

كلية الطب والصيدلة وطب الأسنان
FACULTÉ DE MÉDECINE, DE PHARMACIE ET DE MÉDECINE DENTAIRE



جامعة سيدي محمد بن عبد الله - فاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

Année 2022

Thèse N° 116/22

**L'APPORT DE LA NEURONAVIGATION DANS LA PRISE EN CHARGE DES PATHOLOGIES
NEUROCHIRURGICALES:
EXPÉRIENCE DU SERVICE DE NEUROCHIRURGIE AU CHU HASSAN-II DE FES
(à propos de 72 cas)**

THESE

PRESENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 16/03/2022

PAR

Mr. Abdelhamid Bouramtane
Né le 15 Février 1997 à TAZA

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS :

Neuronavigation - Application - Intérêt - Brain shift

JURY

M. CHAKOUR KHALID..... Professeur d' Anatomie	PRÉSIDENT
M. CHAOUI EL FAIZ MOHAMMED Professeur de Neurochirurgie	RAPPORTEUR
M. BENZAGMOUT MOHAMMED..... Professeur de Neurochirurgie	} JUGES
M. LAKHDAR FAYCAL..... Professeur Agrégé de Neurochirurgie	



PLAN

INTRODUCTION	10
PATIENTS ET MÉTHODES :	14
I. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE	15
II. DONNÉES.....	15
1. Données démographiques	15
2. Données radio-cliniques	15
3. Données techniques.....	16
RÉSULTATS :	17
I. Les données épidémiologiques	18
a. Répartition selon les années.....	18
b. Répartition selon l'âge	19
c. Répartition selon le sexe	19
II. Les données radio-cliniques	20
a. Les antécédents	20
b. Les motifs de consultation	21
c. Les cas opérés sous neuro-navigation.....	22
d. Le protocole d'imagerie radiologique	23
III. Les données techniques	24
a. Le système de neuro-navigation utilisé	24
b. Le geste prévu.	25
c. Le type d'anesthésie	25
d. La durée de l'acte chirurgical	25
e. Les incidents per-opératoires.....	25
f. Le post-opératoire immédiat	25
g. La durée de prise en charge	25
IV. Evolution	26
a. Complications post-opératoires	26
b. Reprise chirurgicale	26
c. Traitement adjuvant.....	26
DISCUSSION	27
I. Historique	28
II. Attentes et principe de la neuro-navigation	34
1- Attentes et besoins spécifiques de la neuro-navigation	34
2- Principe de la neuro-navigation	36

III. Matériels et différents systèmes de neuro-navigation	36
IV. Procédure de la neuro-navigation	43
1. L'obtention d'images pré-opératoires ;.....	44
2. Préplanning ;	45
3. L'enregistrement ;.....	46
4. Localisation per-opératoire et chirurgie	50
V. Applications de la neuro-navigation	53
(1) Biopsie stéréotaxique ;.....	53
(2) Tumeur cérébrale ;.....	54
(3) Abscess cérébraux ;.....	75
(4) Hématome intra-parenchymateux ;.....	76
(5) Les malformations A-V ;	77
(6) Chirurgie d'anévrisme ;.....	79
(7) Chirurgie du cavernome ;.....	82
(8) Chirurgie du rachis ;	85
(9) Chirurgie du Parkinson ;	87
(10) Chirurgie de l'épilepsie ;	90
(11) Dérivation du LCR ;	96
(12) Chirurgie des brèches ostéo-méningées	99
VI. Avantages de la neuro-navigation	102
VII. Inconvénients de la neuro-navigation.....	103
VIII. Avenir de la neuro-navigation	109
CONCLUSION	118
ANNEXES	122
RÉSUMÉS.....	124
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	130

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork at each corner. The word "FIGURES" is centered within the frame in a bold, italicized, serif font.

FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des patients opérés selon les années

Figure 2 : Répartition des patients opérés selon l'âge

Figure 3 : Répartition des patients opérés selon le sexe

Figure 4 : l'imagerie réalisée chez les malades

Figure 5 : Répartition selon le geste réalisé

Figure 6 : Le cadre de Zernov

Figure 7 : Le cadre de Horsley et Clarke

Figure 8 : Le cadre de Spiegel et Wycis

Figure 9 : le cadre stéréotaxique de Horsley et Clarke

Figure 10 : Le cadre stéréotaxique de Leksell

Figure 11 : Le cadre de Brown–Roberts–Wells

Figure 12 : Le bras du capteur du système de neuronavigation Watanabe

Figure 13 : système de neuronavigation BrainLab

Figure 14 : systèmes de localisation et marqueurs associés

Figure 15 : les systèmes de neuronavigation

Figure 16 : les étapes de la neuronavigation

Figure 17 : Enregistrement utilisant des marqueurs attachés à la tête du patient.

Figure 18 : vérification après enregistrement

Figure 19 : Enregistrement utilisant des repères anatomiques

Figure 20 : Enregistrement de surface.

Figure 21 : La position de l'instrument chirurgical projetée sur l'écran comme un
pointeur de couleur verte

Figure 22 : Biopsie stéréotaxique guidée par image

Figure 23 : métastase cérébrale : TDM pré-opératoire.

Figure 24 : TDM après résection de la métastase pariétale.

Figure 25 : méningiome pariétal : TDM pré-opératoire.

Figure 26 : coupe axiale après résection du méningiome pariétal.

Figure 27 : Méningiome pétro-clival : TDM pré-opératoire.

Figure 28 : TDM après résection du méningiome pétro-clival

Figure 29 : TDM pré-opératoire : kyste colloïde du troisième ventricule.

Figure 30 : TDM pré-opératoire : processus fronto-pariétal gauche.

Figure 31 : IRM post-opératoire montrant une excision complète

Figure 32 : TDM pré-opératoire : macro-adénome hypophysaire.

Figure 33 : IRM après résection de l'adénome.

Figure 34 : TDM pré-opératoire : cavernome fronto-temporale gauche.

Figure 35 : IRM après résection du Cavernome.

Figure 36 : TDM pré-opératoire d'un patient avec épilepsie réfractaire.

Figure 37 : TDM Coupes axiales après lobectomie temporale gauche.

Figure 38 : TDM pré-opératoire : processus temporelle

Figure 39 : TDM coupes axiales après résection du processus temporelle

Figure 40 : TDM pré-opératoire : processus pariétal

Figure 41 : TDM coupes axiales après résection du processus pariétal.

Figure 42 : TDM pré-opératoire : BOM

Figure 43 : image illustrative du phénomène du Brain Shift

Figure 44 : Démonstration du déplacement du cerveau causé par la craniotomie

Figure 45 : Salle d'opération multimodale

Figure 46 : Bloc opératoire équipé d'une IRM

Figure 47 : Echographie per-opératoire

Figure 48 : simulateur 3D couplé à la neuronavigation

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : antécédents médico-chirurgicaux

Tableau 2 : les motifs de consultations

Tableau 3 : pathologies opérées sous neuronavigation

Tableau 4 : les durées d'hospitalisation des patients

Tableau 5 : complications post-opératoires

A decorative horizontal frame with ornate, symmetrical scrollwork at each end. Inside the frame, the word "ABBREVIATIONS" is written in a bold, italicized, serif font.

ABBREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

ACA	: artère cérébrale antérieur
ACM	: artère cérébrale moyenne
ATCD	: antécédents
AVCI	: accident vasculaire cérébrale ischémique
BOM	: brèche ostéo-méningée
BST	: biopsie stéréotaxique
CG	: culots globulaire
DACA	: artère cérébrale antérieur distale
DVE	: dérivation ventriculaire externe
DVP	: dérivation ventriculo-péritonéale
EEG	: électroencéphalogramme
EM	: électromagnétique
FLE	: erreurs de localisation fiduciaire
GH	: Growth hormone
HIP	: hématome intra-parenchymateux
HTA	: hypertension artérielle
HTIC	: hypertension intracrânienne
IHA	: insuffisance anté-hypophysaire
IRMf	: imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
IRMi	: imagerie par résonance magnétique intra-opératoire
LCR	: liquide céphalo-rachidien
LED	: diodes électroluminescentes
MAV	: malformation artério-veineuse
MEG	: Magnétoencéphalographie
SCP	: stimulation cérébrale profonde
SNN	: souffrance néonatale
SPECT	: tomographie par émission monophotonique
TC	: traumatisme crânien
TDMi	: tomodensitométrie intra-opératoire
TEP	: tomographie par émission de positons
USi	: échographie intra-opératoire

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork at each corner. The word "INTRODUCTION" is centered within the frame in a bold, italicized, serif font.

INTRODUCTION

La neurochirurgie est un exercice intellectuel et physique dans l'espace tridimensionnel (3D). Depuis bien longtemps, des pionniers, des médecins, des scientifiques et des partenaires industriels unissent leurs efforts en vue de mettre au point des instruments capables de limiter le risque de la navigation dans l'espace tridimensionnel du cerveau lors des interventions. Le but ultime consiste à offrir au neurochirurgien une précision et une sécurité afin qu'il puisse atteindre des régions cérébrales inaccessibles autrement et traiter des affections incurables auparavant. C'est dans cette optique que les systèmes de navigation en neurochirurgie actuels ont vu le jour au début des années 1990.[1]

La neuro-navigation relève de la chirurgie assistée par ordinateur. C'est un système de guidage et de navigation per-opératoire, généralement utilisé pour suivre les outils chirurgicaux et les localiser par rapport à l'anatomie du patient. Cette technique permet de visualiser en 3D le cerveau ou la colonne vertébrale du patient.[2]

Au début du 20e siècle, le diagnostic et la localisation des lésions ont été possibles, presque uniquement, grâce à l'étude des symptômes neurologiques sans aucune possibilité de se référer aux images radiologiques.

La première technique décrite par Dandy en 1918, a été la ventriculographie par injection d'air et plus tard, de substance de contraste. Cette dernière est pompée dans les ventricules afin de permettre leur visualisation sur la radiographie crânienne. Les lésions du voisinage des ventricules, quant à elles, peuvent être localisées en fonction de la forme et du déplacement des ventricules. Plus tard en 1927, Egas Moniz a introduit l'angiographie. Cette technique a permis la localisation des lésions intracérébrales, directement en visualisant différentes malformations vasculaires mais aussi indirectement, en étudiant le déplacement des vaisseaux par rapport à l'anatomie normale dans différents lobes cérébraux. La visualisation directe du cerveau n'a été possible qu'après l'introduction de la tomographie par ordinateur (CT) en 1973, par Hounsfield.[3]

Le développement des systèmes de neuro-navigation a été une avancée technique majeure en neurochirurgie, en particulier pour les petites lésions localisées dans les régions profondes ou sous-corticales où les repères anatomiques ne sont pas disponibles. De tels systèmes facilitent la navigation vers des lésions étroitement focalisées. Ceci permet d'éviter la destruction des zones cérébrales éloquentes, en particulier lorsque l'anatomie est déformée par des tumeurs cérébrales, un œdème ou une hémorragie. [4]

En pratique, la neuro-navigation limite le rasage du crâne, réduit la taille de l'incision et du volet crânien. La précision du geste augmente et la chirurgie devient moins invasive. Certaines lésions invisibles (par exemple, des lésions sous-corticales) sont repérées avec grande précision. Il en est de même des limites – parfois très difficiles à repérer visuellement – entre le tissu tumoral (surtout pour les tumeurs gliales de bas grade) et le parenchyme normal.

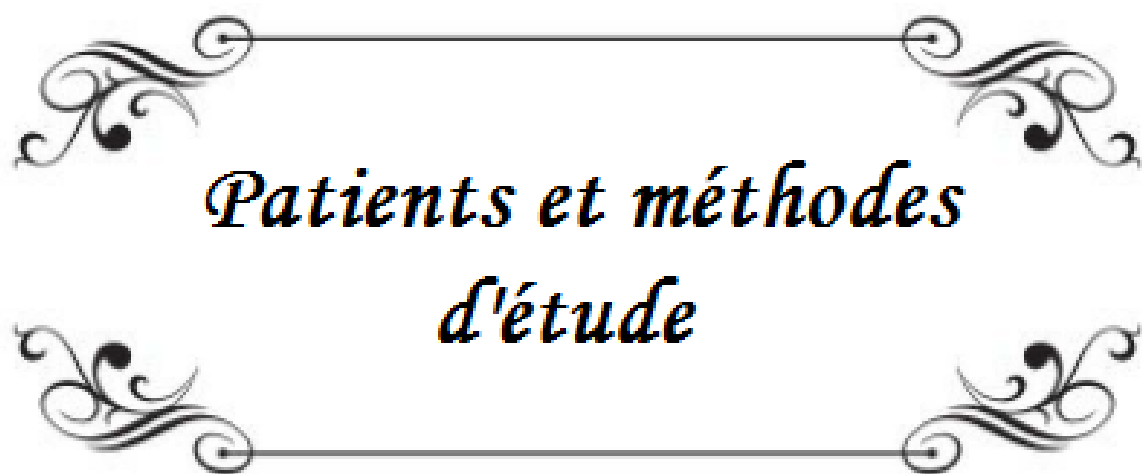
Pour le patient, il en résulte une amélioration du traitement ainsi qu'une réduction de la durée de l'intervention et de l'hospitalisation.

En résumé, la simulation pré-opératoire et le guidage intra-opératoire permettent le traitement chirurgical des lésions qui, par le passé, n'ont pas été opérables ou seulement avec des risques importants. [5]

Bien que très précise, cette méthode présente un inconvénient majeur, puisqu'il s'agit de superposer une situation dynamique à des images qui ne correspondent plus vraiment à la réalité : si l'enceinte crânienne n'est pas déformable, il n'en va pas de même du parenchyme cérébral qui, lui est soumis à plusieurs contraintes, à commencer par la gravité. C'est ce que l'on appelle le "brain shift". Durant l'opération, l'élimination du liquide céphalo-rachidien (surtout en cas d'ouverture du système ventriculaire), la réduction progressive du volume de la lésion et la modification du parenchyme normal accentuent encore ce phénomène et

modifient progressivement les repères anatomiques et pathologiques visibles sur l'imagerie pré-opératoire. Les rapports anatomiques changent au cours de l'opération. Ainsi, le cerveau s'affaisse dès l'ouverture de la boîte crânienne. La pertinence des images préopératoires se réduit donc au fur et à mesure. Il se crée alors inévitablement une perte de précision liée au décalage entre la réalité chirurgicale et les images acquises préalablement. Ceci, rend indispensable de corriger la neuro-navigation par une actualisation des données au cours de l'intervention.[5]

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'apport de la neuro-navigation dans la prise en charge des pathologies neurochirurgicales, selon l'expérience de l'équipe de neurochirurgie au CHU Hassan II de Fès.



*Patients et méthodes
d'étude*

I. Caractéristiques de l'étude :

Il s'agit d'une étude rétrospective et exhaustive des dossiers de 72 patients opérés sous neuro-navigation au sein du service de neurochirurgie au CHU Hassan II de Fès, durant la période du 7 février 2012 au 7 juillet 2021.

II. Données :

Sont inclus dans notre étude tous les patients ayant bénéficié d'une chirurgie assistée par ordinateur avec des dossiers complets.

Les patients ont été collectés à partir des données enregistrées dans le système de neuro-navigation du service de neurochirurgie.

Le recueil des données a été fait à partir :

- Des dossiers d'hospitalisations (dans le système HOSIX).
- Des comptes rendus opératoires.

L'étude a été réalisée à l'aide d'une fiche d'exploitation pré-établie qui renseigne sur :

1) Les données démographiques :

- L'âge
- Le sexe

2) Les données radio-cliniques :

- Les antécédents personnels.
- Les signes cliniques.
- Le bilan biologique.
- Le bilan radiologique.

3) Les données techniques :

- La date de l'intervention
- Le type de l'intervention
- La durée de l'intervention
- Les incidents per-opératoires
- Les complications post-opératoires
- La durée du séjour
- Le traitement médical
- Le traitement adjuvant

(Voir annexe p: 123.)

A decorative horizontal frame with ornate, symmetrical scrollwork at each end. The word "RÉSULTATS" is centered within the frame in a bold, italicized, serif font.

RÉSULTATS

I. Les Données épidémiologiques :

a. Répartition selon les années :

La figure 1 représente la répartition du nombre de patients opérés sous neuro-navigation au sein du CHU de Fès. Neuf patients ont été opérés en 2012, cinq en 2013, quinze en 2014, neuf en 2015, douze en 2016, huit en 2017, six en 2018, trois en 2019 et cinq en 2021.

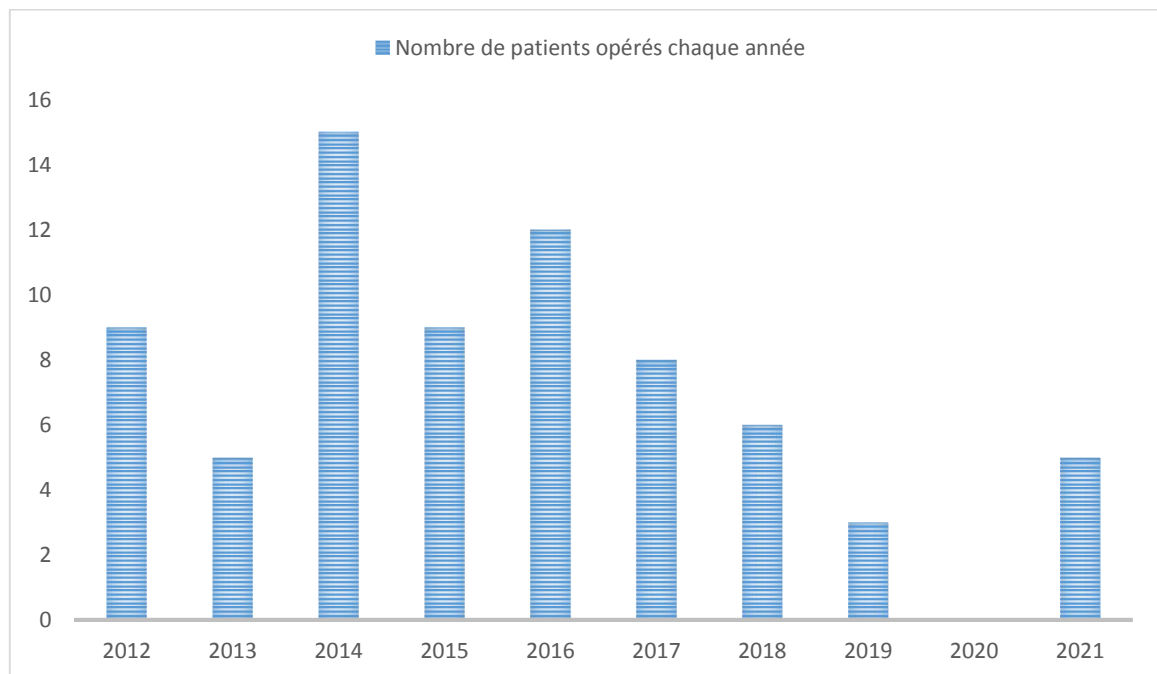


Figure 1 : répartition des patients opérés sous neuro-navigation au CHU Hassan II entre 2012 et 2021.

b. Répartition selon l'âge :

Dans cette étude, l'âge des patients est compris entre 5 et 80 ans avec une moyenne d'âge de 40 ans (figure 2).

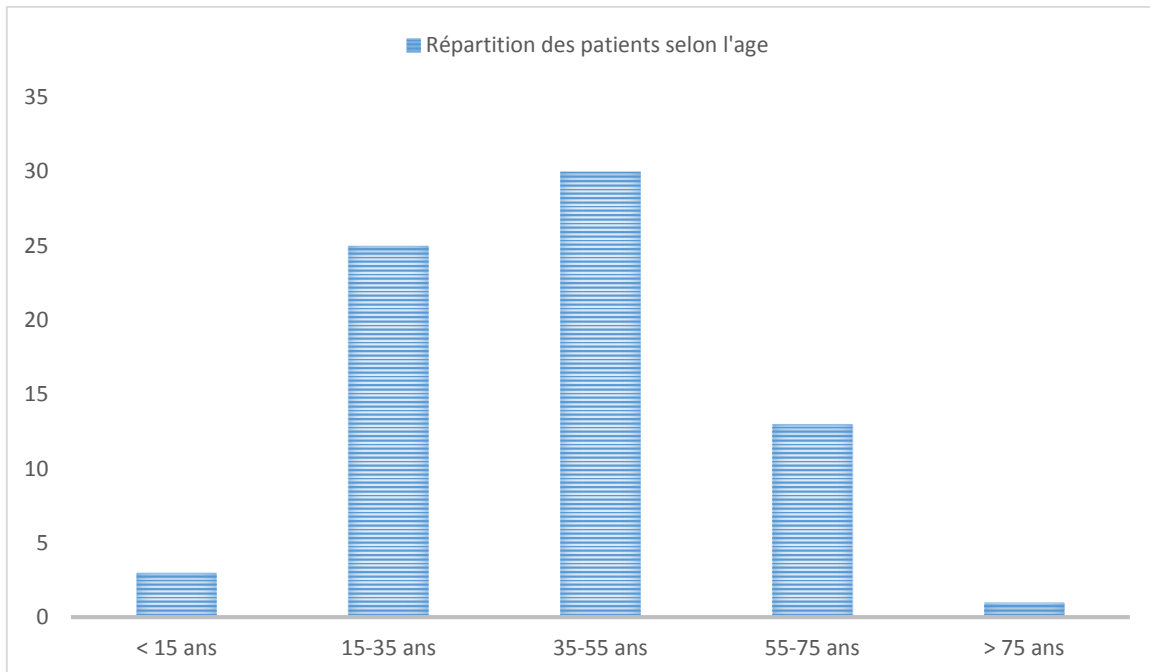


Figure 2 : Répartition des patients opérés selon l'âge

c. Répartition selon le sexe :

Dans notre étude, le sex-ratio est de 0,5 sans prédominance de sexe (figure 3).

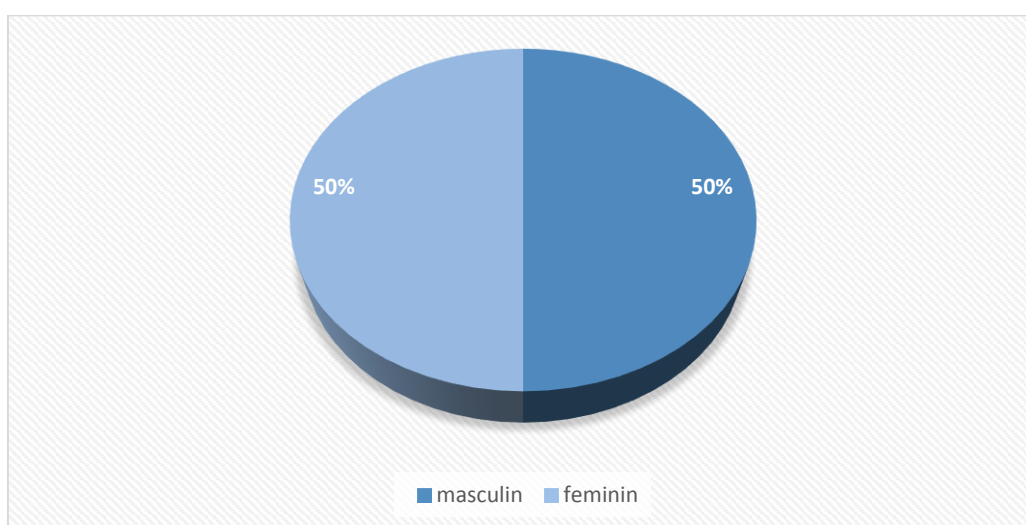


Figure 3 : Répartition des patients opérés selon le sexe.

II. Les données radio-cliniques :

a. Les antécédents :

Trente-huit patients dans notre série n'ont aucun ATCD médico-chirurgical.

Le tableau suivant résume les différents antécédents médico-chirurgicaux du reste des patients :

Tableau 1 : antécédents médico-chirurgicaux des patients

Antécédents	Nombre de cas
DIABÈTE	8
HTA	6
TC	4
CARDIOPATHIE	1
PARALYSIE FACIALE CENTRALE	1
MYOPIE	1
CANCER EXTRA-NEUROLOGIQUE	3
APPENDICECTOMIE	1
STÉNOSE CHOANALE	1
MYRINGOPLASTIE	1
NÉVRALGIE DU TRIJUMEAU	1
ÉPILEPSIE	9
SOUFFRANCE NÉONATALE	2
GOITRE	2

b. Les motifs de consultation :

Les motifs de consultation ont été dominés par les céphalées, les troubles visuels, les crises convulsives et le syndrome d'HTIC.

Le tableau suivant résume les différents motifs de consultation dans la série étudiée :

Tableau 2 : les motifs de consultation des patients dans notre série

Motifs de consultation révélant la maladie	Nombre de cas
Céphalées	17
Troubles visuels	17
Crise convulsive	16
Épilepsie réfractaire	10
Trouble de conscience	3
Syndrome d'HTIC	14
Déficit moteur	7
Syndrome de Cushing	2
Acromégalie	6
Trouble de la marche	1
Vertige	2
Bilan d'extension de cancer	1
Trouble de comportement	1
Rhinorrhée	1
Aménorrhée secondaire	4

c. Cas opérés sous neuro-navigation :

Dans notre série, vingt-neuf patients ont été opérés pour adénome de l'hypophyse, vingt-cinq patients pour des tumeurs cérébrales dont trois métastases, neuf patients pour une épilepsie réfractaire de différentes causes (sclérose de l'hippocampe, lésion séquellaire, tumeur gliale (chez quatre patients), sarcoïdose, IRM normale), quatre patients pour un cavernome, quatre patients pour un kyste colloïde et une patiente pour une brèche ostéo-méningée.

Le tableau suivant résume les différentes pathologies opérées sous neuro-navigation :

Tableau 3 : les pathologies opérées sous neuro-navigation

Pathologies opérées sous neuro-navigation	Nombre de cas
Adénome hypophysaire	29
Tumeur cérébrale primitive	22
Métastase cérébrale	3
Épilepsie réfractaire	9
Cavernome	4
Brèche ostéo-méningée	1
Kyste colloïde	4
TOTALE	72

d. Protocole d'imagerie radiologique :

L'IRM a été réalisée chez tous les patients et la TDM chez soixante-huit patients (figure 4).

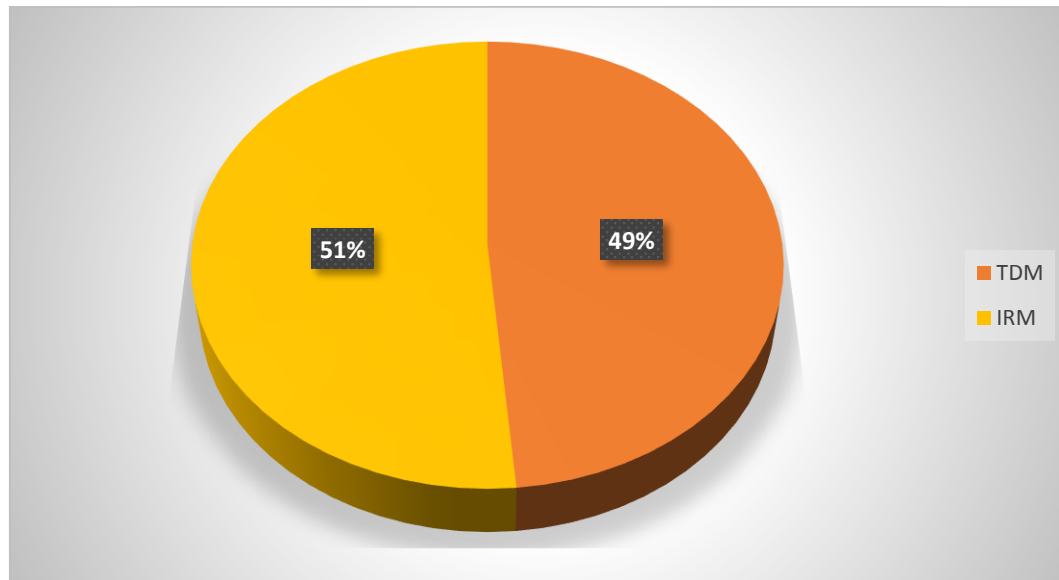


Figure 4 : l'imagerie réalisée chez les malades

III. Les données techniques :

a. Le système de neuro-navigation utilisé :

Dans notre étude, tous les patients ont été opérés à l'aide du système de neuro-navigation BrainLAB Kolibri 2.0. Ce système est composé de :

- Poste de travail
- Chariot Kolibri
- Écran tactile
- Caméra infrarouge pour suivi optique + support mobile

b. Le geste prévu :

Les gestes réalisés à l'aide du système de neuro-navigation varient en fonction de l'indication (exérèse tumorale, biopsie tumorale, exérèse de cavernome, fermeture de BOM, lobectomie temporale, aspiration de kyste).

Le graphique suivant représente les différents gestes réalisés chez les malades :

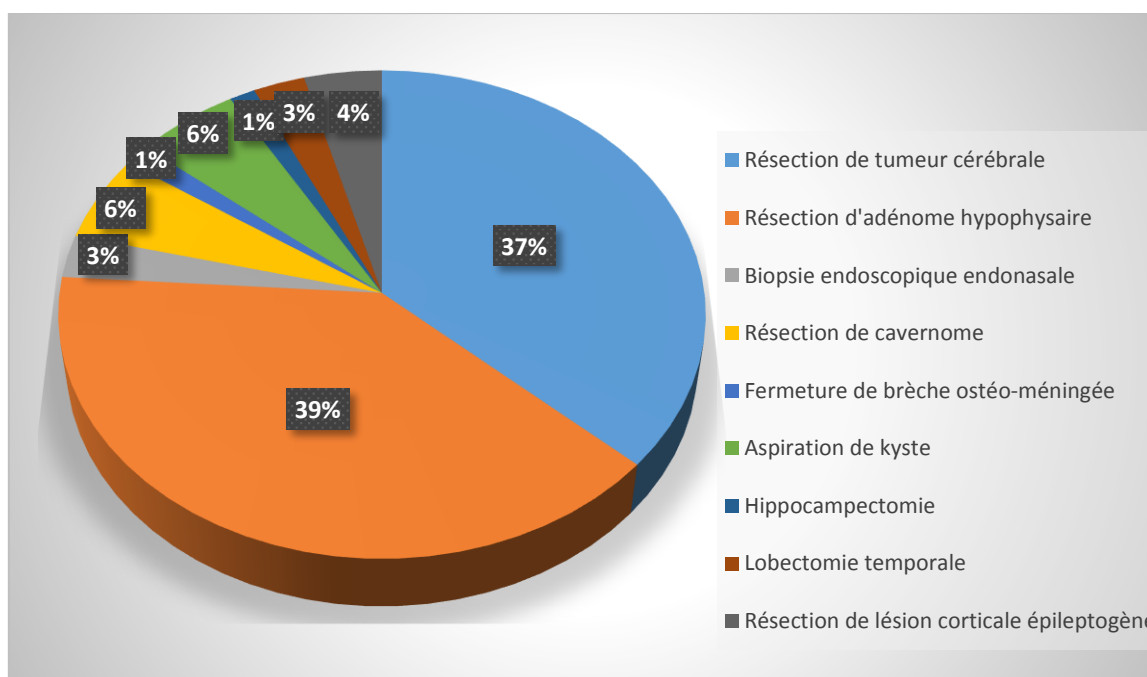


Figure 5 : Répartition des patients selon le geste réalisé

c. Type d'anesthésie :

Tous les patients inclus dans cette étude ont été opérés sous anesthésie générale.

d. Durée de l'acte chirurgical :

La durée de l'acte chirurgical varie entre 1h50min et 12heures en fonction de l'indication avec une moyenne de 4h 20min.

e. Les incidents per-opératoires :

Les gestes opératoires se sont déroulés avec succès sans incident per-opératoire.

f. Le post-opératoire immédiat :

Le post-opératoire immédiat a été satisfaisant chez soixante-et-onze cas. Un réveil pathologique fait de crises convulsives a été observé chez un seul cas.

g. La durée de prise en charge :

La durée de prise en charge varie en fonction de l'indication chirurgicale et du geste réalisé.

Le tableau suivant représente la durée de l'hospitalisation :

Tableau 4 : les durées d'hospitalisation des patients

Durée moyenne du séjour pré-opératoire	7 jours [2-15]
Durée moyenne du séjour en réanimation	2.2 jours [1-7]
Durée moyenne du séjour hospitalier total	8 jours [5-20]

IV. Evolution :

a. Complications post-opératoires :

Les complications post-opératoires des adénomes hypophysaires ont été dominées par le diabète insipide et l'IAH. Le tableau suivant résume les complications post-opératoires de l'ensemble des cas opérés :

Tableau 5 : les complications post-opératoires

Complications	Nombre de cas
Diabète insipide	7
Hématome du foyer opératoire	4
Méningite	1
IAH	10
Altération du champ visuel	2
Déficit moteur	3
Dysarthrie	1
Décès	3

b. Reprise chirurgicale :

Deux patients ont nécessité une reprise chirurgicale pour évacuation d'hématome du site opératoire. Une patiente, ayant bénéficié d'une résection incomplète d'astrocytome de bas grade, a bénéficié d'une chirurgie éveillée en France. Un patient a été repris pour une récurrence après résection complète d'un astrocytome de bas grade.

c. Traitement adjuvant :

Dix-huit patients ont nécessité un traitement adjuvant par radiothérapie et trois patients ont bénéficié d'une chimiothérapie.

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork at each corner. The word "DISCUSSION" is centered within the frame in a bold, italicized, serif font.

DISCUSSION

I. Historique :

L'histoire de la neuro-navigation ou encore chirurgie guidée par image est fortement liée à celle de la neurochirurgie et à l'évolution des techniques de navigation en général. [1]

La première utilisation enregistrée d'un appareil de localisation des structures intracrâniennes chez l'homme date de 1889. Cet appareil a été créé par Dr Zernov, Chirurgien et professeur d'anatomie à l'Université de Moscou-Russie. L'appareil est constitué d'un cadre en aluminium fixé au crâne, appelé «encéphalomètre» (figure 6). Celui-ci permet de prédire la topographie du cerveau en utilisant des points de repère anatomiques superficiels. Cet appareil a d'abord été utilisé avec succès en 1889 pour aspirer un abcès cérébral d'un patient après un traumatisme cérébral. Cependant, la prédiction de la topographie du cerveau en se basant uniquement sur les repères anatomiques superficiels a été limitée dans son efficacité en raison des variations inter-individuelles.

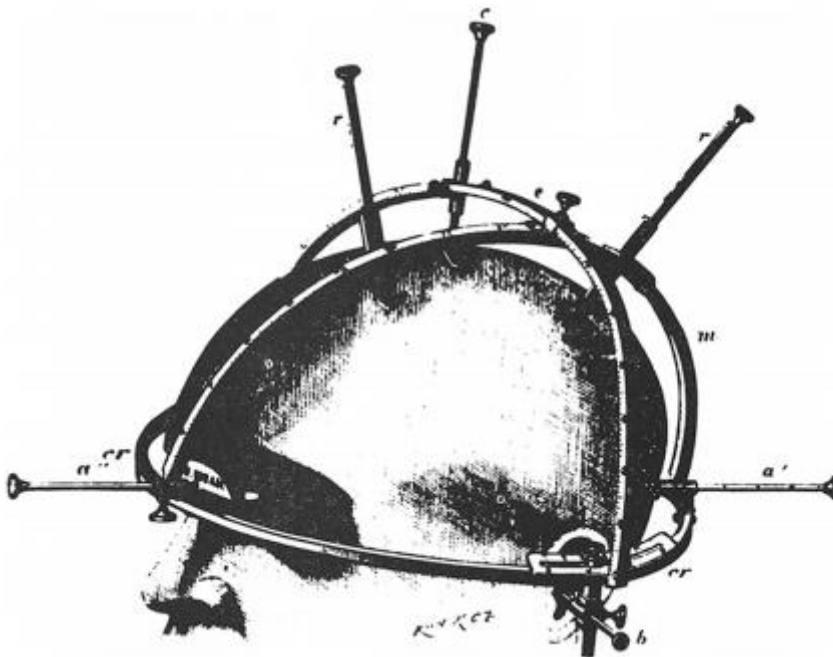


Figure 6. Le cadre de Zernov, créé en 1889, utilisant des repères anatomiques superficiels pour prédire l'emplacement des cibles intracrâniennes. [6]

En 1908, Dr Horsley, Professeur de chirurgie et Robert Clarke, physiologiste et ingénieur à l'Université Collège de Londres en Angleterre, ont été les premiers à créer un cadre stéréotaxique (figure 7). Ce cadre utilise des formules mathématiques basées sur des coordonnées cartésiennes pour identifier l'emplacement des cibles intracrâniennes. Ainsi, il a été possible de diriger avec précision une sonde chirurgicale à une cible intracrânienne définie. Cependant, bien que plus précis que l'encéphalomètre de Zernov, cet appareil n'a jamais été utilisé sur l'être humain.



Figure 7. Le cadre de Horsley et Clarke utilisant des calculs stéréotaxiques basés sur les coordonnées cartésiennes pour localiser les cibles intracrâniennes dans les expérimentations animales. [6]

Ce n'était qu'en 1946 que le Dr Spiegel et Dr Wycis, deux neurochirurgiens américains, ont effectué une chirurgie stéréotaxique sur des humains, utilisant la ventriculographie pour réaliser une thalamotomie (figure 8).

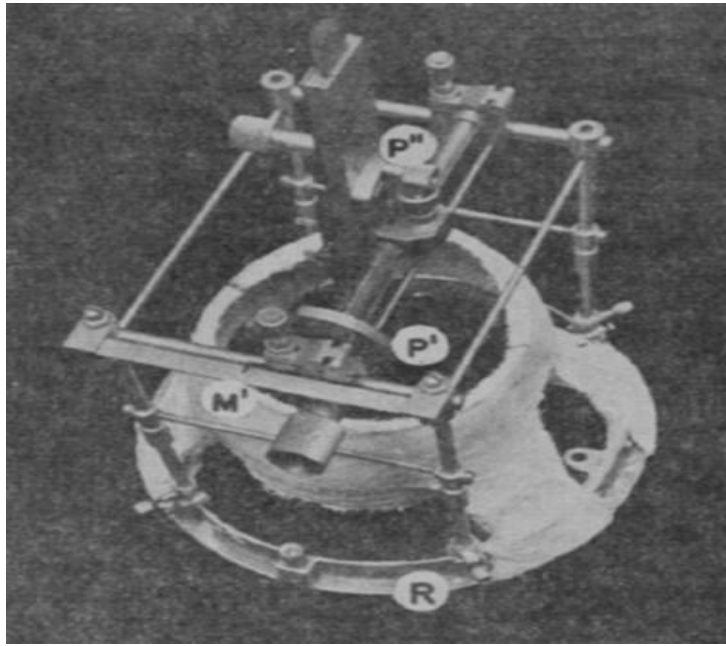


Figure 8. Le cadre de Spiegel et Wycis a été utilisé pour effectuer les premières opérations stéréotaxiques chez l'homme.[6]

L'utilisation des cadres stéréotaxiques a ensuite été considérablement élargie par Dr. Lars Leksell, Professeur de neurochirurgie à l'institut Karolinska à Stockholm-Suède. Le Dr. Leksell a modifié le dispositif de Horsley et Clarke pour l'adapter à la neurochirurgie (figure 10). Ce système a été légèrement différent de celui de Spiegel et Wycis car des coordonnées polaires sont utilisées au lieu des coordonnées cartésiennes.

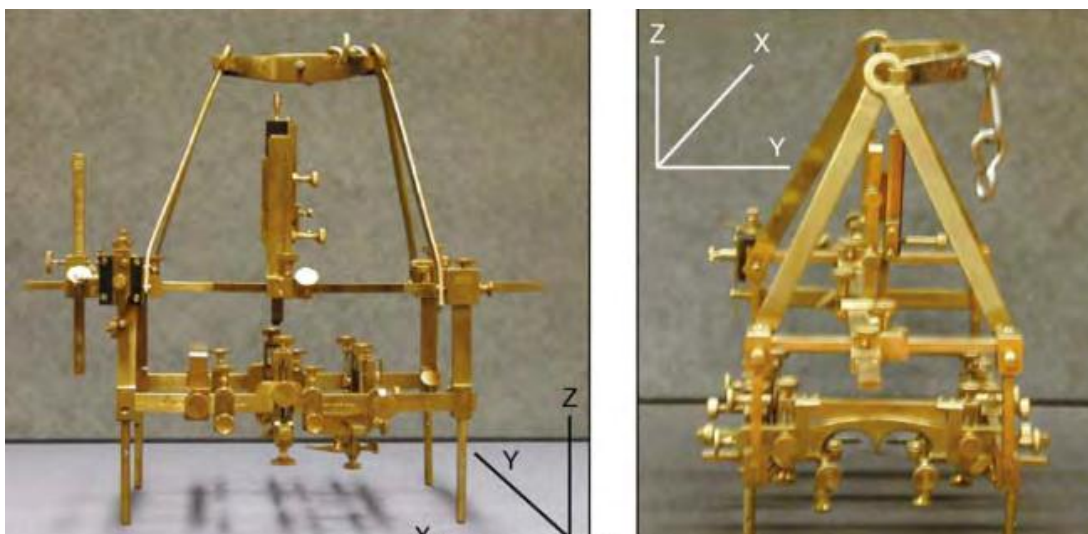


Figure 9. Deuxième appareil stéréotaxique de Horsley et Clark [18]

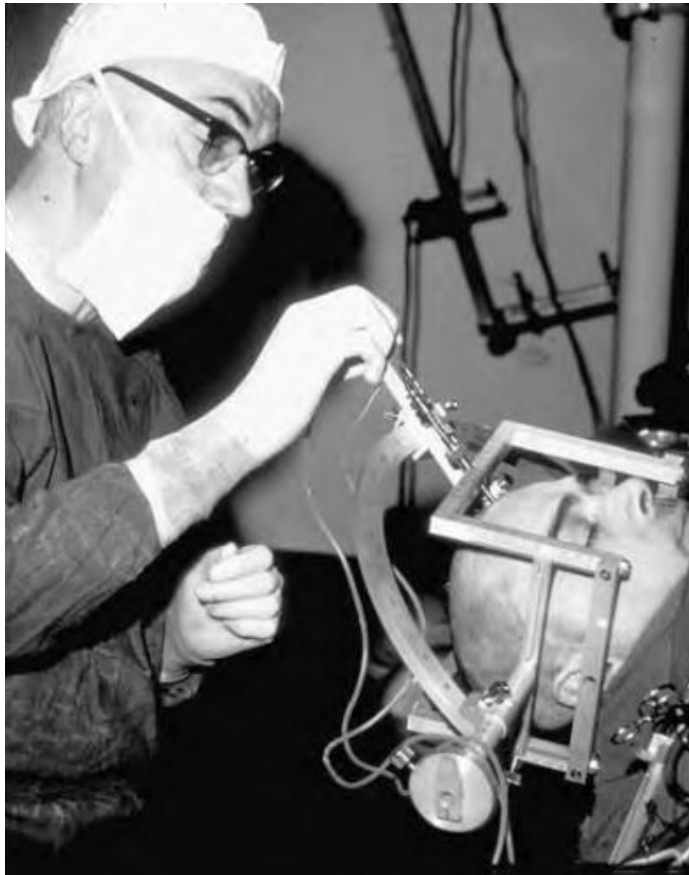


Figure 10. Leksell au début des années 1960 avec la deuxième génération de son cadre stéréotaxique [18]

L'utilisation clinique des cadres stéréotaxiques dans la neurochirurgie a continué de se développer dans les années 1950 et 1960. En effet, durant cette période, des procédures pour le traitement des troubles du mouvement, la douleur, l'épilepsie et les troubles psychiatriques sont apparues.

Pendant les années 1970, les techniques d'imagerie tomographiques en 3D ont été introduites. Des images tridimensionnelles détaillées de l'espace intracrânien ont été alors disponibles pour la première fois, et le nombre de procédures effectuées par les neurochirurgiens a augmenté significativement.

En 1978, Dr. R.A. Brown a développé un cadre de tête stéréotaxique qui permet, à travers l'utilisation d'un système de localisation fixé au patient, de localiser n'importe quel point sur le scanner. Le système de localisation est fixé au patient pendant l'acquisition de l'image et la chirurgie. Ce cadre de tête stéréotaxique a été

ensuite incorporé dans l'instrument stéréotaxique Brown–Roberts–Wells qui comportait six tiges en plastique visibles radiographiquement et servant comme points de repère sur le scanner. Un ordinateur a été utilisé pour marquer l'emplacement des tiges sur chaque coupe du scanner. Ces informations sont ensuite utilisées pour relier le système de coordonnées de la coupe au système de coordonnées du cadre. Un curseur sur l'ordinateur a été utilisé pour marquer l'emplacement de la cible et de la voie d'insertion d'une sonde chirurgicale fixée au cadre. Les chirurgiens ont été ensuite capables de visualiser la trajectoire de la sonde à travers les coupes du scanner pour déterminer si c'était une trajectoire satisfaisante.

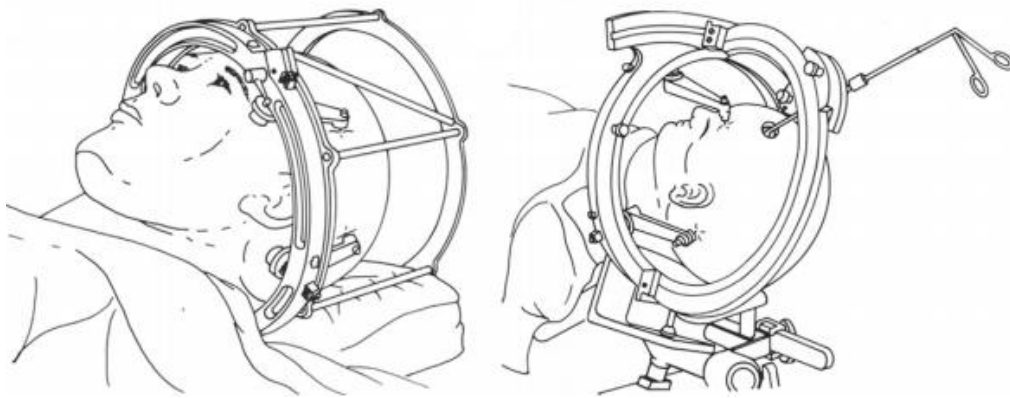


Figure 11. Le cadre de Brown–Roberts–Wells[6]

Bien que les systèmes stéréotaxiques aient amélioré la localisation chirurgicale des cibles intracrâniennes, le cadre lui-même a été un inconvénient majeur. En effet, le cadre doit rester fixé à la tête du patient pendant toute l'intervention chirurgicale. Ceci encombre mécaniquement le champ opératoire et limite potentiellement la dextérité chirurgicale. De plus, le patient est exposé à un risque infectieux majeur.

Afin de pallier les problèmes liés à la présence du cadre sur les systèmes de neuro–navigation, un premier système sans cadre a été créé en 1987 par Dr Eiju Watanabe, neurochirurgien à l'Université de Tokyo–Japon (figure 12). Ce système a été utilisé pour enregistrer les coordonnées 3D de la tête du patient avant de commencer la chirurgie. Il a également permis aux chirurgiens d'obtenir des informations

positionnelles en temps réels. Celles-ci s'affichent directement sur les images TDM et IRM pré-opératoires de l'ordinateur. Bien qu'il n'était pas aussi grand et obstruant que les systèmes de navigation stéréotaxiques basés sur des cadres, le système de Watanabe limitait toujours la dextérité et la technique chirurgicale.[6]

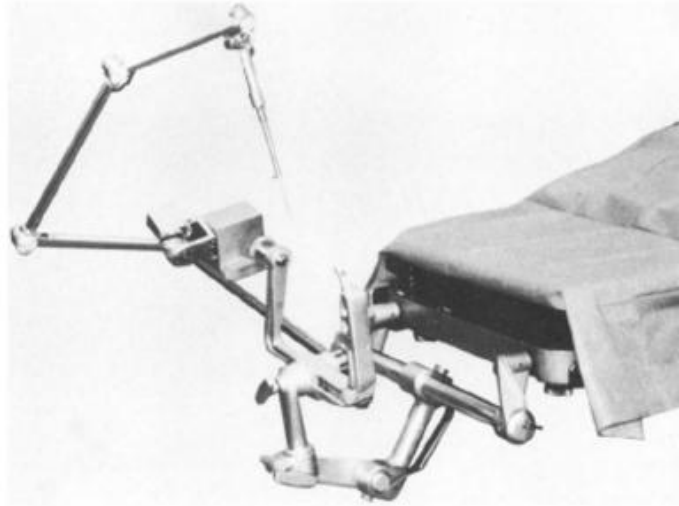


Figure 12. Le bras du capteur dans le système de neuro-navigation Watanabe attaché au cadre Mayfield. [6]

Au début des années 1990, les systèmes de positionnement optiques et électromagnétiques ont commencé à se développer.

En 1992, Heilbrun et al. ont utilisé des caméras ordinaires et infrarouges basées sur le principe de la vision industrielle trinoculaire et binoculaire pour l'orientation stéréotaxique. Cette méthode a une grande précision permettant de suivre plusieurs cibles. Cependant, elle a été facilement perturbée par la lumière de fond et le rayonnement.

La même année, Kato a utilisé des petits capteurs de champ magnétique pour tester la position 3D et l'azimut des sondes. Il a introduit les techniques stéréotaxiques TDM/IRM dans la neurochirurgie ouverte traditionnelle, où le détecteur de champ magnétique peut être placé n'importe où. Mais, l'inconvénient de ce dispositif a été la forte influence du métal sur le système.

Depuis lors, les systèmes de neuro-navigation se sont développés rapidement, réalisant progressivement la fonction de navigation per-opératoire en temps réel.[7]

Dès les années 2000, environ 800 systèmes de navigation chirurgicale, toutes applications confondues, ont été présents sur le marché.

Le progrès de l'informatique, l'ère du numérique et de la modélisation 3D, ainsi que le développement des réseaux informatiques et des techniques de détection ont suscité une avancée formidable vers les systèmes actuels dépourvu du cadre stéréotaxique. Il est alors possible de matérialiser en temps réel la position des instruments chirurgicaux, les cibles opératoires et les zones à risque tout en reconstruisant l'image des régions traversées, afin de limiter les risques de lésions graves.[1]

Le nouveau GPS du neurochirurgien est né.

II. Attentes et principe de la neuro-navigation :

1. Attentes et besoins spécifiques de la neuro-navigation :

Dès le début de la neurochirurgie moderne (fin du XIXe siècle), les progrès de la neurochirurgie ont été étroitement liés aux possibilités de localisation intracrânienne. La connaissance des relations spatiales de la lésion à l'intérieur du crâne et le développement d'approches mini-invasives ont une contribution essentielle à la diminution de la mortalité et de la morbidité dans les procédures neurochirurgicales.

La localisation signifie la réponse à deux questions :

1. Où se situent les lésions ou la zone fonctionnelle à l'intérieur du crâne ?
2. Comment peut-on les identifier pendant l'intervention chirurgicale ?

La réponse à la première question a été possible grâce au développement des techniques modernes de neuro-imagerie (TDM, IRM).

La réponse à la deuxième question est plus complexe et a eu une évolution plus longue.

La technique de localisation per-opératoire, y compris la position de la craniotomie, a été basée sur la connaissance des repères osseux spécifiques du crâne, comme la suture coronaire, la protubérance occipitale externe, le ptériorion, etc., et sur la capacité du neurochirurgien à effectuer une orientation 3D. Après ouverture du crâne, d'autres repères ont été représentés par d'autres structures anatomiques : nerfs, vaisseaux et repères osseux spécifiques. Cette méthode de localisation « anatomique » a été et, est toujours considérée comme le « golden standard » avant et après l'ère TDM/IRM. Cependant, la maîtrise des repères anatomiques ne permet pas toujours aux chirurgiens de se localiser parfaitement, surtout lorsqu'il s'agit d'une lésion tumorale géante qui modifie les repères connus.[8]

D'une manière générale, la neuro-navigation permet :

- La simulation et la préparation de l'acte chirurgical sur station de travail. Le chirurgien peut visualiser plus concrètement son intervention. Il peut également avoir une planification exacte de la craniotomie et de la trajectoire chirurgicale vers les petites lésions sous-corticales ciblées.
- La définition des marges tumorales et des limites de résection des tumeurs cérébrales.
- La localisation des structures vasculaires encaissées et déplacées dans les lésions de la base du crâne, et de l'extension tumorale dans diverses crevasses cérébrales.
- L'orientation spatiale dans le système ventriculaire au cours de la chirurgie endoscopique.

- La localisation des zones éloquentes grâce à l'incorporation des informations obtenues par IRMf et MEG dans les données des images utilisées pour la neuro-navigation. Cette localisation permet de planifier une trajectoire évitant les régions éloquentes et minimisant la morbidité de la procédure.
- Lors de la chirurgie de l'épilepsie : l'appréciation du bord postérieur de la résection temporale antérieure, la localisation de l'hippocampe et la prédiction de la longueur de la division du corps calleux lors d'une callosotomie. [9]
- Le placement des vis pédiculaires dans les régions cervicales, thoraciques et lombaires en minimisant le risque de blessure de l'artère vertébrale et des racines nerveuses.[10]

2. Principe de la neuro-navigation :

La neuro-navigation est essentiellement une façon de cartographier le cerveau afin de pouvoir mieux repérer l'anatomie cérébrale (morphologique, fonctionnelle et vasculaire) et la lésion à opérer.

En premier lieu sont acquises des images TDM ou IRM, le plus souvent la veille de l'intervention. L'espace cérébral n'est plus matérialisé comme en stéréotaxie par un cadre, élément contraignant, mais par des marqueurs. Des vis fixées à la boîte crânienne ou des points de référence anatomiques peuvent être utilisés. Mais, le plus souvent on a recours à des pastilles qui sont collées à la peau du patient. Ensuite, un ou plusieurs examens d'imagerie (IRM, scanner, angiographie, etc.) sont effectués et les données transférées sur une station informatique de pré-planning via CD-Rom, clé USB ou réseau local, afin de réaliser la reconstruction 3D.

Une planification préopératoire peut être réalisée sur une station de travail dédiée, qui permet d'intégrer plusieurs modalités d'imagerie et de préparer une stratégie opératoire. Après avoir contrôlé la validité des images, le neurochirurgien

réalise un contournage de la cible et des zones à risque. Ensuite, il définit la voie d'abord, la trajectoire qu'il va suivre pendant l'intervention, ainsi que la dimension de l'ouverture crânienne. Il peut visualiser les différentes structures rencontrées le long de sa descente chirurgicale et vérifier la faisabilité de ses gestes. Cette phase de planning est jugée primordiale, car elle conditionne le bon déroulement de l'intervention. Elle correspond à une phase de simulation de l'acte chirurgical. Sa durée est variable et dépend essentiellement du type de lésion à traiter. La station de travail est également un outil pédagogique qui aide le jeune chirurgien à anticiper virtuellement l'intervention.

Après avoir mis en correspondance la position du patient et les données du neuro-navigateur par une transformation mathématique, l'acte chirurgical est initié.

Les instruments sont repérés par le système de localisation. Sur l'écran de la station informatique apparaissent en temps réel la position de l'instrument et les données du pré-planning (trajectoire et contours) en superposition aux images préopératoires. Il existe plusieurs sondes de repérage permettant d'utiliser un simple pointeur, une aiguille à biopsie, le microscope opératoire ou tout autre instrument (spatule, dissecteur ultrasonore...) en positionnant le suretrack, qui est une sonde adaptable. La neuro-navigation est comparable à un GPS, avec la localisation de l'objet, la destination et l'itinéraire. Le neurochirurgien peut alors se guider et suivre la progression de son instrument.[11][12]

III. Matériels et différents systèmes de neuro-navigation :

Un système de neuro-navigation est composé, en version de base, d'une connexion Ethernet, d'une station de base de pré-planning (souvent proposée en option), une station informatique (bloc opératoire), un système de localisation et une instrumentation chirurgicale adaptée.

- **Station informatique :**

La station informatique de pré-planning et celle du bloc opératoire sont le plus souvent strictement identiques et offrent les mêmes fonctionnalités. Ces consoles sont fournies avec des logiciels de traitement d'images et de planification chirurgicale. Il est préférable de s'équiper de deux stations afin d'éviter le transport de la station de la salle de planning vers le bloc opératoire.



Figure 13. Système de neuro-navigation BrainLab

- **Système de localisation :**

Le dispositif le plus répandu est le système optique dit « actif ». Les instruments sont équipés de diodes infrarouges émettant un signal détecté par des caméras. La position de l'instrument est déterminée par triangulation et est transmise au système de neuro-navigation.

Il existe également un dispositif optique passif. L'instrument est équipé de sphères réfléchissant les signaux infrarouges provenant de sources situées à proximité des caméras de détection.

Cette technique présente l'avantage d'éviter les connexions électriques sur les instruments. Toutefois, cet avantage est minime puisque sont apparus sur le marché des systèmes actifs à pile. La différence essentielle entre les systèmes actifs et passifs se situe au niveau de la stérilisation. Les outils chirurgicaux utilisant un principe actif sont parfaitement auto-clavables et permettent ainsi de respecter la législation française en vigueur en matière de stérilisation. En revanche, les éléments du système dit « passif » ne sont stérilisables qu'au gaz. La surface réfléchissante des sphères est détériorée lors des cycles de stérilisation. Ce système ne supporte pas les règles de stérilisation que l'on doit appliquer, notamment dans le cadre de la maladie de Creutzfeldt-Jakob ; il faut donc considérer les marqueurs passifs comme des consommables, ce qui augmente considérablement les coûts de l'intervention (figure 14).



Figure 14. Quelques systèmes de localisation et marqueurs associés :

(A) Caméras de localisation optique

(B) Outil en forme d'étoile avec des marqueurs de référence

(C) Marqueurs optiques sur un pointeur

(D) tête (avec pastilles) fixée au cadre de Mayfield

Il existe trois gammes de systèmes de neuro-navigation :

Le système à pointeur :

Le système de base correspondant au premier niveau est le système dit « à pointeur » (figure 14, C). Il est composé des éléments décrits précédemment et utilise un pointeur pour la phase d'enregistrement comme outil de repérage. Le suivi de la position des instruments chirurgicaux en temps réel est possible après adaptation de ces derniers. On peut intégrer dans cette gamme d'équipement le système dit « à microscope passif ». Il existe la possibilité d'adapter un système de surimpression de données dans le binoculaire du microscope. Ainsi, le chirurgien peut obtenir certaines informations (trajectoire, contours) sur sa navigation sans quitter le champ opératoire. Cette option est également disponible sur les systèmes décrits ci-dessous.

Le système à microscope :

C'est le système de neuro-navigation qui intègre le microscope. Le support de ce dernier peut être motorisé et ainsi fournir au chirurgien une aide au déplacement. Pour pouvoir utiliser le microscope comme dispositif de repérage, il est nécessaire que ce dernier renvoie l'information de la position du point focal dans l'espace. Tous les microscopes du marché peuvent transmettre facilement les coordonnées x et y par l'intermédiaire de leur système de repérage. En revanche, ils ne sont pas tous en mesure de renvoyer l'information sur la profondeur (coordonnée z du point focal). Seuls ceux disposant d'un système de mesure spécifique en sont capables. En effet, le point focal ne se situe pas forcément sur la structure où est réalisée la mise au point : le chirurgien visualise nettement les objets sur toute la profondeur du champ du microscope et non pas seulement au point focal. Deux dispositifs permettent la définition du point focal. Le premier possède un système autofocus à visée laser et le second permet au chirurgien de visualiser ce point grâce à deux faisceaux visibles. À partir de ces systèmes, on peut donc afficher la position du point focal sur les images pré-opératoires. Ainsi, le microscope devient un outil de repérage. Le chirurgien peut à chaque instant connaître sa position dans l'anatomie en faisant une mise au point sur la zone concernée. Le microscope peut d'ailleurs être utilisé lors de l'enregistrement des marqueurs extrinsèques collés pour éviter un déplacement de ces derniers dû à un contact avec le pointeur.

Le système à microscope robotisé :

Le microscope est fixé sur un bras robotisé à plusieurs degrés de liberté. Le point focal est déterminé de la même manière que précédemment. Ce système possède donc les mêmes fonctionnalités que celui décrit ci-avant et a en plus la possibilité d'être directement piloté par la station de travail. Le microscope peut ainsi venir se placer dans l'axe de la voie d'abord déterminée durant la phase de planning

et revenir par exemple automatiquement à une position antérieure mémorisée si le chirurgien juge que sa position actuelle est moins adaptée. Il peut donc guider le robot et pointer le microscope vers une structure de son choix, identifiée préalablement sur la station de travail. [11]

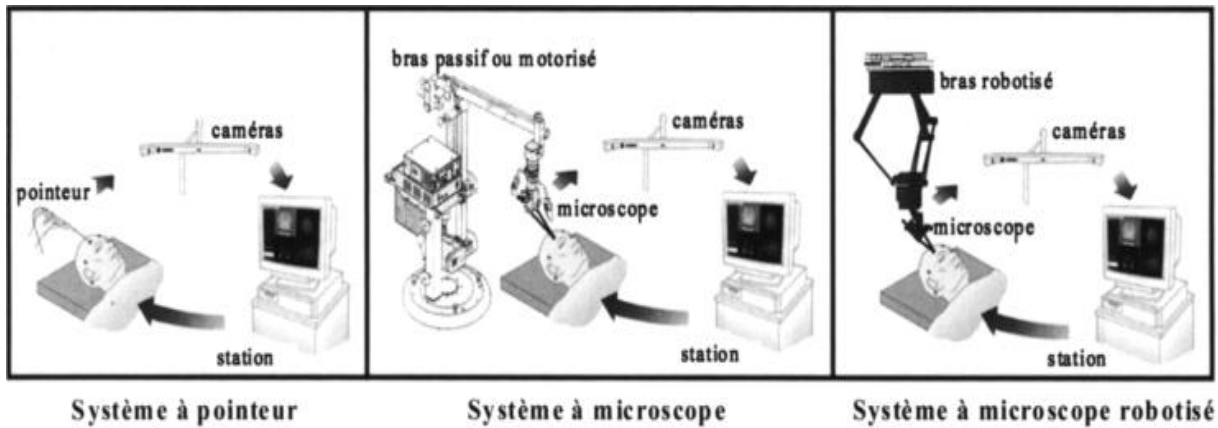


Figure 15. Les systèmes de neuro-navigation [11]

IV. Procédure de la neuro-navigation :

Chaque système de neuro-navigation suit les mêmes étapes afin de lier la procédure chirurgicale aux images obtenues en pré-opératoire (figure 16) :

- 1- L'obtention d'images préopératoires ;
- 2- Pré-planning ;
- 3- L'enregistrement ;
- 4- Localisation per-opératoire et chirurgie.

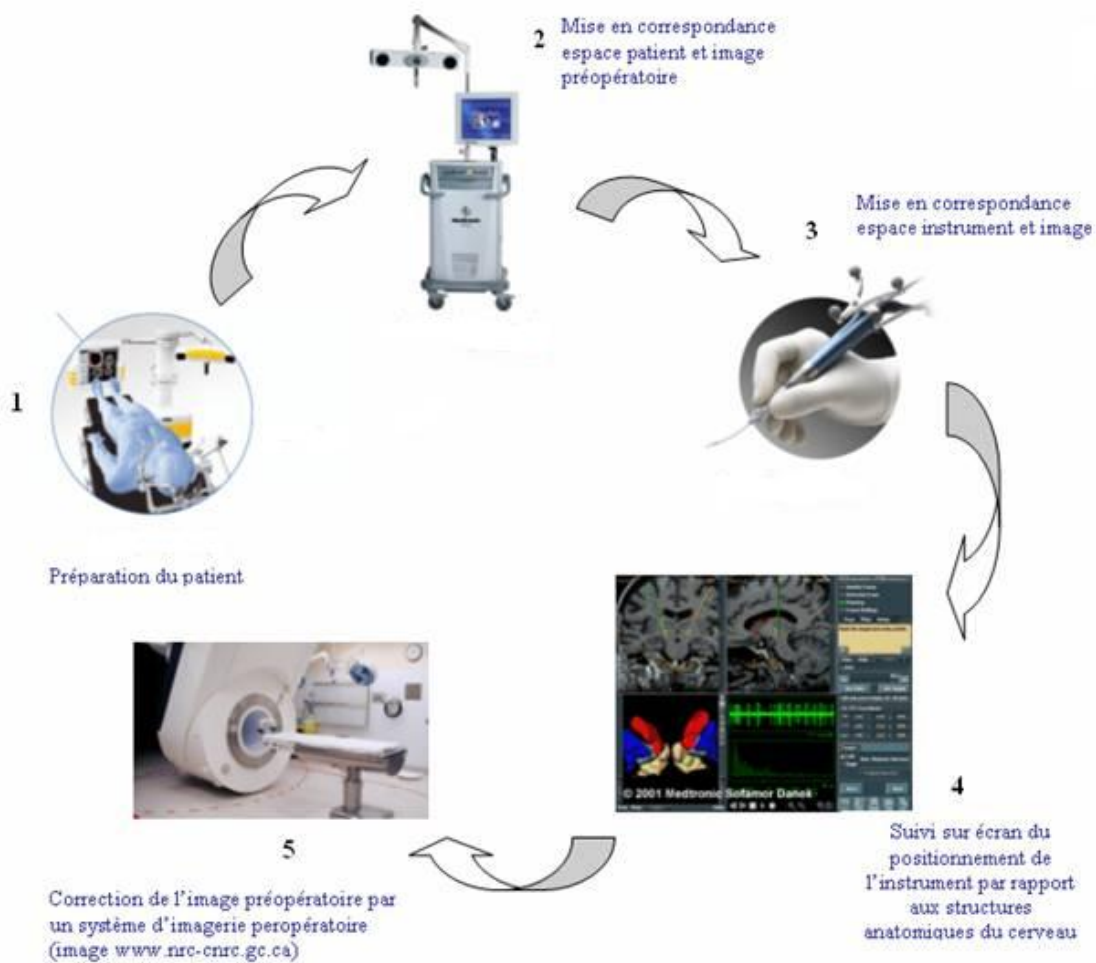


Figure 16. Les étapes de la neuro-navigation [1]

1. L'obtention des images pré-opératoires :

Pour accomplir l'utilisation de la neuro-navigation, des images pré-opératoires doivent être acquises. Plus tard, les données sont transférées vers un poste de travail pour la planification de la chirurgie, puis transférées vers le neuro-navigateur. Bien qu'il existe plusieurs systèmes différents disponibles, tous fonctionnent avec les mêmes étapes. Ces données doivent être obtenues quelques heures ou un jour avant la chirurgie. La précision des informations obtenues du système de navigation est directement liée à la qualité et à l'épaisseur de l'image. Les artefacts et la distorsion de mouvement doivent être fortement évités afin d'éviter une erreur d'enregistrement de la cible. L'IRM pondérée en T1 et la tomodensitométrie représentent des choix optimaux pour la planification. La TDM et l'IRM ont toutes les deux des particularités et toutes les deux peuvent être utilisées pour la navigation. La fusion d'images entre la TDM et l'IRM est particulièrement utile pour les navigations de la base du crâne, en raison de la corrélation entre l'os et les tissus mous. [13]

Les progrès technologiques ont permis non seulement de visualiser les structures anatomiques, mais aussi certaines fonctions cérébrales spécifiques. L'intégration et la fusion de ces informations donnent au neurochirurgien la possibilité d'opérer à la fois sur la base d'anomalies anatomiques et fonctionnelles.

L'imagerie qui nous donne des informations fonctionnelles est représentée par la TEP, la SPECT, l'IRMf et la MEG. Le principal avantage de cette possibilité de combiner des images fonctionnelles et anatomiques est la possibilité de conserver une fonction cérébrale éloquente située à proximité de la lésion. D'un autre côté, un tissu cérébral apparemment normal (du point de vue anatomique) peut être fonctionnellement anormal et générer de l'épilepsie. La résection de ces zones avec préservation de la fonction normale guidée par neuro-navigation est une nouvelle technique utilisée en neurochirurgie. [3]

2. Pré-planning :

La planification de la conduite d'une neurochirurgie est une tâche ardue, en particulier pour les stagiaires et les jeunes neurochirurgiens. Le manque d'expérience peut entraîner des incisions inappropriées, des craniotomies inadéquates et des chirurgies difficiles.

Des logiciels commerciaux, tels qu'OsiriX (Pixmeo) et radiANT (Medixant), sont disponibles et se sont avérés utiles dans la reconstruction 3D de la topographie corticale.

La planification permet d'évaluer diverses trajectoires opératoires jusqu'à ce qu'une approche appropriée soit choisie. Pour les interventions cérébrovasculaires, ceci permet d'étudier la relation de l'anévrisme avec l'os environnant, d'anticiper les principaux vaisseaux et leurs orientations au fur et à mesure qu'on les rencontre, de visualiser la morphologie de l'anévrisme et de prédire quels clips seraient les plus susceptibles d'être utilisés. De la même manière, l'utilisation du programme de planification de la chirurgie tumorale permet d'obtenir des mesures précises de la taille et du volume de la tumeur ainsi que la création d'un modèle 3D de la tumeur, ce qui permet ensuite de tracer des incisions et des craniotomies appropriées.

Un avantage supplémentaire est qu'elle permet aux consultants seniors de faciliter la formation à distance, par exemple via des « sessions de planification virtuelle », au cours desquelles ils peuvent discuter du déroulement de l'intervention chirurgicale par vidéoconférence. L'utilisation de logiciel de planification peut également augmenter les opportunités d'effectuer ou d'assister à une intervention chirurgicale, et d'accélérer l'acquisition des compétences lors de l'apprentissage. Enfin, un avantage supplémentaire à l'utilisation de ces logiciels se trouve dans le processus de consentement éclairé : en montrant aux patients des modèles 3D, les patients peuvent mieux comprendre où se situe leur lésion, quelle est sa taille et comment se déroulera leur intervention. Le partage de ces informations augmentera la satisfaction du patient et l'aidera à faire plus confiance au chirurgien.[14]

3. Enregistrement :

L'enregistrement est une étape très importante du fonctionnement de la neuro-navigation. Un enregistrement précis du patient facilitera le fonctionnement et la reconnaissance des instruments dans le champ opératoire par le système de neuro-navigation.

Dans la plupart des cas, l'enregistrement est réalisé en utilisant des repères – des marqueurs attachés à la tête du patient. Ces repères peuvent être implantés dans le crâne, avec un défaut de précision inférieur à 2 mm, on parle alors du « gold standard » invasif. Ils peuvent également être adhésifs sur la peau du patient. Dans ce cas, ils sont mis en place la veille de l'intervention chirurgicale ou parfois immédiatement avant l'intervention. Afin d'augmenter la précision, il est important d'utiliser autant de repères que possible (minimum 4–8, optimal 12–15). Le placement des repères sur différents niveaux et non sur une ligne est un autre facteur qui contribue à une meilleure précision de la procédure. Il est important d'informer le patient de garder les repères attachés à la peau jusqu'à ce qu'il rentre dans la salle d'opération et de ne pas les retirer à la fin de la TDM/IRM. Parfois, un casque pour les protéger peut-être utile. Par mesure de sécurité, le centre du repère peut être indiqué avec un marqueur au cas où il se détacherait (figure 17).[15]



Figure 17. Enregistrement utilisant des marqueurs attachés à la tête du patient.

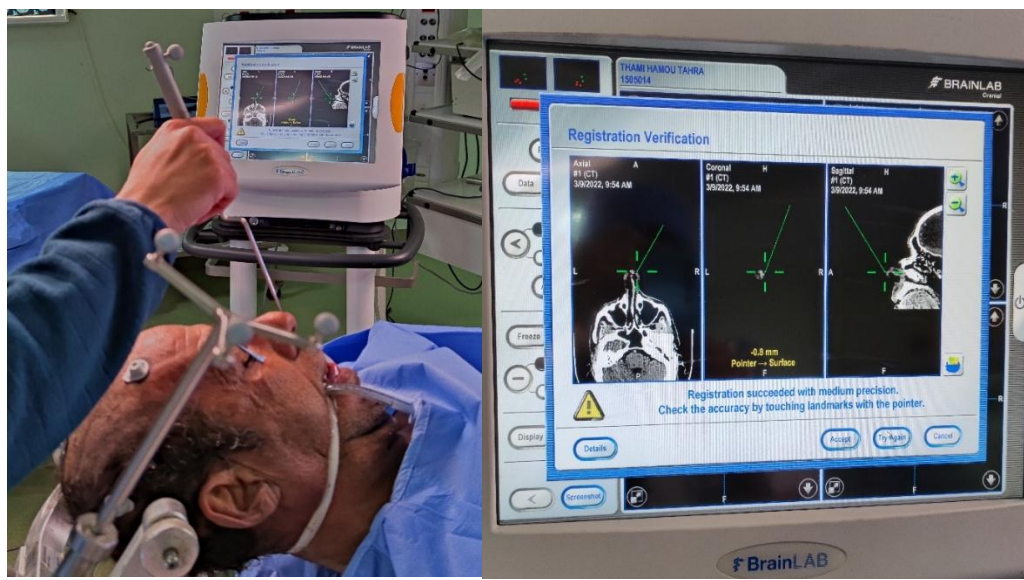


Figure 18. Vérification après enregistrement utilisant des marqueurs attachés à la tête

L'enregistrement avec des repères anatomiques consiste en l'utilisation de repères anatomiques au lieu de repères de référence. Sur la face du patient, ces repères peuvent être le nasion, l'épine nasale antérieure, les angles médiaux et latéraux des yeux et d'autres points soigneusement choisis en évitant les déformations et les zones trop mobiles. C'est peut-être la méthode d'enregistrement la plus dépendante de l'opérateur. Les foramens, les angles et les sutures sur l'anatomie osseuse offrent généralement des repères fiables pour l'enregistrement même après incision cutanée. Cette méthode est souvent utilisée lors des interventions rachidiennes (figure 19).[13]

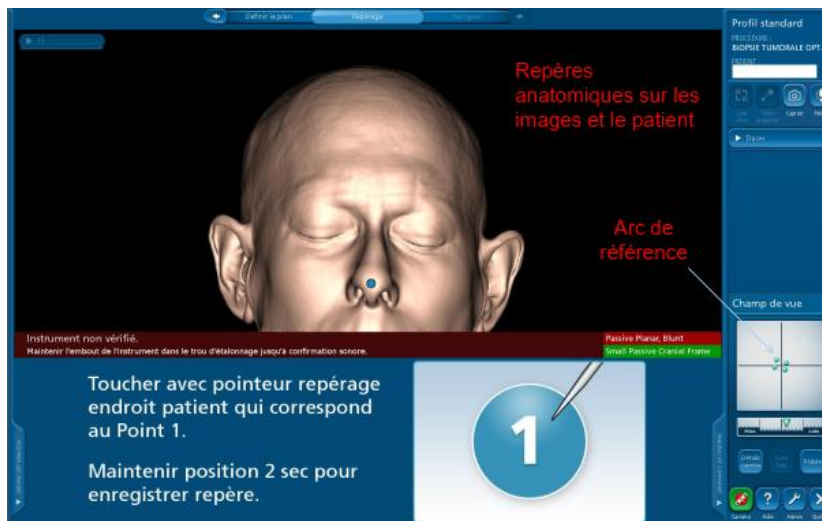


Figure 19. Enregistrement utilisant des repères anatomiques

Une troisième méthode d'enregistrement utilisée est la reconnaissance du contour du visage. Un grand nombre de points (plus de 100) sont hiérarchisés autour du nez, du front, de l'oreille, du cuir chevelu, du périorbite, etc. La somme de ces points donnera un contour de visage reconnu par le logiciel de navigation et superposé à une reconstitution de visage virtuel en 3D. La précision de cette méthode est considérée comme faible, mais elle augmente au fur et à mesure que le nombre de points enregistrés augmente. Outre cette méthode de toucher le contour du visage

avec un instrument reconnu par navigation, BrainLab propose une autre méthode qui utilise un principe similaire, mais, au lieu d'un instrument touchant le visage, un laser est utilisé et la réflexion de la lumière est reconnue par une caméra spéciale. Cette méthode fournit généralement une précision fiable pour la chirurgie craniofaciale ou antérieure de la base du crâne. En raison de la distorsion de l'image, il existe un défaut de précision de plus en plus postérieur à la suture coronale/oreille (figure 20).[8]



Figure20. Enregistrement de surface.

Pour la plupart des chirurgies, un défaut de précision d'environ 2 à 4 mm peut être accepté, en particulier pour les grandes zones cibles. L'erreur d'enregistrement peut varier selon le système de navigation utilisé. Cependant, l'imagerie et sa corrélation avec les repères lors de l'enregistrement constituent des facteurs décisifs pour le succès de la neuro-navigation.[13]

4. Localisation per-opératoire et chirurgie :

Il existe plusieurs façons de reconnaître l'instrument en per-opératoire par la neuro-navigation. Cette fonction est réalisée par un numériseur 3D, qui suit le signal émis ou réfléchi provenant d'un instrument.

Les premiers prototypes de navigation utilisent des microphones comme détecteur et des électrodes génératrices d'ultrasons comme émetteur. Ce type de numériseur nécessite un champ libre et dégagé entre l'émetteur et le récepteur. L'utilisation du son pour la localisation est sous-optimale en raison des échos générés. De plus, la propagation de la vitesse du son dépend de la température ambiante.

Les techniques de localisation optiques sont similaires à celles utilisées dans les équipements à ultrasons, à la différence près, que certains problèmes causés par les propriétés sonores sont résolus[15]. Les systèmes optiques utilisent un dispositif de caméras de numérisation pour localiser les traqueurs dans l'espace. Le réseau de caméras détecte les faisceaux de lumière infrarouge provenant des LED dans les systèmes actifs. Dans les systèmes passifs, le réseaux de caméras détecte la lumière infrarouge émise par les LED situées autour des lentilles de la caméra et réfléchi par les sphères présentement sur le patient et les instruments.[16] Bien que le maintien d'un champ libre reste un critère à respecter, les problèmes générés par la température et les échos du bloc opératoire ont été éliminés.[3]

La navigation optique représente une technologie éprouvée de longue date. Elle offre une précision submillimétrique élevée et un grand volume de suivi de plusieurs mètres cubes. Son plus grand inconvénient réside dans la nécessité d'une ligne de vue libre entre la caméra et le traqueur pour une localisation réussie. Cependant, dans les environnements de configuration opératoire encombrés tels que la microneurochirurgie, la vue entre la caméra de suivi et le site chirurgical est généralement bloquée. En effet, la présence des outils chirurgicaux (microscope

opérateur ou endoscope), un positionnement excentrique du patient ou encore un champ opératoire encombré perturbent la ligne de vue. De plus, le cadre de référence fixé sur la tête du patient est encombrant et peut gêner en partie l'approche du chirurgien. Les systèmes optiques ne sont donc pas adaptés au suivi de dispositifs flexibles tels que les cathéters, les aiguilles ou les instruments flexibles.

La technologie de suivi EM est basée sur un champ magnétique émis par un générateur en tant que système de coordonnées et des bobines posées sur des dispositifs de suivi amenés dans ce champ. Le courant induit dans ces bobines permet la détection de position. Outre un générateur de champ magnétique, un système de navigation EM se compose, tout comme les systèmes de navigation optique, d'un traqueur de référence fixé sur la tête du patient et d'un traqueur de localisation. Ce dernier est une sonde permettant l'identification de la position des instruments. Bien que Kato et al.[17] ont développé un système de neuro-navigation EM au début des années 1990, la sensibilité aux interférences ferromagnétiques et la faible précision à proximité des objets métalliques ont initialement limité son utilisation. Grâce aux progrès de la technologie ces limitations initiales ont été surmontées. La dernière génération des systèmes de neuro-navigation peut détecter le degré d'interférence métallique, et arrêter la localisation si la précision tombe au-delà d'un seuil critique. Il a été rapporté que l'erreur des systèmes EM actuels se situe dans la plage submillimétrique. Ils peuvent donc être utilisés en toute sécurité.

En raison du faible volume de suivi d'environ 50 cm de diamètre et de la susceptibilité ferromagnétique, l'expérience de l'opérateur est nécessaire pour obtenir une navigation EM stable tout au long de l'intervention. La possibilité de localiser les instruments sans problèmes de ligne de vue est le plus grand avantage des systèmes EM par rapport à la navigation optique. De plus, la petite taille des bobines EM offre la possibilité de traquer en continu la pointe des petits instruments flexibles tels que les aspirations, les cathéters, ou les endoscopes.[16]

La position de l'instrument chirurgical est projetée sur l'écran comme un instrument virtuel de couleur verte (Figure 21). Le chirurgien peut sélectionner la cible et l'approche optimale en pré-opératoire et la suivre ou se laisser guider par ces images pendant la chirurgie. [15]



Figure 21. Le suivi per-opératoire (La position de l'instrument chirurgical projetée sur l'écran comme un pointeur de couleur verte)

V. Applications de la neuro-navigation :

1. Biopsie stéréotaxique :

Bien que les systèmes de navigation basés sur des cadres représentent le « gold standard » en termes de biopsie cérébrale stéréotaxique, les systèmes sans cadre ont été de plus en plus utilisés et étudiés depuis leur création. [18]-[20]

Les systèmes sans cadre permettent de se passer du cadre plutôt inconfortable et encombrant à la fois lors de l'imagerie et de l'intervention. En effet, les cadres stéréotaxiques peuvent également gêner le positionnement et l'exposition chirurgicale.[21]

Certains auteurs affirment que la précision tridimensionnelle des techniques sans cadre utilisant des repères appliqués au crâne peut dépasser celle des cadres stéréotaxiques.[22]

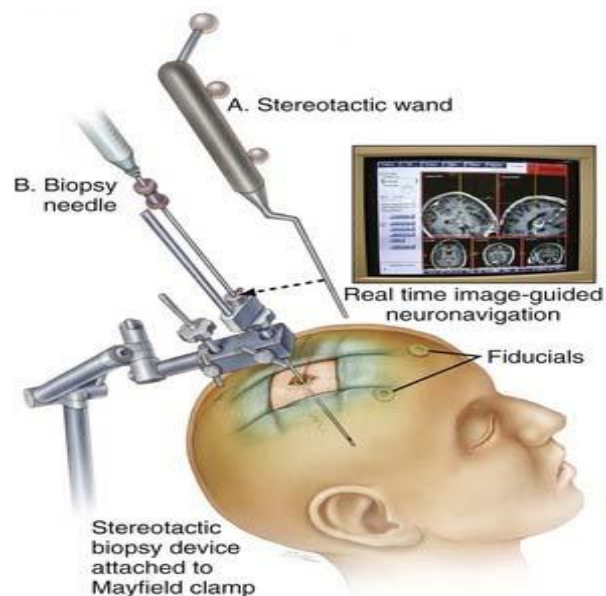


Figure 22. Biopsie stéréotaxique guidée par image.[156]

Des travaux récents ont comparé la biopsie stéréotaxique sans cadre aux techniques basées sur le cadre, en évaluant les différences du taux de diagnostic et des complications. Les résultats obtenus sur une grande série en 1999 ont rapporté des taux de biopsie diagnostique (96,3 %), de morbidité neurologique (1,4 %) et de décès (1,0 %) comparables à ceux rapportés pour les procédures basées sur le cadre[23]. Cependant, les résultats de la biopsie de la fosse cérébrale postérieure ont été significativement pires chez le groupe sans cadre.

D'autres travaux ont signalé que les procédures sans cadre ne montrent aucune différence significative en termes du taux de diagnostic ou de morbidité permanente par rapport aux biopsies basées sur le cadre. Les auteurs ont noté que les techniques sans cadre sont potentiellement avantageuses pour les lésions plus grandes ou corticales, tandis que la stéréotaxie basée sur le cadre est probablement plus efficace pour les lésions plus petites ou profondes [19]. Pour les lésions de moins de 2 cm de diamètre, les techniques de biopsie sans cadre sont à priori équivalentes aux systèmes basés sur le cadre en termes de précision de ciblage, de résultats diagnostiques et de complications.[24]

Le temps passé en salle opératoire est généralement plus long pour les procédures de biopsie sans cadre comparées aux biopsies avec cadre, bien que le temps passé avec la tête immobilisée soit généralement plus court.[18], [24], [25]

Dans notre série, aucun patient n'a bénéficié d'une BST sans cadre.

2. Tumeurs cérébrales :

➤ Métastases cérébrales :

Généralement nous pensons que les tumeurs métastatiques sont histologiquement circonscrites. Il n'y a généralement donc aucun problème à identifier le plan entre la tumeur et le cerveau œdémateux. Cependant, dans certains

cas, cette interface peut ne pas être claire, en particulier en cas de saignement. En effet, les séries chirurgicales rapportées des tumeurs métastatiques réséquées lors d'une craniotomie sans neuro-navigation rapportent un certain pourcentage de patients avec des résections incomplètes.[26]-[29]

De nombreux chirurgiens ont eu l'expérience troublante d'essayer en vain de localiser des lésions métastatiques sous-corticales profondes au cours d'une craniotomie conventionnelle. Les tumeurs métastatiques sont généralement situées à la jonction gris-blanc sous-corticale. Elles peuvent être situées superficiellement près de la couronne d'un gyrus. Elles peuvent également être situées à la jonction gris-blanc dans les profondeurs d'un sillon et être difficiles à localiser avec une craniotomie conventionnelle. La neuro-navigation peut être intéressante dans la résection des métastases superficielles ainsi que des lésions situées en profondeur.[30]

La neuro-navigation permet de localiser les sinus veineux et de réaliser en toute sécurité la craniotomie en les évitant[21]. Elle permet également de centrer les trous de trépan directement sur les lésions superficielles.

Selon une étude , la morbidité post-opératoire de la résection (mortalité, 0 ; morbidité, 4,3 %) se compare favorablement à celle de la chirurgie conventionnelle (mortalité, 11 %).[26], [28], [29], [31]

Dans une expérience de 5,5 ans sur la résection stéréotaxique assistée par ordinateur des métastases intracrâniennes à la clinique Mayo, aucune récurrence locale n'a été mise en évidence sur des scanners post-opératoires en série.[18]

Schackert et al.[32] ont conclu que l'utilisation de la neuro-navigation prolonge le temps de survie médian chez les malades atteints de métastase unique (16 mois contre 10 mois) et multiple (11 mois contre 5 mois).

Dans notre série, 3 patients ont été opérés pour métastases cérébrales :

La première patiente est âgée de 46 ans, opérée pour métastase sous-corticale fronto-pariétale d'origine pulmonaire révélée par des céphalées avec lourdeur du membre inférieur gauche. Le geste a duré 5h et a consisté en une exérèse macroscopiquement totale de la tumeur sans incident per-opératoire majeur. L'évolution a été bonne avec disparition des céphalées. La patiente a gardé une mono-parésie du membre inférieur gauche. Elle a bénéficié d'une radio-chimiothérapie adjuvante.

Le deuxième patient est âgé de 58 ans, opéré pour métastase pariétale d'origine gastrique révélée par des céphalées et des vomissements (Figure 23). Le geste a duré 6h et a consisté en une corticotomie temporale avec résection macroscopiquement complète de la tumeur (Figure 24). L'évolution sur le plan neurologique a été satisfaisante. Il a bénéficié d'une radiothérapie adjuvante.

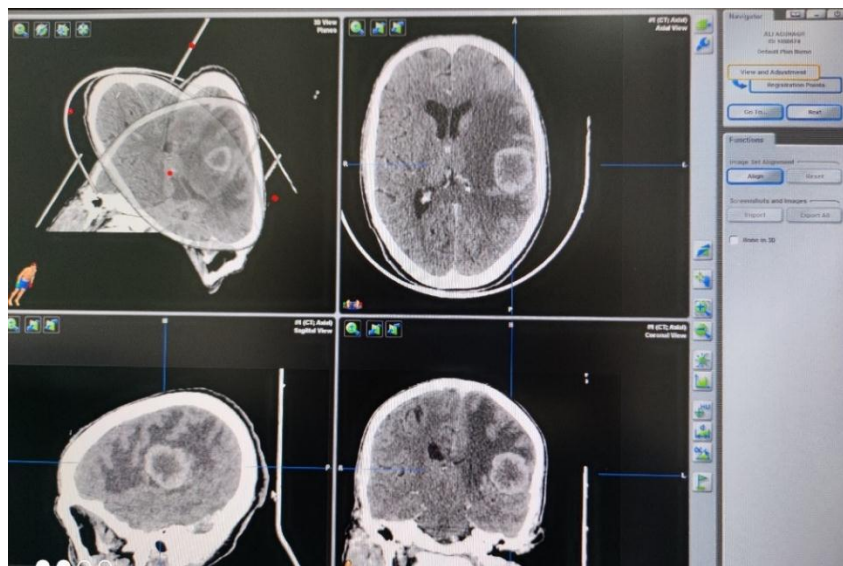


Figure 23 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes axiales, sagittales et coronales d'une TDM pré-opératoire qui montre une lésion pariétale gauche.

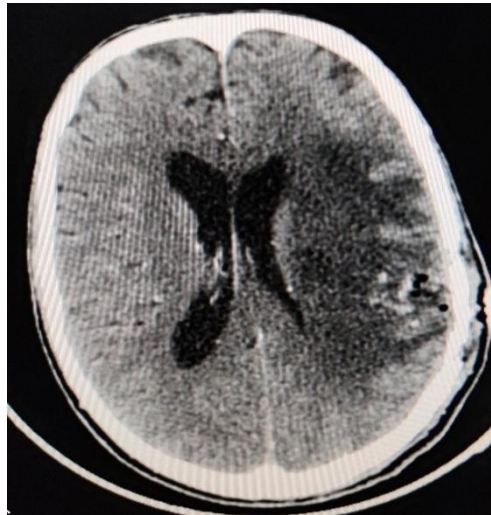


Figure 24 : coupe axiale après résection de la métastase pariétale.

La troisième patiente est âgée de 23 ans, opérée pour métastase sous tensorielle découverte à l'occasion d'un bilan d'extension de sa tumeur du sein. Le geste a duré 4h30min et a consisté en une métastasectomie totale avec bonne évolution neurologique. Elle a bénéficié d'une radiothérapie adjuvante.

Chez ces patients, l'utilisation de la technique de guidage par image a permis la localisation et la définition des métastases cérébrales par rapport au tissu sain, conduisant à des craniotomies plus petites et à des résections chirurgicales plus précises, et donc à une perte sanguine moins importante. Ceci est un atout inestimable chez ces patients déjà fragiles.

L'évolution satisfaisante sur le plan neurologique indique que la neuro-navigation a permis de minimiser les dégâts aux zones éloquentes surtout chez les deux patients dont les lésions étaient cortico-sous-corticales à proximité des aires motrices et de langage.

➤ Méningiomes :

Les méningiomes sont souvent accessibles et superficiels et présentent une interface généralement très évidente avec le cerveau. De ce fait, les techniques stéréotaxiques peuvent être très utiles dans leur résection. Les principes généraux d'optimisation des ouvertures osseuses et dures pour minimiser l'exposition du

cerveau normal sont particulièrement importants lors des interventions sur des masses extra-axiales. Une navigation per-opératoire précise permet d'ouvrir le cuir chevelu avec une petite incision linéaire et de placer les bords de la craniotomie immédiatement en dehors des limites superficielles de la tumeur. Lorsque le cerveau est « tendu » à cause d'un œdème ou d'un effet de masse lié à la tumeur, toute partie du cerveau exposée peut rapidement faire hernie de l'incision durale et s'étrangler. Une incision durale correctement placée sera directement réalisée sur cette interface tumeur/cerveau. Ceci sert à protéger le tissu cérébral environnant et à faciliter la résection tumorale. La pression intracrânienne aidera souvent à forcer la tumeur à sortir par une ouverture durale de taille appropriée, permettant une dissection plus rapide de la tumeur du parenchyme environnant.

L'utilité de la neuro-navigation pour les méningiomes et d'autres tumeurs situées à la base du crâne est moins évidente. Les repères anatomiques restent les principaux indices pour localiser de telles tumeurs ainsi que d'importantes structures neurales et vasculaires avoisinantes. Cependant, la stéréotaxie sans cadre est souvent utilisée dans les cas où l'anatomie est fortement déformée. [18]

Dans notre série deux patients ont été opérés pour des méningiomes de localisations différentes (péetroclival, pariétal droit).

Le premier cas est celui d'un patient de 40 ans opéré pour méningiome pariétal droit (Figure 25), révélé par une hémiparésie et un syndrome d'HTIC. Le patient a bénéficié d'une exérèse subtotale (Figure 26). Le geste a duré 7h30min et s'est déroulé sans incident. L'anapath est revenue en faveur d'un méningiome transitionnel de grade I sans signes de malignité. L'évolution a été marquée par la régression du syndrome d'HTIC et la persistance de l'hémiparésie. Le patient est revenu cinq jours après sa sortie dans un tableau de trouble de conscience. Une TDM a été réalisée objectivant un hématome intra-parenchymateux avec inondation ventriculaire et engagement sous falcoriel. Le patient est décédé le jour même.

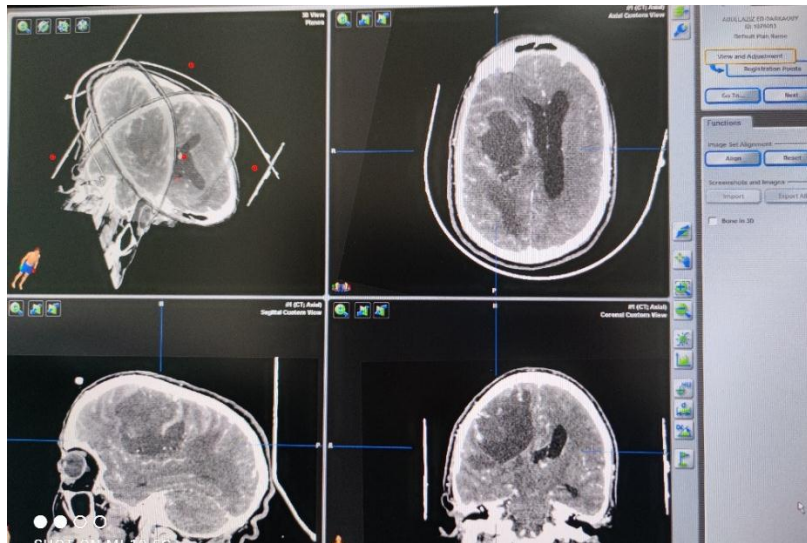


Figure 25 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiale d'une TDM pré-opératoire montrant une lésion fronto-pariétale droite.

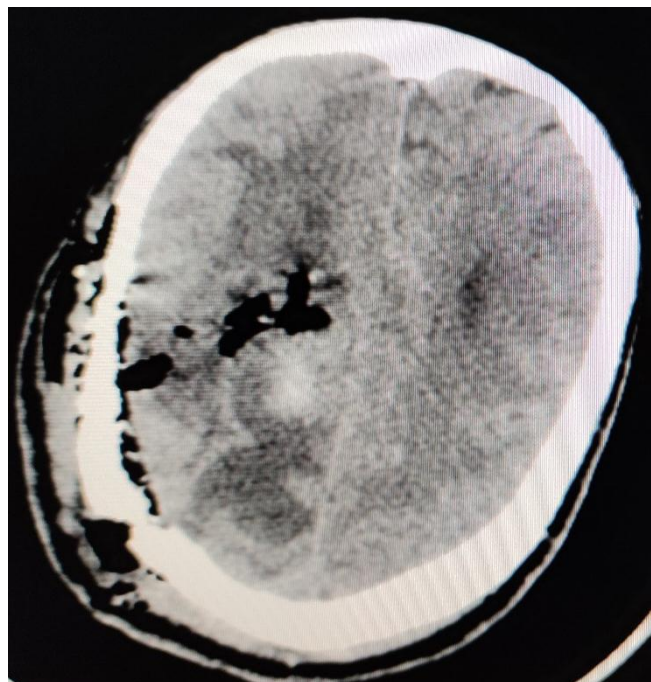


Figure 26 : coupe axiale après résection du méningiome pariétal.

Le deuxième cas est d'un patient de 57 ans opéré pour méningiome pétroclival (Figure 27), révélé par une lourdeur de l'hémicorps droit. Le geste a duré 12h et a consisté en une résection subtotale (Figure 28). Le geste a été marqué par un saignement estimé à 1L, nécessitant une transfusion par 3 CG. L'évolution post-opératoire a été marquée par l'installation d'une détresse respiratoire avec trouble de conscience révélant un hématome extra-dural du site opératoire. Il n'a pas été repris au bloc. L'état du patient s'est aggravé en réanimation par l'installation d'une méningite à polynucléaire neutrophile. Le patient est décédé après un séjour en réanimation de sept jours.

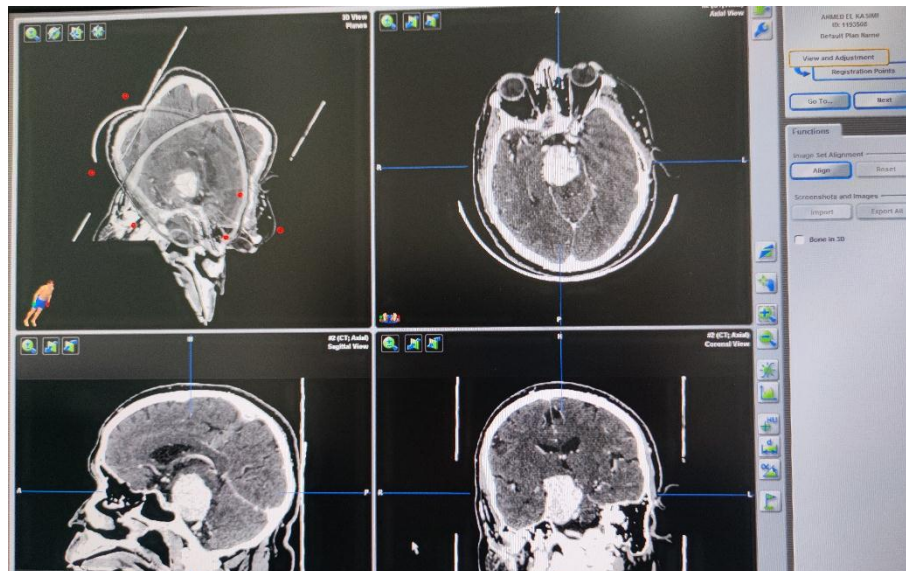


Figure 27 : capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes axiales, sagittales et coronale d'un scanner pré-opératoire montrant un méningiome pétroclival.

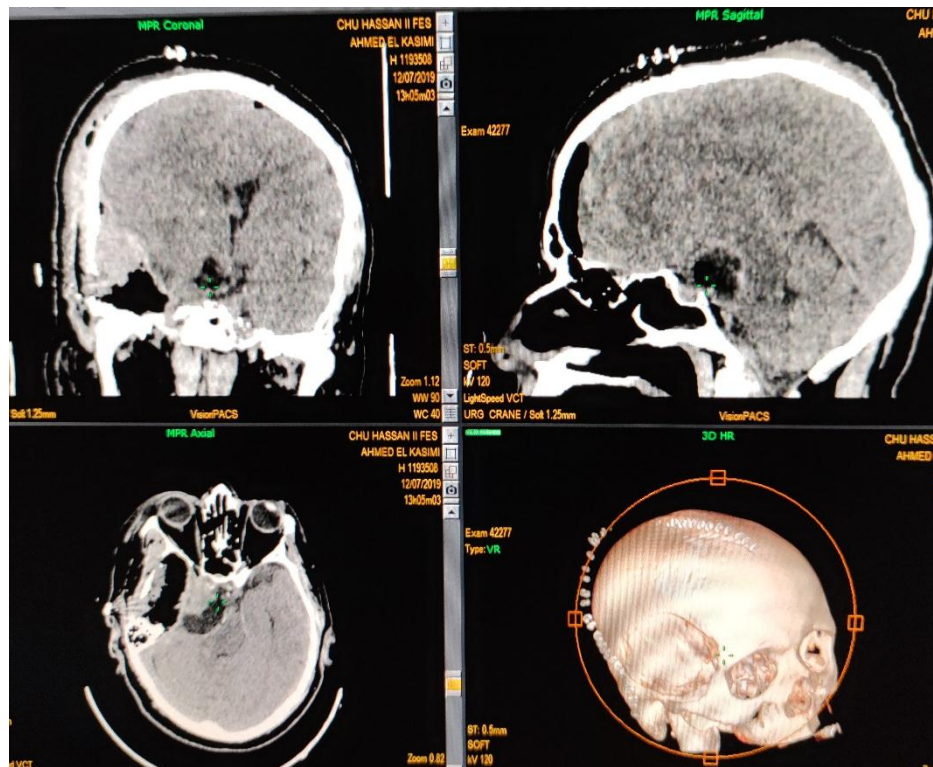


Figure 28 : TDM coupes axiales, coronales et sagittales du scanner post-opératoire du même patient.

Comme pour les autres tumeurs hémisphériques, la neuro-navigation nous a offert une localisation plus précise du méningiome de convexité permettant la réalisation d'une craniotomie centrée. Pour le méningiome pétro-clival, l'intérêt de la neuro-navigation réside dans la localisation des structures nobles adjacentes, notamment le tronc cérébral et l'artère basilaire. Le décès des deux patients par saignement post-opératoire était lié à la nature et la taille de la tumeur et non pas à l'utilisation de la neuro-navigation. Ainsi, nous ne pouvons pas conclure que cette dernière est inutile dans la chirurgie des méningiomes.

➤ Tumeurs intra-ventriculaires :

Il y a généralement peu de problèmes d'orientation spatiale chez les patients avec de gros ventricules latéraux. Cependant, il peut être plus difficile de rester orienté dans des ventricules de taille petite ou normale, ou dans certains cas, même de trouver le ventricule.

Les grandes lésions du troisième ventricule sont généralement abordées par le ventricule latéral droit. Une décompression interne de la lésion est effectuée avec un laser jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'un mince bord de la capsule tumorale. L'affichage par ordinateur des sections transversales du volume tumoral est extrêmement utile à cette étape : le chirurgien, voyant où la tumeur s'arrête et où la paroi du troisième ventriculaire commence, peut être agressif au sein de la tumeur sans risque d'endommager les parois du troisième ventricule. [18]

Les patients avec un système ventriculaire étroit représentent un défi sérieux dans la chirurgie endoscopique des tumeurs. Dans ces cas, une navigation précise est cruciale pour déterminer le point d'accès et la trajectoire optimale pour l'intervention. En pratique, l'utilisation de la navigation sans cadre est communément acceptée partout où il y a une déformation significative des structures anatomiques. Par exemple, en cas de syndrome du ventricule collabé, ou en cas de déplacement de la ligne médiane. L'utilisation de la neuro-navigation pour canuler le système ventriculaire étroit et effectuer sous son contrôle les différentes procédures intra-ventriculaires a de nombreux adeptes. Elle présente des avantages indéniables. En effet, la direction d'introduction de l'endoscope est connue avec précision, l'image est indépendante de la vue obtenue à travers l'optique de l'endoscope et les structures anatomiques adjacentes sont clairement visibles.

En d'autres termes, les avantages de la neuro-navigation compensent les points faibles de la neuro-endoscopie tels que : d'éventuelles difficultés d'orientation spatiale lors de l'introduction de l'endoscope, un champ de vision limité et une perte de visibilité assez facile au moindre saignement.

Un élément très important de la chirurgie endoscopique assistée par neuro-navigation consiste à maintenir un niveau de remplissage constant du système ventriculaire avec du LCR après l'introduction du drain dans le ventricule latéral. Sa

perte excessive peut provoquer le déplacement des structures intracrâniennes et ainsi le phénomène du «brain shift».[33]

Dans notre série cinq patients ont été opérés pour des lésions du troisième ventricule, dont quatre kystes colloïdes et un astrocytome.

Quatre patients dont l'âge est compris entre 18 et 40 ans ont été opérés pour kyste colloïde du troisième ventricule, révélés par un syndrome d'HTIC pour les quatre cas avec trouble de la marche pour un cas. Les gestes ont duré entre 4h et 5h 30min et ont consisté en une aspiration totale pour deux cas et subtotale pour les deux autres cas avec mise en place d'une DVE dans un cas. L'évolution a été favorable pour trois cas avec une récurrence chez un cas.

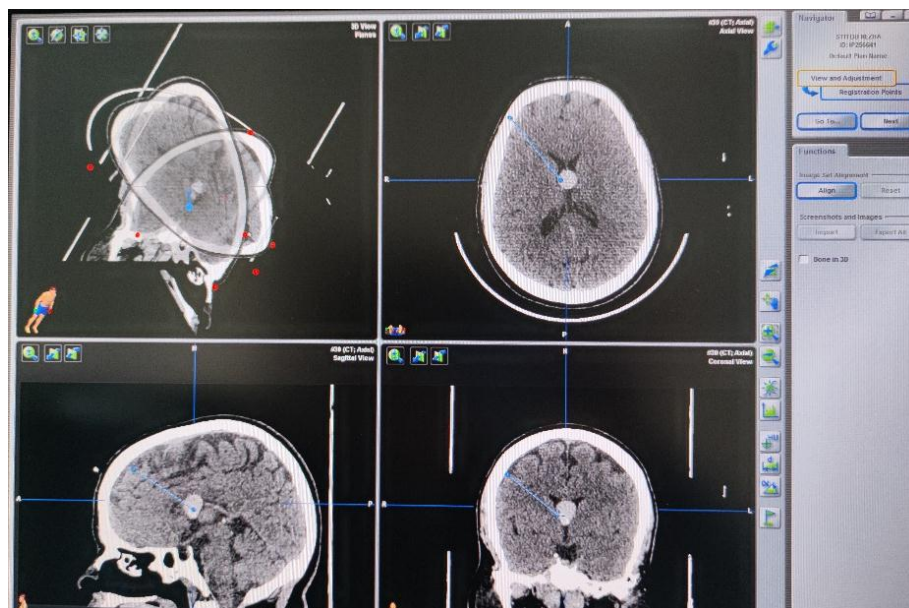


Figure 29 : capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes axiales, coronales et sagittale d'un scanner pré-opératoire montrant un kyste colloïde du troisième ventricule.

Le cinquième patient âgé de 57 ans a été opéré pour astrocytome de grade II du troisième ventricule, révélé par un syndrome d'HTIC. Le geste a duré 5h et a consisté en une biopsie, puis le patient a été référé à Rabat pour radiochirurgie.

Grâce à la neuro-navigation, nous avons pu choisir un point d'entrée optimal et une trajectoire sûre et précise épargnant la tête du noyau caudé. Elle nous a également permis d'atteindre de petits ventricules latéraux non dilatés et de faire avancer l'endoscope à travers un petit foramen de Monro. Des tentatives répétées de ponction ventriculaire et l'utilisation d'une trajectoire moins appropriée avec le risque de lésion du fornix et de mouvement d'endoscope dans le cerveau pour la correction de la trajectoire ont été évitées. Ceci permet ainsi de réduire les complications post-opératoires notamment les troubles mnésiques associés aux lésions du fornix.

➤ Les tumeurs gliales :

La stéréotaxie assistée par ordinateur peut être utilisée pour réséquer toutes les lésions prenant le contraste sur TDM ou IRM avec des taux acceptables de mortalité et de morbidité[34],[37]. Les études post-opératoires montrent généralement une absence de prise de contraste autour du defect chirurgical. La résection stéréotaxique assistée par ordinateur permet en théorie une résection sûre et complète de la lésion prenant le contraste dans les gliomes.[18]

Dans une étude allemande réalisée en 2000 et comprenant soixante-huit patients opérés par neuro-navigation pour glioblastome, Les résultats ont montré qu'il n'a pas eu d'augmentation statistiquement significative du taux des résections tumorales radicales par neuro-navigation. Néanmoins, le volume tumoral résiduel détecté en imagerie post-opératoire a pu être réduit de manière significative dans le groupe opéré par neuro-navigation.[38]

Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres études réalisées pour évaluer l'intérêt de la neuro-navigation :

Du et al.[39] ont réalisé une étude sur soixante-quinze cas de gliomes cérébraux opérés par neuro-navigation. Une résection totale de la tumeur a été obtenue dans soixante-deux cas (82,7 %) et une résection subtotale a été obtenue dans treize cas (17,3 %).

Jia et al. [40] ont évalué l'application de la neuro-navigation dans la résection des tumeurs intracrâniennes superficielles chez trente-sept patients. Ceux-ci ont été comparés à un groupe de contrôle de trente patients atteints de tumeurs de l'hémisphère cérébral ayant bénéficié d'une craniotomie conventionnelle. Les résultats ont montré que la localisation tumorale a été précise et la résection plus complète chez le groupe de neuro-navigation.

Kurimoto et al. [41] ont rapporté que le pourcentage de résection totale brute a été significativement plus élevé chez le groupe traité par neuro-navigation par rapport à celui du groupe sans navigation (64,3 % vs 38,2 %).

Michel et al. [42] ont constaté qu'avec la neuro-navigation, la résection tumorale est complète chez tous les patients, comme déterminé par l'IRM post-opératoire. Les chercheurs ont donc conclu que la neuro-navigation a été un complément utile dans la prise en charge opératoire des patients présentant des lésions intracrâniennes.

Paleologos, et al. [43] ont rapporté que les complications post-opératoires ont été rencontrées dans 14 % des cas dans le groupe chirurgie standard et 6 % des cas dans le groupe neuro-navigation.

Kurimoto et al. [41] ont constaté qu'une détérioration neurologique post-opératoire survient chez 9,5 % des patients après chirurgie avec neuro-navigation et 17,6 % des patients après chirurgie sans neuro-navigation.

Germano et al. [44] ont rapporté que la neuro-navigation est une technique précise qui offre des avantages cliniques ; ceux-ci incluent une résection chirurgicale

précise et une durée d'hospitalisation significativement réduite par rapport aux procédures conventionnelles ($7,5 \pm 1$ contre $10,8 \pm 1,3$ jours respectivement).[45]

Dans notre série dix-huit patients dont l'âge est compris entre 5 ans et 62 ans ont été opérés pour tumeurs gliales de différents types (astrocytome pilocytique, oligodendrogliome, astrocytome anaplasique et glioblastome). La durée du geste a été comprise entre 3h et 7h. L'exérèse a été complète chez douze patients, et subtotale chez six patients dont une patiente a nécessité une reprise chirurgicale. Le geste s'est déroulé sans incident chez tous les patients, à part un saignement estimé à 1L nécessitant une transfusion par 2 CG chez une seule patiente. L'évolution post-opératoire a été satisfaisante chez quatorze patients. Un réveil pathologique fait de crises convulsives généralisées chez un patient, une hémiparésie avec dysarthrie chez un patient et une hémiparésie seule chez deux patients ont été observés. Huit patients ont bénéficié d'une radiothérapie adjuvante et trois patients ont bénéficié d'une radio-chimiothérapie. L'évolution au long terme a été marquée par l'installation d'un mutisme 2 ans après la chirurgie chez un patient et une récurrence chez deux patients dont un a bénéficié d'une reprise chirurgicale avec bonne évolution.



Figure 30 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes axiales, sagittales et coronales d'un scanner pré-opératoire, objectivant un processus fronto-pariétal gauche.



Figure 31 : Coupe d'IRM post-opératoire montrant une exérèse complète

Étant donné que nous n'avons pas de groupe témoin (chirurgie non guidée par l'image) auquel comparer, nous n'avons aucun moyen de déterminer si cette approche a eu un impact sur les résultats des patients. L'utilisation de la neuro-navigation a ajouté un temps supplémentaire à celui de la chirurgie, mais en contrepartie elle a permis de réduire le temps de la chirurgie elle-même et d'augmenter la précision de la localisation et la résection tumorale. Ceci devrait entraîner à priori une diminution de la morbidité chirurgicale, une réduction du temps passé à l'hôpital et éventuellement une diminution des coûts hospitaliers globaux.

➤ Tumeurs du tronc cérébral :

Vu que l'ablation chirurgicale directe des lésions du tronc cérébral est souvent associée à une morbidité élevée, la prise en charge non chirurgicale des tumeurs du tronc cérébral est favorisée dans de nombreux centres. La prise en charge non chirurgicale conduit à la prescription d'un traitement adjuvant empirique, avec radiothérapie et/ou chimiothérapie. L'intégration de la tractographie dans le système de neuro-navigation permettra d'anticiper la localisation des faisceaux fibreux majeurs lors de la chirurgie. Ainsi, cette méthode guidée par l'image peut augmenter la probabilité d'une résection totale des tumeurs adjacentes en évitant les faisceaux de fibres éloquentes dans le tronc cérébral, afin d'éviter l'apparition de nouveaux déficits neurologiques après la chirurgie.

Bien que les gliomes du tronc cérébral soient des tumeurs de pronostic relativement bon, la fonction physiologique importante et la structure anatomique complexe du tronc cérébral ont considérablement limité l'efficacité thérapeutique de la résection chirurgicale. Avec le développement de la technologie d'imagerie et le progrès des techniques chirurgicales, les résultats de la résection chirurgicale des gliomes de bas grade du tronc cérébral ont été grandement améliorés. De ce fait, la qualité de vie post-opératoire des patients a été considérablement amendée.

Les enfants atteints de gliome du tronc cérébral ont de bons résultats après un traitement microchirurgical. L'utilisation du système de neuro-navigation a ajouté une grande valeur au traitement microchirurgical de ces patients, fournissant des informations abondantes en ce qui concerne la planification préopératoire, le guidage per-opératoire et la prédiction des complications post-opératoires.

Dans une étude réalisée à l'unité de neurochirurgie de l'hôpital Tiantan de Pékin, les enfants atteints de gliome du tronc cérébral ont bénéficié d'une résection microchirurgicale à l'aide d'un système de neuro-navigation. De façon encourageante, les résultats ont atteint un taux $\geq 90\%$ de résection tumorale totale ou quasi totale, avec un pourcentage plus élevé que celui rapporté précédemment par Sandri A et Lesniak MS pour la résection microchirurgicale standard sans neuro-navigation. L'étude a également montré une amélioration significative des résultats neurologiques post-opératoires. Ceci a démontré un excellent pronostic chez les enfants atteints de gliome du tronc cérébral. La neuro-navigation a amélioré considérablement les résultats chirurgicaux de la résection des gliomes du tronc cérébral par rapport à la microchirurgie traditionnelle. [46]

Dans notre série, aucun patient n'a été opéré pour tumeur du tronc cérébral.

➤ Tumeurs de la base du crâne :

Dans la chirurgie de la base du crâne, l'IRM offre une visualisation supérieure des nerfs crâniens, du tronc cérébral et des citernes basales, tandis que la TDM offre une meilleure résolution des structures osseuses. Dans la base du crâne anatomiquement complexe, la combinaison de ces méthodes d'imagerie complémentaires est bénéfique[47]. Les structures osseuses de la base du crâne ne subissent pas le même degré de déplacement et de déformation que le cerveau et les autres tissus mous. Ainsi, les inconvénients des systèmes de guidage utilisant l'imagerie préopératoire statique sont minimisés.

Sure et al [48] ont rapporté une série de dix cas, dans lesquels l'IRM/TDM a joué un rôle crucial dans la planification chirurgicale. Tous les patients avaient des tumeurs extra-axiales de la base du crâne. Les auteurs ont pu optimiser l'approche chirurgicale et ont réalisé une résection complète dans 80% des cas.

Kurtsoy et al [49] ont rapporté leurs résultats chez quatre-vingt-sept patients atteints de tumeurs de la base du crâne. Une résection totale brute a été obtenue chez quatre-vingt-deux patients de leur série. L'enregistrement a nécessité moins de 10 minutes dans chaque cas, avec une précision d'enregistrement moyenne de 1,1 mm.

Nakamura et al [50] ont appliqué la neuro-navigation basée sur la TDM à la résection des tumeurs antérieures de la base du crâne. Ils ont découvert que le guidage par image permet une résection tumorale sûre et une meilleure orientation spatiale pendant la chirurgie. Le guidage par image est particulièrement important dans les cas où l'anatomie est déformée par la croissance et l'invasion tumorale.

En ce qui concerne la base antérieure du crâne, les repères anatomiques ne sont pas toujours facilement reconnaissables. Par exemple, dans le cas d'un sinus sphénoïdal conchal : la pneumatisation incomplète ne permet pas la reconnaissance des repères anatomiques, tels que le clivus, la proéminence carotidienne et le récessus optico-carotidien ; les repères anatomiques pourraient ne pas être reconnaissables en cas de reprise chirurgicale. Un système de navigation est donc obligatoire dans ces cas.[18]

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour tumeur de la base du crâne (à part le méningiome pétroclival sus décrit).

➤ Chirurgie de la fosse postérieure :

Une étude rétrospective a analysé l'impact du guidage par imagerie sur les taux de complication et les temps opératoires pour les craniotomies sous-occipitales latérales réalisées en position semi-assise du patient. Les résultats obtenus ont

montré une augmentation significative de la vitesse et de la sécurité de la procédure lorsque la neuro-navigation stéréotaxique est utilisée. [18]

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour tumeur de la fosse cérébrale postérieure.

➤ Chirurgie de l'hypophyse :

Plusieurs groupes ont rapporté les avantages et la précision relative des dispositifs stéréotaxiques sans cadre en chirurgie hypophysaire.

Burkey et al.[51] ont décrit l'usage du système Acustar I dans les approches trans-sphénoïdales. Les auteurs ont conclu que ce système fournit des informations essentielles qui pourraient prévenir la morbidité des patients.[52]

Thomale et al.[53] ont réalisé une étude prospective chez seize patients. Cette étude consiste à évaluer le système de neuro-navigation MKM dans la chirurgie hypophysaire trans-sphénoïdale dans la résection des adénomes récidivants ou des microadénomes latéraux. Les résultats histologiques et endocrinologiques ont été évalués. Les auteurs ont rapporté une bonne applicabilité du système de neuro-navigation MKM pour l'abord trans-sphénoïdal des adénomes récidivants et microadénomes latéraux avec un degré de précision satisfaisant. L'utilisation du système MKM rend inutile l'emploi d'une fluoroscopie supplémentaire, réduisant ainsi l'exposition aux rayons X.

Dans les microadénomes latéraux, les rapports spatiaux des artères carotides internes peuvent être reconstruits en 3D sur la station de travail et visualisés dans le champ visuel du microscope. Ceci augmente la marge de sécurité pour le chirurgien et peut ainsi prévenir des complications majeures. Dans les adénomes hormono-sécrétant, les hormones circulantes peuvent servir comme marqueurs tumoraux lors du suivi endocrinologique post-opératoire. En particulier pour l'acromégalie et la maladie de Cushing où les résultats endocriniens sont essentiels pour déterminer le

succès de la chirurgie. Cependant, dans les adénomes et microadénomes non sécrétant, les bilans endocrinologiques sont inutiles pour déterminer la réussite de l'ablation chirurgicale de la tumeur. Dans ce cas, l'imagerie est l'outil le plus sensible pour le diagnostic et le suivi. Dans cette série, les adénomes hormono-sécrétant ont pu être traités avec de bons résultats endocrinologiques chez sept patients sur huit selon les taux post-opératoires de GH, cortisol et ACTH. L'analyse histologique a confirmé la résection tumorale chez tous les patients. Pour les adénomes non sécrétant, l'IRM post-opératoire a servi d'outil pour déterminer la résection complète ou incomplète de la tumeur. Chez trois patients parmi les sept, une résection incomplète de la tumeur a été suspectée, et deux patients ont reçu une radiothérapie supplémentaire. Aucune autre intervention n'a été nécessaire chez ces derniers. La neuro-navigation a été très utile pour l'approche chirurgicale et l'identification per-opératoire des microadénomes, en particulier à proximité des carotides. [53]

Dans notre série vingt-neuf patients ont été opérés pour adénome hypophysaire dont l'âge était compris entre 28 ans et 73 ans. Les interventions ont duré entre 2h et 5h et ont consisté en une résection totale chez quatorze patients, subtotale chez dix patients, partielle chez trois patients, une reprise d'une ancienne résection incomplète chez un cas et une biopsie chez un autre cas. Les complications post-opératoires ont été dominées par le diabète insipide chez sept patients, l'insuffisance antéhypophysaire chez dix patients, l'altération du champ visuel chez deux patients et un hématome du site opératoire chez deux patients dont un est décédé même après la reprise chirurgicale.

Nous avons utilisé un système de navigation pour identifier les structures osseuses et neurovasculaires adjacentes notamment l'artère carotide, le nerf optique et le sinus caverneux (surtout pour les adénomes invasifs). La neuro-navigation a parfaitement remplacé la fluoroscopie utilisée dans le passé. Ainsi, le patient, le

chirurgien et le personnel de la salle d'opération ne sont plus exposés aux rayonnements ionisants et donc n'auront plus besoin d'utiliser les tabliers en plomb encombrants. Nous pensons que l'addition d'environ 15 minutes de temps de configuration à l'ensemble de la procédure a été plus que compensée par les avantages obtenus à travers l'orientation tridimensionnelle guidée par l'image.



Figure 32 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiale d'un scanner pré-opératoire montrant un macro-adénome hypophysaire chez un des patients opérés dans notre série.

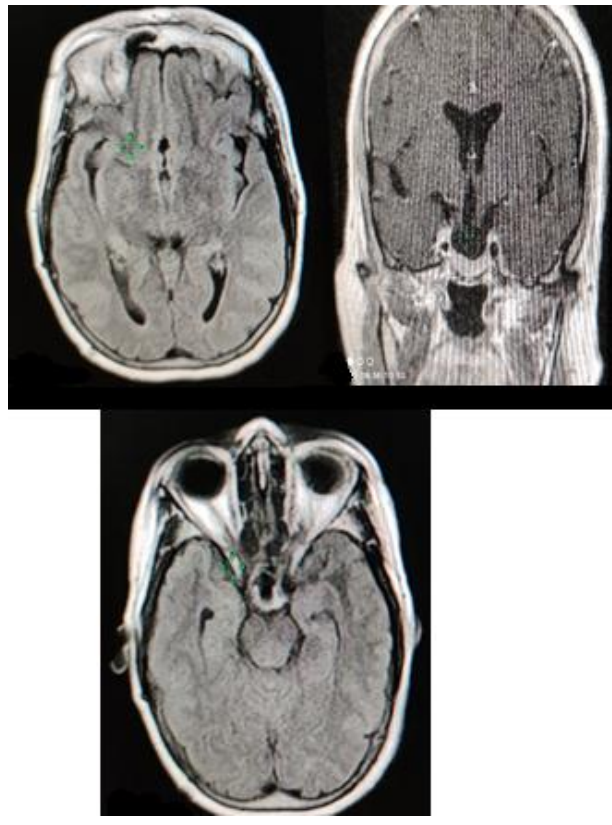


Figure 33 : coupes IRM après résection de l'adénome.

3. Abscès cérébraux :

La stéréotaxie sans cadre est une méthode alternative pour la direction de la sonde d'aspiration vers une cible pré-déterminée sur le scanner ou l'IRM préopératoire. Les résultats obtenus avec cette technique devraient a priori être les mêmes que ceux de l'aspiration stéréotaxique conventionnelle, tant que le ciblage sans cadre est précis.[54]

La ponction stéréotaxique guidée par la TDM des lésions intracrâniennes s'est avérée extrêmement précise avec une mortalité d'environ 2 % et une détérioration neurologique transitoire de 3 %. Elle permet la ponction des petites lésions presque n'importe où dans le cerveau. Des études *in vitro* ont montré que les lésions inférieures à 0,5 cm de diamètre peuvent être atteintes avec succès par la neuro-navigation. [54]

L'utilisation des techniques stéréotaxiques guidées par la TDM dans le traitement des abcès cérébraux est connue pour avoir des bons résultats avec une faible morbidité et mortalité chirurgicales. Plusieurs séries rapportent des taux de morbidité et de mortalité de 1 à 8 %. Actuellement, aucune mesure directe de la morbidité et de la mortalité de la craniotomie ouverte n'est disponible. Cette dernière doit être associée à un risque significativement plus élevé ainsi qu'à un séjour hospitalier plus long et à un coût plus élevé. Les résultats de cette série montrent que les abcès cérébraux peuvent être traités efficacement et en toute sécurité par une combinaison de stéréotaxie et d'antibiotiques. Chez la grande majorité des patients, le geste stéréotaxique peut être réalisé sous anesthésie locale pour drainer rapidement et efficacement le processus purulent, et ainsi, obtenir un diagnostic bactériologique permettant le choix de l'agent chimiothérapeutique le plus approprié.[55]

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour abcès cérébral.

4. Hématome intra-parenchymateux :

L'évacuation de l'HIP a été initialement réalisée par une grande craniotomie sans utilisation de guidage stéréotaxique.[56] [57] Cependant, en raison des taux de mortalité élevés et du manque de bénéfices dans les essais randomisés avec cette approche, des techniques stéréotaxiques moins invasives, y compris l'évacuation endoscopique et l'aspiration avec thrombolyse, ont été introduites pour améliorer les résultats de l'évacuation.[56, 58]

Les techniques mini-invasives offrent des avantages théoriques significatifs par rapport aux techniques de craniotomie traditionnelles : l'utilisation d'une anesthésie locale, des temps opératoires plus courts, et moins de dommages au cerveau environnant. L'une des clés du succès des techniques mini-invasives réside dans la précision de la localisation. [18]

Selon l'étude de Thiex [59], les aspirations stéréotaxiques d'hématome avec et sans cadre sont efficaces pour réduire le volume de l'hémorragie intracérébrale. Les résultats cliniques sont comparables, mais la procédure sans cadre est associée à un risque plus élevé de mauvais positionnement du cathéter.[59] Cependant, le risque potentiel lié à l'utilisation du cadre tel qu'une augmentation de la pression artérielle due à la douleur (causée par les vis à la tête) n'a pas été pris en compte. L'augmentation de la pression artérielle peut entraîner l'expansion de l'hématome. De plus, des difficultés d'intubation après la mise en place du cadre ont déjà été rapportées. La méthode sans cadre offre également d'autres avantages en termes de gain de temps et de commodité.

Une étude réalisée à Taichung, Taiwan a montré une réduction moyenne de l'hématome de 79 % avec la neuro-navigation. Ainsi, la méthode sans cadre semble être une technique prometteuse pour l'évacuation des hématomes intra-parenchymateux.[60]

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour hématome intra-parenchymateux.

5. Les malformations A-V :

Malgré l'application extensive de la stéréotaxie sans cadre pour l'optimisation de la résection chirurgicale des néoplasmes intracrâniens, il existe peu de rapports cliniques décrivant son utilisation pour la résection des MAV cérébrales [61],[64]. Cela pourrait être attribué au fait que l'angiographie cérébrale est la principale modalité d'imagerie pour les MAV cérébrales et qu'il n'existe actuellement aucune méthode pour l'intégrer dans une plate-forme de neuro-navigation. De plus, les limites des MAV sur l'IRM ne sont pas aussi claires que les limites des tumeurs.

La biopsie stéréotaxique à l'aiguille des lésions circonscrites superficielles ou profondes présentant un rehaussement intense au scanner sans œdème périlésionnel peut être dangereuse. Ces lésions peuvent représenter des MAV occultes même si l'artériographie n'objective pas une vascularisation compatible avec une MAV. Une hémorragie post-opératoire peut survenir après la biopsie d'une MAV cryptique ou d'un hémangiome caverneux.

La résection microchirurgicale stéréotaxique assistée par ordinateur offre une alternative à la biopsie stéréotaxique. Les MAV cryptiques et les hémangiomes caverneux sont des lésions bien circonscrites qui peuvent être complètement éliminées de manière stéréotaxique avec un risque relativement faible. Les petites MAV profondes peuvent également être réséquées avec des techniques similaires. La position des vaisseaux nourriciers est établie lors de la planification chirurgicale tridimensionnelle. Ces vaisseaux sont coupés ou coagulés avant que le reste de la lésion ne soit disséqué du parenchyme environnant.[18]

Muacevic et Steiger [64] ont rapporté une nouvelle méthode de résection des MAV utilisant la neuro-navigation. Cette méthode a été utilisée pour localiser et couper les artères nourricières, pour obtenir une décompression intranidale avant la résection nidale formelle. Les auteurs ont ainsi souligné la capacité du guidage par image de définir avec précision les marges nidales.

Sisti et al. [62] ont rapporté 10 MAV réséquées avec l'utilisation de la stéréotaxie. Ils ont conclu que la stéréotaxie a été inestimable pour les petites MAV profondes dans le cortex éloquent. Par ailleurs, le guidage par image peut également être utile pour localiser les hématomes périnidaux profonds, permettant le drainage de l'hématome et l'excision chirurgicale de la MAV dans la même procédure.

Russel et al. Ont comparé deux groupes de patients ; le premier a subi une résection sans stéréotaxie, tandis que le second a subi une résection à l'aide d'un système de stéréotaxie sans cadre. La perte de sang per-opératoire et les durées opératoires ont été toutes les deux significativement inférieures chez le groupe traité par stéréotaxie sans cadre. Ces avantages pourraient être attribuables à plusieurs éléments. Par exemple, des incisions cutanées plus petites, des craniotomies plus petites, une localisation précise des marges nidales, la localisation préventive et la ligature précoce des artères nourricières, qui sont tous des avantages de la stéréotaxie sans cadre.[65]

Étant donné que les MAV sont enlevées en bloc, un «brain shift» important ne pose pas de problème.

Dans notre série, aucun patient n'a été opéré pour une MAV.

6.Chirurgie d'anévrisme :

Dans la chirurgie d'anévrisme, la neuro-navigation est utilisée dans la prévention de la rupture prématurée de l'anévrisme. En effet, elle peut aider l'opérateur à identifier l'anévrisme et/ou l'artère proximale avant et pendant l'intervention chirurgicale. De nombreux avantages du système de neuro-navigation ont été rapportés au cours des deux dernières décennies [66, 67]. Notamment, une localisation et un guidage précis des lésions cérébrales, une planification préopératoire optimale de l'incision cutanée et de la craniotomie, une orientation tridimensionnelle exacte pendant la chirurgie et une confiance accrue du chirurgien.

Dans la chirurgie de l'anévrisme, le système de neuro-navigation fournit la trajectoire la plus courte et la plus directe vers l'anévrisme, ainsi que les rapports de l'anévrisme avec les artères adjacentes et les structures cérébrales. En cas d'anévrisme de l'ACA, si le patient présente une hémorragie sous-arachnoïdienne sévère ou un hématome intracérébral, il est difficile de disséquer la fissure interhémisphérique et

d'identifier l'anévrisme ou l'artère proximale. Même les chirurgiens neurovasculaires expérimentés peuvent parfois rater la voie de dissection optimale et l'orientation chirurgicale. Par conséquent, une voie de dissection manquée peut prendre beaucoup de temps et conduire à une rupture prématurée inattendue de l'anévrisme.

Kim et al. [68] ont réalisé une étude sur douze patients présentant un anévrisme de l'artère cérébrale antérieure distale (DACA). Ces patients ont été traités par clipping direct guidé par le système de neuro-navigation. Aucun problème technique ni complication lors de l'application du système de neuro-navigation n'a eu lieu. La précision d'enregistrement variait de 0,5 à 1,5 mm. Le système de neuro-navigation a offert une visualisation en temps réel des DACA ainsi qu'un avertissement concernant la proximité de la paroi de l'anévrisme. Le système facilite ainsi l'exposition et le clippage en toute sécurité de l'anévrisme.

En cas d'anévrisme de l'artère cérébrale distale associé à un hématome intracérébral, il est difficile de trouver l'anévrisme au sein de l'hématome. En effet, il existe un risque élevé de rupture prématurée lors de l'évacuation de l'hématome intracérébral.

Un anévrisme infectieux avec un énorme hématome intracérébral a été traité avec succès sous assistance du système de neuro-navigation sans aucune complication liée à la procédure. [68] Selon Kim et al. Les anévrismes DACA sont de bon candidats pour la neuro-navigation et les avantages supplémentaires d'une petite craniotomie et d'une orientation per-opératoire précise rendent l'intervention peu invasive.

Schmid-Elsaesser et al. Ont déclaré que la neuro-navigation utilisant l'angioscanner est utile lors des interventions sur les anévrismes non rompus, en particulier, les anévrismes de l'artère cérébrale moyenne (ACM). Ils ont rapporté que, avec ce système, les anévrismes de l'ACM ont été abordés par minicraniotomie, évitant le décollement du muscle temporal.[69]

Lee et Bang ont rapporté un cas rare d'anévrisme disséquant non traumatique non rompu du segment M4 de l'ACM accompagné d'une occlusion totale de l'artère carotide interne homolatérale. Ils ont utilisé l'angioscanner dans la navigation et traité l'anévrisme M4 avec une ligature proximale. Avec l'aide de cet instrument, ils ont pu localiser avec précision l'anévrisme sans corticotomie.[70]

Carvalho et al. ont rapporté que la neuro-navigation a permis la planification chirurgicale et la visualisation de l'anévrisme infectieux ainsi que la réduction du temps de dissection et du risque de survenue des lésions iatrogènes vasculaires et parenchymateuses.[71]

Kil et al. Ont traité trente-deux patients atteints d'anévrismes intracrâniens non rompus par clipping chirurgical guidé par neuro-navigation. Une incision cutanée de 4 à 5 cm et une petite craniotomie de $2,5 \times 4$ cm ont été réalisées autour de la fissure sylvienne. Les résultats obtenus, selon Kil et al. Ont montré que l'approche guidée par la neuro-navigation est utile pour la gestion des anévrismes de la circulation antérieure. Elle permet de réduire la durée des gestes opératoires, le séjour hospitalier, et donne des résultats plus esthétiques.[72]

La neuro-navigation basée sur l'IRM permet une localisation précise de l'anévrisme, optimise la visualisation de la lésion, diminue les lésions parenchymateuses et vasculaires et est utile pour le traitement des anévrismes distaux de l'ACM et l'ACA. Elle peut également être utile pour une meilleure localisation du col de l'anévrisme, et entraîne moins de dommages lors de la dissection de l'anévrisme.[73]

Dans notre série, aucun patient n'a été opéré pour anévrisme intracrânien.

7. Chirurgie du cavernome :

La neuro-navigation est un instrument utile pour la chirurgie des cavernomes permettant une résection microchirurgicale avec un haut degré de sécurité, de précision et de fiabilité. Dans la littérature récente, il a été largement rapporté que la chirurgie assistée par neuro-navigation des lésions intracrâniennes peut améliorer la planification chirurgicale et l'orientation per-opératoire. [74, 75]

Chez les patients atteints de cavernomes profonds (corps calleux, ventricules), les dispositifs de neuro-navigation ont été utilisés afin d'augmenter la sécurité pour le chirurgien, réduire le risque pour le patient et prévenir un traumatisme supplémentaire associé à la chirurgie.

Avec l'utilisation routinière des appareils de neuro-navigation, la majorité des cavernomes situés profondément et/ou de petite taille ont été réséqués d'une excellente manière.

Aucune étude évaluant le bénéfice réel pour les patients n'a été réalisée dans le passé. En effet, il est difficile d'évaluer objectivement les méthodes de neuro-navigation en chirurgie des cavernomes. Cependant, l'évolution des résultats montre que l'utilisation de la neuro-navigation constitue une bonne base pour la résection des cavernomes petits et profonds. Par rapport à la chirurgie conventionnelle, la mise en place d'une chirurgie assistée par neuro-navigation peut être recommandée sans réserve pour la résection des cavernomes de petite extension et de localisation difficile.[76]

Dans notre série, quatre patients dont l'âge est compris entre 23 et 51 ans ont été opérés pour cavernomes de différentes localisations (frontale, basi-frontale, temporale et pontique). Les cavernomes ont été révélés par des crises convulsives généralisées chez trois patients et une hémiparésie avec diplopie chez un patient. Les gestes ont duré entre 4h et 7h et ont consisté en une exérèse complète du cavernome avec bonne évolution dans la totalité des cas.

Vu que les cavernomes sont situés dans le parenchyme cérébral, les objectifs de l'utilisation de la neuro-navigation pour les cavernomes hémisphériques ont été de réduire les dommages aux tissus cérébraux environnants, diminuer l'exposition per-opératoire des tissus cérébraux sains, déterminer l'étendue de la résection, et réduire les écarts de localisation qui se produisent inévitablement dans les chirurgies conventionnelles des lésions profondes. L'application de la neuro-navigation a permis de surmonter ces difficultés.

Étant donné que le tronc cérébral est encaissé en grande partie dans des structures osseuses, les phénomènes de déplacement et de déformation parenchymateux à ce niveau sont minimes. Ainsi, la précision de la neuro-navigation est meilleure. Ceci renforce la confiance du neurochirurgien face à une intervention aussi critique. L'amélioration post-opératoire du déficit moteur du patient opéré pour cavernome pontique témoigne de la robustesse de la neuro-navigation dans la chirurgie des cavernomes du tronc cérébral.

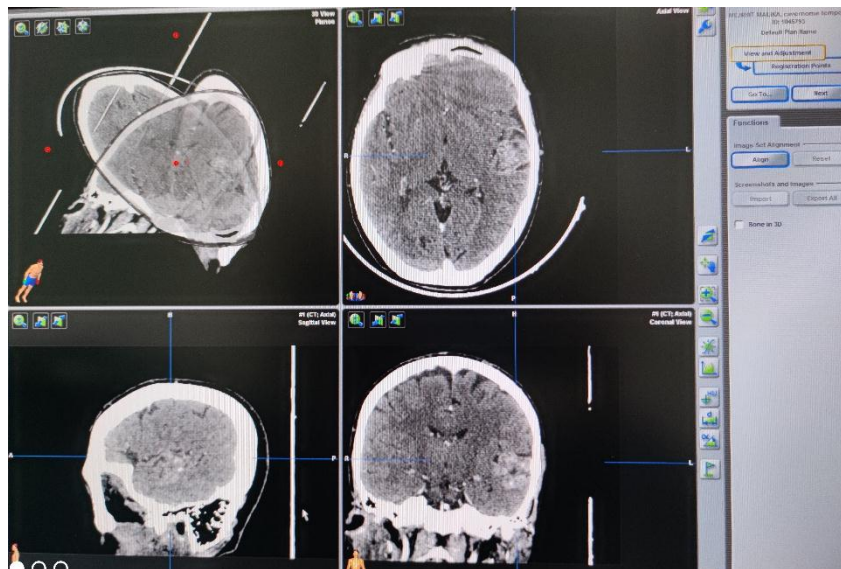


Figure 34 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiales d'un scanner pré-opératoire objectivant un cavernome fronto-temporal gauche.

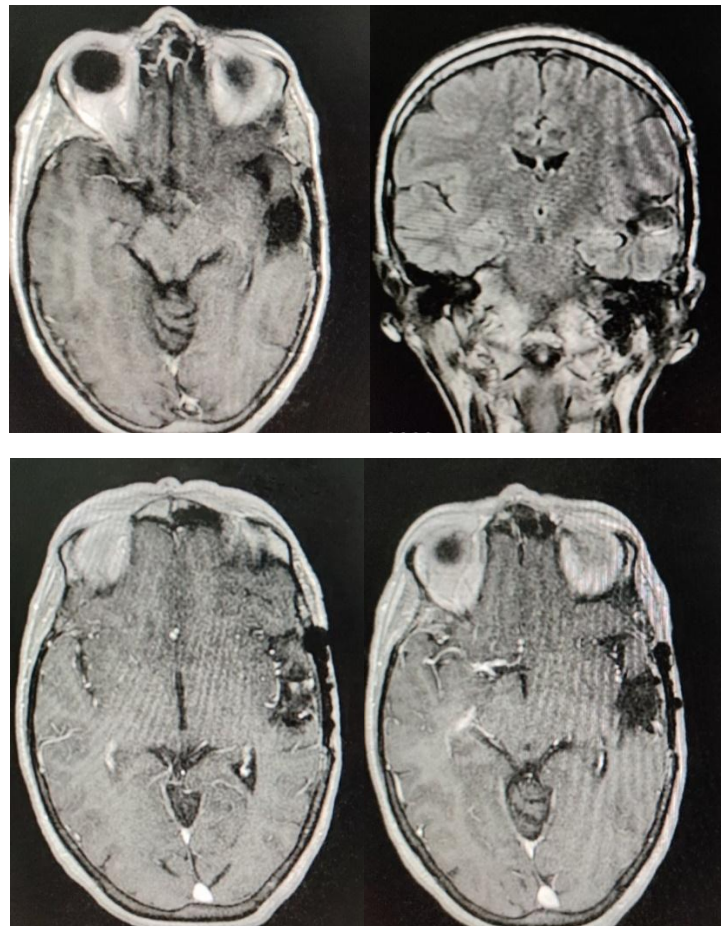


Figure 35 : coupes IRM après résection du Cavernome.

8. Chirurgie du rachis :

La stéréotaxie sans cadre est particulièrement utile pour réséquer les tumeurs vertébrales lorsque l'anatomie osseuse est déformée et les références visuelles standard sont perdues.

Le placement des vis pédiculaires au niveau du rachis thoracique et lombaire a également été facilité par la neuro-navigation. Par rapport aux techniques conventionnelles, la plupart des études rapportent que le guidage stéréotaxique sans cadre améliore la précision du placement des vis et minimise le risque de lésion nerveuse et vasculaire, notamment lorsque les vis sont placées dans des pédicules relativement petits de C3 – C6. Certains systèmes permettent de placer des vis virtuelles pour déterminer la longueur, le diamètre et la trajectoire des vis trans-articulaires. [157][158]

La chirurgie stéréotaxique guidée par l'image peut être appliquée à toutes les parties de la colonne vertébrale humaine. En chirurgie cervicale, la localisation exacte des structures anatomiques clés est cruciale pour éviter une atteinte neurologique ou vasculaire.[77], [78]. Historiquement, la précision de cette localisation a été basée sur l'expérience du chirurgien et sa connaissance de l'anatomie. Les structures les plus à risque dans la colonne cervicale sont les artères vertébrales, les racines nerveuses et la moelle épinière. [157][158]

Bolger et al. [79] ont examiné rétrospectivement des cas impliquant l'utilisation de stéréotaxie sans cadre pour le placement précis d'implants chirurgicaux et pour la résection chirurgicale de lésion au niveau du rachis cervical ou thoracique. Les procédures réalisées comprenaient la mise en place de vis trans-articulaires atlanto-axiales, la mise en place de vis pédiculaires thoraciques, la décompression cervicale antérieure et la vertébrotomie. Les critères de jugement ont été la survenue de lésion neurovasculaire, d'infection de la plaie, de reprise chirurgicale ou de décès. Un total de 368 vis ont été insérées dans 120 procédures primaires. Ils ont conclu que le

guidage par image a été bénéfique dans les cas complexes du rachis nécessitant une clarification de l'anatomie tridimensionnelle.

Sundaresan et al. [80] ont décrit leur expérience utilisant des sondes numériques pour identifier les marges des tumeurs du rachis cervical avant la résection et la reconstruction chez onze patients. Les TDM post-opératoires chez ces patients ont démontré un placement précis des vis pédiculaires pour la reconstruction et une résection complète de toutes les tumeurs chez tous les patients.

L'application la plus répandue du guidage par image stéréotaxique est la mise en place de vis pédiculaires au niveau du rachis thoracique et lombaire. Le pédicule d'une vertèbre sert à l'orientation intra-rachidienne et la fixation la plus solide et la plus rigide lors d'une procédure de fusion. La proximité intime du pédicule avec les éléments neuraux expose au risque de survenue d'une lésion radiculaire si une vis pédiculaire est mal placée. Sans l'utilisation d'un système de guidage, le point de départ, l'angle d'entrée et la trajectoire sont estimés à partir de structures de référence visibles telles que les facettes et les apophyses transverses à un niveau donné. L'utilisation de la fluoroscopie per-opératoire peut aider à mieux localiser le pédicule. Cependant, l'utilisation de ces technologies expose le personnel du bloc opératoire et le patient aux irradiations. De plus, la fluoroscopie peut prendre du temps, surtout si elle est effectuée pour chaque placement de vis. [157][158]

Castro et al.[81] ont montré que malgré l'utilisation de la radiographie per-opératoire, l'incidence des vis mal positionnées sans neuro-navigation pouvait atteindre 40 %. Le taux des lésions neurologiques associées a été aussi élevé (3,2 %).[82]

Merloz et al. [83] ont révélé un taux de 42 % d'erreurs de placement de vis sans guidage par imagerie contre 8 % lorsque le guidage par imagerie a été utilisé. Dans une revue distincte, Merloz et al. [84] ont rapporté un taux de placement similaire avec 44 % de vis mal placées sous insertion manuelle versus 9 % sous guidage d'image.

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour une lésion du rachis.

9. Chirurgie du Parkinson :

Étant donné que le placement des électrodes pour (stimulation cérébrale profonde) SCP est une procédure neurochirurgicale difficile qui exige un haut degré de précision, le positionnement précis des électrodes est crucial pour obtenir des résultats optimaux. Il nécessite une localisation préopératoire anatomiquement fiable de la cible et un enregistrement électro-physiologique per-opératoire.[85]

Une étude comparative de l'exactitude et la précision entre la navigation stéréotaxique basée sur le cadre et sans cadre pour l'implantation des électrodes de SCP a été réalisée à l'Unité de neurochirurgie fonctionnelle et stéréotaxique à l'Hôpital universitaire de Lund, Suède. Cette étude a montré que l'exactitude et la précision de la localisation d'une cible stéréotaxique sont meilleures avec la technique conventionnelle basée sur le cadre qu'avec la procédure sans cadre. Les déviations moyennes par rapport aux objectifs planifiés ont été plus importantes à la fois dans les directions antéro-postérieures et médio-latérales avec la technique sans cadre, ce qui indique une précision moindre. La dispersion des positions finales des électrodes par rapport aux cibles prévues a été plus grande, indiquant une moins bonne précision. [86, 87]

Ce point de vue est en conflit avec les données *in vivo* publiées par Holloway et al. [88] qui ont trouvé des déviations similaires chez les patients avec des électrodes de SCP implantées par des techniques avec et sans cadre.

Dans une étude de Bjartmarz et al.[89], des électrodes de SCP ont été implantées bilatéralement dans le noyau ventral intermédiaire du thalamus chez quatorze patients. Sur le premier côté, ils ont utilisé une technique stéréotaxique sans cadre. Sur le deuxième côté, le placement des électrodes a été guidé par stéréotaxie conventionnelle avec cadre fixé au crâne avant l'imagerie du cerveau.

Les déviations moyennes par rapport aux cibles prévues ont été plus importantes dans les trois plans en utilisant la technique sans cadre.

La fuite du LCR combinée à la position couchée pendant la chirurgie pourrait expliquer la tendance aux déviations postérieures et médiales observées avec les deux techniques. Ainsi, même une petite diminution de la taille des ventricules après l'implantation des électrodes, mais avant l'imagerie aux rayons X, aurait tendance à déplacer le parenchyme cérébral (avec les électrodes) dans les directions médiales, et en raison de la position couchée dans les directions postérieures. Si tel est le cas, cela pourrait mettre les résultats en faveur de la technique à base de cadre, puisque celle-ci a toujours été utilisée pour le deuxième côté à opérer. Ainsi, un éventuel brain shift est plus susceptible de se produire pendant le temps (environ 45 min) entre les deux implantations.

Le suivi clinique des patients n'a montré aucune différence dans la réduction des symptômes entre les deux techniques neurochirurgicales étudiées. Ceci indique que les différences de déviation entre les techniques ont peu d'importance en ce qui concerne le résultat clinique dans le traitement du tremblement par SCP avec le noyau ventral intermédiaire comme cible. La technique sans cadre présente un avantage par rapport aux techniques conventionnelles avec cadre, car elle est plus flexible et moins dépendante de la forme et de la taille de la tête et du cou du patient. Elle peut donc être recommandée comme alternative chez les patients lorsque des difficultés techniques peuvent les exclure de la chirurgie basée sur le cadre.[89]

En 2010, Fukaya et al. [90] ont publié une série de cinq patients avec implantation bilatérale d'électrodes sur le noyau sous thalamique. Les auteurs ont calculé la précision à trois axes et affirmé que la procédure est fiable en termes de précision. Cependant, ils ont conclu que la procédure sans cadre ne peut pas remplacer la procédure stéréotaxique conventionnelle basée sur le cadre, alors que la

même année, Kelman et al. [91] ont rapporté une grande série de soixante-neuf patients ayant bénéficié d'une implantation d'électrode de SCP avec une technique sans cadre et soixante-dix patients avec une méthode basée sur un cadre, concluant que les deux systèmes ont la même précision.

Deux articles récents (Burchiel et al., 2013 [92] et Mirzadeh et al., 2014 [93]) ont conclu que la précision du système sans cadre est satisfaisante.

Li et al. [94] ont publié en 2016 une étude approfondie sur la précision du ciblage de l'implantation d'électrodes de SCP sur la base d'une revue systématique de la littérature. Dans cette étude, un total de 2 931 sondes de SCP implantées a été rapporté chez 1 765 patients utilisant différents systèmes (avec cadre, sans cadre). Les auteurs ont conclu que la précision du ciblage de la chirurgie sans cadre a été presque la même que celle de la chirurgie conventionnelle avec cadre.

Au fil du temps, l'équipe des chirurgiens s'est familiarisée avec l'application de cette technologie, améliorant l'utilisation des appareils qui lui sont associés. Ainsi, la marge d'erreur est minimisée et la précision du système sans cadre est apparue supérieure à celle des systèmes basés sur des cadres. De plus, certains systèmes de neuro-navigation constitués de composants jetables permettent d'éliminer les erreurs systématiques, pouvant se développer dans le cadre stéréotaxique au fil du temps en raison d'une utilisation répétée.

Les avantages potentiels du système sans cadre incluent l'amélioration du confort du patient et la réduction des temps d'intervention. Les patients ont moins peur pendant la chirurgie avec le système sans cadre par rapport à la chirurgie avec un cadre stéréotaxique. De plus, la possibilité d'appliquer les marqueurs de référence et de tout planifier la veille de la chirurgie réduit le temps passé en salle d'opération, améliorant ainsi le confort du patient. De plus, sans fixation rigide à la table d'opération, les patients bénéficient d'une plus grande mobilité et peuvent mieux

tolérer des procédures longues. L'examen per-opératoire du patient par un neurologue et un anesthésiste est également plus facile sans le cadre encombrant. L'inconvénient de l'option sans cadre est lié à l'approche technique et procédurale, plus complexe que celle basée sur le cadre. En effet, celle-ci implique des étapes supplémentaires, et est plus chère par rapport à la SCP classique.[95]

Dans notre série aucun patient n'a été opéré pour maladie de Parkinson.

10. Chirurgie de l'épilepsie :

Dans une étude réalisée au département de neurochirurgie et de neurologie, Landesnervenklinik Linz, Linz, Autriche [96], il a été démontré que les chirurgiens de l'épilepsie apprécient particulièrement l'introduction de la neuro-navigation dans la pratique quotidienne. Cela est dû au fait qu'un large éventail de problème spécifique à la chirurgie de l'épilepsie a été résolu par la neuro-navigation.

L'épilepsie se caractérise par des perturbations transitoires de la fonction cérébrale. Ces perturbations ont souvent une base structurelle, et il peut y avoir une disparité entre les anomalies structurelles et fonctionnelles. Par conséquent, la fusion des informations structurelles avec les informations fonctionnelles est particulièrement importante dans la chirurgie des zones épileptogènes.

La capacité des données fonctionnelles à localiser les régions avec une micro-organisation anormale responsable de la génération de l'activité épileptique peut faire avancer des stratégies chirurgicales spécifiques pour le traitement de l'épilepsie. De plus, les méthodes fonctionnelles sont capables de fournir des informations fonctionnelles complémentaires à l'étude morphologique standard. Elle ont récemment été intégrées dans des systèmes de neuro-navigation pour la planification chirurgicale et le guidage per-opératoire.[97],[99]

La localisation de la lésion peut être projetée à la surface de la peau via le système de neuro-navigation. La largeur de l'incision cutanée et de la craniotomie a pu être réduite. Il a été possible d'effectuer une intervention chirurgicale de manière moins invasive. Des craniotomies plus petites et mieux centrées ont été associées à une perte de sang réduite et à une diminution du temps opératoire. Des approches raffinées et centrées ont réduit le temps opératoire et minimisé les traumatismes, réduisant ainsi le risque d'hématomes post-opératoires[100]. La neuro-navigation a permis d'assurer un placement précis des grilles sous-durales sur la région d'intérêt. De plus, elle a permis de déterminer sans équivoque l'emplacement des électrodes invasives pendant la vidéo-EEG.[96]

La visualisation des structures vasculaires et des zones cérébrales éloquentes a contribué à la réalisation de procédure chirurgicale plus sûre. Cela a grandement aidé à effectuer une résection corticale plus précise permettant de maximiser l'excision de la zone épileptogène tout en minimisant l'impact sur le cortex éloquent.[101]

Dans notre série neuf patients ont présenté une épilepsie réfractaire. Les gestes opératoires réalisés varient en fonction de l'étiologie de l'épilepsie : lobectomie temporale chez deux patients, hippocampectomie chez un patient, résection d'une lésion corticale séquellaire chez deux patients, résection partielle d'une tumeur gliale frontale de bas grade chez un patient, résection totale d'une tumeur gliale pariéto-occipitale de bas grade chez un patient, résection complète d'un astrocytome pariétal de grade III chez un patient et la résection d'un processus cortico-sous-cortical temporal dont l'histologie est revenue en faveur d'une sarcoïdose chez une patiente. Les gestes ont duré entre 4h et 7h. L'évolution post-opératoire a été marquée par la persistance d'une aura résiduelle sans crises pour un cas (probablement secondaire à une résection incomplète de l'hippocampe objectivée sur l'IRM post-opératoire).

L'évolution a été bonne pour les autres patients avec stabilisation des crises sous une bithérapie au maximum.

Le système de neuro-navigation nous a été très utile notamment dans la localisation de la lésion épileptogène au sein du tissu sain, la planification d'une corticotomie sur mesure pour les lésions de petite taille, l'optimisation de la longueur antéro-postérieure de la lobectomie temporale et de l'hippocampectomie. L'utilisation de la neuro-navigation avec des images d'IRM préopératoires a permis de localiser précisément les glioses séquellaires et les gliomes de bas grade, difficiles à identifier à l'œil nu. Elle a permis également d'être moins invasif, et de réaliser des corticotomies dirigées de petite taille pour les lésions sous-corticales. En revanche, la neuro-navigation n'a pas été aussi efficace pour la vérification des limites de l'exérèse puisque quatre patients (40%) ont nécessité au moins un antiépileptique.

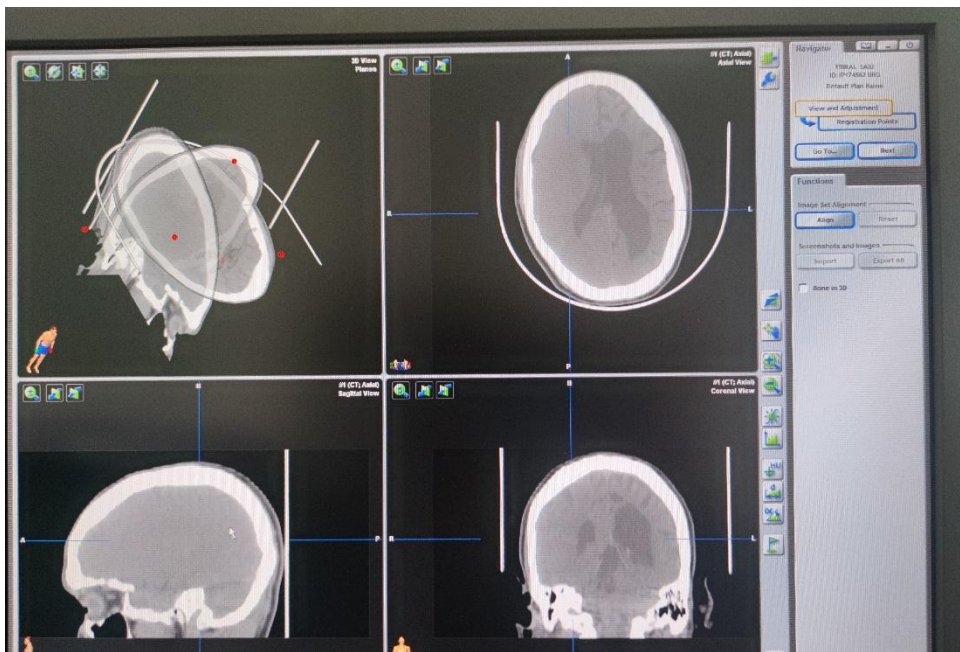


Figure 36 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiales d'une TDM pré-opératoire.

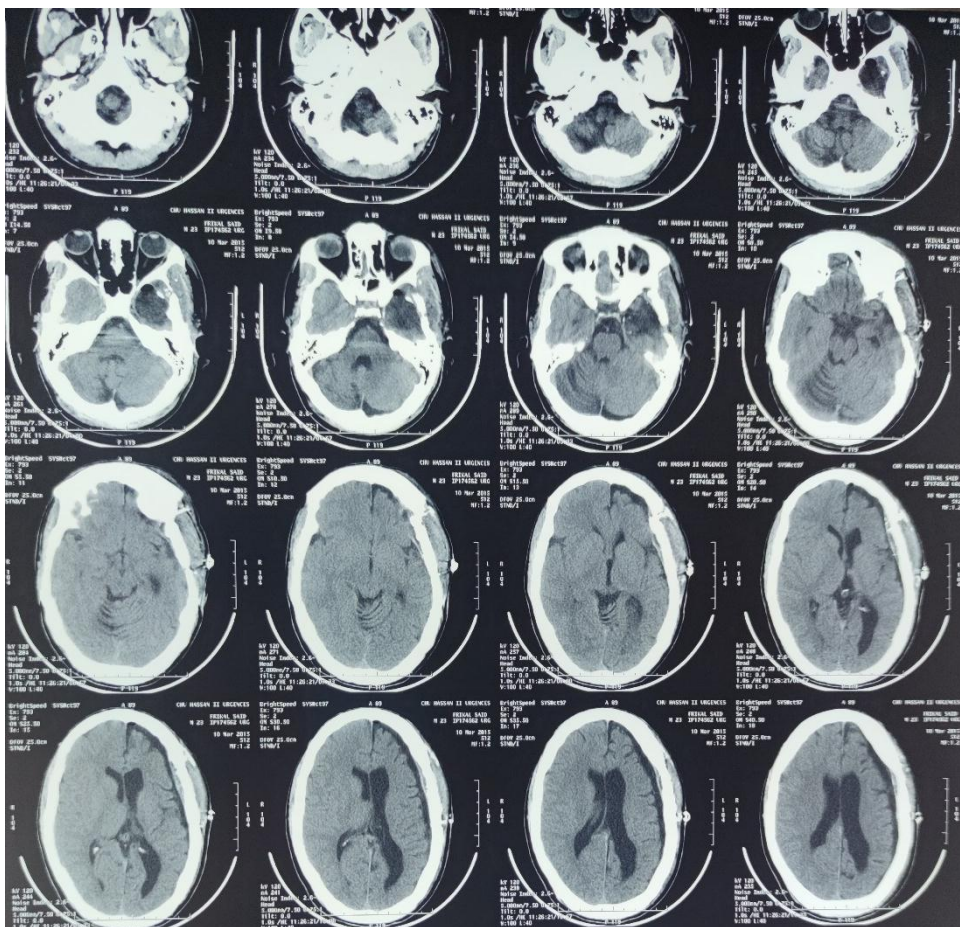


Figure 37 : Coupes axiales après lobectomie temporelle gauche.

Parmi les neuf patients analysés, un jeune âgé de 24 ans, ayant comme ATCD une souffrance néonatale avec retard psychomoteur a été suivi pour épilepsie maladie depuis l'âge de 3 ans. Le scanner réalisé (Figure 36) a montré une diminution du volume de l'hémisphère cérébral gauche avec élargissement des sillons corticaux. Le patient a bénéficié d'une lobectomie temporale gauche avec bonne évolution (Figure 37).

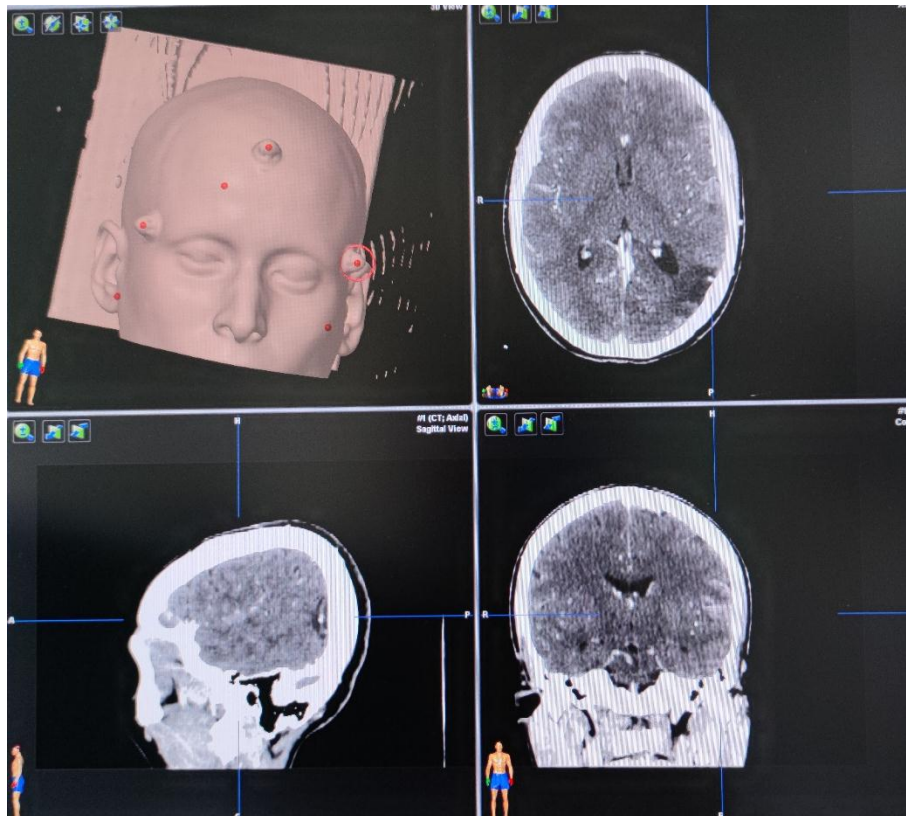


Figure 38 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiales d'une TDM pré-opératoire

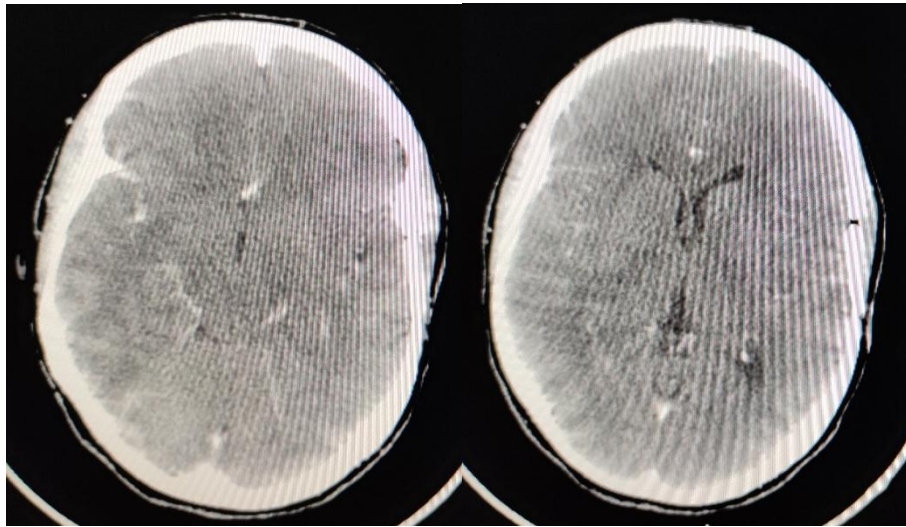


Figure 39 : TDM coupes axiale après résection du processus temporele.

Le deuxième cas est celui d'une patiente âgée de 31 ans, suivie pour épilepsie depuis 7 ans. La TDM effectuée (Figure 38) a mis en évidence un processus cortical temporal gauche avec séquelle d'AVCI temporo-occipital gauche. La patiente a bénéficié d'une exérèse de ce processus (Figure 39). Les résultats de l'anapath ont été en faveur d'un Sarcoïdome.

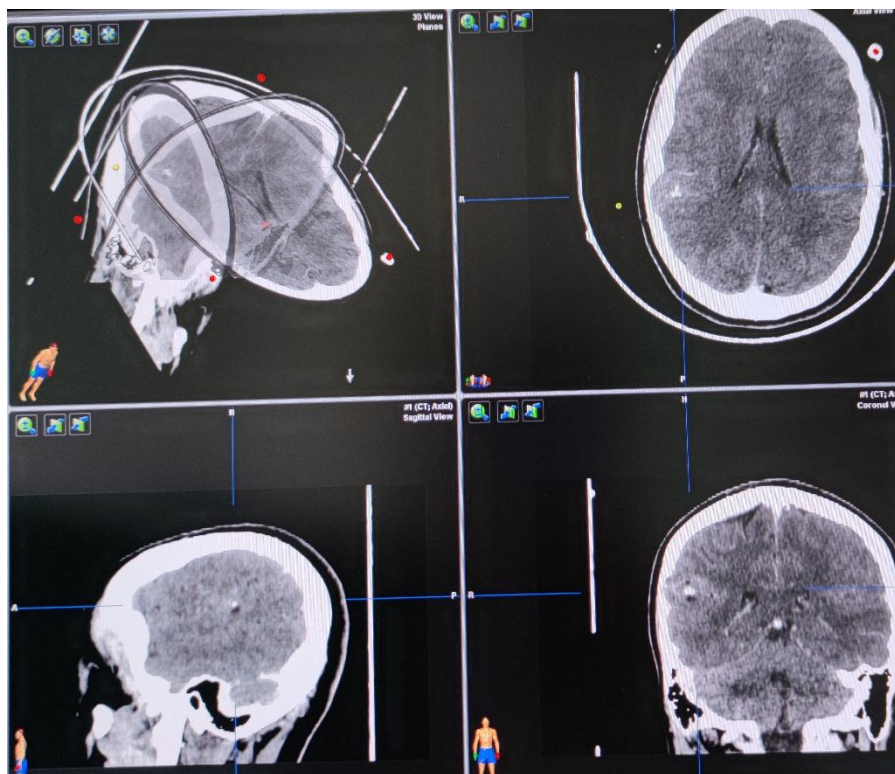


Figure 40 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiales d'une TDM pré-opératoire

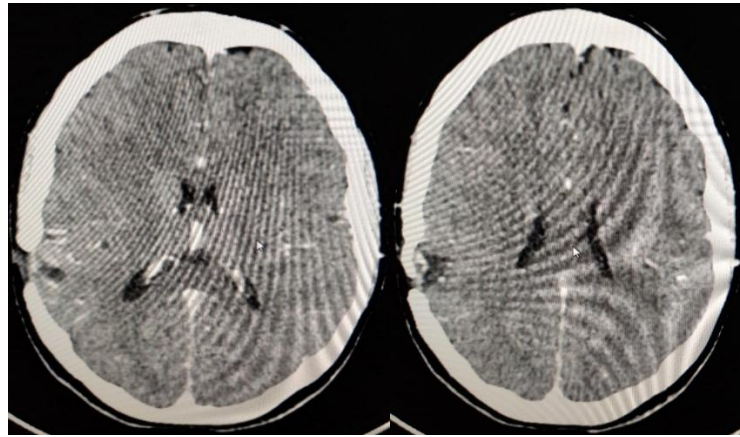


Figure 41 : TDM coupes axiale après résection du processus pariétal.

Enfin, une jeune patiente de 16 ans suivie depuis 3 ans pour épilepsie, a bénéficié d'une TDM (Figure 40) objectivant un processus pariétal droit. Elle a bénéficié d'une résection de son processus (Figure 41). Les résultats de l'anapath ont été en faveur d'un astrocytome grade II.

11. Dérivation du LCR :

Le placement idéal du cathéter ventriculaire serait celui qui :

- (1) a un point d'entrée optimal dans le crâne,
- (2) a un chemin sûr et la pointe distale du cathéter arrive à l'emplacement ciblé près du foramen de Monro,
- (3) est faisable en une seule tentative,
- (4) est fonctionnel sans complications post-insertion,
- (5) nécessite une courte durée de temps au bloc opératoire,
- (6) ne nécessite aucun coût supplémentaire.

Dans une étude bibliographique, Gautschi et al. [102] ont montré que le rendement et la sécurité de l'insertion non assistée d'un cathéter intraventriculaire sont médiocres et peuvent être améliorés en utilisant la neuro-navigation. Cette observation confirme les nombreux mauvais rendements précédemment rapportés de la ponction ventriculaire utilisant uniquement des repères anatomiques. [103],[106]

L'utilisation d'une méthode guidée par neuro-navigation a amélioré le rendement du placement des cathéters intraventriculaires. Une trajectoire sûre a été observée dans 59,6 % des insertions non assistées par ordinateur contre 79,4 % dans les insertions assistées par neuro-navigation. Ces observations sont cohérentes avec les taux rapportés dans l'étude de Kakarla et al., dans laquelle 77 % des placements de drains par technique standard ont été optimaux dans la corne frontale ipsilatérale et le troisième ventricule à travers le foramen de Monro.[107] Cependant, Huyette et al. ont rapporté un placement précis du cathéter en utilisant une technique standard de 56,1 % dans le ventricule latéral ipsilatéral et de 8,2 % dans le troisième ventricule, totalisant un pourcentage de 64,3 %.[106]

Le fait que les méthodes assistées puissent augmenter la précision a été démontré dans différentes études. L'une des plus importantes expériences a été publiée par Sampath et al., où soixante-dix patients ont bénéficié de cinquante-deux dérivations ventriculo-péritonéaux (DVP) et dix-huit placements de réservoir Ommaya en utilisant la neuro-navigation stéréotaxique[108]. Les auteurs ont rapporté un taux de malposition de seulement 1,4 %. De plus, il n'y a pas eu de dysfonctionnement proximal ni de complication chimiothérapeutique au cours d'un suivi moyen de 16,3 mois.

Stieglitz et al. Ont rapporté dans une étude pilote utilisant les systèmes de neuro-navigation BrainLab une bonne précision du placement des cathéters avec une déviation moyenne par rapport à la position prévue de 1,5 mm. [109]

Azeem et Origiano [110] ont présenté leur expérience clinique d'un an dans une série pédiatrique et adulte de trente-quatre cathéters placés à l'aide d'un système de neuro-navigation sans cadre. Bien que les auteurs n'aient pas évalué directement la précision de la dérivation avec l'imagerie post-opératoire, ils n'ont signalé aucun échec proximal de la dérivation. [102]

Wilson et al. [105] ont comparé la précision de trois méthodes de pose de cathéter ventriculaire incluant deux-cent-quarante-neuf patients. Ils ont utilisé la technique standard avec repères anatomiques, guidage ultrasonore et neuro-navigation stéréotaxique. Quatre-vingt-quatorze (55 %) parmi les cent-soixante-dix cathéters posés à main libre ont été placés avec précision, contre quarante-cinq (88 %) parmi les cinquante-et-un cathéters guidés par neuro-navigation et vingt-cinq (89 %) parmi les vingt-huit cathéters guidés par ultrasons.[102],[105]

Dans une autre étude, Alazri et al.[111] ont rapporté que le temps moyen pour la configuration de la neuro-navigation a été de $17,22 \pm 6,73$ min, et le temps moyen de l'enregistrement a été de $17,17 \pm 11,05$ min. La combinaison de ces deux temps a été considérée comme le temps supplémentaire nécessaire à la neuro-navigation.

La méthode standard, qui nécessite souvent plusieurs passages, peut en fait allonger la durée de la procédure. De plus, un mauvais placement peut impliquer une procédure supplémentaire pour la révision, des analyses supplémentaires et des coûts ajoutés.[111]

Le mauvais positionnement du cathéter ventriculaire dans un tissu cérébral éloquent peut entraîner des morbidités importantes, qui peuvent avoir des conséquences très graves et nécessiter d'autres interventions. [112],[114]

Les cathéters mal placés peuvent nécessiter une révision. Ce qui implique des coûts et du temps supplémentaires pour la répétition de la TDM et des procédures. Ainsi, le risque d'apparition d'autres lésions cérébrales supplémentaires est augmenté. Chaque insertion entraîne davantage de blessures au cerveau déjà traumatisé. Une augmentation du nombre de tentatives de pose du cathéter est associée à un risque faible. Cependant, la survenue des complications est certaine, notamment l'hémorragie, les lésions neurologiques et l'infection. Les études d'imagerie post-procédure, telles que la TDM ou l'IRM, montrent souvent les effets

d'un traumatisme iatrogène de l'insertion du cathéter. Il peut y avoir des effets cliniquement détectables associés aux plusieurs tentatives de placement de cathéter. Des effets neuropsychologiques peuvent être présents même lorsqu'aucun effet clinique n'est détectable. Par conséquent, le nombre de tentatives doit être minimisé d'où l'intérêt des nouveaux outils qui rendent le placement du cathéter plus facile, plus sûr et plus précis.[109], [111]

Le guidage assisté par neuro-navigation aurait un effet plutôt faible sur l'amélioration de la ponction des ventricules grands ou extralarges. En revanche, il pourrait être bénéfique chez les patients avec des ventricules plutôt petits ou une anatomie ventriculaire déformée. L'objectif ultime doit être un placement optimal de la DVE lors de la première tentative. Ce qui peut finalement réduire la morbidité liée à la procédure, y compris l'infection, le taux de révision, les complications et la durée du séjour, ainsi que la mortalité. [102], [105], [115], [116]

Dans notre série, aucun patient n'a été opéré pour dérivation du LCR.

12. Chirurgie des brèches ostéo méningée (BOM) :

Une brèche ostéoméningée est une solution de continuité ostéoméningée qui permet au liquide cébrospinal de s'écouler dans une cavité aérique de la base du crâne. Sa gravité est liée au risque d'infection du système nerveux central. Dans le cas d'une liquorrhée claire et abondante, le diagnostic positif est évident et l'imagerie a pour but de localiser la brèche. Un examen scanographique avec coupes fines, complété par une imagerie par IRM constituent le mode d'exploration le plus performant. [117] Traditionnellement, ces brèches ont été fermées par la réparation de l'anomalie durale par une craniotomie ouverte. Ces techniques peuvent être lourdes, de complication possible, et loin d'être couronnées de succès. Ces dernières années, des techniques endoscopiques ont été développées dans le domaine de la

chirurgie nasale et de la neurochirurgie. Au moyen d'une neuro-navigation, il est possible d'identifier la piste chirurgicale avec une grande précision et, par la même occasion, identifier le défaut dans le crâne. Dans une étude, M Kosteljanetz et al.[118] ont opéré six patients avec BOM en combinant la technique endoscopique avec la neuro-navigation par voie endonasale. La fistule a été confirmée avant l'intervention par injection sous-arachnoidale de fluorescéine. La chirurgie a été réussie et sans complications dans les six cas. [118], [2]

Dans notre série, une patiente âgée de 46 ans aux antécédents de traumatisme crânien, a été diagnostiquée à l'aide d'une IRM de BOM ethmoïdale gauche de 5 mm. Elle a été opérée par voie endonasale. Le geste a duré 4h et a consisté en une fermeture de la brèche par lambeau muqueux renforcé par surgicel et des fragments osseux assemblés à l'aide de la colle biologique. L'évolution post-opératoire a été bonne et sans complication ni récurrence.

Chez cette patiente, la neuro-navigation nous a été d'une grande utilité pour la localisation de la brèche et sa fermeture par voie endonasale, et cela, sans avoir recours à une chirurgie conventionnelle avec craniotomie ouverte.

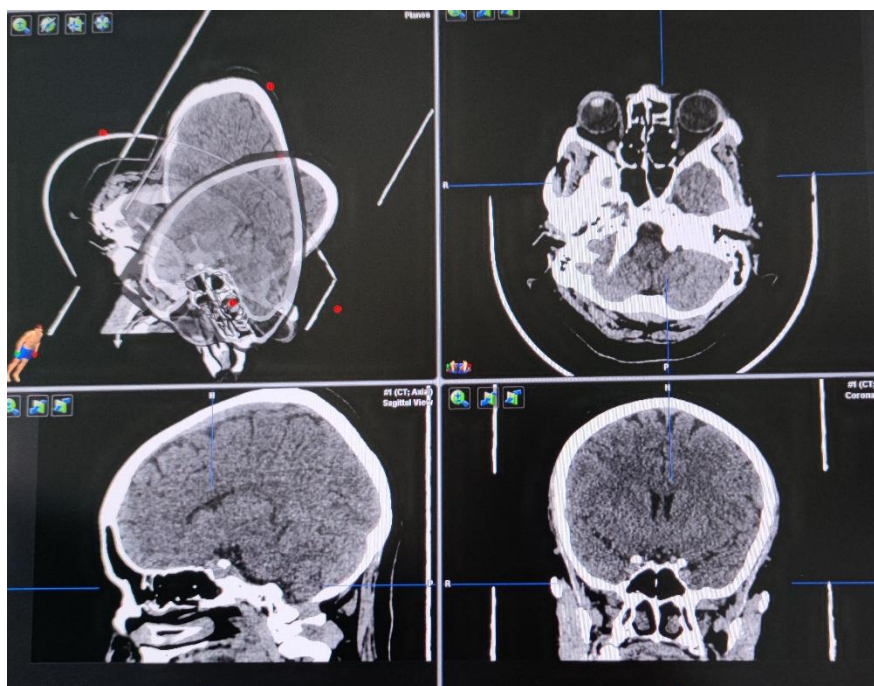


Figure 42 : Capture d'écran du logiciel de planification BrainLab montrant des coupes sagittales, coronales et axiales d'une TDM pré-opératoire, d'une patiente souffrante d'une BOM

VI. Avantages de la neuro-navigation:

L'utilisation d'une nouvelle technique est subordonnée à la condition qu'elle apporte un réel bénéfice pour le patient et qu'elle ne complique pas la tâche du neurochirurgien pendant l'intervention.

D'après ce que nous avons discuté ci-dessus, les bénéfices de la neuro-navigation peuvent être répartis en trois catégories:

- Les bénéfices pour le patient:
 - Rasage du crâne limité.
 - Réduction de la taille de l'incision et du volet crânien.
 - Réduction de l'incidence des infections des plaies.
 - Réduction des transfusions sanguines.
 - Réduction des radiations en chirurgie du rachis et de l'hypophyse.
 - Réduction du risque de morbidité neurologique et de mortalité.
 - La durée du geste opératoire est raccourcie.
- Les bénéfices pour le chirurgien:
 - Permet une planification plus approfondie de la procédure, ce qui accroît la confiance du neurochirurgien.
 - Fournit un retour visuel constant sur l'emplacement des outils chirurgicaux.
 - Offre une précision accrue du repérage, permettant de déterminer les rapports de la lésion avec les structures cérébrales critiques à proximité.
- Les bénéfices pour l'hôpital:
 - Réduit les durées de séjour globales à l'hôpital et en unités de soins intensifs.
 - Réduit le coût global de la prise en charge.

VII. Inconvénients de la neuro-navigation:

Pour une utilisation per-opératoire, les systèmes de neuro-navigation doivent relier l'emplacement physique d'un patient aux modèles pré-opératoires au moyen d'une cartographie patient-image. En suivant un ensemble d'outils chirurgicaux spécialisés, cette cartographie permet au chirurgien de pointer vers un emplacement spécifique sur le patient et de voir l'anatomie correspondante dans les images pré-opératoires acquises précédemment.

Une limitation majeure des systèmes de neuro-navigation traditionnels basés sur l'imagerie pré-opératoire est la perte de précision dans la cartographie obtenue lors de la phase d'enregistrement. Ceci, conduit à ce qu'un emplacement physique sur le patient soit incorrectement signalé sur les images utilisées pour le guidage.[119]

Ces erreurs spatiales résultent de :

1. Inexactitudes techniques :

➤ La distorsion géométrique des images pré-opératoires :

En particulier dans les images IRM, qui conduisent à une différence entre l'anatomie d'un patient dans les espaces physiques et virtuels (Maurer et al. 1996). [120]. Une cause principale de ces distorsions est les inhomogénéités du champ magnétique (Jezzard et Clare 1999). [119], [121]. Bien qu'il existe de nombreuses approches dans la littérature pour corriger la distorsion, cette dernière ne peut toujours pas être supprimée totalement dans les appareils IRM actuels.

➤ L'imprécision de l'étendue de la tumeur dans l'espace image :

Pallud et al.[122] ont découvert que l'IRM conventionnelle sous-estime l'étendue spatiale réelle des gliomes diffus de bas grade. Ils déclarent qu'une résection étendue, d'une marge au-delà des anomalies définies par l'IRM, chaque fois

que possible dans des zones cérébrales non éloquentes, pourrait améliorer le résultat. De nombreuses images de différentes modalités peuvent être utilisées pour aider à améliorer l'étendue de la résection tumorale. Dans une autre étude, Pirotte et al.[123] ont intégré la tomographie par émission de positrons (TEP) dans la neuro-navigation. Ils ont découvert que les images TEP pouvaient aider à augmenter la quantité de tumeurs retirées. Elles peuvent également guider la résection vers les parties tumorales qui représentent le potentiel d'évolution le plus élevé.[124]

➤ Les erreurs de localisation fiduciaires (FLE) lors de l'enregistrement :

Dans l'enregistrement des points appariés, les chirurgiens doivent localiser manuellement les points repères correspondants dans les deux espaces. Pour chaque point de repère sélectionné dans l'espace image, il existe un point correspondant unique dans l'espace patient. L'erreur dans la sélection des points correspondants est l'une des principales sources du FLE. Selon l'étude de Woerdeman et al. [125], la sélection manuelle des points repères a été suffisamment stable et précise pour la neuro-navigation si les chirurgiens comprenaient bien la méthode de sélection.

En outre, l'erreur et le mouvement des marqueurs de repère lors de la numérisation des images peuvent entraîner un FLE encore plus important. En TDM ou IRM, certains supports de tête et coussins sont utilisés pour stabiliser la tête pendant le processus de numérisation. Une grande surface de peau dans la région occipitale se déformera à cause de la pression. Si un marqueur de repère est placé dans cette zone, sa position sur les images et celle sur le patient ne sont plus une paire de points correspondants. Quelle que soit la précision avec laquelle ils sont localisés dans chaque espace, l'erreur de localisation pour cette paire de points de repère est encore très grande.

Un autre facteur important du FLE est que les marqueurs adhésifs sur la peau peuvent tomber de la tête du patient après la numérisation de l'image et peuvent être

replacés au mauvais endroit. Il est recommandé de marquer la position des marqueurs de repère après la numérisation de l'image pour éviter ce type de déplacement.[124], [126]

➤ L'incohérence de la forme du visage entre les deux espaces en raison de l'expression faciale dans l'enregistrement de surface :

Dans l'enregistrement de surface, l'espace image comporte la forme du visage lors de la numérisation de l'image. Celle-ci peut être différente de la forme du visage lors de la phase d'enregistrement au bloc opératoire. Marmulla et al.[127] ont constaté que la différence moyenne de la peau du visage a été de 1,1 mm lorsque le patient est allongé et de 1,7 mm lorsque le patient est allongé et souriant. D'autres facteurs, tels que l'existence d'une intubation trachéale lors de l'enregistrement, peuvent entraîner des différences encore plus importantes. Les chirurgiens doivent essayer d'éviter ce genre de différences lorsqu'ils utilisent l'enregistrement de surface.[124]

➤ Les mouvements du cadre de référence pendant l'opération :

De toutes les erreurs causées par la négligence des chirurgiens, la plus importante est le mouvement relatif entre le cadre de référence et la tête du patient après l'enregistrement. Si le cadre de référence n'est pas fixé fermement avec le serre-tête, de nombreuses activités peuvent provoquer son mouvement par rapport à la tête, telles que la traction des champs opératoires, la collision par les chirurgiens, etc. La transformation calculée à partir de l'enregistrement de l'espace ne peut donc plus refléter la relation entre la tête du patient et les images. Un petit mouvement du cadre de référence peut entraîner une très grande erreur de transformation (plusieurs centimètres). Les chirurgiens utilisant un système de navigation doivent être très prudents quant au mouvement relatif entre le cadre de référence et la tête. Dans de nombreux systèmes de navigation, des procédures de vérification peuvent être exécutées pour détecter ce type de mouvement.[124]

2. Inexactitudes liées au phénomène de brain shift :

Malheureusement, le mouvement du cerveau pendant la chirurgie invalide la cartographie patient-image. Il réduit ainsi l'efficacité de l'utilisation des images pré-opératoires pour le guidage chirurgical per-opératoire. Le brain shift est un phénomène spatio-temporel complexe avec une grande variété de causes. En plus des limitations liées au matériel de neuro-navigation, des causes chirurgicales dues à la résection de tissus et à la perte de LCR sont possibles. Des effets biologiques liés à l'administration des médicaments, comme le mannitol, sont également parmi les causes possibles du brain shift. Ces problèmes ne peuvent pas être correctement pris en compte avec les systèmes de neuro-navigation basés uniquement sur des images pré-opératoires. En conséquence, la plupart des chirurgiens utilisent des systèmes de neuro-navigation pour approcher une cible chirurgicale, mais ne font plus confiance au système tout au long d'une opération. Au cours des 20 dernières années, des recherches approfondies ont été menées sur la caractérisation et la correction du phénomène de brain shift[119]. De nombreuses études ont indiqué que l'ampleur de la déformation du cerveau a été très variable dans des cas différents. Dans certains cas, la déformation a été si importante que la navigation a dû être arrêtée.

Roberts et al.[128] ont étudié vingt-huit cas et ont trouvé que la déformation moyenne de la surface corticale a été de 1 cm.

Hill et al. [129] ont mesuré la déformation de la surface cérébrale après ouverture de la dure-mère, mais avant résection dans vingt-et-un cas. Les mesures ont été effectuées à deux moments différents. Ils ont constaté que la déformation moyenne de la surface du cerveau a été de 4,4 mm juste après l'ouverture de la dure-mère et de 5,6 mm environ 1 heure plus tard.

Nimsky et al. [130] ont mesuré la déformation à différents sites du cerveau dans soixante-quatre cas par IRM per-opératoire. Ils ont classé la déformation en trois niveaux : élevé (>7 mm), modéré (3,0-6,9 mm) et faible (0-2,9 mm). Pour le cortex,

la déformation a été élevée dans 63 % des cas, modérée dans 14 % et faible dans 23 %. Pour la marge tumorale profonde, la déformation a été élevée dans 24 % des cas, modérée dans 42 % et faible dans 34 %.

Selon les recherches menées par Khan et al. [131], la déformation cérébrale existe également en neurochirurgie sans ouverture du crâne. Ils ont trouvé une déformation maximale de 4 mm chez vingt-cinq patients ayant subi une stimulation cérébrale profonde.

Après l'ouverture de la dure-mère, d'autres opérations chirurgicales, telles que l'ouverture du système ventriculaire et les résections, peuvent entraîner une déformation encore plus grave du cerveau.[124]

Les stratégies de mesure du brain shift vont de la mesure directe à des techniques complexes d'imagerie per-opératoire qui peuvent fournir des images à jour pour la navigation. Un des travaux les plus prometteurs dans le domaine et qui a connu un succès croissant, est la simulation du changement de cerveau à l'aide de modèles mathématiques.[119]

Il reste encore de nombreux défis à surmonter pour compléter la compréhension du brain shift afin de faciliter les prédictions précises et la correction du phénomène. Bien qu'il soit largement admis que l'une des principales causes incontrôlables du déplacement du cerveau est la gravité, il existe de nombreux facteurs supplémentaires qui, jusqu'à récemment, ont été négligés. Au fur et à mesure que les stratégies de compensation deviennent plus complexes et efficaces, les contributions des plus petits effets devront être mieux comprises. Cela signifie qu'il est important que davantage d'études soient menées à l'avenir pour confirmer les facteurs rapportés et caractériser précisément leurs contributions. Le besoin de caractérisation sera extrêmement important pour les stratégies prédictives de compensation du déplacement cérébral. Plus on connaît d'informations sur les mécanismes sous-jacents du brain shift, plus ces stratégies auront de chances de réussir à l'avenir. [119]

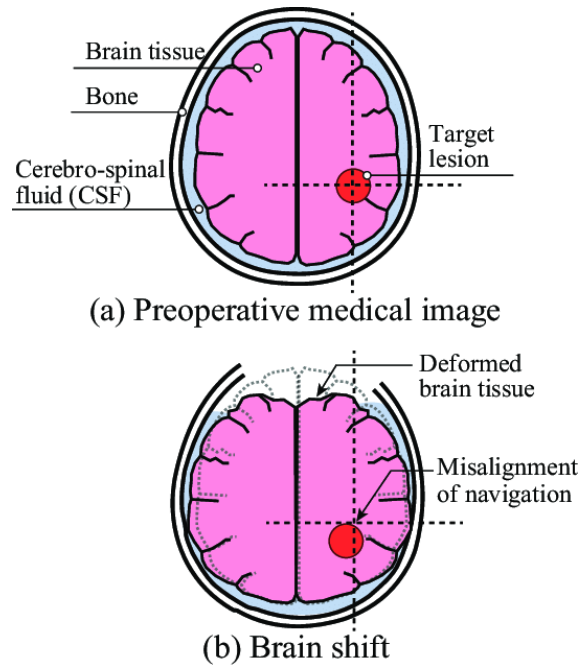


Figure 43. Image illustrative du phénomène du Brain Shift

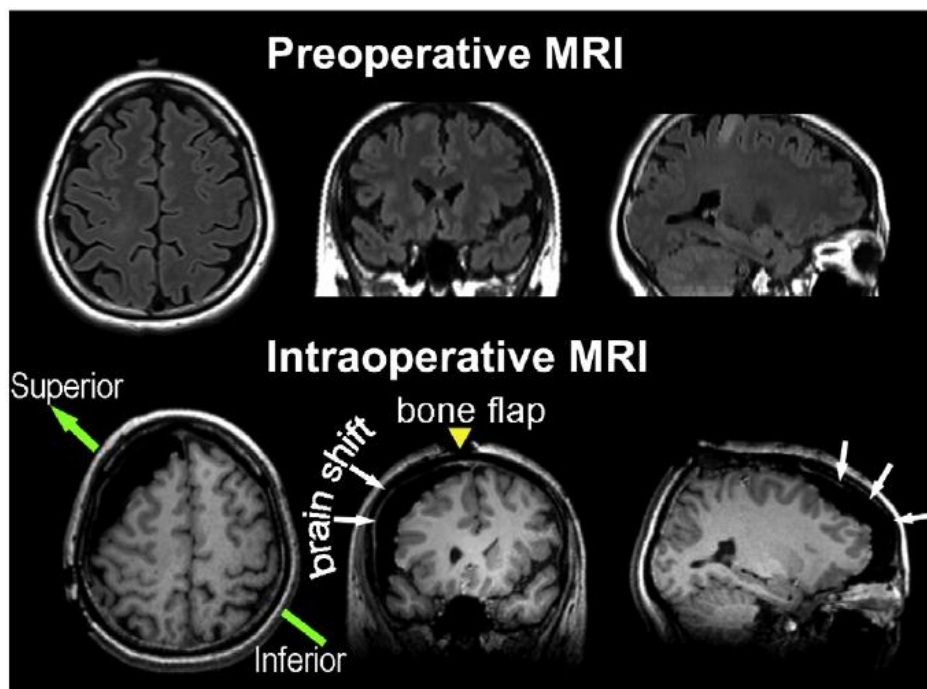


Figure 44. Démonstration du déplacement du cerveau causé par la craniotomie. La rangée supérieure montre les vues orthographiques de l'image structurale préopératoire (T2 FLAIR). La rangée inférieure montre les plans correspondants des images acquises en per-opératoire du même patient. Les flèches blanches montrent la déformation du cerveau. La flèche jaune indique la ligne d'incision sur le cuir chevelu (lambeau osseux). La flèche verte indique la direction de la tête du patient.

VIII. Avenir de la neuro-navigation:

Il est difficile de fournir un pronostic pour le développement et le rôle de la chirurgie naviguée à l'avenir, car la technologie informatique évolue si rapidement.[132]

1)Technologies:

a. Les systèmes de localisations:

Les systèmes de localisation les plus utilisés actuellement sont les numériseurs optiques et, dans une moindre mesure, électromagnétiques. La précision et la robustesse de ces méthodes ont été satisfaisantes pour une utilisation pratique dans la salle d'opération. Les contraintes respectives de ligne de visée et l'interférence ferromagnétique ont été généralement acceptées. Il n'y a pas eu de pression importante ou immédiate pour aller au-delà de ces technologies. Neanmoins, il existe des méthodologies émergentes offrant des améliorations potentielles en étant moins intrusives et plus automatisées. Potentiellement, les scanners laser pourraient traquer le cerveau ou la surface de résection en per-opératoire. Ils jouent ainsi un rôle dans la mise à jour de l'enregistrement au cours d'une procédure.

Enfin, l'intégration de plus d'un système de localisation dans une procédure deviendra probablement plus courante et offrira des avantages de complémentarité. Les systèmes de localisation de secours qui fonctionnent lorsque des contraintes (par exemple, la ligne de vue) empêchent l'utilisation d'un système primaire sont actuellement coûteux, mais pourraient évidemment être utiles.[18]

b. L'enregistrement:

Les méthodes d'enregistrement basées sur les points de référence ont dominé les systèmes de neuro-navigation à présent, bien que des alternatives aient été explorées. [133, 134]. Les méthodes d'enregistrement à partir de points de référence, qu'elles soient basées sur des repères sur le cuir chevelu ou autres, sont faciles à mettre en œuvre et raisonnablement robustes [135]. Cependant, tel qu'elles sont actuellement mises en œuvre, elles présentent certains inconvénients notamment la nécessité d'une participation manuelle au processus d'enregistrement. On peut raisonnablement prévoir que cette inefficacité conduira à l'automatisation du processus. Les scanners laser ou les systèmes basés sur une caméra détectant automatiquement les repères peuvent accomplir cette tâche.

Un second axe de développement, déjà inhérent à l'imagerie per-opératoire, sera celui de l'enregistrement actualisé ou itératif pour tenir compte des changements per-opératoires du champ opératoire.[18]

c. L'imagerie per-opératoire:

L'imagerie per-opératoire a connu un large éventail d'utilisations au cours des deux dernières décennies, l'accent étant mis principalement sur l'IRMi et l'USi. L'avantage de l'imagerie per-opératoire est qu'elle permet une visualisation actualisée de l'anatomie du patient. Ceci est extrêmement important lors de l'enquête sur le brain shift, car il permet une enquête à la fois qualitative et quantitative. Comme le montre la littérature, l'IRMi est un outil très utile pour l'imagerie per-opératoire. Elle a la capacité de visualiser les tissus de différentes manières en raison de la grande variété de séquences d'imagerie disponibles. La superposition des données fonctionnelles, de diffusion et de perfusion constituerait une vue en réalité virtuelle du cerveau. De plus, la mise à jour continue de cette image en per-opératoire guiderait parfaitement le neurochirurgien avec la plus petite marge d'erreur possible dans la localisation, le ciblage et la réévaluation de la lésion et des tissus environnants.

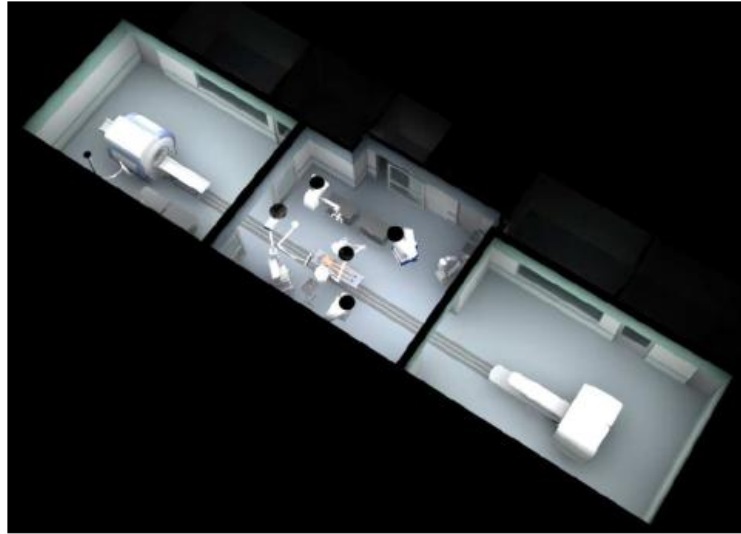


Figure 45. Salle d'opération multimodale: trois salles d'opération sont connectées par des rails pour le transport du patient. Les deux pièces aux extrémités offrent respectivement une IRM 3 teslas et un TEP/CT.

De nombreux facteurs rendent cette technologie indisponible pour la plupart des centres dans le monde. L'appareil IRMi est extrêmement coûteux et nécessite une salle d'opération dédiée, des outils spécialisés ainsi qu'un personnel spécialement formé pour une utilisation quotidienne. Un autre facteur important est lié au temps que l'IRMi ajoute à une procédure. Ce temps est de l'ordre de 40min ou plus par scan/utilisation. Ces problèmes font qu'il est difficile pour l'IRMi de devenir une routine, sauf dans les plus grands centres universitaires.[119]



Figure 46. Bloc opératoire équipé d'une IRM.

D'autre part, l'USi a également été étudié pour le brain shift:

L'échographie fournit une imagerie en temps réel sans irradiation pour le patient. L'échographie per-opératoire n'a aucune exigence particulière sur l'arsenal neurochirurgical ou l'environnement du bloc opératoire. Les appareils échographiques sont nettement moins chers que les TDMi et en particulier l'IRMi. Il est donc aisé de supposer que l'échographie per-opératoire a sa place dans la neuro-navigation de demain. Le principal défi associé à l'USi est de relier les informations à l'imagerie pré-opératoire telle que l'IRM. L'alignement des images USi sur IRM est une tâche difficile en raison de la nature et de la qualité très différentes des deux modalités. Les images échographiques per-opératoires sont généralement de moindre qualité, mais ont la capacité de montrer différents tissus, les frontières entre les tissus, ainsi que les frontières entre les lésions et les tissus sains. [119]

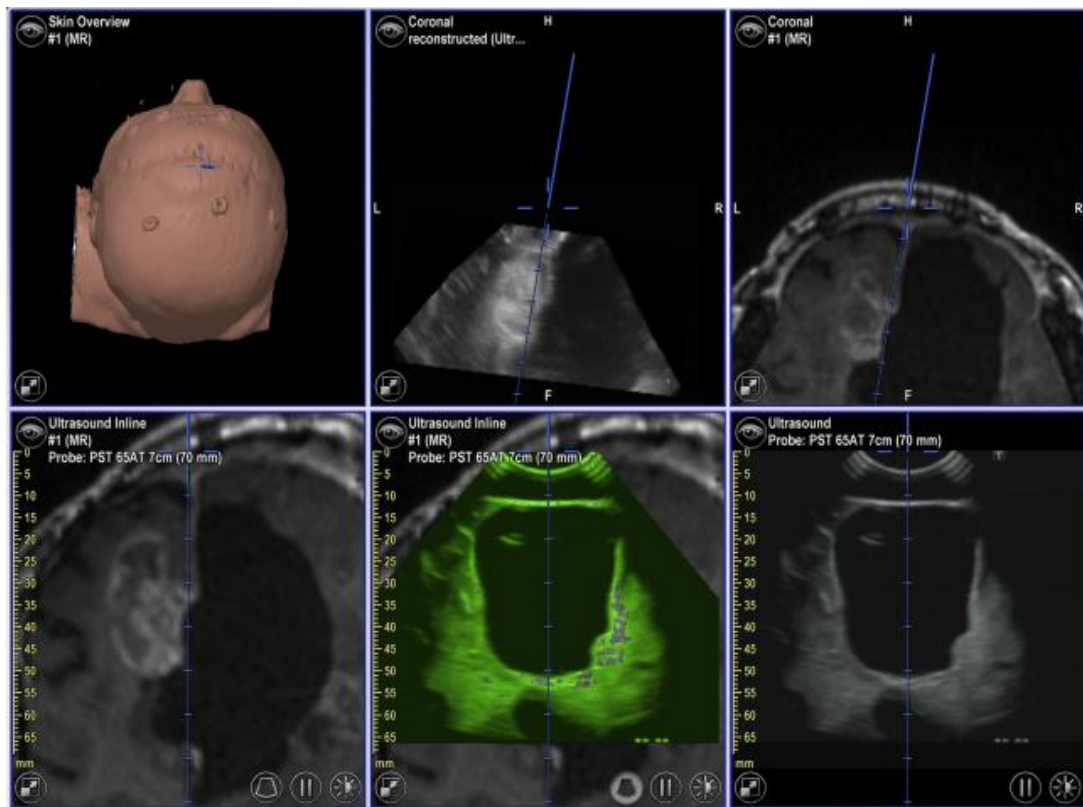


Figure 47. Échographie per-opératoire combinée à l'IRM pré-opératoire.

Neuro-navigation et scanner per-opératoire:

À l'avenir, l'intégration de la TDMi en neuro-navigation ne sera pas la direction principale du développement de la technologie guidée par l'image en raison de la charge de rayonnement pour les patients. L'avantage de la technologie basée sur la TDMi par rapport à l'imagerie IRMi est sa simplicité associée à une qualité d'image suffisante. [136]

Neuro-navigation et SPECT et TEP per-opératoires:

À l'heure actuelle, leur introduction au bloc opératoire est en effet impossible et peu rentable. Les progrès technologiques futurs prévaudront probablement sur ces obstacles et permettront leur réelle intégration per-opératoire avec la neuro-navigation. [136]

d. La robotique:

Les robots sont des dispositifs inventés pour effectuer automatiquement des actions avec une précision ultime. Les robots sont extrêmement utiles pour l'exécution des tâches répétitives, monotones ou fatigantes[137]. L'utilisation de robot complète parfaitement l'idée de la neuro-navigation[138]. Dans un avenir proche, les robots feront probablement partie intégrante du traitement neurochirurgical. Les robots intégrés à la neuro-navigation et équipés d'un intellect artificiel spécialement conçu seront les neurochirurgiens du future. En effet, la télérobotique pourrait permettre l'exécution à distance d'interventions neurochirurgicales dans des endroits éloignés.

L'intégration des robots à la neuro-navigation améliorera initialement les procédures neurochirurgicales actuelles, et ouvrira à long terme des interventions non envisagées actuellement. [136]

e. Télécommunications:

La possibilité de partager les données aisément sur des grandes distances pourrait être mise à profit dans certaines situations, notamment l'apport d'une expertise à distance pour l'assistance chirurgicale[139]. Pour le jeune neurochirurgien qui apprend une procédure ou le neurochirurgien plus expérimenté effectuant une opération rare, les conseils d'une expertise peuvent être inestimables. Couplées à une instrumentation robotisée, de telles liaisons pourraient permettre une véritable intervention technique à distance.[18]

2) Les applications:

Il est possible d'anticiper avec assurance l'extension généralisée des méthodes stéréotaxiques sans cadre à de nombreuses procédures chirurgicales supplémentaires, à la fois neurochirurgicales et autres.

L'adaptation précoce de la neuro-navigation à la chirurgie des tumeurs intracrâniennes a été logique étant donné sa capacité à trouver des petites lésions et à définir l'étendue des plus grandes. Si ce n'est déjà une norme, cette utilisation le deviendra presque certainement dans un futur très proche. Son utilité dans ce contexte ne fera que croître au fur et à mesure que toutes les avancées technologiques ci-dessus seront intégrées.

De même, l'application de la neuro-navigation dans les procédures fonctionnelles ne fera que continuer. Les procédures traditionnelles basées sur le cadre telles que le placement d'une aiguille de biopsie ou d'une électrode sont en cours de transition à des méthodes sans cadre. Les interventions fonctionnelles nécessitant une craniotomie – notamment la chirurgie de l'épilepsie – bénéficient déjà de ces techniques. L'incorporation de l'imagerie fonctionnelle et d'autres informations physiologiques poussera d'avantage l'adoption de ces méthodes.

En chirurgie cérébro-vasculaire, la neuro-navigation a peu de place dans les pathologies extra-axiales stéréotypique dans laquelle le guidage est moins essentiel, comme dans la chirurgie des anévrysmes. Mais, son utilisation dans des contextes sélectionnés, tels que les approches d'anévrysmes plus périphériques et atypiques ou d'alimentation vasculaire ou le drainage de malformations vasculaires, a déjà été appréciée. L'intégration de détails plus exacts à un anévrysme complexe peut également être attrayante.[18]

3) Implications pour la planification du traitement et pour la formation:

L'écart entre la planification chirurgicale et son exécution a été considérablement réduit. Dans une procédure élaborée telle que l'épilepsie, des équipes multidisciplinaires utilisant des informations provenant de l'imagerie structurelle, de l'imagerie fonctionnelle, de l'électrophysiologie, ainsi que des

considérations neuropsychologiques peuvent développer conjointement une stratégie de traitement. L'exécution de cette stratégie avec une précision millimétrique remplace la résection anatomique standardisée[140].

En tant qu'outil de formation chirurgicale, sa puissance n'a pas été pleinement appréciée. La simulation chirurgicale a nécessité des ressources informatiques plus puissantes et abordables pour décoller. Mais, les applications stéréotaxiques sont bien placées pour être à la pointe de ce développement.[18]

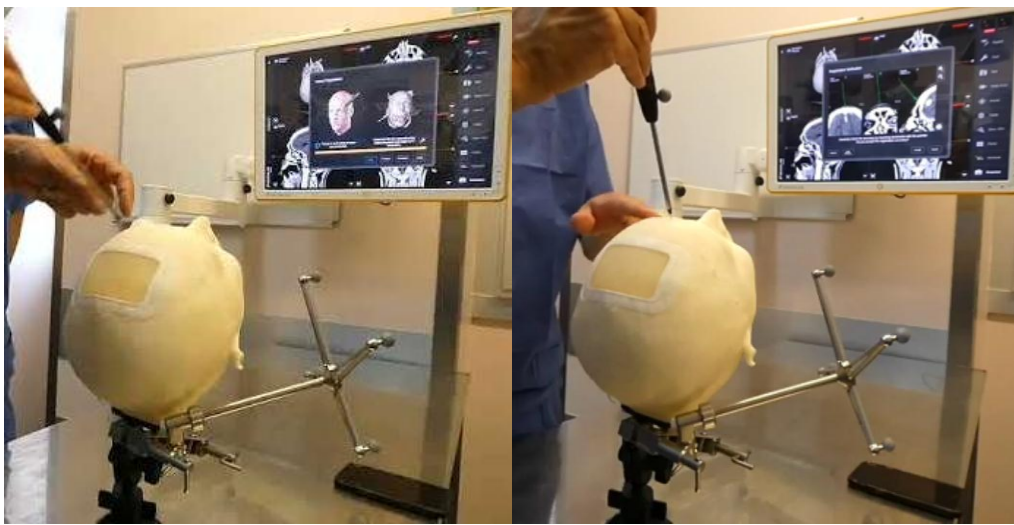
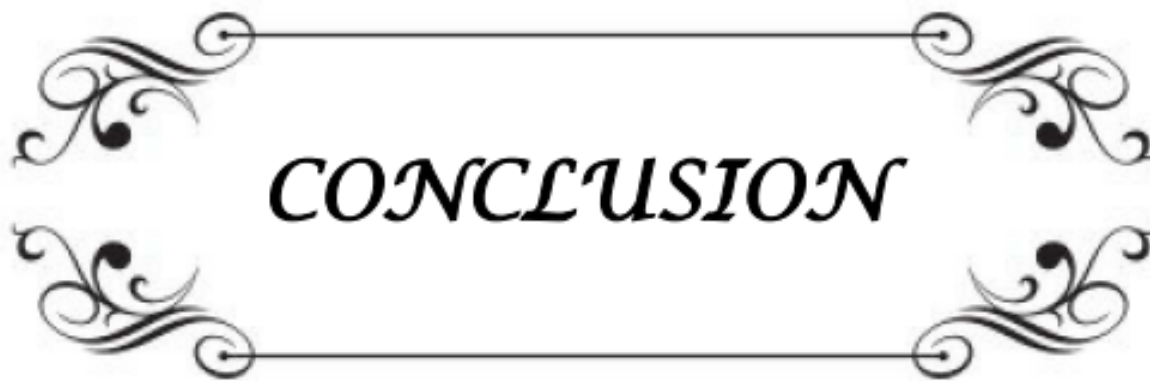


Figure 48. Simulateur 3D couplé à la neuro-navigation pour formation à l'accès crânien

La déformation du cerveau entraîne de très grande erreur d'application dans la neuro-navigation, c'est pourquoi de nombreuses études ont été menées pour résoudre ce problème, notamment en utilisant des images per-opératoires pour naviguer ou mettre à jour les images pré-opératoires[130], [141], en essayant de compenser la déformation en construisant un modèle déformable de cerveau et en le déformant en fonction de certaines informations per-opératoires[142]-[144], en enregistrant l'espace image directement avec le cerveau au lieu de l'enregistrer avec la tête[143], [145], [146], et en estimant directement la déformation par un modèle

statistique.[147], [148]. L'imagerie per-opératoire est une méthode efficace pour faire face à la déformation du cerveau, mais cela augmente le coût de la chirurgie et ajoute de la complexité à l'opération. Il est généralement reconnu qu'elle ne peut pas être largement appliquée dans un avenir prévisible. La plupart des autres approches sont encore en phase d'étude au laboratoire et n'ont pas été intégrées dans des systèmes commerciaux.[124]

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork at each corner. The word "CONCLUSION" is centered within the frame in a bold, italicized, serif font.

CONCLUSION

La neurochirurgie est une spécialité extraordinaire s'occupant de l'organe le plus précieux : le cerveau humain. Les neurochirurgiens ont toujours investi le plus haut degré d'efforts et de précision pour minimiser les «dommages collatéraux». En fait, toute l'histoire de la neurochirurgie est une quête pour la rendre la moins invasive possible, depuis l'utilisation des pinces coagulantes bipolaires il y a 100 ans, jusqu'à l'application des techniques d'imagerie les plus modernes, en particulier la neuro-navigation.

Pour les non-neurochirurgiens, la valeur de la neuro-navigation et de l'imagerie per-opératoire peut ne pas être claire. Pour comprendre l'importance de ces techniques, il faut tenir compte des limites inhérentes aux opérations neurochirurgicales: l'abondance des zones éloquentes et des vaisseaux sanguins majeurs, la rigidité du crâne et de la dure-mère, la fragilité du tissu cérébral et sa sensibilité aux manipulations chirurgicales, l'absence de repères visibles qui indiqueraient un passage sûr vers des structures profondes, etc. La neurochirurgie est aujourd'hui inimaginable sans neuro-navigation, tout comme le serait un hôpital de traumatologie sans radiographie, une salle d'opération d'urologie sans cystoscopes et une chirurgie cardiaque sans machines cœur-poumon.

En fait, la neuro-navigation est devenue si sophistiquée que de nouvelles modalités se disputent désormais l'attention des neurochirurgiens. Parmi les articles récemment publiés, il existe maintenant diverses techniques pour compenser le brain shift ; l'imagerie en tenseur de diffusion et la tractographie font leur entrée dans la planification préopératoire ; l'endoscopie visuelle, l'échographie endoscopique, l'échographie Doppler, l'IRM fonctionnelle haute résolution et la TEP s'intègrent dans les systèmes de neuro-navigation. En plus de l'application originale de la neuro-navigation dans les tumeurs cérébrales intrinsèques, la technique est maintenant appliquée à divers autres domaines neurochirurgicaux, y compris les résections

tumorales trans-sphénoïdales, l'ablation des cavernomes et des malformations artério-veineuses, des kystes parasitaires ou encore des clipping d'anévrismes intracrâniens. Il n'est pas surprenant que l'application de la navigation ait été largement acceptée en neurochirurgie fonctionnelle – après tout, la neurochirurgie stéréotaxique est née comme une technique de traitement des troubles fonctionnels (affections psychiatriques, douleur, troubles du mouvement et épilepsie). Actuellement, la neuro-navigation et l'imagerie per-opératoire sont utilisées à la fois pour les troubles du mouvement (pour l'insertion de stimulateurs cérébraux profonds) et pour la chirurgie de la douleur. De plus, la neuro-navigation est devenue un outil important dans la planification pré-chirurgicale, l'éducation neurochirurgicale, l'ablation des tumeurs, le clipping des anévrismes ou même la dérivation ventriculaire. On s'attend à ce que ce domaine suscite encore plus d'intérêt dans les années à venir.

Bien qu'il soit très excitant d'assister à ce formidable développement de la neurochirurgie, il est important de se rappeler que l'approche évolue avec les chirurgiens. La neuro-navigation est plus utile lorsqu'un « chirurgien est prêt à modifier sa technique ». Pour convaincre le monde entier des neurochirurgiens de l'utilité des nouvelles modalités, il faudra montrer des études de résultats à long terme bien conçues qui corréleront l'utilisation de la technique moderne avec une meilleure survie, moins de risques d'invalidité ou un taux de complications plus faible ; de telles études manquent à ce jour.

Le temps déterminera quelles techniques mériteront de faire partie de l'arsenal neurochirurgical et lesquelles seront oubliées comme inutiles ou trop compliquées. Cependant, une chose est sûre : la technologie qui rend les interventions neurochirurgicales plus sûres et plus efficaces, qui élimine les erreurs humaines et minimise les blessures, qui permet de gagner du temps et d'améliorer les résultats continuera de révolutionner nos approches. La salle d'opération d'aujourd'hui est déjà

très différente de ce que nous avons il y a 30 ans – les microscopes, les perceuses à grande vitesse et les systèmes de guidage d'image sont maintenant partout. Dans un avenir proche, la combinaison de neuro-navigateurs améliorés, plus intuitifs et plus fiables, de dispositifs d'imagerie et de visualisation per-opératoires et de robots neurochirurgicaux modifiera davantage la manière de pratiquer la neurochirurgie.

[149] [150] [151] [152][153][154][155]

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork at each corner. The word "ANNEXES" is centered within the frame in a bold, black, serif font.

ANNEXES

Fiche d'exploitation :

Date d'entrée :

Date de sortie :

N° de tele :

A) Identité :

- Nom-Prénom
- Sexe

B) Motif de consultation :

C) Antécédents médico-chirurgicaux :

- Oui
- Non
- Si oui lesquels :

D) Imagerie à l'admission :

- TDM
- IRM

E) Diagnostic final :

F) Préparation à la chirurgie :

- Durée d'hospitalisation :
- Type d'imagerie pré-opératoire
- Type d'anesthésie
- Type de marquage crânien pour enregistrement

G) Geste chirurgical :

- Date d'intervention
- Type du geste chirurgical
- Durée du geste
- Incidents per-opératoires

H) Evolution post-opératoire :

- Complications post-opératoires
- Traitement adjuvant
- Evolution au long terme



RÉSUMÉS

Résumé :

La neuronavigation ou neurochirurgie guidée par l'image est une technologie permettant le lien entre les instruments chirurgicaux et des logiciels d'assistance visuelle. C'est un système de guidage peropératoire qui permet de visualiser la boîte crânienne ou la colonne vertébrale en trois dimensions (3D). L'imagerie fonctionne comme un véritable GPS du corps humain. Elle permet, au cours de l'intervention chirurgicale, de fusionner les images radiologiques du patient avec sa propre anatomie. Nous avons réalisé une étude auprès du service de Neurochirurgie du CHU Hassan II de Fès, récoltant de façon rétrospective les dossiers de 72 patients opérés à l'aide de la neuronavigation durant une période de 10 ans allant du 07 février 2012 au 07 juillet 2021. L'objectif de notre étude est d'évaluer l'apport de la neuronavigation dans la prise en charge des pathologies neurochirurgicales dans notre service. L'âge de nos patients était compris entre 5 et 80 ans avec une moyenne d'âge de 40 ans, sans prédominance de sexe. Dans notre série, 29 patients avaient un adénome hypophysaire, 25 patients avaient une tumeur cérébrale primitive, 9 patients avaient une épilepsie réfractaire, 4 patients avaient un cavernome, 4 patients avaient un kyste colloïde et 1 patiente avait une brèche ostéo-méningée. L'IRM a été réalisée chez tous les patients et la TDM chez 68 patients. Tous les patients ont bénéficié d'une anesthésie générale. Le système de neuronavigation utilisé était BrainLab Colibri 2.0. Le marquage a été fait par des pastilles collées au crâne. La durée de l'acte chirurgical variait en fonction de l'indication avec une moyenne de 4h 20min [1h 50min -12heures]. Les gestes prévus (exérèse, aspiration de kyste, fermeture de BOM...) ont été effectués avec succès sans incidents per-opératoires. En post-opératoire, un seul patient opéré pour tumeur gliale a fait un réveil pathologique fait de crises convulsives généralisées. La neuronavigation permet de réaliser des

interventions neurochirurgicales plus précises et moins invasives avec la possibilité de préserver les zones fonctionnelles et d'assurer une exérèse totale des lésions. Les risques sont donc limités et la durée d'hospitalisation est réduite. Or son problème majeur réside dans les déformations cérébrales per-opératoires dont la solution en perspective pourrait être l'utilisation de modèles mathématiques prédictifs, ultrasons ou IRM per-opératoires...

Abstract :

Neuronavigation or image-guided neurosurgery is a technology that links surgical instruments to visual assistance softwares. It is an intraoperative guidance system that allows the visualization of the cranium or the rachis in three dimensions (3D). The imagery works like a true GPS of the human body. It allows, during the surgery, to merge the radiological images of the patient with his own anatomy. We carried out a study with the Neurosurgery department of the Hassan II University Hospital in Fez, retrospectively collecting the files of 72 patients operated on using neuronavigation during a period of 10 years from February 7, 2012 to July 7, 2021. The aim of our study is to evaluate the contribution of neuronavigation in the management of neurosurgical pathologies in our department. The ages of our patients ranged from 5 to 80 years with an average age of 40, without gender predominance. In our series, 29 patients had a pituitary adenoma, 25 patients had a primary brain tumor, 9 patients had refractory epilepsy, 4 patients had a cavernoma, 4 patients had a colloid cyst and 1 patient had an osteo-meningeal breach. MRI was performed in all patients and CT in 68 patients. All patients received general anesthesia. The neuronavigation system used was BRAINLAB Colibri 2.0. The registration was performed by using fiducials attached to the patient's head. The duration of the surgical act varied according to the indication with an average of 4h 20min [1h 50min -12heures]. The planned procedures (resection, cyst aspiration, OMB closure, etc...) were performed successfully without intraoperative incidents. Postoperatively, one patient operated on for a glial tumor presented generalized convulsive seizures at the emergence from anesthesia. Neuronavigation allows for more precise and less invasive neurosurgical interventions with the possibility of preserving functional areas and ensuring total resection of lesions. The risks are therefore limited and the

duration of hospitalization is reduced. However, its major problem lies in intraoperative brain shift and deformation, the solution of which could be the use of predictive mathematical models, intraoperative ultrasound or MRI...

ملخص :

الملاحة الجراحية العصبية أو جراحة الأعصاب الموجهة بالصور هي تقنية تربط بين الأدوات الجراحية وبرامج المساعدة البصرية. إنه نظام توجيه يمكن من تجسيد دماغ المريض أو عموده الفقري في صورة ثلاثية الأبعاد. كما تمكن الملاحة العصبية بدمج الصور الإشعاعية للمريض مع تشريحه الخاص. أجرينا دراسة رجعية مع قسم جراحة المخ والأعصاب في المستشفى الجامعي الحسن الثاني بفاس، حيث قمنا بجمع ملفات 72 مريضاً أجروا جراحة باستخدام الملاحة العصبية خلال فترة 10 سنوات امتدت ما بين 7 فبراير 2012 و 7 يوليوز 2021. الهدف من دراستنا هو تقييم مساهمة الملاحة العصبية في إدارة أمراض جراحة الأعصاب في قسمننا. تراوحت أعمار مرضانا من 5 إلى 80 سنة بمتوسط عمر 40 سنة، دون تمييز بين الجنسين. في سلسلتنا، كان 29 مريضاً مصاباً بورم في الغدة النخامية، 25 مريضاً يعانون من أورام دماغية أولية، 9 مرضى مصابين بالصرع المقاوم للعلاج، 4 مرضى مصابين بورم كهفي، 4 مرضى مصابين بكيس غرواني، ومريض واحد كان يعاني من خرق للعظم السحائي. تم إجراء التصوير بالرنين المغناطيسي لجميع المرضى والتصوير المقطعي المحوسب ل 68 مريضاً. تلقى جميع المرضى تخديراً عاماً، و كان نظام الملاحة العصبية المستخدم هو BRAINLAB Colibri 2.0. تمت عملية التسجيل بواسطة لاصقات وضعت على رأس المريض، و تباينت مدة إجراء العمليات الجراحية حسب دواعي الجراحة بمتوسط 4 ساعات و 20 دقيقة [ساعة و 50 دقيقة - 12 ساعة]. تم إجراء الجراحات بنجاح دون حوادث أثناء الجراحة. بعد الجراحة، عانى مريض واحد من نوبة صرع معممة أثناء الاستيقاظ من التخدير. تمكن الملاحة العصبية من إجراء تدخلات جراحية أكثر دقة وأقل ضرراً مع إمكانية الحفاظ على المناطق الوظيفية للدماغ وضمان الاستئصال الكامل للأورام، وهذا يقلل من مخاطر الجراحة وكذا من مدة الاستشفاء. لكن ورغم ذلك لا يزال تحول الدماغ وتشوّهه أثناء العملية يشكل مشكلة كبيرة قد يمكن حلها باستخدام النماذج الرياضية التنبؤية أو الموجات فوق الصوتية والتصوير بالرنين المغناطيسي أثناء العملية...



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gaël BATAN, Saâd BEN DADI, Magali LABORDE, « Les systèmes de navigation en neurochirurgie », 2006–2005. http://www.utc.fr/master_qualite/public/publications/qualite_et_biomedical/UTC/master_mts/2005_2006/projets/neuro-navigation/neuro-navigation.htm
- [2] A. Griche, « Intérêt de la neuro-navigation en neurochirurgie: expérience du service de neurochirurgie de L'hôpital Ar-razi CHU Mohammed VI », Thèse, Faculté de médecine et pharmacie de Fès, Fès, 2018. <http://wd.fmpm.uca.ma/biblio/theses/annee-htm/FT/2018/these34-18.pdf>
- [3] M. Ivanov et A. Vlad Ciurea, « Neuro-navigation. Principes. Surgical technique. », J. Med. Life, vol. 2, no 1, p. 29-35, 2009, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5051478/>
- [4] C. Stippich, Clinical Functional MRI: Presurgical Functional Neuroimaging. Springer, 2015.
- [5] Anthony Tessier, « Apport en bloc de neurochirurgie du couplage entre la neuro-navigation et l'IRM per-opératoire dans le traitement chirurgical des tumeurs cérébrales ». <http://new.afppe.com/downloads/2016/12/190.pdf>
- [6] N. W. D. Thomas et J. Sinclair, « Image-Guided Neurosurgery: History and Current Clinical Applications », J. Med. Imaging Radiat. Sci., vol. 46, no 3, p. 331-342, sept. 2015, doi: 10.1016/j.jmir.2015.06.003.
- [7] Q. Zheng, C. Liu, Q. Pan, J. Chang, et J. Cui, « Development status and application of neuro-navigation system », J. Complex. Health Sci., vol. 3, no 1, Art. no 1, 2020, doi: 10.21595/chs.2020.21260.
- [8] M. Ivanov et A. Vlad Ciurea, « Neuro-navigation. Principes. Surgical technique. », J. Med. Life, vol. 2, no 1, p. 29-35, 2009,. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5051478/>

- [9] O. Ganslandt, S. Behari, J. Gralla, R. Fahlbusch, et C. Nimsky, « Neuro–navigation: concept, techniques and applications », *Neurol. India*, vol. 50, no 3, p. 244-255, sept. 2002.
- [10] A. Weidner, M. Wähler, S. T. Chiu, et C. G. Ullrich, « Modification of C1–C2 transarticular screw fixation by image–guided surgery », *Spine*, vol. 25, no 20, p. 2668-2673; discussion 2674, oct. 2000, doi: 10.1097/00007632–200010150–00020.
- [11] P. Di Donate, A. Bergery, S. Largillière, et J. J. Lemaire, « La neuro–navigation : principe et intérêt », *ITBM–RBM*, vol. 21, no 2, p. 70-77, avr. 2000, doi: 10.1016/S1297–9562(00)90008–1.
- [12] E. Masson, « La neurochirurgie guidée par l'image : intérêt de la neuro–navigation », *EM–Consulte*.<https://www.em-consulte.com/article/925010/la-neurochirurgie-guidee-par-l-image-interet-de-l>.
- [13] Erasmo Barros da Silva Jr., M.D., M.Sc, Lucas Alves Aurich, M.D, Luis Fernando Moura da Silva Jr., M.D, Jerônimo Buzetti Milano, M.D., Ph.D, et Ricardo Ramina, M.D., M.Sc., Ph.D, « Neuro–navigationforIntracranialMeningiomas »,brazil,p.7. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjpiB3Invj0AhUT5OAKHWv8BowQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fjbn.c.emnuvens.com.br%2Fjbn.c%2Farticle%2Fdownload%2F1033%2F921%2F&usg=AOvVaw2QCRVe52F6UUzmkdFfy3X_
- [14] O. R. M. Malilay, K. P. Ferraris, et J. E. V. Navarro, « Editorial. Neurosurgical planning in a low–resource setting using free open–source three–dimensional volume–rendering software », *Neurosurg. Focus*, vol. 50, no 1, p. E2, janv. 2021, doi: 10.3171/2020.10.FOCUS20772.
- [15] M. Ivanov et A. Vlad Ciurea, « Neuro–navigation. Principles. Surgical technique. », *J. Med. Life*, vol. 2, no 1, p. 29-35, 2009, Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5051478/>

- [16] A. Mert, L. S. Gan, E. Knosp, G. R. Sutherland, et S. Wolfsberger, « Advanced Cranial Navigation », *Neurosurgery*, vol. 72, no suppl_1, p. A43-A53, janv. 2013, doi: 10.1227/NEU.0b013e3182750c03.
- [17] A. Kato et al., « A frameless, armless navigational system for computer-assisted neurosurgery. Technical note », *J. Neurosurg.*, vol. 74, no 5, p. 845-849, mai 1991, doi: 10.3171/jns.1991.74.5.0845.
- [18] A. M. Lozano, P. L. Gildenberg, et R. R. Tasker, *Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [19] G. F. Woodworth, M. J. McGirt, A. Samdani, I. Garonzik, A. Olivi, et J. D. Weingart, « Frameless image-guided stereotactic brain biopsy procedure: diagnostic yield, surgical morbidity, and comparison with the frame-based technique », *J. Neurosurg.*, vol. 104, no 2, p. 233-237, févr. 2006, doi: 10.3171/jns.2006.104.2.233.
- [20] « (9) Accuracy of frameless and frame-based image-guided stereotactic brain biopsy in the diagnosis of glioma: Comparison of biopsy and open resection specimen|RequestPDF». https://www.researchgate.net/publication/7793874_Accuracy_of_frameless_and_frame-based_image-guided_stereotactic_brain_biopsy_in_the_diagnosis_of_glioma_Comparison_of_biopsy_and_open_resection_specimen
- [21] D. A. Orringer, A. Golby, et F. Jolesz, « Neuro-navigation in the surgical management of brain tumors: current and future trends », *Expert Rev. Med. Devices*, vol. 9, no 5, p. 491-500, sept. 2012, doi: 10.1586/erd.12.42.
- [22] A. H. Friedman, « Advanced Techniques in Image-Guided Brain and Spine Surgery. », *Neuro-Oncol.*, vol. 6, no 1, p. 77, janv. 2004, doi: 10.1215/S1152851703200028.

- [23] G. H. Barnett, D. W. Miller, et J. Weisenberger, « Frameless stereotaxy with scalp-applied fiducial markers for brain biopsy procedures: experience in 218 cases », *J. Neurosurg.*, vol. 91, no 4, p. 569-576, oct. 1999, doi: 10.3171/jns.1999.91.4.0569.
- [24] M. Bernstein et al., *Neuro-Oncology*, 3rd Edition. Thieme Verlag, 2015. doi: 10.1055/b-002-98007.
- [25] T. M. Soo, M. Bernstein, J. Provias, R. Tasker, A. Lozano, et A. Guha, « Failed stereotactic biopsy in a series of 518 cases », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 64, no 4, p. 183-196, 1995, doi: 10.1159/000098747.
- [26] Y. D et al., « Neurosurgical management of single brain metastasis », *Surg. Neurol.*, vol. 21, no 4, avr. 1984, doi: 10.1016/0090-3019(84)90118-6.
- [27] E. E. MacGee, « Surgical treatment of cerebral metastases from lung cancer. The effect on quality and duration of survival », *J. Neurosurg.*, vol. 35, no 4, p. 416-420, oct. 1971, doi: 10.3171/jns.1971.35.4.0416.
- [28] F. Haar et R. H. Patterson, « Surgical for metastatic intracranial neoplasm », *Cancer*, vol. 30, no 5, p. 1241-1245, nov. 1972, doi: 10.1002/1097-0142(197211)30:5<1241::aid-cncr2820300515>3.0.co;2-5.
- [29] « SURVIVAL AFTER SURGICAL EXCISION OF SINGLE METASTATIC BRAIN TUMORS : American Journal of Roentgenology : Vol. 111, No. 2 (AJR) ». <https://www.ajronline.org/doi/10.2214/ajr.111.2.323?mobileUi=0> (consulté le 19 janvier 2022).
- [30] J. H. M. Van Eck, K. G. Go, et E. J. Ebels, « PRIMARY AND METASTATIC BRAIN TUMOURS », *The Lancet*, vol. 289, no 7486, p. 386, févr. 1967, doi: 10.1016/S0140-6736(67)92923-6.
- [31] S. J. McGirr, P. J. Kelly, et B. W. Scheithauer, « Stereotactic resection of juvenile pilocytic astrocytomas of the thalamus and basal ganglia », *Neurosurgery*, vol. 20, no 3, p. 447-452, mars 1987, doi: 10.1227/00006123-198703000-00016.

- [32] G. Schackert, A. Steinmetz, U. Meier, et S. B. Sobottka, « Surgical management of single and multiple brain metastases: results of a retrospective study », *Onkologie*, vol. 24, no 3, p. 246-255, juin 2001, doi: 10.1159/000055087.
- [33] K. Stachura et E. Grzywna, « Neuro-navigation-guided endoscopy for intraventricular tumors in adult patients without hydrocephalus », *Videosurgery Miniinvasive Tech.*, vol. 11, no 3, p. 200-207, sept. 2016, doi: 10.5114/wiitm.2016.61430.
- [34] P. J. Kelly, « Volumetric stereotactic surgical resection of intra-axial brain mass lesions », *Mayo Clin. Proc.*, vol. 63, no 12, p. 1186-1198, déc. 1988, doi: 10.1016/s0025-6196(12)65405-6.
- [35] B. C. Devaux, J. R. O'Fallon, et P. J. Kelly, « Resection, biopsy, and survival in malignant glial neoplasms. A retrospective study of clinical parameters, therapy, and outcome », *J. Neurosurg.*, vol. 78, no 5, p. 767-775, mai 1993, doi: 10.3171/jns.1993.78.5.0767.
- [36] P. J. Kelly, B. A. Kall, S. Goerss, et F. Earnest, « Computer-assisted stereotaxic laser resection of intra-axial brain neoplasms », *J. Neurosurg.*, vol. 64, no 3, p. 427-439, mars 1986, doi: 10.3171/jns.1986.64.3.0427.
- [37] P. J. Kelly, B. Kall, S. Goerss, et G. J. Alker, « Precision resection of intra-axial CNS lesions by CT-based stereotactic craniotomy and computer monitored CO2 laser », *Acta Neurochir. (Wien)*, vol. 68, no 1-2, p. 1-9, 1983, doi: 10.1007/BF01406196.
- [38] C. R. Wirtz et al., « The benefit of neuro-navigation for neurosurgery analyzed by its impact on glioblastoma surgery », *Neurol. Res.*, vol. 22, no 4, p. 354-360, juin 2000, doi: 10.1080/01616412.2000.11740684.
- [39] ALA-Glioma Study Group, « EXTENT OF RESECTION AND SURVIVAL IN GLIOBLASTOMA MULTIFORME: IDENTIFICATION OF AND ADJUSTMENT FOR BIAS », *Neurosurgery*, vol. 62, no 3, p. 564-576, mars 2008, doi: 10.1227/01.neu.0000317304.31579.17.

- [40] L. Xingang, « Application of neuro-navigation in the resection of superficial intracranial tumors with small, incision », undefined, 2006, .Disponiblesur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-neuro-navigation-in-the-resection-of-Xingang/70abbb7164e9df04bc1582246180018a65e8bebd>
- [41] M. Kurimoto et al., « Impact of neuro-navigation and image-guided extensive resection for adult patients with supratentorial malignant astrocytomas: a single-institution retrospective study », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 47, no 5, p. 278-283, oct. 2004, doi: 10.1055/s-2004-830093.
- [42] M. T. Lawton, J. G. Golfinos, T. R. Geldmacher, et R. F. Spetzler, « The state of the art of neuro-navigation with frameless stereotaxy in intracranial neurosurgery », *Oper. Tech. Neurosurg.*, vol. 1, no 1, p. 27-38, mars 1998, doi: 10.1016/S1092-440X(98)80006-6.
- [43] T. S. Paleologos, J. P. Wadley, N. D. Kitchen, et D. G. Thomas, « Clinical utility and cost-effectiveness of interactive image-guided craniotomy: clinical comparison between conventional and image-guided meningioma surgery », *Neurosurgery*, vol. 47, no 1, p. 40-47; discussion 47-48, juill. 2000, doi: 10.1097/00006123-200007000-00010.
- [44] I. M. Germano, H. Villalobos, A. Silvers, et K. D. Post, « Clinical Use of the Optical Digitizer for Intracranial Neuro-navigation », *Neurosurgery*, vol. 45, no 2, p. 261-269, août 1999, doi: 10.1097/00006123-199908000-00013.
- [45] M. M. Ammar, M. Mahmoud, A. E. A. Kreasha, et A. E. Mousa, « Evaluation of Neuro-navigation in Glioma Surgery », *Open J. Mod. Neurosurg.*, vol. 10, no 1, Art. no 1, nov. 2019, doi: 10.4236/ojmn.2020.101005.
- [46] T. Sun et al., « Surgical treatment and prognosis of focal brainstem gliomas in children: A 7 year single center experience », *Medicine (Baltimore)*, vol. 99, no 36, p. e22029, sept. 2020, doi: 10.1097/MD.00000000000022029.

- [47] S. F. Nemecek et al., « CT-MR image data fusion for computer assisted navigated neurosurgery of temporal bone tumors », *Eur. J. Radiol.*, vol. 62, no 2, p. 192-198, mai 2007, doi: 10.1016/j.ejrad.2006.11.029.
- [48] U. Sure, O. Alberti, M. Petermeyer, R. Becker, et H. Bertalanffy, « Advanced image-guided skull base surgery », *Surg. Neurol.*, vol. 53, no 6, p. 563-572; discussion 572, juin 2000, doi: 10.1016/s0090-3019(00)00243-3.
- [49] A. Kurtsoy, A. Menku, B. Tucer, I. S. Oktem, et H. Akdemir, « Neuro-navigation in skull base tumors », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 48, no 1, p. 7-12, févr. 2005, doi: 10.1055/s-2004-830151.
- [50] M. Nakamura et al., « Neuro-navigational guidance in craniofacial approaches for large (para)nasal tumors involving the anterior skull base and upper clival lesions », *Eur. J. Surg. Oncol. J. Eur. Soc. Surg. Oncol. Br. Assoc. Surg. Oncol.*, vol. 35, no 6, p. 666-672, juin 2009, doi: 10.1016/j.ejso.2008.10.011.
- [51] B. B. Burkey, M. T. Speyer, R. J. Maciunas, J. M. Fitzpatrick, R. L. Galloway, et G. S. Allen, « Sublabial, transseptal, transsphenoidal approach to the pituitary region guided by the ACUSTAR I system », *Otolaryngol.--Head Neck Surg. Off. J. Am. Acad. Otolaryngol.--Head Neck Surg.*, vol. 118, no 2, p. 191-194, févr. 1998, doi: 10.1016/S0194-5998(98)80012-0.
- [52] I. E. McCutcheon, R. S. Kitagawa, P. F. Demasi, B. K. Law, et K. E. Friend, « Frameless Stereotactic Navigation in Transsphenoidal Surgery: Comparison with Fluoroscopy », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 82, no 1, p. 43-48, 2004, doi: 10.1159/000076660.
- [53] U.-W. Thomale, J. F. Stover, et A. W. Unterberg, « The use of neuro-navigation in transnasal transsphenoidal pituitary surgery », *Zentralbl. Neurochir.*, vol. 66, no 3, p. 126-132; discussion 132, août 2005, doi: 10.1055/s-2005-836602.

- [54] G. Laborde, L. Klimek, A. Harders, et J. Gilsbach, « Frameless stereotactic drainage of intracranial abscesses », *Surg. Neurol.*, vol. 40, no 1, p. 16-21, juill. 1993, doi: 10.1016/0090-3019(93)90163-u.
- [55] S. Shahzadi, A. M. Lozano, M. Bernstein, A. Guha, et R. R. Tasker, « Stereotactic management of bacterial brain abscesses », *Can. J. Neurol. Sci. J. Can. Sci. Neurol.*, vol. 23, no 1, p. 34-39, févr. 1996, doi: 10.1017/s0317167100039159.
- [56] D.-Y. Cho, C.-C. Chen, C.-S. Chang, W.-Y. Lee, et M. Tso, « Endoscopic surgery for spontaneous basal ganglia hemorrhage: comparing endoscopic surgery, stereotactic aspiration, and craniotomy in noncomatose patients », *Surg. Neurol.*, vol. 65, no 6, p. 547-555; discussion 555-556, juin 2006, doi: 10.1016/j.surneu.2005.09.032.
- [57] P. M. Vespa, N. Martin, M. Zuccarello, I. Awad, et D. F. Hanley, « Surgical Trials in Intracerebral Hemorrhage », *Stroke*, vol. 44, no 6_suppl_1, p. S79-S82, juin 2013, doi: 10.1161/STROKEAHA.113.001494.
- [58] L. M. Auer et al., « Endoscopic surgery versus medical treatment for spontaneous intracerebral hematoma: a randomized study », *J. Neurosurg.*, vol. 70, no 4, p. 530-535, avr. 1989, doi: 10.3171/jns.1989.70.4.0530.
- [59] R. Thiex et al., « Frame-based and frameless stereotactic hematoma puncture and subsequent fibrinolytic therapy for the treatment of spontaneous intracerebral hemorrhage », *J. Neurol.*, vol. 251, p. 1443-50, déc. 2004, doi: 10.1007/s00415-004-0554-5.
- [60] C. Chen, H. Lee, C. Shen, et M. Sun, « Aspiration of hypertensive intracerebral hematoma with frameless and fiducial-free navigation system: technical note and preliminary result », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 86, no 5, p. 288-291, 2008, doi: 10.1159/000151716.

- [61] L. Zamorano, M. L. Planells, Z. Jiang, L. Nolte, A. M. Kadi, et F. Diaz, « Vascular malformations of the brain. Surgical management using interactive image guidance », *Neurosurg. Clin. N. Am.*, vol. 7, no 2, p. 201-214, avr. 1996.
- [62] M. B. Sisti, R. A. Solomon, et B. M. Stein, « Stereotactic craniotomy in the resection of small arteriovenous malformations », *J. Neurosurg.*, vol. 75, no 1, p. 40-44, juill. 1991, doi: 10.3171/jns.1991.75.1.0040.
- [63] S. Nakajima et al., « Computer-assisted surgical planning for cerebrovascular neurosurgery », *Neurosurgery*, vol. 41, no 2, p. 403-409; discussion 409-410, août 1997, doi: 10.1097/00006123-199708000-00013.
- [64] A. Muacevic et H. J. Steiger, « Computer-assisted resection of cerebral arteriovenous malformations », *Neurosurgery*, vol. 45, no 5, p. 1164-1170; discussion 1170-1171, nov. 1999, doi: 10.1097/00006123-199911000-00030.
- [65] S. M. Russell, H. H. Woo, S. S. Joseffer, et J. J. Jafar, « Role of frameless stereotaxy in the surgical treatment of cerebral arteriovenous malformations: technique and outcomes in a controlled study of 44 consecutive patients », *Neurosurgery*, vol. 51, no 5, p. 1108-1116; discussion 1116-1118, nov. 2002, doi: 10.1097/00006123-200211000-00002.
- [66] K. K. Tan et al., « A frameless stereotactic approach to neurosurgical planning based on retrospective patient-image registration. Technical note », *J. Neurosurg.*, vol. 79, no 2, p. 296-303, août 1993, doi: 10.3171/jns.1993.79.2.0296.
- [67] H. K. Gumprecht, D. C. Widenka, et C. B. Lumenta, « BrainLab VectorVision Neuro-navigation System: technology and clinical experiences in 131 cases », *Neurosurgery*, vol. 44, no 1, p. 97-104; discussion 104-105, janv. 1999, doi: 10.1097/00006123-199901000-00056.

- [68] T. S. Kim et al., « Neuro-navigation-assisted surgery for distal anterior cerebral artery aneurysm », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 50, no 3, p. 140-144, juin 2007, doi: 10.1055/s-2007-985151.
- [69] R. Schmid-Elsaesser, A. Muacevic, M. Holtmannspötter, E. Uhl, et H.-J. Steiger, « Neuro-navigation based on CT angiography for surgery of intracranial aneurysms: primary experience with unruptured aneurysms », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 46, no 5, p. 269-277, oct. 2003, doi: 10.1055/s-2003-44455.
- [70] S. H. Lee et J. S. Bang, « Distal Middle Cerebral Artery M4 Aneurysm Surgery Using Navigation-CT Angiography », *J. Korean Neurosurg. Soc.*, vol. 42, no 6, p. 478-480, déc. 2007, doi: 10.3340/jkns.2007.42.6.478.
- [71] F. G. de Carvalho, B. L. Godoy, M. Reis, E. L. Gasparetto, E. Wajnberg, et J. M. de Souza, « Frameless stereotactic navigation for intraoperative localization of infectious intracranial aneurysm », *Arq. Neuropsiquiatr.*, vol. 67, no 3B, p. 911-913, sept. 2009, doi: 10.1590/s0004-282x2009000500028.
- [72] 김진상, D.-W. Kim, et K. Sung-Don, « Navigation-guided Keyhole Approach for Unruptured Intracranial Aneurysms », *J. Cerebrovasc. Endovasc. Neurosurg.*, vol. 13, no 3, p. 244-248, 2011, . Disponiblesur: <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artild=ART001591175>
- [73] A. Khoshnevisan et S. Abdollahzadeh, « Neuro-navigation for Intraoperative Localization of Cerebral Aneurysms », *Arch. Neurosci.*, vol. 1, no 3, Art. no 3, oct. 2014, doi: 10.5812/archneurosci.16164.
- [74] P. Matz, M. McDermott, P. Gutin, W. Dillon, et C. Wilson, « Cavernous malformations: results of image-guided resection », *J. Image Guid. Surg.*, vol. 1, no 5, p. 273-279, 1995, doi: 10.1002/(SICI)1522-712X(1995)1:5<273::AID-IGS3>3.0.CO;2-7.

- [75] K. Ungersböck, M. Aichholzer, M. Günthner, K. Rössler, H. Görzer, et W. T. Koos, « Cavernous malformations: from frame-based to frameless stereotactic localization », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 40, no 4, p. 134-138, déc. 1997, doi: 10.1055/s-2008-1053434.
- [76] D. Winkler, D. Lindner, G. Strauss, A. Richter, R. Schober, et J. Meixensberger, « Surgery of cavernous malformations with and without navigational support—a comparative study », *Minim. Invasive Neurosurg. MIN*, vol. 49, no 1, p. 15-19, févr. 2006, doi: 10.1055/s-2005-919163.
- [77] B. J. Wellman, K. A. Follett, et V. C. Traynelis, « Complications of posterior articular mass plate fixation of the subaxial cervical spine in 43 consecutive patients », *Spine*, vol. 23, no 2, p. 193-200, janv. 1998, doi: 10.1097/00007632-199801150-00009.
- [78] A. W. Graham, M. L. Swank, R. E. Kinard, G. L. Lowery, et B. E. Dials, « Posterior cervical arthrodesis and stabilization with a lateral mass plate. Clinical and computed tomographic evaluation of lateral mass screw placement and associated complications », *Spine*, vol. 21, no 3, p. 323-328; discussion 329, févr. 1996, doi: 10.1097/00007632-199602010-00014.
- [79] C. Bolger et C. Wigfield, « Image-guided surgery: applications to the cervical and thoracic spine and a review of the first 120 procedures », *J. Neurosurg.*, vol. 92, no 2 Suppl, p. 175-180, avr. 2000, doi: 10.3171/spi.2000.92.2.0175.
- [80] « Sundaresan N, Steinberger A, Moore F, et al. Clinical applications of frameless stereotaxy in cervical spine tumor surgery. Presented at the XVth Annual Meeting of the Cervical Spine Research Society, European Section. Strasbourg, Germany; July 1999. – Recherche Google ».
<https://www.google.com/search?q=Sundaresan+N%2C+Steinberger+A%2C+Moore+F%2C+et+al.+Clinical+applications+of+frameless+stereotaxy+in+cervical+spine+tumor+surgery.+Presented+at+the+XVth+Annual+Meeting+of+the+Cer>

vical+Spine+Research+Society%2C+European+Section.+Strasbourg%2C+Germany%3B+July+1999.&hl=fr&biw=1326&bih=637&tbm=bks&sxsrf=APqWBvcBMnh_Xtc18u2oHEm3I_SpEayFg%3A1644408448893&ei=gK4DYrz3NdHVgQask5m4Ag&ved=0ahUKEwi8t9jryvL1AhXRasAKHaxJBicQ4dUDCAg&uact=5&oq=Sundaresan+N%2C+Steinberger+A%2C+Moore+F%2C+et+al.+Clinicalapplications+of+frameless+stereotaxy+in+cervical+spinetumor+surgery.+Presented+at+the+XVth+Annual+Meetingof+the+Cervical+Spine+Research+Society%2C+European+Section.+Strasbourg%2C+Germany%3B+July+1999.&gs_lcp=Cg1nd3Mtd2l6LWJvb2tzEANQQtYQQtgnBjoAnAAeACAAQCIAQCQAQCYAQCgAQGgAQKwAQDAAQE&sclient=gws-wiz-books

- [81] W. H. Castro, H. Halm, J. Jerosch, J. Malms, J. Steinbeck, et S. Blasius, « Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae », *Spine*, vol. 21, no 11, p. 1320-1324, juin 1996, doi: 10.1097/00007632-199606010-00008.
- [82] C. A. Sansur et al., « Scoliosis research society morbidity and mortality of adult scoliosis surgery », *Spine*, vol. 36, no 9, p. E593-597, avr. 2011, doi: 10.1097/BRS.0b013e3182059bfd.
- [83] P. Merloz, J. Tonetti, L. Pittet, M. Coulomb, S. Lavalée, et P. Sautot, « Pedicle screw placement using image guided techniques », *Clin. Orthop.*, no 354, p. 39-48, sept. 1998, doi: 10.1097/00003086-199809000-00006.
- [84] P. Merloz et al., « Computer assisted spine surgery », *Clin. Orthop.*, no 337, p. 86-96, avr. 1997, doi: 10.1097/00003086-199704000-00011.
- [85] Lin, « Frameless stereotactic deep brain stimulation for Parkinson's disease: A casereportandtechnicalnote ». <https://www.jmedscindmc.com/article.asp?issn=1011-4564;year=2014;volume=34;issue=5;spage=224;epage=234;aulast=Lin> (consulté le 9 février 2022).
- [86] J. M. Henderson, K. L. Holloway, S. E. Gaede, et J. M. Rosenow, « The application accuracy of a skull-mounted trajectory guide system for image-guided functional

- neurosurgery », *Comput. Aided Surg. Off. J. Int. Soc. Comput. Aided Surg.*, vol. 9, no 4, p. 155-160, 2004, doi: 10.3109/10929080500050249.
- [87] J. M. Henderson, « Frameless localization for functional neurosurgical procedures: a preliminary accuracy study », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 82, no 4, p. 135-141, 2004, doi: 10.1159/000081345.
- [88] K. L. Holloway, S. E. Gaede, P. A. Starr, J. M. Rosenow, V. Ramakrishnan, et J. M. Henderson, « Frameless stereotaxy using bone fiducial markers for deep brain stimulation », *J. Neurosurg.*, vol. 103, no 3, p. 404-413, sept. 2005, doi: 10.3171/jns.2005.103.3.0404.
- [89] H. Bjartmarz et S. Rehnrona, « Comparison of accuracy and precision between frame-based and frameless stereotactic navigation for deep brain stimulation electrode implantation », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 85, no 5, p. 235-242, 2007, doi: 10.1159/000103262.
- [90] C. Fukaya et al., « Nexframe frameless stereotaxy with multitract microrecording: accuracy evaluated by frame-based stereotactic X-ray », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 88, no 3, p. 163-168, 2010, doi: 10.1159/000313868.
- [91] C. Kelman, V. Ramakrishnan, A. Davies, et K. Holloway, « Analysis of stereotactic accuracy of the cosman-robert-wells frame and nexframe frameless systems in deep brain stimulation surgery », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 88, no 5, p. 288-295, 2010, doi: 10.1159/000316761.
- [92] K. J. Burchiel, S. McCartney, A. Lee, et A. M. Raslan, « Accuracy of deep brain stimulation electrode placement using intraoperative computed tomography without microelectrode recording », *J. Neurosurg.*, vol. 119, no 2, p. 301-306, août 2013, doi: 10.3171/2013.4.JNS122324.
- [93] Z. Mirzadeh, K. Chapple, M. Lambert, R. Dhall, et F. A. Ponce, « Validation of CT-MRI fusion for intraoperative assessment of stereotactic accuracy in DBS

- surgery », *Mov. Disord. Off. J. Mov. Disord. Soc.*, vol. 29, no 14, p. 1788-1795, déc. 2014, doi: 10.1002/mds.26056.
- [94] Z. Li, J.-G. Zhang, Y. Ye, et X. Li, « Review on Factors Affecting Targeting Accuracy of Deep Brain Stimulation Electrode Implantation between 2001 and 2015 », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 94, no 6, p. 351-362, 2016, doi: 10.1159/000449206.
- [95] R. Eleopra et al., « Frameless Deep Brain Stimulation Surgery: A Single-Center Experience and Retrospective Analysis of Placement Accuracy of 220 Electrodes in a Series of 110 Patients », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 97, no 5-6, p. 337-346, 2019, doi: 10.1159/000503335.
- [96] G. Wurm, H. Ringler, F. Knogler, et M. Schnizer, « Evaluation of neuro-navigation in lesional and non-lesional epilepsy surgery », *Comput. Aided Surg. Off. J. Int. Soc. Comput. Aided Surg.*, vol. 8, no 4, p. 204-214, 2003, doi: 10.3109/10929080309146055.
- [97] F. E. Roux et al., « Methodological and technical issues for integrating functional magnetic resonance imaging data in a neuro-navigational system », *Neurosurgery*, vol. 49, no 5, p. 1145-1156; discussion 1156-1157, nov. 2001, doi: 10.1097/00006123-200111000-00025.
- [98] J. D. McDonald et al., « Integration of preoperative and intraoperative functional brain mapping in a frameless stereotactic environment for lesions near eloquent cortex. Technical note », *J. Neurosurg.*, vol. 90, no 3, p. 591-598, mars 1999, doi: 10.3171/jns.1999.90.3.0591.
- [99] V. Braun, S. Dempf, R. Tomczak, A. Wunderlich, R. Weller, et H. P. Richter, « Functional cranial neuro-navigation. Direct integration of fMRI and PET data », *J. Neuroradiol. J. Neuroradiol.*, vol. 27, no 3, p. 157-163, sept. 2000.
- [100] G. Wurm, W. Wies, M. Schnizer, J. Trenkler, et K. Holl, « Advanced surgical approach for selective amygdalohippocampectomy through neuro-navigation »,

- Neurosurgery, vol. 46, no 6, p. 1377-1382; discussion 1382–1383, juin 2000, doi: 10.1097/00006123-200006000-00016.
- [101] M. Murphy, T. J. O'Brien, K. Morris, et M. J. Cook, « Multimodality image-guided epilepsy surgery », *J. Clin. Neurosci. Off. J. Neurosurg. Soc. Australas.*, vol. 8, no 6, p. 534-538, nov. 2001, doi: 10.1054/jocn.2001.0921.
- [102] O. P. Gautschi et al., « Non-assisted versus neuro-navigated and XperCT-guided external ventricular catheter placement: a comparative cadaver study », *Acta Neurochir. (Wien)*, vol. 156, no 4, p. 777-785; discussion 785, avr. 2014, doi: 10.1007/s00701-014-2026-8.
- [103] C. M. Woernle, J.-K. Burkhardt, D. Bellut, N. Krayenbuehl, et H. Bertalanffy, « Do iatrogenic factors bias the placement of external ventricular catheters?--a single institute experience and review of the literature », *Neurol. Med. Chir. (Tokyo)*, vol. 51, no 3, p. 180-186, 2011, doi: 10.2176/nmc.51.180.
- [104] S. T. O'Leary, M. K. Kole, D. A. Hoover, S. E. Hysell, A. Thomas, et C. I. Shaffrey, « Efficacy of the Ghajar Guide revisited: a prospective study », *J. Neurosurg.*, vol. 92, no 5, p. 801-803, mai 2000, doi: 10.3171/jns.2000.92.5.0801.
- [105] T. J. Wilson, W. R. Stetler, W. N. Al-Holou, et S. E. Sullivan, « Comparison of the accuracy of ventricular catheter placement using freehand placement, ultrasonic guidance, and stereotactic neuro-navigation », *J. Neurosurg.*, vol. 119, no 1, p. 66-70, juill. 2013, doi: 10.3171/2012.11.JNS111384.
- [106] D. R. Huyette, B. J. Turnbow, C. Kaufman, D. F. Vaslow, B. B. Whiting, et M. Y. Oh, « Accuracy of the freehand pass technique for ventriculostomy catheter placement: retrospective assessment using computed tomography scans », *J. Neurosurg.*, vol. 108, no 1, p. 88-91, janv. 2008, doi: 10.3171/JNS/2008/108/01/0088.

- [107] U. K. Kakarla, L. J. Kim, S. W. Chang, N. Theodore, et R. F. Spetzler, « Safety and accuracy of bedside external ventricular drain placement », *Neurosurgery*, vol. 63, no 1 Suppl 1, p. ONS162–166; discussion ONS166–167, juill. 2008, doi: 10.1227/01.neu.0000335031.23521.d0.
- [108] R. Sampath, R. Wadhwa, T. Tawfik, A. Nanda, et B. Guthikonda, « Stereotactic placement of ventricular catheters: does it affect proximal malfunction rates? », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 90, no 2, p. 97-103, 2012, doi: 10.1159/000333831.
- [109] L. H. Stieglitz, M. Giordano, M. Samii, et W. O. Luedemann, « A new tool for frameless stereotactic placement of ventricular catheters », *Neurosurgery*, vol. 67, no 3 Suppl Operative, p. ons131–135; discussion ons135, sept. 2010, doi: 10.1227/01.NEU.0000382964.72262.9A.
- [110] S. S. Azeem et T. C. Origitano, « Ventricular catheter placement with a frameless neuro–navigational system: a 1–year experience », *Neurosurgery*, vol. 60, no 4 Suppl 2, p. 243-247; discussion 247–248, avr. 2007, doi: 10.1227/01.NEU.0000255387.03088.53.
- [111] A. AlAzri, K. Mok, J. Chankowsky, M. Mullah, et J. Marcoux, « Placement accuracy of external ventricular drain when comparing freehand insertion to neuro–navigation guidance in severe traumatic brain injury », *Acta Neurochir. (Wien)*, vol. 159, no 8, p. 1399-1411, août 2017, doi: 10.1007/s00701–017–3201–5.
- [112] R. Grandhi, N. T. Zwagerman, P. Lee, T. Jovin, et D. O. Okonkwo, « Iatrogenic pseudoaneurysm of the middle meningeal artery after external ventricular drain placement », *J. Neuroimaging Off. J. Am. Soc. Neuroimaging*, vol. 25, no 1, p. 140-141, févr. 2015, doi: 10.1111/jon.12080.
- [113] F. Y. Chai, F. Farizal, et T. Jegan, « Coma due to malplaced external ventricular drain », *Turk. Neurosurg.*, vol. 23, no 4, p. 561-563, 2013, doi: 10.5137/1019–5149.JTN.5724–12.1.

- [114] B. P. Rosenbaum, A.-M. E. Wheeler, et A. A. Krishnaney, « External ventricular drain placement causing upgaze palsy: case report », *Clin. Neurol. Neurosurg.*, vol. 115, no 8, p. 1514-1516, août 2013, doi: 10.1016/j.clineuro.2012.12.008.
- [115] R. D. Dickerman et al., « Failure rate of frontal versus parietal approaches for proximal catheter placement in ventriculoperitoneal shunts: revisited », *J. Clin. Neurosci. Off. J. Neurosurg. Soc. Australas.*, vol. 12, no 7, p. 781-783, sept. 2005, doi: 10.1016/j.jocn.2004.12.005.
- [116] M. M, S. Rf, et N. P, « Electromagnetic stereotactic navigation for external ventricular drain placement in the intensive care unit », *J. Clin. Neurosci. Off. J. Neurosurg. Soc. Australas.*, vol. 20, no 12, déc. 2013, doi: 10.1016/j.jocn.2013.03.005.
- [117] P. Grunert et al., « Basic principles and clinical applications of neuro-navigation and intraoperative computed tomography », *Comput. Aided Surg. Off. J. Int. Soc. Comput. Aided Surg.*, vol. 3, no 4, p. 166-173, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1097-0150(1998)3:4<166::AID-IGS6>3.0.CO;2-E.
- [118] M. Kosteljanetz, C. von Buchwald, L. Poulsgård, N. Rasmussen, et A. Wagner, « [Endoscopic closure of cranionasal cerebrospinal fluid fistulas with the use of neuro-navigation--"Computer Aided Surgery"] », *Ugeskr. Laeger*, vol. 163, no 32, p. 4201-4203, août 2001.
- [119] I. J. Gerard, M. Kersten-Oertel, K. Petrecca, D. Sirhan, J. A. Hall, et D. L. Collins, « Brain shift in neuro-navigation of brain tumors: A review », *Med. Image Anal.*, vol. 35, p. 403-420, janv. 2017, doi: 10.1016/j.media.2016.08.007.
- [120] C. R. Maurer et al., « Effect of geometrical distortion correction in MR on image registration accuracy », *J. Comput. Assist. Tomogr.*, vol. 20, no 4, p. 666-679, août 1996, doi: 10.1097/00004728-199607000-00032.

- [121] P. Jezzard et S. Clare, « Sources of distortion in functional MRI data », *Hum. Brain Mapp.*, vol. 8, no 2-3, p. 80-85, 1999, doi: 10.1002/(sici)1097-0193(1999)8:2/3<80::aid-hbm2>3.0.co;2-c.
- [122] J. Pallud et al., « Diffuse low-grade oligodendrogliomas extend beyond MRI-defined abnormalities », *Neurology*, vol. 74, no 21, p. 1724-1731, mai 2010, doi: 10.1212/WNL.0b013e3181e04264.
- [123] B. Pirotte et al., « Integrated positron emission tomography and magnetic resonance imaging-guided resection of brain tumors: a report of 103 consecutive procedures », *J. Neurosurg.*, vol. 104, no 2, p. 238-253, févr. 2006, doi: 10.3171/jns.2006.104.2.238.
- [124] M. N. Wang et Z. J. Song, « Classification and analysis of the errors in neuro-navigation », *Neurosurgery*, vol. 68, no 4, p. 1131-1143; discussion 1143, avr. 2011, doi: 10.1227/NEU.0b013e318209cc45.
- [125] P. A. Woerdeman, P. W. A. Willems, H.-J. Noordmans, et J. W. Berkelbach van der Sprenkel, « The effect of repetitive manual fiducial localization on target localization in image space », *Neurosurgery*, vol. 60, no 2 Suppl 1, p. ONS100-103; discussion ONS103-104, févr. 2007, doi: 10.1227/01.NEU.0000249231.74741.C3.
- [126] C. R. Maurer, J. M. Fitzpatrick, M. Y. Wang, R. L. Galloway, R. J. Maciunas, et G. S. Allen, « Registration of head volume images using implantable fiducial markers », *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 16, no 4, p. 447-462, août 1997, doi: 10.1109/42.611354.
- [127] R. Marmulla, J. Mühling, T. Lüth, et S. Hassfeld, « Physiological shift of facial skin and its influence on the change in precision of computer-assisted surgery », *Br. J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 44, no 4, p. 273-278, août 2006, doi: 10.1016/j.bjoms.2005.06.011.

- [128] D. W. Roberts, A. Hartov, F. E. Kennedy, M. I. Miga, et K. D. Paulsen, « Intraoperative brain shift and deformation: a quantitative analysis of cortical displacement in 28 cases », *Neurosurgery*, vol. 43, no 4, p. 749-758; discussion 758–760, oct. 1998, doi: 10.1097/00006123-199810000-00010.
- [129] D. L. Hill, C. R. Maurer, R. J. Maciunas, J. A. Barwise, J. M. Fitzpatrick, et M. Y. Wang, « Measurement of intraoperative brain surface deformation under a craniotomy », *Neurosurgery*, vol. 43, no 3, p. 514-526; discussion 527–528, sept. 1998, doi: 10.1097/00006123-199809000-00066.
- [130] C. Nimsky, O. Ganslandt, S. Cerny, P. Hastreiter, G. Greiner, et R. Fahlbusch, « Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging », *Neurosurgery*, vol. 47, no 5, p. 1070-1079; discussion 1079–1080, nov. 2000, doi: 10.1097/00006123-200011000-00008.
- [131] M. F. Khan, K. Mewes, R. E. Gross, et O. Škrinjar, « Assessment of Brain Shift Related to Deep Brain Stimulation Surgery », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 86, no 1, p. 44-53, 2008, doi: 10.1159/000108588.
- [132] A. Khoshnevisan et N. S. Allahabadi, « Neuro–navigation: Principles, Clinical Applications and Potential Pitfalls », *Iran. J. Psychiatry*, vol. 7, no 2, p. 97-103, 2012, consulté le: 26 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3428645/>
- [133] J. M. Henderson, K. R. Smith, et R. D. Bucholz, « An accurate and ergonomic method of registration for image–guided neurosurgery », *Comput. Med. Imaging Graph. Off. J. Comput. Med. Imaging Soc.*, vol. 18, no 4, p. 273-277, août 1994, doi: 10.1016/0895-6111(94)90051-5.
- [134] E. M. Friets, J. W. Strohbehn, et D. W. Roberts, « Curvature–based nonfiducial registration for the frameless stereotactic operating microscope », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 42, no 9, p. 867-878, sept. 1995, doi: 10.1109/10.412654.

- [135] M. P. Heilbrun, S. Koehler, P. MacDonald, V. Siemionow, et W. Peters, « Preliminary experience using an optimized three-point transformation algorithm for spatial registration of coordinate systems: a method of noninvasive localization using frame-based stereotactic guidance systems », *J. Neurosurg.*, vol. 81, no 5, p. 676-682, nov. 1994, doi: 10.3171/jns.1994.81.5.0676.
- [136] Y. Enchev, « Neuro-navigation: geneology, reality, and prospects », *Neurosurg. Focus*, vol. 27, no 3, p. E11, sept. 2009, doi: 10.3171/2009.6.FOCUS09109.
- [137] W. Pn, « Advances in ultrasound: from microscanning to telerobotics », *Br. J. Radiol.*, vol. 73, no 875, nov. 2000, doi: 10.1259/bjr.73.875.11144789.
- [138] Z. M, K. R, R. A, et S. V, « Robot-assisted navigated neuroendoscopy », *Neurosurgery*, vol. 51, no 6, déc. 2002, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12445350/>
- [139] Z. Tian, W. Lu, T. Wang, B. Ma, Q. Zhao, et G. Zhang, « Application of a robotic telemanipulation system in stereotactic surgery », *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, vol. 86, no 1, p. 54-61, 2008, doi: 10.1159/000110742.
- [140] A. T. Stadie et al., « Virtual reality system for planning minimally invasive neurosurgery. Technical note », *J. Neurosurg.*, vol. 108, no 2, p. 382-394, févr. 2008, doi: 10.3171/JNS/2008/108/2/0382.
- [141] M. M. J. Letteboer, P. W. A. Willems, M. A. Viergever, et W. J. Niessen, « Brain shift estimation in image-guided neurosurgery using 3-D ultrasound », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 52, no 2, p. 268-276, févr. 2005, doi: 10.1109/TBME.2004.840186.
- [142] Y. Liu et Z. Song, « A robust brain deformation framework based on a finite element model in IGNS », *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. MRCAS*, vol. 4, no 2, p. 146-157, juin 2008, doi: 10.1002/rcs.186.
- [143] M. I. Miga, T. K. Sinha, D. M. Cash, R. L. Galloway, et R. J. Weil, « Cortical surface registration for image-guided neurosurgery using laser-range scanning », *IEEE*

- Trans. Med. Imaging, vol. 22, no 8, p. 973-985, août 2003, doi: 10.1109/TMI.2003.815868.
- [144] D. W. Roberts et al., « Intra-operative image updating », Stereotact. Funct. Neurosurg., vol. 76, no 3-4, p. 148-150, 2001, doi: 10.1159/000066712.
- [145] A. Cao et al., « Laser range scanning for image-guided neurosurgery: investigation of image-to-physical space registrations », Med. Phys., vol. 35, no 4, p. 1593-1605, avr. 2008, doi: 10.1118/1.2870216.
- [146] I. Reinertsen, F. Lindseth, G. Unsgaard, et D. L. Collins, « Clinical validation of vessel-based registration for correction of brain-shift », Med. Image Anal., vol. 11, no 6, p. 673-684, déc. 2007, doi: 10.1016/j.media.2007.06.008.
- [147] C. Davatzikos, D. Shen, A. Mohamed, et S. K. Kyriacou, « A framework for predictive modeling of anatomical deformations », IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 20, no 8, p. 836-843, août 2001, doi: 10.1109/42.938251.
- [148] P. Dumpuri et M. I. Miga, « Model-Updated Image Guidance: A Statistical Approach to Gravity-Induced Brain Shift », Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv. MICCAI Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv., vol. 2878, p. 375-382, nov. 2003, doi: 10.1007/978-3-540-39899-8_47.
- [149] K. V. Slavin, « Neuro-navigation in neurosurgery: current state of affairs », Expert Rev. Med. Devices, vol. 5, no 1, p. 1-3, janv. 2008, doi: 10.1586/17434440.5.1.1.
- [150] Upadhyay UM, Golby AJ. Role of pre- and intraoperative imaging and neuronavigation in neurosurgery. Expert Rev. Med. Devices 5(1) 65-73 (2008). [Taylor & Francis Online],
- [151] Wittek A, Miller K, Kikinis R, Warfield SK. Patient-specific model of brain deformation: application to medical image registration. J. Biomech. 40, 919-929
- [152] Bucki M, Lobos C, Payan Y. Framework for a low-cost intra-operative

image-guided neuronavigator including brain shift compensation. Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 1, 872–875, (2007)

[153] Romano A, Ferrante M, Cipriani V et al. Role of magnetic resonance tractography in the preoperative planning and intraoperative assessment of patients with intra-axial brain tumours. Radiol. Med. (Torino) 112(6), 906–920, (2007).

[154] Berman JI, Berger MS, Chung SW, Nagarajan SS, Henry RG. Accuracy of diffusion tensor magnetic resonance imaging tractography assessed using intraoperative subcortical stimulation mapping and magnetic source imaging. J. Neurosurg. 107, 488–494 (2007).

[155] Chen X, Weigel D, Ganslandt O, Fahlbusch R, Buchfelder M, Nimsky C. Diffusion tensor based fiber tracking and intraoperative neuronavigation for the resection of a brainstem cavernous angioma. Surg. Neurol. 68, 285–291, (2007).

[156] Frame and Frameless Stereotactic Brain Biopsy, 26/03/2015,
<https://clinicalgate.com/frame-and-frameless-stereotactic-brain-biopsy/>

[157] L. Gokaslan, "Machine Vision Navigation in Spine Surgery", 02 March 2021
| <https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.640554>

[158] J. Bartolomei, "Application of Frameless Stereotaxy to Spinal Surgery",
<https://www.barrowneuro.org/for-physicians-researchers/education/grand-rounds-publications-media/barrow-quarterly/volume-17-no-1-2001/application-of-frameless-stereotaxy-to-spinal-surgery/>

كلية الطب والصيدلة وطب الأسنان
FACULTÉ DE MÉDECINE, DE PHARMACIE ET DE MÉDECINE DENTAIRE



جامعة سيدي محمد بن عبد الله - فاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

أطروحة رقم 22/116

سنة 2022

مساهمة الملاحظة العصبية في إدارة أمراض الجراحة العصبية :
تجربة قسم جراحة الدماغ والأعصاب بالمستشفى الجامعي الحسن الثاني بفاس
(بصدد 72 حالة)

الأطروحة

قدمت و نوقشت علانية يوم 2022/03/16

من طرف

السيد عبد الحميد بورمطان

المزاداد في 1997/02/15 بتازة

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية

استعمالات - الأهمية - الملاحظة العصبية - تحول الدماغ

اللجنة

الرئيس	السيد خالد شكور..... أستاذ في علم التشريح
المشرف	السيد محمد الشاوي الفائز..... أستاذ في علم جراحة الأعصاب
الأعضاء	السيد محمد بنزكموط..... أستاذ في علم جراحة الأعصاب
	السيد فيصل لخضر..... أستاذ مبرز في علم جراحة الأعصاب