium.

Les deux procédures ont été effectuées dans les 5 jours suivant l'opération. Les images RM ont été scannées, numérisées et triées Les fréquences des transducteurs comprenaient 5,0 et 7,5 MHz pour maximiser la résolution des tumeurs et des limites. Les tumeurs se sont avérées être hyperéchogènes par rapport à l'œdème ou au tissu cérébral environnant (figure 52)

Sur les 36 patients atteints de gliome, 18 n'avaient pas été traités auparavant. Les tumeurs ont été bien localisées grâce à l'IOUS chez les 18 (100 %) de ces patients. Les 18 autres patients atteints de gliome avaient déjà subi une intervention chirurgicale et/ou une

radiothérapie ; cinq d'entre eux avaient des tumeurs récurrentes et 13 avaient les lésions radio-induites. Les cinq (100 %) tumeurs récurrentes ont été bien localisées par le IOUS.

Dans les 13 patients pour lesquels la pathologie a montré principalement des radiations , les lésions étaient bien localisées dans huit cas (62 %) et mal localisés dans cinq d'entre eux (38 %). Les 34 lésions métastatiques étaient toutes bien localisées.

Dans cette étude, l'échographie peropératoire a pu bien définir l'étendue de la résection chez les 18 patients atteints de gliomes et n'ayant jamais de radiothérapie , chez quatre des cinq patients souffrant de gliomes récurrents, et chez les 34 patients atteints de tumeurs métastatiques. En revanche, tous les patients qui présentaient des lésions radio-induites, l'étendue de la résection était mal définie. Cette étude a permis d'évaluer la visibilité des ultrasons dans la détection de la tumeur résiduelle en comparant les volumes de tumeurs mesurés après l'excision avec comme moyen d'imagerie l'IOUS avec ceux définis en postopératoire par imagerie IRM. Ces données montrent que les volumes de tumeurs mesurés à l'aide de l'IOUS post-excision et l'imagerie par résonance magnétique ont été corrélée de manière significative pour les volumes de gliomes tumoraux mesurés par IOUS . (128)

Hammoud et al ont déterminé que l'IOUS n'est pas seulement utile pour localiser et définir les marges des gliomes et des métastases cérébrales . Elle détermine également avec précision l'étendue de la résection, comme le confirme l'imagerie par IRM postopératoire. Cette évaluation ne s'applique toutefois pas lorsque la lésion est due principalement à l'effet des radiations.



Figure 52 : Images d'échographie et d'IRM peropératoire d'un astrocytome (128)

Image par résonance magnétique (à gauche) et image échographique peropératoire (à droite) d'un astrocytome pilocytique juvénile (T) montrant le kyste (C), les marges de la tumeur (B), le falx (F), l'œdème (E) et les cornes antérieures des ventricules latéraux (v) . (128)

RENNER et al (129) ont évalué le rôle l'échographie peropératoire (IOUS) en tant qu'outil le contrôle de la résection après une chirurgie pour une tumeur cérébrale . L'échographie per opératoire a permis d'examiner 36 tumeurs de haut grade gliomes (62 %), métastases (22 %) et autres (16 %). L'évaluation des images a été effectuée en corrélant le volume de la tumeur mesuré par échographie en peropératoire avant et après la résection avec un volume pré et postopératoire (dans les 48 heures) mesuré par IRM.

Les mesures par IOUS ont été effectuées par le neurochirurgien et les mesures par IRM par le neuroradiologue. Ainsi, les procédures de mesure ont été rendues aveugles. Correspondant à un l'écart du volume des ultrasons de 10, 20 et 0,20% par rapport au volume de l'IRM, la corrélation a été classée bonne, modérée et mauvaise. Pour évaluer la concordance entre ces deux méthodes de l'imagerie l'analyse statistique .

Le volume de la tumeur a été déterminé avant l'opération par IRM, l'IRM postopératoire précoce a été réalisée dans une unité identique dans les 48 heures.

L'imagerie a été répétée plusieurs fois des zones hyperéchogènes adjacents à la cavité de résection étaient soupçonnés d'être une tumeur et ont été enlevés ; La zone de marge a été évaluée par l'échographie dans différents plans pour éviter la négligence des tissus tumoraux suspects. Une comparaison statistique entre les deux différentes modalités d'imagerie était réalisée en comparant les différences de volume moyen.

En examinant toutes les tumeurs, la corrélation a été équilibrée. Il y avait 11 tumeurs avec un bon résultat, 13 avec un résultat modéré et 12 avec une faible corrélation avec l'imagerie IRM. Dans 15 cas, dont six gliomes de haut grade, six métastases et trois astrocytomes pilocytaires, l'échographie a été corrélée avec l'IRM liée à la résection complète de la tumeur. Ainsi, dans ces cas, aucune tumeur résiduelle n'a été observée à l'échographie ou au début de la période postopératoire IRM. Cela correspond à 42% de toutes les tumeurs, soit près de 58 % d'entre eux ont l'intention de procéder à une ablation complète de la tumeur.

Chez 10 patients, un reste défini de la tumeur a été laissé pour éviter l'handicap fonctionnel. Il s'agit notamment de huit gliomes, un lymphome et un astrocytome pilocytaires. À la fin de la résection, le volume résiduel était de mesurée. La masse était comprise entre 0,20 et 19,8 cm³ (moyenne : 5,5 cm³) alors que la plupart des masses tumorales résiduelles ont été trouvés dans le groupe des maladies primaires ou récurrentes glioblastomes. (129)

Ce qu'on peut déduire d'après ses 2 études (*HAMMOUD et al* , *RENNER et al*) est que l'IOUS est un outil très utile pour les procédures neurochirurgicales comparé à avec d'autres procédures d'imagerie peropératoire comme la neuronavigation ou l'IRM ouverte ; elle est bon marché, facile à manipuler et disponible à tout moment.

En outre, l'échographie est un un excellent système de navigation en temps réel pour la localisation des lésions intracérébrales et les lésions anatomiques adjacentes des structures comme le système ventriculaire et les vaisseaux.

En résumant les interprétations et les conclusions de ces deux études comparables, on peut confirmer que l'IOUS est adapté à la description volumétrique métastases et certains gliomes de haut grade et que la précision volumétrique de l'IOUS diminue avec la l'augmentation du volume de la tumeur.

Ainsi, il faut dire que l'étendue de la résection est étroitement corrélée à la précision volumétrique de l'IOUS, qui dépend de la représentation du tissu tumoral et en particulier de la tumeur et les zones marginales . Toutefois, l'exactitude volumétrique dépend surtout de la taille de la tumeur.

Un nouveau concept permet de maximiser l'étendue de la résection des tumeurs cérébrales de haut grade est l'application des ultrasons à hautes fréquences c'est-ce qu'a démontrer *SERRA et al (130)* .

Serra et al (130) dans une étude rétrospective portant sur 22 patients, Serra et ses collaborateurs [29] ont démontré que l'échographie à haute fréquence (hfioUS) permettait une détection précise de la tumeur et une discrimination détaillée entre les tissus normaux, pathologiques et œdémateux dans les 22 cas, obtenant une GTR de 95,5%.

Serra et al ont essayé de reformuler et éventuellement d'étendre l'utilisation de l'échographie peropératoire (ioUS) en adaptant cette sonde à haute résolution (hfioUS) comme outil peropératoire pour les tumeurs plus grandes et plus profondément localisées.

L'idée était d'insérer la sonde de balayage après une résection macroscopique de la tumeur dans la cavité de résection, puis la déplacer le long de la la résection des parois de la cavité de *manière "in-out"* (Figure 53).

C'était techniquement possible en raison de la petite taille de cette nouvelle sonde. En rapprochant la sonde de la zone d'intérêt, la discrimination élevée à quelques centimètres de la source émettrice rend (hfioUS) particulièrement adapté pour un balayage détaillé de l'interface entre les tissus sains et pathologiques.

Ainsi, *Serra et al* ont adopté ce nouveau protocole dans la résection des lésions malignes intracérébrales pour tenter de voir si cette stratégie pourrait permettre une amélioration de la discrimination des tissus tumoraux et donc dans la maximisation de l'étendue de la résection .(130)

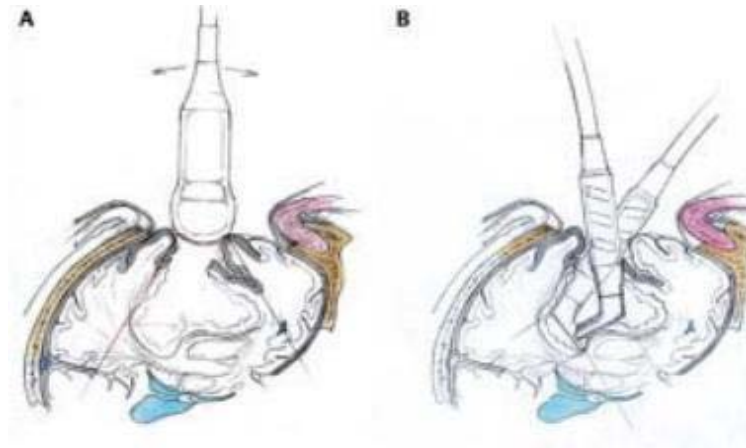


Figure 53 : Deux concepts différents d'utilisation peropératoire des ultrasons.

A) montre l'utilisation courante ; la sonde est posée au-dessus ou juste à côté de la cavité de résection et les parois de la cavité sont scannées à distance. Dans l'ordre pour obtenir une imagerie suffisante, y compris dans la profondeur de la cavité, il est nécessaire de sacrifier la résolution axiale (c'est-à-dire les détails de l'imagerie, qui seraient mieux avec des fréquences plus élevées) en faveur de la pénétration des ondes (c'est-à-dire qu'il faut utiliser des fréquences plus basses).

B) illustre notre nouvelle stratégie. En raison de ses dimensions réduites, la sonde peut être insérée dans la cavité, de sorte que les parois peuvent être balayées dans toutes les directions. La distance réduite entre les sources d'émission d'ultrasons et la zone d'intérêt permet d'adopter des fréquences plus élevées (c'est-à-dire d'obtenir un meilleur détail) également au fond de la cavité .

Ce qu'on peut déduire d'après cette étude que l'application d'une sonde à haute fréquence (hfioUS) a permis d'étudier une détection précise de la tumeur et une discrimination détaillée entre tissu normal, pathologique et œdémateux dans les 22 cas.(130)

En comparaison avec une autre étude , *Solheim et al (131)* dans une étude portant sur 142 patients atteints de tumeurs intracrâniennes de haut grade opérés par neuf chirurgiens différents ont rapporté une résection total (GTR) de 37 % et une résection sous-totale (STR) de 26 %, GRT étant défini comme la résection de 90 - 99 % de la masse tumorale préopératoire renforcée par le contraste.

Dans cette même étude, la qualité de l'imagerie échographique a été identifiée comme un facteur indépendant associé à la réalisation de la RGT . Trois sondes différentes, dont une haute fréquence, ont été utilisés en per-opératoire, et l'étendu de la résection (EOR) a été évalué vraisemblablement de manière volumétrique, bien qu'il ne soit pas spécifiquement signalé. L'échographie peropératoire facilitera la résection chirurgicale des gliomes de haut niveau et ont évalué l'impact de la qualité des images échographiques également l'importance de la sélection des patients pour les résultats chirurgicaux.

Solheim et al ont cherché à explorer et à décrire les résultats associés à l'utilisation du système d'échographie couplé à la neuronavigation (système SonoWand) dans une des séries de gliomes de haut grade, non sélectionnées, basées sur la population, opérées par des neurochirurgiens non sélectionnés. Et on a déterminé les degrés de résection et les résultats cliniques dans un échantillon consécutif de gliomes de haut grade, dont 95% ont été opérés à l'aide du système SonoWand .

Ce système qui repose sur le couplage de la technique de neuronavigation et la technique de l'échographie peropératoire , ça permet d'explorer l'impact de la qualité des images échographiques par rapport aux résultats chirurgicaux et explorer les relations entre la sélection des patients et les résultats chirurgicaux .

Solheim et al ont démontré d'après cette étude de bons résultats globaux, tant en termes de résection et le résultat fonctionnel dans les cas de malignité consécutifs résections de gliomes, dans lesquelles l'échographie peropératoire a été utilisé à 95%. Cela peut suggérer que l'échographie peropératoire permet de mieux opérer. L'étude a également clairement démontré que, en termes de résultats chirurgicaux, la sélection des patients semble être beaucoup plus importante que la la sélection des outils chirurgicaux. (131)

Ces études ont démontré l'apport et l'utilité l'échographie peropératoire (IOUS) dans la neurochirurgie , comme étant une modalité d'imagerie largement accessible qui permet un guidage chirurgical avec un risque identifié minimal ou un temps opératoire supplémentaire.

Renner et al ; Hammod et al ; Solheim et al ; Serra et al ont révélé une forte corrélation entre les résultats de l'IOUS et de l'IRM postopératoire lors de l'évaluation de l'étendue de la résection de la tumeur, ce qui suggère que IOUS pourraient avoir des implications cliniques importantes.

L'objectif d'une étude menée par *Sweeney et al (132)* était de développer les résultats des précédentes études afin de fournir davantage de preuves sur l'utilisation de l'IOUS dans la détermination de la résection totale brute (RBT) dans les deux les patients adultes et pédiatriques atteints de tumeurs cérébrales.

Cette étude rétrospective sur des patients adultes et pédiatriques ayant subi une chirurgie pour les tumeurs cérébrales . Tous les patients ont été traités avec IOUS puis ont subi une IRM postopératoire (avec et sans contraste) dans la semaine suivant l'opération.

La Localisation de la tumeur et les marges ont été confirmées à l'aide de l'IOUS. Tout au long de la procédure, l'IOUS a été utilisé périodiquement pour évaluer la progression de la résection.

Selon *Sweeney et al* l'IOUS a été en mesure d'identifier correctement les tumeurs dans tous les cas de gliome où le STR était souhaité.

Les résultats de l'IOUS pendant la résection de la tumeur métastatique étaient également corrélés aux résultats de l'IRM postopératoire . L'échographie peropératoire (IOUS) dans la résection de tumeurs métastatiques a été trouvé pour avoir une sensibilité de 47,4 % , une spécificité de 100 % une valeur prédictive négative (VAN) de 87,0 % , et une valeur prédictive positive (VPP) de 100 % par rapport à l'IRM postopératoire.

l'IOUS pourrait aider à obtenir une meilleure résection totale RGT chez les patients adultes et pédiatriques en neurochirurgie. Cette étude soutient l'utilisation de l'IOUS dans la chirurgie des tumeurs cérébrales chez l'adulte et l'enfant pour améliorer les résultats de la chirurgie.

Et présente une cohorte de patients plus importante qui comprend des patients pédiatriques et adultes, afin d'étudier l'efficacité et la sensibilité de cette technique (132) .

Cette étude vise à approfondir les résultats de l'étude menée par *Smith et al* (133) de fournir davantage de preuves sur l'utilisation de IOUS dans la détermination de la résection complète de la tumeur.

Puisque les tumeurs du SNC restent la principale cause de décès par cancer chez les enfants âgés de 0 à 14 ans, et l'ablation maximale des tumeurs a des implications cliniques importantes pour l'amélioration des résultats dans la population pédiatrique (133) .

Lorsque la détermination de l'étendue de la résection est faite, l'effet sur le pronostic global, le degré de morbidité neurologique de la tumeur et le risque de morbidité neurologique de la chirurgie par rapport à l'état neurologique de base doivent être pris en considération.

Smith et al a prouvé d'après une étude rétrospective , qui a pour objectif d'évaluer la corrélation de l'étendue de la résection entre l'échographie peropératoire et l'IRM postopératoire en chirurgie des tumeurs cérébrales en Pédiatrie (133) .

La localisation relative de la tumeur a été définie en recherchant sur le site chirurgical des repères anatomiques tels que les ventricules ou la faux du cerveau . Une échographie peropératoire a été réalisée périodiquement tout au long de l'opération pour évaluer la progression et la trajectoire appropriée de la résection.

Dans cette série de cas, *Smith et al* ont trouvé une valeur prédictive négative respectable de 86,3% avec l'inclusion de multiples tumeurs les pathologies situées dans l'ensemble du SNC.

Parmi les divers cas chirurgicaux examinés dans cette étude, 71 % des Le taux de résection brut total a été atteint. Hors cas dans laquelle les tumeurs ne sont destinées qu'à être débulées compte tenu de leur localisation anatomique, l'étude a fait apparaître un taux de 80% de le taux de résection brut total prévu avec l'utilisation de l'IOUS.

D'après *Smith et al* l'utilisation de l'échographie peropératoire n'a entraîné aucune complication identifiable et a contribué à réduire au minimum le temps supplémentaire nécessaire à la chirurgie . Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux d'enquêtes déjà signalées *Sweeney et al* (132) , et ont contribué a une plus grande généralisation à tous les types et emplacements de tumeurs.

El Beltagy et al (134) ont récemment décrit le rôle de l'IOUS dans la résection des tumeurs du SNC chez les enfants. En utilisant une échographie conventionnel 2D (6,5 MHz) , ils ont conclu que la technique était utile pour délimiter la frontière entre la tumeur et les cellules saines du et pour détecter des restes de tumeur qui, autrement, auraient été oubliés. Cette étude a permis d'obtenir une 82% du taux brut total de résection et 94% des résections prévues taux de résection brut-total dans un plus petit, moins représentatif cohorte de 22 patients pédiatriques.

Dans cette étude une échographie peropératoire (B Mode conventionnel) a été réalisée chez 25 patients pédiatriques atteints de tumeurs cérébrales avant, pendant et après l'intervention, dont 8 patients étaient supratentoriels et 17 infra-tentoriels. Des images post-opératoires à échelle de gris des tumeurs cérébrales, obtenues par échographie conventionnelle, ont été comparées aux résultats de l'imagerie par résonance magnétique postopératoire immédiate.

Selon *EL Beltagy et al* , l'échographie conventionnelle peropératoire a été utile dans la détermination de la localisation de la tumeur, sa plus superficielle et dans la différenciation entre les tumeurs solides et les composants kystiques. Aussi entre la limite tumorale et les tissus restants de la tumeur qui se distinguent plus facilement à l'échographie .

L'échographie peropératoire (IOUS) a été très utile lors de la résection de la fosse postérieure les tumeurs s'étendant aux parties latérales du quatrième ventricule ou vers le haut jusqu'à l'aqueduc. La tumeur solide a été identifiée et excisée. En comparant les les résultats de l'IRM post-opératoire immédiate à ceux de l'IOUS (Fig 54 et 55) , on a remarqué l'absence de tumeur résidu qui aurait pu être réséqué (134) .

En outre, la mise en œuvre de l'échographie peropératoire (IOUS) 3-D devrait permettre de surmonter certaines limites de l'IOUS 2-D en produisant une image volumétrique. L'IOUS 3-D a montré une sensibilité de 71% dans la détection des tumeurs résiduelles lors de la résection de lésions cérébelleuses, dans une série de 16 patients ayant subi une résection de lésions intracérébrales. Cependant, l'échantillon était trop petit pour être concluant (135) .Ils ont été

opérés pour des tumeurs intra-axiales dans des zones cérébrales non élémentaires, ont été initialement inclus dans une étude prospective d'après *Rhode et al (135)*.

Chez deux patients, la petite taille de la craniotomie a empêché l'imagerie échographique peropératoire. Chez 14 patients, des images échographiques en 3-D ont été obtenues avant et après l'ouverture de la dure-mère, pendant l'ablation de la tumeur, avant l'évaluation par un enquêteur en aveugle pour l'identification des restes de la tumeur, et après la fermeture de la dure-mère. Sept patients ont été randomisés pour l'ablation complète de la tumeur selon l'impression du chirurgien (groupe 1). Sept patients ont été randomisés pour une ablation incomplète de la tumeur (reste de tumeur <1cm) (groupe 2) ; chez ces patients, le neurochirurgien a intentionnellement laissé un reste de tumeur avant l'évaluation par l'enquêteur en aveugle. Le reste de la tumeur a ensuite été enlevé. Il a été vérifié si l'échographie 3D peut identifier correctement une résection complète et incomplète de la tumeur. Tous les patients ont subi une IRM postopératoire précoce.

Chez deux patients (un pour chacun des deux groupes), la qualité de l'image était trop mauvaise pour une évaluation peropératoire significative. Chez les six patients randomisés pour une ablation incomplète de la tumeur, l'échographie 3D a correctement identifié les restes de la tumeur chez quatre patients (67 %). Chez les six patients randomisés pour une ablation complète de la tumeur, l'échographie 3D a confirmé une résection complète de la tumeur chez trois patients. En outre, l'échographie en trois dimensions a correctement identifié un reste de tumeur chez un patient sélectionné pour une ablation complète de la tumeur. Ainsi, la sensibilité pour la détection des restes de tumeur est passée à 71 % (cinq patients sur sept) et celle de la confirmation de l'ablation complète de la tumeur était de 60 % (trois patients sur cinq). Selon Rhode et al l'échographie 3D est particulièrement utile pour la détection des tissus de tumeurs cérébrales sous surveillance . (135)

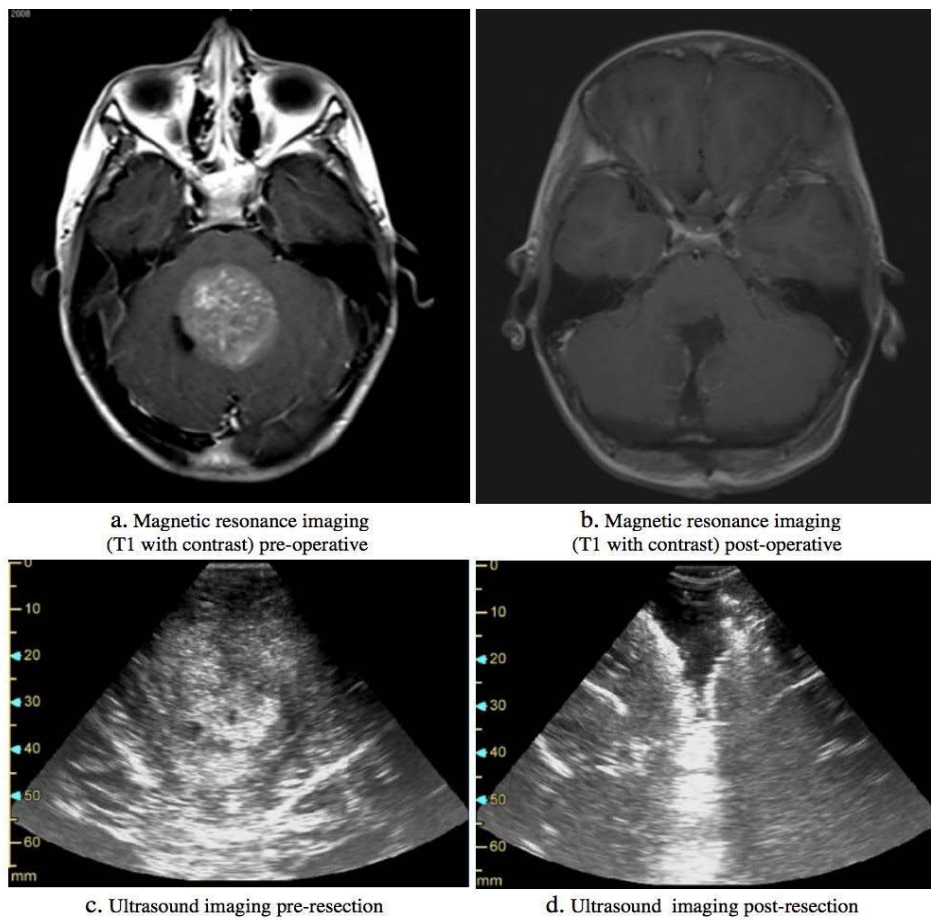


Figure 54 : Échographie peropératoire d'un médulloblastome et l'imagerie par résonance magnétique sur un patient masculin de 9 ans souffrant de médulloblastome classique (135)

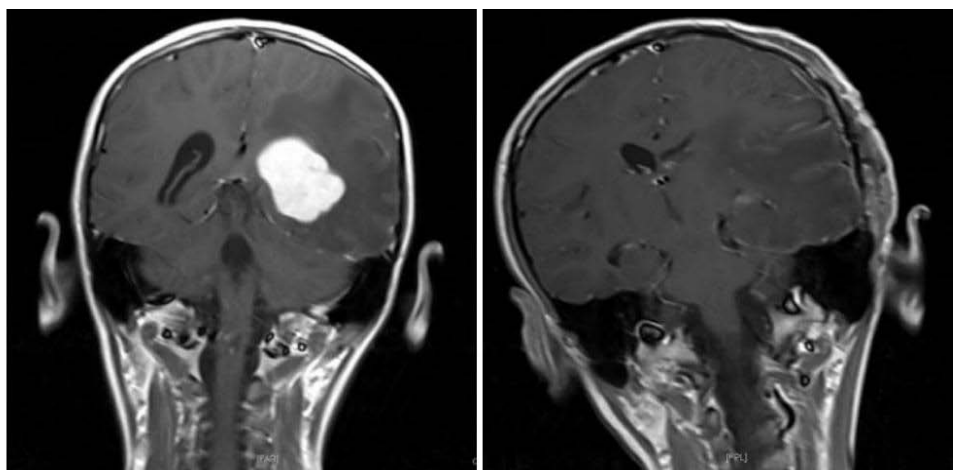


Figure 55 : IRM en séquence T1 d'un gliome choroïde intraventriculaire

Un enfant de 13 ans atteint d'un gliome choroïde intraventriculaire . Image de résonance magnétique T1 avec contraste préopératoire (à gauche) et postopératoire (à droite) (135) .

Dans une étude portant sur 28 patients, *Unsgaard et al (136)* ont analysé les données d'un système d'imagerie et de navigation peropératoire en 3D basé sur l'IOUS , comparant son utilité dans la chirurgie des gliomes cérébraux et des métastases. Les résultats ont indiqué que les images US en 3D donnent une bonne délimitation des métastases et de la partie solide des gliomes, fournissant ainsi un guide fiable pour la chirurgie des tumeurs avant de commencer la résection. Dans des séries plus importantes, il a été démontré que l'utilisation d'un système d'échographie peropératoire navigable en 3D peut permettre au chirurgien d'atteindre un GTR de 67% des tumeurs cérébrales .

Quatre-vingt-cinq biopsies ont été prélevées entre 2 et 7 mm , le bord de la tumeur visible sur les images échographiques. Des biopsies ont été prélevées lors de 28 opérations (7 astrocytomes de bas grade, 8 astrocytomes anaplasiques, 7 glioblastomes et 6 métastases). Des coupes transversales correspondantes à l'IRM en T1 préopératoire, et à l'IRM en T2 et l'échographie peropératoire ont été affichées simultanément, dirigées par la pince à biopsie équipée d'un capteur de positionnement. L'interprétation des images par les chirurgiens sur les sites de biopsie indiqués électroniquement a été comparée à l'histopathologie des des échantillons.

Les résultats des ultrasons étaient en accord avec l'histopathologie dans 74 % des cas (n=31) pour les astrocytomes de bas grade, 83 % (n= 18) pour les les astrocytomes anaplasiques, 77% (n= 26) pour les glioblastomes et 100% (n=10) pour les métastases. des cellules tumorales ont été trouvées dans des biopsies en dehors de la limite visible de la tumeur par échographie peropératoire (IOUS) , en particulier dans les gliomes de bas grade.

D'après *Unsgaard et al* IOUS a une meilleure concordance avec l'histopathologie que les pour les astrocytomes de bas grade. (136)

En ce qui concerne la caractérisation des pathologies tumorales, l'échographie avec renforcement du contraste (CEUS) est un outil précieux pour visualiser les schémas de vascularisation qui sont souvent en corrélation avec l'histologie des lésions. Dans une série de

71 patients, *Prada et al (137)* ont essayé de fournir la première évaluation iCEUS dynamique et continue d'une variété de lésions cérébrales en une série de 71 patients subissant une imagerie iCEUS dans un cadre non conforme tout en étant opérés pour différentes lésions cérébrales ; l'imagerie iCEUS a été obtenue avant la résection de chaque lésion, après injection intraveineuse d'un agent de contraste ultrasonore. Une analyse interobservateurs semi-quantitative et hors ligne a été effectuée pour visualiser chaque lésion cérébrale et pour caractériser ses caractéristiques de perfusion, en corrélation avec l'histopathologie.

Dans tous les cas, la lésion cérébrale a été visualisée en peropératoire avec l'iCEUS. Les vaisseaux afférents et efférents ont été identifiés, ce qui a permis d'évaluer le temps et les caractéristiques des phases artérielles et veineuses et de faciliter la stratégie chirurgicale. L'iCEUS s'est également révélé utile pour mettre en évidence la lésion par rapport à l'imagerie standard en mode B et pour montrer ses schémas de perfusion. Aucun effet indésirable n'a été observé.(137)

Prada et al ont conclu que La capacité du CEUS à mettre en évidence et à caractériser une tumeur cérébrale fournit au neurochirurgien des informations importantes à tout moment au cours d'une procédure chirurgicale.(137)

Dans une étude rétrospective portant sur 50 patients, *Arlt et al (138)* ont examiné les avantages de l'utilisation d'ultrasons reconstruits en trois dimensions et à contraste élevé (3D CEUS) dans les tumeurs cérébrales .

Selon Arlt et al la CEUS tridimensionnelle est une modalité d'imagerie peropératoire fiable et pourrait améliorer la qualité de l'imagerie. Quatre-vingt-dix pour cent des gliomes de haut grade (HGG, glioblastome et astrocytome de grade III) ont montré une absorption de contraste élevée avec une qualité d'imagerie améliorée dans plus de 50 % des cas. La résection totale brute et la résection incomplète des glioblastomes ont été correctement mises en évidence par le CEUS 3D en peropératoire. L'application d'un agent de contraste américain pourrait être un outil d'imagerie utile, en particulier pour le contrôle de la résection dans la chirurgie des glioblastomes.(138)

L'angiome caverneux se distingue du gliome par sa bénignité. Une fois qu'il est totalement réséqué , il peut être soigné. Il est donc plus judicieux de réduire les dommages causés aux tissus cérébraux normaux dans les cas d'angiome caverneux . *Regelsberger et al*

ont rapporté la résection de 17 cavernomes montrant que le système IOUS est toujours efficace pour détecter les petits angiomes caverneux. (

Les méningiomes ont généralement un apport sanguin abondant. L'IOUS aide à visualiser la vascularisation à l'intérieur ou à proximité des tumeurs. Il aide les chirurgiens à contrôler les saignements.

Si l'artère d'alimentation peut être détectée par IOUS, l'opérateur peut coaguler l'artère avant de réséquer le tumeur. Si l'approvisionnement en sang n'est pas aussi abondant, le chirurgien peut réséquer directement dans la tumeur. L'IOUS est également utile pour localiser les méningiomes situés dans les ventricules latéraux, afin d'aider le chirurgien à choisir la bonne partie du cortex à inciser. (123)

La chirurgie des malformations artérioveineuses (MAV) reste un défi pour la plupart des chirurgiens, car il est difficile d'imaginer l'ensemble de la prise en charge à l'avance de toute mauvaise gestion. Selon *Dempsey et al* l'IOUS peut aider à réduire les saignements, elle fournit des informations en temps réel sur l'étendue de la résection et permet d'éviter de laisser des résidus. L'IOUS indique l'indice de résistance de l'artère d'alimentation à déterminer si le nodulus a été totalement enlevé. (114)

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude :

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Notre étude	-Étude prospective -Évaluer l'utilité de l'échographie peropératoire en neurochirurgie	3	HCG(1) LGG(1) DNET (1)	-----	Le système d'échographie per opératoire permet une bonne localisation et une délimitation peropératoire des lésions , et fournit des informations en temps réel sur le volume de la tumeur et l'étendue de la résection .
Chacko et al (2003) (125)	-Étude Prospective -Évaluer l'utilité des ultrasons peropératoires (IOUS) dans la détection des tumeurs résiduelles par rapport à une tomographie calculée postopératoire et à l'histo-pathologie	35	HGG (22) LGG (11) Autres (2)	12/35 (34.29%)	La comparaison entre les résultats de l'IOUS et les résultats de la TDM post-opératoire dans les 28 pts avec des tumeurs parenchymateuses ; 5 patients qui avaient reçu une radiation antérieure et 2 granulomes inflammatoires ont été exclus de l'analyse, il y a eu concordance entre les résultats de l'IOUS et la TDM post-opératoire dans 23 des 28 cas.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Erdogan et al (2005) (126)	-Étude prospective -Déterminer l'accord inter-méthodes entre l'échographie intra-opératoire et l'échographie post-opératoire l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à contraste amélioré pour la détection des tumeurs résiduels .	32	HHG 15 (GBM (8) Astrocytome anaplasique (4) Oligodendrogliome (3)) Autres (17)	59.38%	La corrélation avec l'IRM postopératoire a révélé un bon niveau d'accord (9 cas avec accord sur le résidu positif et 19 cas avec accord sur le résidu négatif, aucun accord dans quatre cas)
Renner et al (2005) (129)	-Étude prospective -Évaluer l'échographie peropératoire (IOUS) comme outil de contrôle de la résection après une chirurgie de tumeur cérébrale.	36	HGG(22) Autre 14	76.2%	La fiabilité de l'IOUS dépend du type de tumeur. Il est avantageux d'utiliser l'IOUS pour la résection de métastases et de quelques gliomes de haut grade. En ce qui concerne la précision volumétrique, la valeur de IOUS est pire que sa valeur de navigation et de contrôle de la résection

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Unsgaard et al (2005) (136)	-Étude prospective - Examiner si les images du système d'imagerie 3D d'échographie peropératoire fournissent au chirurgien suffisamment d'informations pour délimiter en toute sécurité les marges des gliomes et des métastases pendant l'opération.	28	HGG 15 LGG 7 Autres 6	-----	Les images reformatées des volumes d'échographie peropératoire en 3D donnent une bonne délimitation des métastases et de la partie solide des gliomes avant de commencer la résection.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Moiyadi et al (2011) (124)	-Étude rétrospective -Évaluer l'utilité pratique du système d'échographie peropératoire de navigation 3D et son impact sur les décisions peropératoires lors de la chirurgie des gliomes cérébraux et analyser l'ampleur de la résection réalisée dans les gliomes malins.	90	HGG (51) LGG (17) Autres (22)	67%	Le système d'échographie peropératoire 3D navigable est un outil de guidage d'images peropératoires très utile en neuro-oncologie, qui facilite souvent des résections meilleures et radicales.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Serra et al (2012) (130)	-Étude rétrospective -Démontrer l'utilité de l'utilisation peropératoire de l'échographie peropératoire à haute fréquence (hfioUS) pour maximiser l'étendue de la résection (EOR) des tumeurs intracérébrales de haut grade.	22	HCG (14) Autres 8	95.5%	L'échographie peropératoire (hfioUS) a permis dans cette étude une détection précise de la tumeur et une discrimination nette entre les tissus normaux, pathologiques et œdémateux dans les 22 cas.
Moyadi et al (2016) (127)	-Étude rétrospective -Évaluer l'utilité de l'IOUS de manière objective.	77	41 gliomes 36 autres	76%	L'IOUS est un outil très utile pour la localisation et la délimitation peropératoire des lésions et la planification des différentes étapes de la résection de la tumeur. Il est facile, pratique, fiable, largement disponible et surtout un outil rentable.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Rhode et al (2011) (135)	-Étude prospective -vérifier si l'échographie peropératoire en 3D peropératoires peuvent également être utilisés pour le contrôle de la résection.	16	-----	80,7%	L'échographie(IOUS) 3D est particulièrement utile pour la détection des tissus de tumeurs cérébrales sous surveillance.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Prada et al (2014) (137)	-Étude prospective -Évaluer et décrire les différentes pathologies cérébrales au moyen d'une échographie intra-opératoire avec renforcement du contraste (iCEUS) par rapport à une IRM préliminaire de base à l'échographie et à une IRM préopératoire. Cette technique, dynamique et continue, permet une vision directe en temps réel de la vascularisation et des schémas de distribution des flux de différents types de lésions neurochirurgicales.	71	LGG 16 HGG 37 Autres 18	-----	L'échographie peropératoire avec renforcement du contraste iCEUS ajoute des informations anatomiques et biologiques précieuses telles que la vascularisation, la microcirculation et la dynamique de perfusion des tissus, ce qui permettra éventuellement de mieux comprendre la pathologie des tumeurs cérébrales. Il pourrait aider le chirurgien à adapter l'approche à la lésion, en mettant en évidence la lésion, en clarifiant entre la tumeur et le tissu cérébral œdémateux, et en montrant les vaisseaux afférents et efférents et les zones hyperperfusées, ce qui pourrait éventuellement modifier la stratégie chirurgicale peropératoire.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Arlt et al (2016) (138)	-Étude prospective -Examiner le contraste et l'ultrason reconstruit tridimensionnel (3D CEUS) dans la chirurgie des tumeurs cérébrales en ce qui concerne l'absorption de l'agent de contraste avant et après la résection de la tumeur, la qualité de l'imagerie et en comparaison avec l'imagerie par résonance magnétique postopératoire dans différentes entités tumorales.	50	HGG (23) LGG (6) Autres 21	62%	La CEUS tridimensionnelle est une modalité d'imagerie peropératoire fiable et pourrait améliorer la qualité de l'imagerie. Quarante-vingt-dix pour cent des gliomes de haut grade (HGG, glioblastome et astrocytome de grade III) ont montré une absorption de contraste élevée avec une qualité d'imagerie améliorée dans plus de 50 % des cas. La résection totale brute et la résection incomplète des glioblastomes ont été correctement mises en évidence par le CEUS 3D en peropératoire. L'application d'un agent de contraste des ultrasons pourrait être un outil d'imagerie utile, en particulier pour le contrôle de la résection dans la chirurgie des glioblastomes.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Neidert et al (2016) (120)	-Étude rétrospective -Analyser l'impact des modalités de contrôle de la résection peropératoire sur la survie globale (OS) et la survie sans progression (PFS) après une résection totale brute (GTR) de glioblastome.	76	HCG 76	-----	La OS et la PSF étaient plus longues chez les patients qui avaient un GTR en utilisant l'ioUS (soit l'ioUS seul ou l'ioUS en combinaison avec l'ioMRI) par rapport aux patients sans ioUS.
Sun et al, (2007) (123)	-Étude rétrospective - Évaluer la valeur de l'échographie peropératoire dans les opérations neurologiques.	110	HCG 68 LCG 42	-----	L'IOUS a été un outil précieux pour localiser les lésions, sélectionner l'approche appropriée, contrôler l'étendue de la résection et afficher la distribution du système vasculaire. L'IOUS peut fournir une protection plus fiable pour la neurochirurgie mini-invasive.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Mursc et al., (2017) (122)	-Étude prospective -Chercher à savoir si (IOUS) a aidé le chirurgien à se diriger vers la tumeur comme le montre l'imagerie par résonance magnétique préopératoire et si (IOUS) a été capable de distinguer les marges de la tumeur du tissu environnant.	25	HCG 25	-----	Lors de l'opération de gliomes de haut grade irradiés en rechute, l'IOUS a fourni une méthode fiable pour se diriger vers le centre de la tumeur. Aux marges , elle ne permettait pas de distinguer de manière fiable les restes ou les tissus non tumoraux, mais les zones hypoéchogènes contenaient rarement des tissus tumoraux.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Sweeney et al (2018) (132)	-Étude rétrospective -Évaluer l'utilisation du SIUO dans la détermination de la résection totale brute (RGT) chez les patients adultes et pédiatriques atteints de tumeurs cérébrales.	260	HCG 110 Autres 150	81%	-L'utilisation de l'IOUS pourrait aider à obtenir une meilleure RGT chez les patients adultes et pédiatriques en neurochirurgie et pourrait améliorer les résultats de la chirurgie. Il pourrait être utile d'étudier l'efficacité combinée de l'IOUS et de l'imagerie de fluorescence peropératoire pour obtenir un taux de RGT plus élevé dans les cas de tumeurs du SNC invasives.
Smith et al (2016) (133)	-Étude rétrospective -Évaluer la corrélation de l'étendue de la résection entre l'IOUS et IRM postopératoire		HCG 5 LCG 34 Autres 23	71%	L'utilisation de l'IOUS peut jouer un rôle important dans l'obtention d'un plus grand degré de résection en fournissant des informations en temps réel sur le volume et la localisation de la tumeur dans le cadre du déplacement du cerveau tout au long d'une opération.

Tableau : Résumé de la documentation de la revue de la littérature à propos de l'utilité de l'échographie peropératoire dans la résection des tumeurs cérébrales en comparaison à notre étude "suite"

Auteurs	Type d'étude et objectif	Nombre de patients	Type de tumeur	Le taux résection tumoral totale (GTR)	Les résultats des études
Policicchio et al (2018) (121)	-Étude rétrospective -Évaluer l'utilité de l'utilisation systématique du IOUS lors de divers types de chirurgie intracrânienne.	162	HGG 62 LGG 9 Autres 91	HGG 46.77% LGG 55.56% Métastases 86.67%	Les examens par l'échographie peropératoire étaient très sensibles dans la détection de tous les types de pathologie, étaient sûrs et précis dans la planification des trajectoires des lésions intraparenchymateuses et étaient précis dans la vérification de l'étendue de la résection dans plus de 80% des cas. L'IOUS est un outil polyvalent et réalisable ; il pourrait améliorer la sécurité et son utilisation peut être envisagée dans la chirurgie intracrânienne de routine.

L'objectif principal de la chirurgie des tumeurs cérébrales est d'obtenir une résection radicale avec une morbidité minimale, car il a été démontré que l'ablation radicale est un facteur principal affectant la survie globale.

L'avènement de la neuronavigation a certainement apporté des avantages significatifs dans la chirurgie des tumeurs cérébrales, en permettant l'identification de la lésion et de ses marges lors de la résection, mais il y a la grande limitation de la distorsion anatomique après la craniotomie. L'échographie peropératoire a permis de dépasser cette limite. De plus, l'IOUS exerce un attrait notable en raison de son faible coût, de l'interruption minimale du flux opératoire et de l'absence d'exposition aux radiations. Entre des mains expérimentées, les caractéristiques échographiques peuvent aider à différencier les gliomes de bas grade, qui peuvent présenter des calcifications et une légère hyperéchogénicité, des gliomes de haut grade, qui peuvent présenter une dégénérescence nécrotique .

Notre étude au service de neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI et les résultats de la littérature montrent que l'utilisation croissante des ultrasons dans les tumeurs cérébrales peut permettre des résections plus radicales, augmentant ainsi la survie globale.

Les études analysées dans la revue montrent une grande corrélation entre l'IRM postopératoire et l'échographie peropératoire, en particulier pour les gliomes et les métastases. De plus, l'échographie per opératoire semble fournir des images de meilleure qualité , notamment en ce qui concerne la visualisation du résidu de la tumeur.

Dans notre étude prospective qui portait sur 3 cas : 1 cas de glioblastome de haut grade , 1 cas de oligodendrogliome et 1 cas de tumeur DNET . L'échographie peropératoire a fournit des informations précieuses sur les structures des tissus mous du parenchyme cérébrale qui ne pourraient pas être visualisées par le chirurgien.Elle a une capacité à localiser les lésions sous une surface cérébrale d'apparence normale, permet aussi d'évaluer le déplacement du cerveau.

D'après l'expérience du service de neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI l'échographie peropératoire est facilement reproductible et sa disponibilité peropératoire est rapide. Cela a permis de guider la résection tumorale , d'identifier les limites d'exérèse chirurgicale et aussi de vérifier en post résection l'existence d'une tumeur résiduelle tous ces paramètres permettent une bonne prise en charge de la pathologie tumorale cérébrale et favorise le pronostic .

XI. Le développement future de l'échographie peropératoire en Neurochirurgie :

L'optimisation des systèmes de neuronavigation et l'introduction de l'échographie peropératoire (IoUS) pour la chirurgie de la colonne vertébrale a été encouragée par de nombreuses avancées dans plusieurs domaines scientifiques (notamment : le génie biomédical, l'imagerie, l'électronique, les nanotechnologies, etc.)

Ces aides technologiques servent maintenant comme un excellent outil de planification et d'aide chirurgicale pour les pathologies de la colonne vertébrale pour préserver les structures vitales rencontrées en per-opératoire et être une modalité d'imagerie en temps réel.

L'IoUS a un avantage sur les autres techniques d'imagerie préopératoire , de nombreuses modalités utilisés pour tenir en compte des changements en peropératoires . Il semble donc que cette technique est un outil fiable pour la chirurgie du rachis pour les pathologies intradurales et pour localiser et visualiser les pathologies extradurales.

Ainsi, de nombreux chirurgiens du monde entier utilisent désormais l'IoUS , cette tendance devrait favoriser l'incorporation de l'IoUS dans les programmes de chirurgie la colonne vertébrale pour les lésions spinales , en effet l'utilisation de l'IoUS est susceptible d'augmenter encore au cours de la prochaine décennie lorsque l'utilisation d'agents de contraste ultrasoniques améliorer la définition des images acquises en per-opératoire .



CONCLUSION



L'échographie peropératoire est une technique qui a été largement acceptée actuellement par les neurochirurgiens , au Maroc et à Marrakech le service de Neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI fut le premier récemment en 2019 à avoir intégrer cette technique qui a plusieurs avantages en permettant au chirurgien d'identifier les marges d'exérèse et de détecter en temps réel les résidus tumoraux au fur et à mesure de l'intervention, pour maximiser l'exérèse tumorale .

L'avantage de l'échographie en neurochirurgie est, en plus de fournir une image anatomique en temps réel de la région d'exérèse, de compenser le phénomène de brain shift. Cette technique, disposant d'une bonne sensibilité de détection, est particulièrement adaptée aux gliomes se situant dans les régions corticales et sous-corticales. notamment parce que les sondes et les appareils encombrants deviennent plus un obstacle qu'un atout sur le terrain.

Son utilisation pour guider la biopsie de la tumeur, l'aspiration des kystes et la mise en place des cathéters, ainsi que pour estimer le volume et déterminer l'intégralité de la résection de la tumeur, est décrite. La capacité à reconnaître une hémorragie péri-opératoire est démontrée.

Actuellement l'échographie 3D naviguée permet une imagerie peropératoire en temps réel, à faible coût, permettant une mise a jour rapide des marges d'exérèse sur le planning préopératoire.



RÉSUMÉS



RÉSUMÉ

L'échographie peropératoire (IOUS) a été utilisée en neurochirurgie comme technique d'imagerie en peropératoire parce qu'elle est pratique et peut fournir des informations en temps réel sur lésion et structures cérébrales et spinales normales . Elle permet une localisation des lésions, choisir l'approche appropriée et contrôler l'étendue de la résection et afficher la répartition des vaisseaux. L'IOUS peut fournir une approche plus garantie et plus fiable pour la neurochirurgie peu invasive.

L'objectif de ce travail était d'analyser l'utilité de l'échographie peropératoire en Neurochirurgie et illustrer l'apport de l'échographie per opératoire en particulier dans la chirurgie des tumeurs cérébrales .

Nous rapportant dans cette étude prospective 3 cas : 1 cas de Glioblastome de haut grade , 1 cas de Oligodendrogliome , 1 cas de tumeur DNET. Dans ces 3 cas l'exérèse tumorale totale a été indiqué comme moyen de traitement , l'échographie peropératoire a été utilisé comme moyen d'imagerie per opératoire pour la première fois au Maroc pour ces 3 cas .

L'échographie per opératoire a été d'une grande utilité pour le chirurgien parce qu'elle a permis d'évaluer l'étendue des lésions tumorales cérébrales , guider l'exérèse chirurgicale et détecter la présence ou pas de tumeurs résiduelles .

Les résultats postopératoires concordent avec les résultats de l'échographie peropératoire , ce qui nous permet d'affirmer que l'échographie per opératoire est une technique de grande importance diagnostique pour la localisation des lésions tumorales.

Notre étude au service de neurochirurgie à l'hôpital ERRAZI et les résultats de la littérature montrent que l'utilisation croissante des ultrasons dans les tumeurs cérébrales peut permettre des résections plus radicales, augmentant ainsi la survie globale.

Abstract

Intraoperative ultrasound (IOUS) has been used in neurosurgery as an intraoperative imaging technique because it is convenient and can provide real-time information about lesions and normal brain and spinal structures. It allows the localization of lesions, selection of the appropriate approach and control of the extent of resection and display of vessel distribution. The IOUS can provide a more guaranteed and reliable approach to minimally invasive neurosurgery.

The objective of this work was to analyze the usefulness of intraoperative ultrasound in neurosurgery and to illustrate the contribution of intraoperative ultrasound in particular in brain tumor surgery .

In this prospective study we reported 3 cases: 1 case of high grade glioblastoma, 1 case of oligodendroglioma, 1 case of DNET. In these 3 cases, total tumor removal was indicated as a means of treatment, intraoperative ultrasound was used as a means of intraoperative imaging for the first time in Morocco for these 3 cases.

Intraoperative ultrasound was very useful for the surgeon because it allowed to evaluate the extent of brain tumor lesions, guide the surgical removal and detect the presence or not of residual tumors.

The postoperative results are consistent with the results of intraoperative ultrasound, which allows us to state that intraoperative ultrasound is a technique of great diagnostic importance for the localization of tumor lesions.

Our study in the neurosurgery department at ERRAZI Hospital and the results of the literature show that the increasing use of ultrasound in brain tumors may allow more radical resections, thus increasing overall survival.

ملخص

تم استخدام الموجات فوق الصوتية أثناء الجراحة (IOUS) في جراحة الأعصاب كتقنية تصوير أثناء الجراحة لأنها عملية ويمكن أن توفر معلومات في الوقت الحقيقي حول الإصابة والبنى الطبيعية للدماغ والعمود الفقري. يسمح بتوطين الآفات ، واختيار النهج المناسب والتحكم في مدى الاستئصال وعرض توزيع الأوعية. يمكن أن يوفر IOUS نهجًا أكثر أمانًا وموثوقية لجراحة الأعصاب الأقل بضعًا.

كان الهدف من هذا العمل هو تحليل فائدة الموجات فوق الصوتية أثناء الجراحة في جراحة الأعصاب وتوضيح مساهمة الموجات فوق الصوتية أثناء الجراحة على وجه الخصوص في جراحة أورام الدماغ.

نذكر في هذه الدراسة المستقبلية 3 حالات: حالة واحدة من ورم أرومي دقيقي عالي الدرجة ، حالة واحدة من ورم Oligodendroglioma ، حالة واحدة من ورم DNET. في هذه الحالات الثلاث ، تم الإشارة إلى استئصال الورم الكلي كوسيلة للعلاج ، وتم استخدام الموجات فوق الصوتية أثناء الجراحة كوسيلة للتصوير أثناء الجراحة لأول مرة في المغرب لهذه الحالات الثلاث.

كانت الموجات فوق الصوتية أثناء العملية مفيدة جدًا للجراح لأنها جعلت من الممكن تقييم مدى آفات ورم الدماغ وتوجيه الاستئصال الجراحي واكتشاف وجود أو عدم وجود الأورام المتبقية. تتوافق نتائج ما بعد الجراحة مع نتائج الموجات فوق الصوتية أثناء العملية ، والتي تسمح لنا أن نقول أن الموجات فوق الصوتية أثناء العملية هي تقنية ذات أهمية تشخيصية كبيرة لموقع آفات الورم.

تظهر دراستنا في قسم جراحة المخ والأعصاب في مستشفى ERRAZI ونتائج الأدبيات أن الاستخدام المتزايد للموجات فوق الصوتية في أورام الدماغ يمكن أن يسمح بعمليات استئصال جذرية ، وبالتالي زيادة البقاء على قيد الحياة بشكل عام.



BIBLIOGRAPHIE



1. **Alexander E III, Moriarty TM, Kikinis R & Jolesz FA .**
Innovations in minimalism: Intraoperative MRI. *Clinical Neurosurgery* (1995) 43: 338-352.
2. **Koivukangas J**
Ultrasound imaging in operative neurosurgery: An experimental and clinical study with special reference to ultrasound holographic B (UHB) imaging. *Acta Univ Oul*(1984) D 115.
3. **McGirt MJ et al**
Independent association of extent of resection with survival in patients with malignant brain astrocytoma. *J Neurosurg* 110(1): (2009) 156- 162.
4. **Sanai N & Berger MS**
Glioma extent of resection and its impact on patient outcome. *Neurosurgery* (2008) 62(4): 753-764.
5. **Soffiatti, R., Rudà, R., & Trevisan, E.**
Brain metastases: current management and new developments. *Current Opinion in Oncology*, 20(6),(2008). 676-684. doi:10.1097
6. **Louis, D et al**
The 2007 WHO Classification of Tumours of the Central Nervous System. *Acta Neuropathologica*, 114(2), 97-109. doi:10.1007
7. **Behin, A., Hoang-Xuan, K., Carpentier, A. F., & Delattre, J.-Y.**
Primary brain tumours in adults. *The Lancet*, 361(9354), 323-331 (2003).doi:10.1016/s0140-6736(03)12328-8
8. **Ali Osman :**
Brain tumor edited by Francis Ali Osman , Humana press (2005) Vol 5 ; p:55
9. **Liigant A, Asser T, Kulla A, Kaasik AE.**
Epidemiology of primary central nervous system tumors in Estonia. *Neuroepidemiology* 2000;19:300-11.
10. **Linos E, Raine T, Alonso A, Michaud D.**
Atopy and risk of brain tumors: a meta-analysis. *J Natl Cancer Inst* 2007;99:1544-50.
11. **McCarthy BJ, Kruschko C.**
Consensus conference on cancer registration of brain and central nervous system tumors. *Neuro Oncol* 2005;7:196-201
12. **McKinney PA.**
Brain tumours: incidence, survival, and aetiology. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2004;75(Suppl 2):ii12-7

13. **Rajaraman P, Stewart PA, Samet JM, et al.**
Lead, genetic susceptibility, and risk of adult brain tumors. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 2006;15:2514-20.
14. **Von Behren J, Reynolds P.**
Birth characteristics and brain cancers in young children. *Int J Epidemiol* 2003;32:248-56.
15. **Wigertz A, Lonn S, Mathiesen T, et al.**
Risk of brain tumors associated with exposure to exogenous female sex hormones. *Am J Epidemiol* 2006;164:629-36.
16. **Wrensch M, Minn Y, Chew T, Bondy M, Berger MS.**
Epidemiology of primary brain tumors: current concepts and review of the literature. *Neuro Oncol* 2002;4:278-99.
17. **Schlehofer B, Blettner M, Preston-Martin S, et al.**
Role of medical history in brain tumour development. Results from the international adult brain tumour study. *Int J Cancer* 1999;82:155-60.
18. **David N Louis, Hiroko Ohgaki, et al**
The 2007 WHO classification of tumours of the central nervous system. *Acta neuropathologica*, vol. 114, no. 2, (2007) pages 97-109.
19. **La classification histopronostique de l'OMS (2016) des tumeurs cérébrales primitives**
<https://www.cen-neurologie.fr/deuxieme-cycle/tumeurs-intracraniennes>
20. **Navas-Acien A, Pollan M, Gustavsson P, Plato N.**
Occupation, exposure to chemicals and risk of gliomas and meningiomas in Sweden. *Am J Ind Med* 2002;42:214-27.
21. **Whittle, I. R., Smith, C., Navoo, P., & Collie, D.**
Meningiomas. *The Lancet*, 363(9420), 1535-1543.(2004) doi:10.1016/s0140-6736(04)16153-9
22. **Provenzale JM, Mukundan S, Barboriak DP.**
Diffusion-weighted and perfusion MR imaging for brain tumor characterization and assessment of treatment response. *Radiology*. 2006 Jun;239(3):632-49
23. **Cha S.**
Update on brain tumor imaging: from anatomy to physiology. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2006 Mar;27(3):475-87.
24. **Schmainda KM, Rand SD, Joseph AM, et al**
Characterization of a first-pass gradient-echo spin-echo method to predict brain tumor grade and angiogenesis. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2004 Oct;25(9):1524-32.

25. **E. Mandonnet, J. Y. Delattre, M. L. Tanguy, K. et al**
Continuous growth of mean tumor diameter in a subset of grade II gliomas. *Ann. Neurol.*, vol. 53, Apr 2003 pages 524–528.
26. **E. Mandonnet, J. Pallud, O. Clatz, et al**
Computational modeling of the WHO grade II glioma dynamics: principles and applications to management paradigm. *Neurosurg Rev*, vol. 31, Jul 2008 pages 263–269.
27. **Woydt M, Krone A, Becker G, et al**
Correlation of intraoperative ultrasound with histopathologic findings after tumor resection in supratentorial gliomas. A method to improve gross total tumor resection. *Acta Neurochir (Wien)* 1996a;138:1391–8.
28. **Bohan, E., & Glass–Macenka, D.**
Surgical management of patients with primary brain tumors. *Seminars in Oncology Nursing*, 20(4), 240–252.(2004) doi:10.1016
29. **Carpentier, A. C .**
La chirurgie des gliomes cérébraux en 2008. *Cancer/Radiothérapie*, 12(6–7), 676–686. (2008) doi:10.1016
30. **Zhang S, William C.**
Educational Case: Histologic and Molecular Features of Diffuse Gliomas. *Acad Pathol.* 2020 Jan–Dec;7:2374289520914021
31. **Giese, A., Bjerkvig, R., Berens, M. E., & Westphal, M.**
Cost of Migration: Invasion of Malignant Gliomas and Implications for Treatment. Journal of Clinical Oncology, 21(8), 1(2003) 624–1636. doi:10.1200
32. **Frappaz et al**
Summary version of the Standards, Options and Recommendations for the management of adult patients with intracranial glioma *British Journal of Cancer* (2003) 89(Suppl 1), S73–S83. doi:10.1038.
33. **Cavaliere, R., Lopes, M. B. S., & Schiff, D.**
Low-grade gliomas: an update on pathology and therapy. The Lancet Neurology, 4(11), 760–770.(2005) doi:10.1016
34. **Alexandra Benouaich–Amiel , Jean–Marc Simon, Jean–Yves Delattre**
Concomitant Radiotherapy With Chemotherapy in Patients With Glioblastoma *Bull Cancer* 2005 Dec;92(12):1065–72.
35. **Kowalczyk et al :**
Quantitative Imaging Study of Extent of Surgical Resection and Prognosis of Malignant Astrocytomas. *Neurosurgery*, 41(5), 1028–1038.(1997) doi:10.1097

36. **Kernohan JW, Sayre GP**
Tumors of the Central Nervous System, fasc 35, Washington in : Armed Forces Institute of Pathology (ed) : Atlas of Tumors Pathology, 1952
37. **Parsa A, Lee J, Parney I, Weinstein P, McCormick P, Ames C.**
Spinal cord and intradural-extraparenchymal spinal tumors: current best care practices and strategies. J Neuro - oncol. 2004;69:291-318.
38. **Conti P, Pansini G, Mouchaty H, Capuano C, Conti R.**
Spinal neurinomas: retrospective analysis and long-term outcome of 179 consecutively operated cases and review of the literature. Surg Neurol. 2004;61(1):34-43; discussion 44.
39. **Setzer M, Vatter H, Marquardt G, Seifert V, Vrionis FD.**
Management of spinal meningiomas: surgical results and a review of the literature. Neurosurg Focus. 2007;23(4):E14.
40. **Sa'adah M, Al Shunnar K, Saadah L, Shogan A, Inshasi J, Afifi H.**
Atypical presentations of conus medullaris and filum terminale myxopapillary ependymomas. J Clin Neurosci. 2004;11(3):268-72.
41. **Sugita K, Takayasu M :**
Arteriovenous malformations. in Apuzzo M (ed) : Brain surgery. 1993 Churchill-Livingstone New York , 1113-1117.
42. **Luessenhop AJ, Rosa L :**
Cerebral arteriovenous malformations : Indications for and results of surgery, and role of intravascular techniques. J Neurosurg 60 : 14-22, 1984
43. **Barnwells S, Dowd CF, Higashida RT et al :**
Endovascular therapy for cerebral arteriovenous malformation in Apuzzo M (ed) : Brain surgery. Churchill-Livingstone New York , (1993) 1225-1250.
44. **Itoyama Y, et al :**
Natural course of unoperated intracranial arteriovenous malformations : Study of 50 cases. (1989) J Neurosurg 71 : 805-809.
45. **Minakawa T, Tanaka R, Koike T, Takeuchi S, Sasaki O :**
Angiographic follow-up study of cerebral arteriovenous malformations with references to their enlargement and regression. (1989) Neurosurgery 24,1 : 68-74.
46. **Mackenzie I :**
The clinical presentation of cerebral angioma : a review of 50 cases. Brain 78 (1953) : 184-214
47. **Spetzler R, Martin N :**
A proposed grading system for arteriovenous malformations. 1986 J Neurosurg 65 : 476-483,

48. **Peter W. et al**
Effectiveness of neuronavigation in resecting solitary intracerebral contrast-enhancing tumors: a randomized controlled trial *The journal of neurosurgery* (2006) DOI : 10.3171
49. **ALBAYRAK B, SAMDANI A, BLACK P.**
(2004). Intraoperative MRI in neurosurgery. *Acta Neurochirurgica*, 146: 543–556.
50. **Unsgaard, G et al**
Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery. Acta Neurochirurgica, 148(3),(2005). 235-253.
doi:10.1007
51. **Rasmussen, et al**
Functional neuronavigation combined with intra-operative 3D ultrasound: Initial experiences during surgical resections close to eloquent brain areas and future directions in automatic brain shift compensation of preoperative data. *Acta Neurochirurgica,(2007) 149(4), 365–378.* doi:10.1007
52. **Regelsberger, J. Lohmann, K. Helmke, K & Westphal, M.**
Ultrasound-guided surgery of deep seated brain lesions. *European Journal of Ultrasound, 12(2), 115–121.(2000)* doi:10.1016
53. **Rygh et al**
Comparison of navigated 3D ultrasound findings with histopathology in subsequent phases of glioblastoma resection. *Acta Neurochirurgica, 150(10), 1033–1042.(2008)* doi:10.1007
54. **Newman PG, Rozycki GS**
The history of ultrasound. *Surg Clin North Am (1998) 78(2):179–195*
55. **French LA, Wild JJ, Neal D**
Detection of cerebral tumors by ultrasonic pulses; pilot studies on post-mortem material. *Cancer (1950) 3(4):705–708*
56. **Wild JJ, Reid JM**
The effects on biological tissue of 15-mc pulsed ultrasound. *J Acoust Soc Am (1953)25:270–280*
57. **Tanaka K, Kikuchi Y, Uchida R**
Ultrasonic diagnosis of intracranial disease. *Proc Surg Soc Japan(1953) 53:242–243*
58. **Kikuchi Y, Uchida R, Tanaka K, Wagai T**
Early cancer diagnosis through ultrasonics. *J Acoust Soc Am (1957) 29:824–833*
59. **Dyck P,et al**
Intraoperative ultrasonic encephalography of cerebral mass lesions. *Bull Los Angeles Neurol Soc (1966) 31(3):114–124*

60. **Kurze T, Barrows HS**
The impact of intraoperative ultrasonic encephalography of cerebral mass lesions. Bull Los Angeles Neurol Soc (1968) 31(3):116-124
61. **Rubin JM, Mirfakhraee M, Duda EE, Dohrmann GJ, Brown F**
(1980) Intraoperative ultrasound examination of the brain. Radiology 137(3):831-832
62. **Voorhies RM, Patterson RH**
Preliminary experience with intra-operative ultrasonographic localization of brain tumors. Radiol Nucl Med Mag (1980) 10:8-9
63. **Masuzawa H, Hachiya J, Kamitami H, Sakai F, Sato J**
Intra-operative use of ultrasonography in neurosurgery. Abstract: seventh international congress of neurological surgery, Munchen,(1981) July 12-18,
64. **Edmonds PD**
Methods of experimental physics, vol 19, Ultrasonic.. Published in Neurological Surgery, Supplement to Neurochirurgica(1981)
65. **Richardson EG**
Ultrasonic physics. Elsevier Publishing Company, 52 Vanderbilt Avenue, New York 17, N.Y. (1952)
66. **Pisani R, Liboni W**
Principi fisici degli ultrasuoni. In: Rabbia C, De Lucchi R, Cirillo R (eds) Ecodoppler vascolare. Edizioni Minerva Medica(1999) , Torino
67. **Dickinson RJ**
Reflection and scattering. In:Hill CR (ed) Physical principles of medical ultrasonics. Ellis Horwood, Chichester(1986)
68. **Carpenter DA**
Ultrasonic transducer. Clin Diagn , (1980) Ultrasound 5:31/39
69. **Whittingham TA**
An overview of digital technology in ultrasonic imaging. Technology section 2: digital technology. Eur Radiol (1999) 9:S307-S311
70. **Whittingham TA**
Broadband transducers. Technology section 1: new transducers. Eur Radiol(1999) 9:S298-S303
71. **Baker ML, Dalrymple GV**
Biological effects of diagnostic ultrasound: a review. (1978)Radiology 126: 479-483
72. **Sutcliffe, J. C.**
The value of intraoperative ultrasound in neurosurgery. British Journal of Neurosurgery, 5(2), 169-178. (1991) doi:10.3109

73. **Regelsberger, J., Lohmann, F., Helmke, K., & Westphal, M**
. Ultrasound-guided surgery of deep seated brain lesions. *European Journal of Ultrasound*, 12(2), 115-121. (2000) doi:10.1016
74. **Renner, C.; Lindner, D.; Schneider, J.P.; Meixensberger, J.**
Evaluation of intra-operative ultrasound imaging in brain tumor resection: A prospective study. *Neurol. Res.*(2005) 27, 351-357.
75. **Sjolander U, Lindgren PG, Hugosson R.**
Ultrasound sector scanning for the localization and biopsy of intracerebral lesions. *J Neurosurg* (1983); 58:7- 10
76. **Tomancok B , Holl K , Wurm G , Pogady P , Fischer J .**
Stereotaxically guided versus ultrasound guided surgery – a comparative report of experiences . *Zentralbl Neurochir*(1996) ; 57 : 123 - 128
77. **Dorward NL, Alberti O, Velani B, et al**
Postimaging brain distortion: magnitude, correlates, and impact on neuronavigation. *J Neurosurg* 88(4):656-662. doi:10.3171/jns.1998.88.4.0656
78. **Stieglitz LH, Fichtner J, Andres R, et al**
The silent loss of neuronavigation accuracy: a systematic retrospective analysis of factors influencing the mismatch of frameless stereotactic systems in cranial neurosurgery. *Neurosurgery* 72(5):796-807. (2013)doi:10.1227
79. **Soleman J, Fathi AR, Marbacher S, Fandino J**
The role of intraoperative magnetic resonance imaging in complex meningioma surgery. *Magn Reson Imaging* 31(6):923-929.(2013) doi:10.1016/j.mri.2012.12.005
80. **Reid MH**
Ultrasonic visualization of a cervical cord cystic astrocytoma. *AJR Am J Roentgenol* 131(5):907-908.(1978) doi:10.2214/ajr.131.5.907
81. **Chacko AG, Kumar NK, Chacko G, Athyal R, Rajshekhar V**
Intraoperative ultrasound in determining the extent of resection of parenchymal brain tumours – a comparative study with computed tomography and histopathology. *Acta Neurochir* 145(9):743-748.(2003)doi:10.1007
82. **van Velthoven :**
Intraoperative ultrasound imaging: comparison of pathomorphological findings in US versus CT, MRI and intraoperative findings. *Acta Neurochir Suppl* (2003) 85:95-99
83. **Makuuchi M, Torzilli G, Machi J :**
History of intraoperative ultrasound. *Ultrasound Med Biol* (1998)24(9):1229-1242

84. **Dohrmann GJ, Rubin JM :**
History of intraoperative ultrasound in neurosurgery. *Neurosurg Clin N Am* (2001) 12(1):155-166, ix
85. **McGirt MJ, Attenello FJ, Dato G, et al :**
Intraoperative ultrasonography as a guide to patient selection for duraplasty after suboccipital decompression in children with Chiari malformation Type I. *J Neurosurg Pediatr* 2(1):52-57.(2008) doi:10.3171
86. **van Velthoven V:**
Intraoperative ultrasound imaging: comparison of pathomorphological findings in US versus CT, MRI and intraoperative findings. (2003)*Acta Neurochir Suppl* 85:95-99
87. **Moiyadi A**
Objective assessment of intraoperative ultrasound in brain tumors. *Acta Neurochir* 156(4):703-704. (2014) doi:10.1007
88. **Prada F, Del Bene M, Moiraghi A, et al**
From Grey Scale B-Mode to Elastosonography: Multimodal Ultrasound Imaging in Meningioma Surgery—Pictorial Essay and Literature Review, *BioMed Research International*, vol. 2015, Article ID 925729, 13 pages, 2015. doi:10.1155/2015/925729
89. **Francesco Prada , Massimiliano Del Bene ,Alessandro Moiraghi ,Francesco DiMeco**
Intraoperative Ultrasound (IOUS) in Neurosurgery: From Standard B-mode to Elastosonography, DOI 10.1007/978-3-319-25268-1_4
90. **Ivanov, M., Wilkins, S., Poata, I., & Brodbelt, A**
Intraoperative ultrasound in neurosurgery – a practical guide. *British Journal of Neurosurgery*, 24(5), 510-517.(2010). doi:10.3109
91. **Unsgaard G, Gronningsaeter A, Ommedal S, Hernes TAN**
Brain operations guided by real-time two-dimensional ultrasound: new possibilities as a result of improved image quality. *Neurosurgery* 2002;51(2):402-11; discussion 11-2.
92. **Nimsky C, Ganslandt O, Cerny S, Hastreiter P, Greiner G, Fahlbusch R.**
Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 2000;47(5):1070-80
93. **Sosna J, Barth MM, Kruskal JB, Kane RA**
Intraoperative sonography for neurosurgery. *J Ultrasound Med* 24(12):1671-1682 (2005)
94. **Moiyadi A**
Objective assessment of intraoperative ultrasound in brain tumors. *Acta Neurochir* 156(4):703-704. (2014)doi:10.1007/s00701-014-2010-3

95. **Rygh OM, Selbekk T, Torp SH, Lydersen S, Hernes TA, Unsgaard G**
Comparison of navigated 3D ultrasound findings with histopathology in subsequent phases of glioblastoma resection. *Acta Neurochir*(2008) 150(10):1033-1041. doi:10.1007/s00701-008-0017-3; discussion 1042
96. **Wells PNT**
Ultrasonics in medicine and biology. *Phys Med Biol* (1977) 22(4):629
97. **Chandler WF, Knake JE, McGillicuddy JE, Lillehei KO, Silver TM**
Intraoperative use of real-time ultrasonography in neurosurgery. *J Neurosurg* 57(2):157-163, Epub 1982/08/01. doi:10.3171/jns.1982.57.2.0157.
98. **Unsgaard G, Gronningsaeter A, Ommedal S, Nagelhus Hernes TA**
Brain operations guided by real-time two-dimensional ultrasound: new possibilities as a result of improved image quality. *Neurosurgery* 51(2):402-411; discussion 11-12. Epub 2002/08/17.
99. **Gronningsaeter A, Kleven A, Ommedal S, et al :**
SonoWand, an ultrasound-based neuronavigation system. *Neurosurgery* (2000) 47(6):1373-1379; discussion 9-80.
100. **Solheim O, Selbekk T, Jakola A, Unsgård G :**
Ultrasound-guided operations in unselected high-grade gliomas—overall results, impact of image quality and patient selection. *Acta Neurochir* 152(11):1873-1886.(2010) doi:10.1007/s00701-010-0731-5
101. **Masuzawa H, Kanazawa I, Kamitani H, Sato J :**
Intraoperative ultrasonography through a burr-hole. *Acta Neurochir* 77(1-2):41-45.(1985) doi: 10.1007/BF01402304
102. **Serra C, Stauffer A, Actor B, Burkhardt JK, et al**
Intraoperative high frequency ultrasound in intracerebral high-grade tumors. *Ultraschall Med* 33(7):E306-E312, Epub 2012/11/07. doi:10.1055/s-0032-1325369.
103. **Coburger J, Scheuerle A, Kapapa T al**
Sensitivity and specificity of linear array intraoperative ultrasound in glioblastoma surgery: a comparative study with high field intraoperative MRI and conventional sector array ultrasound. *Neurosurg Rev* 38:499-509, Epub 2015/04/10. doi:10.1007/s10143-015-0627-1.
104. **Coburger J**
Linear array ultrasound: a dedicated tool for a dedicated application. *Acta Neurochir (Wien)* 157:959-960. doi:10.1007/s00701-015-2406-8, Epub 2015/04/08.

105. **Mair R, Heald J, Poata I, Ivanov M**
A practical grading system of ultrasonographic visibility for intracerebral lesions. *Acta Neurochir* 155(12):2293–2298. (2013) doi:10.1007/s00701–013–1868–9
106. **Yamahara T, Numa Y, Oishi T, et al**
Morphological and flow cytometric analysis of cell infiltration in glioblastoma: a comparison of autopsy brain and neuroimaging. *Brain Tumor Pathol* (2010) 27(2):81–87
107. **McGirt MJ, Mukherjee D, Chaichana KL, Than KD, et al**
Association of surgically acquired motor and language deficits on overall survival after resection of glioblastoma multiforme. *Neurosurgery* 65(3):463–469; discussion 9–70.(2009) Epub 2009/08/19. doi:10.1227
108. **Coburger J, König RW, Scheuerle A, et al (2014):**
Navigated high frequency ultrasound: Description of technique and first clinical comparison with conventional intracranial ultrasound. *World Neurosurg*
109. **Coburger J, Scheuerle A, Thal DR, Engelke J, et al :**
Linear array ultrasound in low-grade glioma surgery: histology-based assessment of accuracy in comparison to conventional intraoperative ultrasound and intraoperative MRI. *Acta Neurochir (Wien)* (2015)157:195–206, Epub 2015/01/07. doi:10.1007
110. **Unsgaard GK et al :**
An ultrasound-based neuronavigation system, a good solution to the brain-shift problem. (1999) *Neurosurgery* 45(3):696
111. **Unsgaard G et al**
Ability of navigated 3D ultrasound to delineate gliomas and metastases – comparison of image interpretations with histopathology. *Acta Neurochir (Wien)*(2005) 147(12):1259–1269; discussion 1269
112. **Leclercq D et al :**
Comparison of diffusion tensor imaging tractography of language tracts and intraoperative subcortical stimulations. *J Neurosurg* (2010) 112(3):503–511
113. **Giussani C et al :**
Is preoperative functional magnetic resonance imaging reliable for language areas mapping in brain tumor surgery? Review of language functional magnetic resonance imaging and direct cortical stimulation correlation studies.(2010) *Neurosurgery* 66(1):113–120
114. **Dempsey, R. J., Moftakhar, R., & Pozniak, M. :**
Intraoperative Doppler to Measure Cerebrovascular Resistance as a Guide to Complete Resection of Arteriovenous Malformations. Neurosurgery, 55(1), (2004): 155–161. doi:10.1227

115. **Lindegaard K, Grolimund P, Aaslid R, Nornes H:**
Evaluation of cerebral AVM's using transcranial Doppler ultrasound. *J Neurosurg* 65:335-344, 1986.
116. **Rubin J, Hatfield M, Chandler W, Black K, DiPietro M:**
Intracerebral arteriovenous malformations: Intraoperative color Doppler flow imaging. *Radiology* 170:219-222, 1989
117. **Chaddock WM, Flanigan S**
(1985) Intraoperative ultrasound for spinal lesions. *Neurosurgery* DOI: 16:47483
118. **Charles M. Glasier , William M. Chaddock , Patricia E. Burrows :**
Diagnosis of diastematomyelia with high-resolution spinal ultrasound
Child's Nerv Syst (1986) 2:255-257
119. **Mimatsu, K., Kawakami, N., Kato, F., Saito, H., & Sato, K.**
(1992). *Intraoperative ultrasonography of extramedullary spinal tumours. Neuroradiology, 34(5), 440-443.*
120. **Neidert, Hostettler, C.Burkhardt, et al**
The influence of intraoperative resection control modalities on survival following gross total resection of glioblastoma. *Neurosurg. Rev.* 2016, 39, 401-409
121. **Policicchio, D.; Doda, A.; Sgaramella, E.; et al**
Ultrasound-guided brain surgery: Echographic visibility of different pathologies and surgical applications in neurosurgical routine. *Acta. Neurochir. (Wien.)* 2018, 160, 1175-1185
122. **Mursch, K.; Scholz, M.; Brück, W.; Behnke-Mursch, J.**
The value of intraoperative ultrasonography during the resection of relapsed irradiated malignant gliomas in the brain. *Ultrasonography* 2017, 36, 60-65.
123. **Sun, H.; Zhao, J.Z.**
Application of intraoperative ultrasound in neurological surgery. *Minim. Invasive Neurosurg.* 2007, 50, 155-159.
124. **Moiyadi, A., & Shetty, P**
Objective assessment of utility of intraoperative ultrasound in resection of central nervous system tumors: A cost-effective tool for intraoperative navigation in neurosurgery. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, 2(1), 4. (2011).doi:10.4103
125. **Chacko, A.G; Athyal, R.; Unsgaard, G.**
Intraoperative ultrasound in determining the extent of resection of parenchymal brain tumours-A comparative study with computed tomography and histopathology. *Acta. Neurochir. (Wien.)* 2003, 145, 743-748.

126. **Erdogan, N.Tucer, B. Mavli, E.Menkü, A.Kurtsoy:**
Ultrasound guidance in intracranial tumor resection: Correlation with postoperative magnetic resonance findings. *Acta Radiol.* 2005, *46*, 743-749.
127. **Moiyadi, A.Shetty :**
Direct navigated 3D ultrasound for resection of brain tumors: A useful tool for intraoperative image guidance. *Neurosurg. Focus* 2016, *40*, E5.
128. **Hammoud, M. A., Ligon, B. L., Elsouki, R., et al .**
Use of intraoperative ultrasound for localizing tumors and determining the extent of resection: a comparative study with magnetic resonance imaging. *Journal of Neurosurgery*,(1996) *84*(5), 737-741 .
129. **Renner, C.; Lindner, D.; Schneider, J.P.; Meixensberger, J.**
Evaluation of intra-operative ultrasound imaging in brain tumor resection: A prospective study. *Neurol. Res.* 2005, *27*, 351-357.
130. **Serra, C.; Stauffer, A.; Actor, B.et al**
Intraoperative high frequency ultrasound in intracerebral high-grade tumors. *Ultraschall Der Medizin* 2012, *33*, 306-312
131. **Solheim, O.; Selbekk, T.; Jakola, A.S.; Unsgård, G.**
Ultrasound-guided operations in unselected high-grade gliomas-overall results, impact of image quality and patient selection. *Acta. Neurochir. (Wien.)* **2010**, *152*, 1873-1886.
132. **Sweeney, J.F.; Smith, H.; Taplin, A.; Perloff, E.; Adamo, M.A.**
Efficacy of intraoperative ultrasonography in neurosurgical tumor resection. *J. Neurosurg. Pediatr.* **2018**, *27*, 504-510.
133. **Smith, H.; Taplin, A.; Syed, S.; Adamo, M.A.**
Correlation between intraoperative ultrasound and postoperative MRI in pediatric tumor surgery. *J. Neurosurg. Pediatr.* **2016**, *18*, 578-584.
134. **El Beltagy, M. A., Aggag, M., & Kamal, M .**
Role of intraoperative ultrasound in resection of pediatric brain tumors. *Child's Nervous System*, *26*(9), 1189-1193.(2010) doi:10.1007/s00381-010-1091-4
135. **Rohde , Coenen V.A:**
Intraoperative 3-Dimensional Ultrasound for Resection Control During Brain Tumour Removal: Preliminary Results of a Prospective Randomized Study. *Acta. Neurochir. Suppl.*(2011), *109*, 187-190.

136. **Unsgaard, G. Selbekk, T. Brostrup Müller .**
Ability of navigated 3D ultrasound to delineate gliomas and metastases – comparison of image interpretations with histopathology. *Acta Neurochirurgica*, 147(12), 1259–1269. (2005)
doi:10.1007/s00701-005-0624-1
137. **Prada, F.; Perin, A.; Martegani, A. et al**
Intraoperative contrast-enhanced ultrasound for brain tumor surgery. *Neurosurgery* 2014, 74, 542–552.
138. **Arlt, F. Chalopin, C. Müns, A. Meixensberger, J. Lindner**
Intraoperative 3D contrast-enhanced ultrasound (CEUS): A prospective study of 50 patients with brain tumours. *Acta Neurochir. (Wien.)* 2016, 158, 685–694.

قسم الطبيب

أقسم بالله العظيم

أن أراقب الله في مهنتي.

وأن أصون حياة الإنسان في كافة أطوارها في كل الظروف
والأحوال بأدلة وسعي في استنقاذها من الهلاك والمرض

والألم والقلق.

وأن أحفظ للناس كرامتهم، وأستر عورتهم، وأكتم سرهم.

وأن أكون على الدوام من وسائل رحمة الله، بأدلة رعايتي الطبية للقريب والبعيد،
للصالح والطالح، والصديق والعدو.

وأن أثار على طلب العلم، أسخره لنفع الإنسان .. لا لأذاه.

وأن أوقر من علمني، وأعلم من يصغرنني،

وأكون أختاً لكل زميل في المهنة الطبية

متعاونين على البر والتقوى.

وأن تكون حياتي مصداق إيماني في سرّي وعلانيّتي، نقيّة مما يُشِينها تجاه

الله ورسوله والمؤمنين.

والله على ما أقول شهيدا

أطروحة رقم 109

سنة 2020

**فائدة الفحص بالصدى الصوتي أثناء الجراحة في جراحة الأعصاب،
في مستشفى الرازي. دراسة أولية في مصلحة جراحة الأعصاب
ومراجعة المقالات الطبية**

الأطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم 2020/07/22
من طرف

السيدة سارة حدوثة

المزداد في 29 يونيو 1994 بمراكش

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية:

الموجات فوق الصوتية أثناء الجراحة - ورم في المخ -
جراحة الأعصاب - ورم في العمود الفقري

اللجنة

الرئيس

ع. راجي

السيد

أستاذ في جراحة الأنف، الأذن والحنجرة

المشرف

س. آيت بن علي

السيد

أستاذ في جراحة الدماغ والأعصاب

م. والي ادريسي

السيدة

أستاذة في الفحص بالأشعة

ح. غنان

السيد

أستاذ في جراحة الدماغ والأعصاب

الحكام