



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

Année 2026

Thèse N°16

Radiochirurgie cérébrale par Gamma Knife : expérience du CHU Mohammed VI de Marrakech.

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 02/01/2026

PAR

Mlle. MANAL ABOUBI

Médecin interne au CHU Mohammed VI de Marrakech

Née le 28/12/1999 à SAFI

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS :

Radiochirurgie -cérébrale- Gamma Knife - dosimétrie

JURY

Mr. S.AIT BENALI

Professeur de neurochirurgie

PRÉSIDENT

Mme. M.KHOUCHANI

Professeur en Oncologie radiothérapie

RAPPORTEUSE

Mme. H. RAIS

Professeur d'anatomopathologie

JUGES



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ الْحَيُّ الْقَيُّومُ

لَا تَأْخُذُهُ سِنَةٌ وَلَا نَوْمٌ

لَهُ مَا فِي السَّمَوَاتِ وَمَا فِي الْأَرْضِ

مَنْ ذَا الَّذِي يَشْفَعُ عِنْدَهُ إِلَّا بِإِذْنِهِ

يَعْلَمُ مَا بَيْنَ أَيْدِيهِمْ وَمَا خَلْفَهُمْ

وَلَا يُحِيطُونَ بِشَيْءٍ مِنْ عِلْمِهِ إِلَّا بِمَا شَاءَ

وَسِعَ كُرْسِيُّهُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ

وَلَا يَئُودُهُ حِفْظُهُمَا وَهُوَ الْعَلِيُّ الْعَظِيمُ ﴿٢٥٦﴾



وَقُلْ لِّعِبَادِي
قُلُوبًا

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَكَ

لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا

إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

Serment d'Hippocrate

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

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

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

Je ne trahirai pas les secrets qui me seront confiés.

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

Les médecins seront mes frères.

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

Je maintiendrai strictement le respect de la vie humaine dès sa conception. Même sous la menace, je n'userai pas mes connaissances médicales d'une façon contraire aux lois de l'humanité.

Je m'y engage librement et sur mon honneur.

Déclaration Genève, 1948



LISTE DES PROFESSEURS



UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
MARRAKECH

Doyens Honoraires

: Pr. Badie Azzaman MEHADJI
: Pr. Abdelhaq ALAOUI YAZIDI
: Pr. Mohammed BOUSKRAOUI

ADMINISTRATION

Doyen

: Pr. Said ZOUHAIR

Vice doyen de la Recherche et la Coopération

: Pr. Mohamed AMINE

Vice doyen des Affaires Pédagogiques

: Pr. Redouane EL FEZZAZI

Vice doyen Chargé de la Pharmacie

: Pr. Oualid ZIRAOUI

Secrétaire Générale

: Mr. Azzeddine EL HOUDAIGUI

Liste nominative du personnel enseignants chercheurs
permanant

N°	Nom et Prénom	Cadre	Spécialités
01	ZOUHAIR Said (Doyen)	P.E.S	Microbiologie
02	CHOULLI Mohamed Khaled	P.E.S	Neuro pharmacologie
03	BOUSKRAOUI Mohammed	P.E.S	Pédiatrie
04	KHATOURI Ali	P.E.S	Cardiologie
05	NIAMANE Radouane	P.E.S	Rhumatologie
06	AIT BENALI Said	P.E.S	Neurochirurgie
07	KRATI Khadija	P.E.S	Gastro-entérologie
08	SOUMMANI Abderraouf	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
09	RAJI Abdelaziz	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
10	SARF Ismail	P.E.S	Urologie
11	MOUTAOUAKIL Abdeljalil	P.E.S	Ophtalmologie
12	AMAL Said	P.E.S	Dermatologie
13	ESSAADOUNI Lamiaa	P.E.S	Médecine interne
14	MANSOURI Nadia	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
15	MOUTAJ Redouane	P.E.S	Parasitologie
16	AMMAR Haddou	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
17	CHAKOUR Mohammed	P.E.S	Hématologie biologique
18	EL FEZZAZI Redouane	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
19	YOUNOUS Said	P.E.S	Anesthésie-réanimation
20	BENELKHAIAT BENOMAR Ridouan	P.E.S	Chirurgie générale
21	ASMOUKI Hamid	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
22	BOUMZEBRA Drissi	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
23	CHELLAK Saliha	P.E.S	Biochimie-chimie
24	LOUZI Abdelouahed	P.E.S	Chirurgie-générale

25	AIT-SAB Imane	P.E.S	Pédiatrie
26	GHANNANE Houssine	P.E.S	Neurochirurgie
27	OULAD SAIAD Mohamed	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
28	DAHAMI Zakaria	P.E.S	Urologie
29	EL HATTAOUI Mustapha	P.E.S	Cardiologie
30	AMINE Mohamed	P.E.S	Epidémiologie clinique
31	EL ADIB Ahmed Rhassane	P.E.S	Anesthésie-réanimation
32	ELFIKRI Abdelghani	P.E.S	Radiologie
33	ARSALANE Lamiae	P.E.S	Microbiologie-virologie
34	KAMILI El Ouafi El Aouni	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
35	MAOULAININE Fadl mrabih rabou	P.E.S	Pédiatrie (Néonatalogie)
36	MATRANE Aboubakr	P.E.S	Médecine nucléaire
37	ADMOU Brahim	P.E.S	Immunologie
38	CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	P.E.S	Radiologie
39	MANOUDI Fatiha	P.E.S	Psychiatrie
40	BOURROUS Monir	P.E.S	Pédiatrie
41	TASSI Noura	P.E.S	Maladies infectieuses
42	NEJMI Hicham	P.E.S	Anesthésie-réanimation
43	LAOUAD Inass	P.E.S	Néphrologie
44	FOURAJI Karima	P.E.S	Chirurgie
45	BOUKHIRA Abderrahman	P.E.S	Biochimie-chimie
46	KHALLOUKI Mohammed	P.E.S	Anesthésie-réanimation
47	BSISS Mohammed Aziz	P.E.S	Biophysique
48	EL OMRANI Abdelhamid	P.E.S	Radiothérapie
49	SORAA Nabila	P.E.S	Microbiologie-virologie
50	KHOUCHANI Mouna	P.E.S	Radiothérapie
51	JALAL Hicham	P.E.S	Radiologie
52	EL ANSARI Nawal	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
53	AMRO Lamyae	P.E.S	Pneumo-phtisiologie

54	OUALI IDRISSE Mariem	P.E.S	Radiologie
55	ZAHLANE Mouna	P.E.S	Médecine interne
56	BENJILALI Laila	P.E.S	Médecine interne
57	NARJIS Youssef	P.E.S	Chirurgie générale
58	RABBANI Khalid	P.E.S	Chirurgie générale
59	SAMLANI Zouhour	P.E.S	Gastro-entérologie
60	LAGHMARI Mehdi	P.E.S	Neurochirurgie
61	ABOUSSAIR Nisrine	P.E.S	Génétique
62	BENCHAMKHA Yassine	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
63	CHAFIK Rachid	P.E.S	Traumato-orthopédie
64	ABKARI Imad	P.E.S	Traumato-orthopédie
65	EL BOUIHI Mohamed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
66	LAKMICHI Mohamed Amine	P.E.S	Urologie
67	AGHOUTANE El Mouhtadi	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
68	HOCAR Ouafa	P.E.S	Dermatologie
69	EL KARIMI Saloua	P.E.S	Cardiologie
70	EL BOUCHTI Imane	P.E.S	Rhumatologie
71	QAMOUSS Youssef	P.E.S	Anesthésie réanimation
72	ZYANI Mohammad	P.E.S	Médecine interne
73	QACIF Hassan	P.E.S	Médecine interne
74	BEN DRISS Laila	P.E.S	Cardiologie
75	MOUFID Kamal	P.E.S	Urologie
76	EL BARNI Rachid	P.E.S	Chirurgie générale
77	KRIET Mohamed	P.E.S	Ophtalmologie
78	BOUCHENTOUF Rachid	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
79	ABOUCHADI Abdeljalil	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
80	BASRAOUI Dounia	P.E.S	Radiologie
81	RAIS Hanane	P.E.S	Anatomie Pathologique
82	BELKHOU Ahlam	P.E.S	Rhumatologie

83	ZAOUI Sanaa	P.E.S	Pharmacologie
84	MSOUGAR Yassine	P.E.S	Chirurgie thoracique
85	EL MGHARI TABIB Ghizlane	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
86	DRAISS Ghizlane	P.E.S	Pédiatrie
87	EL IDRISSE SLITINE Nadia	P.E.S	Pédiatrie
88	RADA Noureddine	P.E.S	Pédiatrie
89	BOURRAHOUAT Aicha	P.E.S	Pédiatrie
90	MOUAFFAK Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
91	ZIADI Amra	P.E.S	Anesthésie-réanimation
92	ANIBA Khalid	P.E.S	Neurochirurgie
93	TAZI Mohamed Illias	P.E.S	Hématologie clinique
94	ROCHDI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
95	FADILI Wafaa	P.E.S	Néphrologie
96	ADALI Imane	P.E.S	Psychiatrie
97	ZAHLANE Kawtar	P.E.S	Microbiologie- virologie
98	LOUHAB Nisrine	P.E.S	Neurologie
99	HAROU Karam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
100	BOUKHANNI Lahcen	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
101	FAKHIR Bouchra	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
102	BENHIMA Mohamed Amine	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
103	HACHIMI Abdelhamid	P.E.S	Réanimation médicale
104	EL KHAYARI Mina	P.E.S	Réanimation médicale
105	AISSAOUI Younes	P.E.S	Anesthésie-réanimation
106	BAIZRI Hicham	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
107	ATMANE El Mehdi	P.E.S	Radiologie
108	EL AMRANI Moulay Driss	P.E.S	Anatomie
109	BELBARAKA Rhizlane	P.E.S	Oncologie médicale
110	ALJ Soumaya	P.E.S	Radiologie

111	OUBAHA Sofia	P.E.S	Physiologie
112	EL HAOUATI Rachid	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
113	BENALI Abdeslam	P.E.S	Psychiatrie
114	MLIHA TOUATI Mohammed	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
115	MARGAD Omar	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
116	KADDOURI Said	P.E.S	Médecine interne
117	ZEMRAOUI Nadir	P.E.S	Néphrologie
118	EL KHADER Ahmed	P.E.S	Chirurgie générale
119	DAROUASSI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
120	BENJELLOUN HARZIMI Amine	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
121	FAKHRI Anass	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
122	SALAMA Tarik	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
123	CHRAA Mohamed	P.E.S	Physiologie
124	ZARROUKI Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
125	AIT BATAHAR Salma	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
126	ADARMOUCH Latifa	P.E.S	Médecine communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
127	BELBACHIR Anass	P.E.S	Anatomie pathologique
128	HAZMIRI Fatima Ezzahra	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
129	EL KAMOUNI Youssef	P.E.S	Microbiologie-virologie
130	EL MEZOUARI El Mostafa	P.E.S	Parasitologie mycologie
131	SERGHINI Issam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
132	ABIR Badreddine	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
133	GHAZI Mirieme	P.E.S	Rhumatologie
134	ZIDANE Moulay Abdelfettah	P.E.S	Chirurgie thoracique
135	LAHKIM Mohammed	P.E.S	Chirurgie générale
136	MOUHSINE Abdelilah	P.E.S	Radiologie
137	TOURABI Khalid	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique

138	ARABI Hafid	P.E.S	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
139	BELHADJ Ayoub	P.E.S	Anesthésie-réanimation
140	BOUZERDA Abdelmajid	P.E.S	Cardiologie
141	ABDELFETTAH Youness	P.E.S	Rééducation et réhabilitation fonctionnelle
142	REBAHI Houssam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
143	BENNAOUI Fatiha	P.E.S	Pédiatrie
144	ZOUIZRA Zahira	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
145	SEBBANI Majda	P.E.S	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
146	FENANE Hicham	Pr Ag	Chirurgie thoracique
147	ABDOU Abdessamad	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
148	HAMMOUNE Nabil	P.E.S	Radiologie
149	ESSADI Ismail	P.E.S	Oncologie médicale
150	ALJALIL Abdelfattah	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
151	LAFFINTI Mahmoud Amine	P.E.S	Psychiatrie
152	RHARRASSI Issam	P.E.S	Anatomie-pathologique
153	ASSERRAJI Mohammed	P.E.S	Néphrologie
154	JANAH Hicham	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
155	NASSIM SABAH Taoufik	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
156	ELBAZ Meriem	P.E.S	Pédiatrie
157	SEDDIKI Rachid	P.E.S	Anesthésie-réanimation
158	BELGHMAIDI Sarah	Pr Ag	Ophtalmologie
159	GEBRATI Lhoucine	MC Hab	Chimie
160	FDIL Naima	MC Hab	Chimie de coordination bio-organique
161	LOQMAN Souad	MC Hab	Microbiologie et Toxicologie
162	BAALLAL Hassan	Pr Ag	Neurochirurgie
163	BELFQUIH Hatim	Pr Ag	Neurochirurgie
164	AKKA Rachid	Pr Ag	Gastro-entérologie
165	BABA Hicham	Pr Ag	Chirurgie générale

166	MAOUJOURD Omar	Pr Ag	Néphrologie
167	SIRBOU Rachid	Pr Ag	Médecine d'urgence et de catastrophe
168	DAMI Abdallah	Pr Ag	Médecine Légale
169	AZIZ Zakaria	Pr Ag	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
170	ELOUARDI Youssef	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
171	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Pr Ag	Hématologie clinique
172	NASSIH Houda	Pr Ag	Pédiatrie
173	LAHMINI Widad	Pr Ag	Pédiatrie
174	BENANTAR Lamia	Pr Ag	Neurochirurgie
175	EL FADLI Mohammed	Pr Ag	Oncologie médicale
176	AIT ERRAMI Adil	Pr Ag	Gastro-entérologie
177	CHETTATI Mariam	Pr Ag	Néphrologie
178	BOUTAKIOUTE Badr	Pr Ag	Radiologie
179	SAYAGH Sanae	Pr Ag	Hématologie
180	EL FAKIRI Karima	Pr Ag	Pédiatrie
181	EL FILALI Oualid	Pr Ag	Chirurgie Vasculaire périphérique
182	EL- AKHIRI Mohammed	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
183	HAJJI Fouad	Pr Ag	Urologie
184	JALLAL Hamid	Pr Ag	Cardiologie
185	ZBITOU Mohamed Anas	Pr Ag	Cardiologie
186	RAISSI Abderrahim	Pr Ag	Hématologie clinique
187	EL HAKKOUNI Awatif	Pr Ag	Parasitologie mycologie
188	ACHKOUN Abdessalam	Pr Ag	Anatomie
189	DARFAOUI Mouna	Pr Ag	Radiothérapie
190	EL-QADIRY Rabi	Pr Ag	Pédiatrie
191	ELJAMILI Mohammed	Pr Ag	Cardiologie
192	HAMRI Asma	Pr Ag	Chirurgie Générale
193	ELATIQUI Oumkeltoum	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
194	BENZALIM Meriam	Pr Ag	Radiologie

195	ABOULMAKARIM Siham	Pr Ag	Biochimie
196	LAMRANI HANCHI Asmae	Pr Ag	Microbiologie-virologie
197	HAJHOUJI Farouk	Pr Ag	Neurochirurgie
198	EL KHASSOUI Amine	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
199	CHAHBI Zakaria	Pr Ag	Maladies infectieuses
200	MEFTAH Azzelarab	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
201	BELLASRI Salah	Pr Ag	Radiologie
202	ATMANI Noureddine	Pr Ag	Chirurgie Cardio-vasculaire
203	AABBASSI Bouchra	Pr Ag	Pédopsychiatrie
204	DOUIREK Fouzia	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
205	SAHRAOUI Houssam Eddine	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
206	RHEZALI Manal	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
207	ABALLA Najoua	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
208	MOUGUI Ahmed	Pr Ag	Rhumatologie
209	ZOUITA Btissam	Pr Ag	Radiologie
210	HAZIME Raja	Pr Ag	Immunologie
211	SALLAHI Hicham	Pr Ag	Traumatologie-orthopédie
212	BENCHAFAI Ilias	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
213	EL JADI Hamza	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
214	AZAMI Mohamed Amine	Pr Ag	Anatomie pathologique
215	FASSI Fihri Mohamed jawad	Pr Ag	Chirurgie générale
216	AMINE Abdellah	Pr Ag	Cardiologie
217	CHETOUI Abdelkhalek	Pr Ag	Cardiologie
218	ROUKHSI Redouane	Pr Ag	Radiologie
219	ARROB Adil	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
220	MOULINE Souhail	Pr Ag	Microbiologie-virologie
221	AZIZI Mounia	Pr Ag	Néphrologie
222	BOUHAMIDI Ahmed	Pr Ag	Dermatologie

223	YANISSE Siham	Pr Ag	Pharmacie galénique
224	KHALLIKANE Said	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
225	ZIRAOUI Oualid	Pr Ag	Chimie thérapeutique
226	IDALENE Malika	Pr Ag	Maladies infectieuses
227	LACHHAB Zineb	Pr Ag	Pharmacognosie
228	ABOUDOURIB Maryem	Pr Ag	Dermatologie
229	AHBALA Tariq	Pr Ag	Chirurgie générale
230	EL AOUAME Amal	Pr Ag	Orthodontie et orthopédie dento-faciale
231	WARDA Karima	MCHab	Microbiologie
232	SBAI Asma	MCHab	Informatique
233	ABISSY Meriem	MC	Microbiologie
234	SLIOUI Badr	MC	Radiologie
235	CHEGGOUR Mouna	MC	Biochimie
236	BELARBI Marouane	MC	Néphrologie
237	EL AMIRI My Ahmed	MC	Chimie de Coordination bio-organnique
238	LALAOUI Abdessamad	MC	Pédiatrie
239	ESSAFTI Meryem	MC	Anesthésie-réanimation
240	RACHIDI Hind	MC	Anatomie pathologique
241	FIKRI Oussama	MC	Pneumo-phtisiologie
242	EL HAMDAOUI Omar	MC	Toxicologie
243	EL HAJJAMI Ayoub	MC	Radiologie
244	BOUMEDIANE El Mehdi	MC	Traumato-orthopédie
245	RAFI Sana	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
246	JEBRANE Ilham	MC	Pharmacologie
247	LAKHDAR Youssef	MC	Oto-rhino-laryngologie
248	LGHABI Majida	MC	Médecine du Travail
249	AIT LHAI El Houssaine	MC	Ophtalmologie
250	RAMRAOUI Mohammed-Es-said	MC	Chirurgie générale
251	EL MOUHAFID Faisal	MC	Chirurgie générale

252	AHMANNA Hussein-choukri	MC	Radiologie
253	AIT M'BAREK Yassine	MC	Neurochirurgie
254	ELMASRIOUI Joumana	MC	Physiologie
255	FOURA Salma	MC	Chirurgie pédiatrique
256	LASRI Najat	MC	Hématologie clinique
257	BOUKTIB Youssef	MC	Radiologie
258	MOUROUTH Hanane	MC	Anesthésie-réanimation
259	BOUZID Fatima zahrae	MC	Génétique
260	MRHAR Soumia	MC	Pédiatrie
261	QUIDDI Wafa	MC	Hématologie
262	BEN HOUMICH Taoufik	MC	Microbiologie-virologie
263	FETOUI Imane	MC	Pédiatrie
264	FATH EL KHIR Yassine	MC	Traumato-orthopédie
265	NASSIRI Mohamed	MC	Traumato-orthopédie
266	AIT-DRISS Wiam	MC	Maladies infectieuses
267	AIT YAHYA Abdelkarim	MC	Cardiologie
268	DIANI Abdelwahed	MC	Radiologie
269	AIT BELAID Wafae	MC	Chirurgie générale
270	ZTATI Mohamed	MC	Cardiologie
271	HAMOUCHE Nabil	MC	Néphrologie
272	ELMARDOULI Mouhcine	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
273	BENNIS Lamiae	MC	Anesthésie-réanimation
274	BENDAOUUD Layla	MC	Dermatologie
275	HABBAB Adil	MC	Chirurgie générale
276	CHATAR Achraf	MC	Urologie
277	OUMGHAR Nezha	MC	Biophysique
278	HOUMAID Hanane	MC	Gynécologie-obstétrique
279	YOUSFI Jaouad	MC	Gériatrie

280	NACIR Oussama	MC	Gastro-entérologie
281	BABACHEIKH Safia	MC	Gynécologie-obstétrique
282	ABDOURAFIQ Hasna	MC	Anatomie
283	TAMOUR Hicham	MC	Anatomie
284	IRAQI HOUSSAINI Kawtar	MC	Gynécologie-obstétrique
285	EL FAHIRI Fatima Zahrae	MC	Psychiatrie
286	BOUKIND Samira	MC	Anatomie
287	LOUKHNATI Mehdi	MC	Hématologie clinique
288	ZAHROU Farid	MC	Neurochirurgie
289	MAAROUFI Fathillah Elkarim	MC	Chirurgie générale
290	EL MOUSSAOUI Soufiane	MC	Pédiatrie
291	BARKICHE Samir	MC	Radiothérapie
292	ABI EL AALA Khalid	MC	Pédiatrie
293	AFANI Leila	MC	Oncologie médicale
294	EL MOULOUA Ahmed	MC	Chirurgie pédiatrique
295	LAGRINE Mariam	MC	Pédiatrie
296	DAFIR Kenza	MC	Génétique
297	CHERKAOUI RHAZOUANI Oussama	MC	Neurologie
298	ABAINOU Lahoussaine	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
299	BENCHANNA Rachid	MC	Pneumo-phtisiologie
300	EL GUAZZAR Ahmed (Militaire)	MC	Chirurgie générale
301	OULGHOUL Omar	MC	Oto-rhino-laryngologie
302	AMOCH Abdelaziz	MC	Urologie
303	ZAHLAN Safaa	MC	Neurologie
304	EL MAHFOUDI Aziz	MC	Gynécologie-obstétrique
305	CHEHBOUNI Mohamed	MC	Oto-rhino-laryngologie
306	LAIRANI Fatima ezzahra	MC	Gastro-entérologie
307	SAADI Khadija	MC	Pédiatrie

308	TITOU Hicham	MC	Dermatologie
309	EL GHOUL Naoufal	MC	Traumato-orthopédie
310	BAHI Mohammed	MC	Anesthésie-réanimation
311	RAITEB Mohammed	MC	Maladies infectieuses
312	DREF Maria	MC	Anatomie pathologique
313	ENNACIRI Zainab	MC	Psychiatrie
314	BOUSSAIDANE Mohammed	MC	Traumato-orthopédie
315	JENDOUI Omar	MC	Urologie
316	MANSOURI Maria	MC	Génétique
317	ERRIFAIY Hayate	MC	Anesthésie-réanimation
318	BOUKOUB Naila	MC	Anesthésie-réanimation
319	OUACHAOU Jamal	MC	Anesthésie-réanimation
320	EL FARGANI Rania	MC	Maladies infectieuses
321	IJIM Mohamed	MC	Pneumo-phtisiologie
322	AKANOUR Adil	MC	Psychiatrie
323	ELHANAFI Fatima Ezzohra	MC	Pédiatrie
324	MERBOUH Manal	MC	Anesthésie-réanimation
325	BOUROUMANE Mohamed Rida	MC	Anatomie
326	IJDDA Sara	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
327	GHARBI Khalid	MC	Gastro-entérologie
328	ATBIB Yassine	MC	Pharmacie clinique
329	MOURAFIQ Omar	MC	Traumato-orthopédie
330	ZAIZI Abderrahim	MC	Traumato-orthopédie
331	HENDY Iliass	MC	Cardiologie
332	HATTAB Mohamed Salah Koussay	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
333	DEBBAGH Fayrouz	MC	Microbiologie-virologie
334	OUASSIL Sara	MC	Radiologie
335	KOUYED Aicha	MC	Pédopsychiatrie

336	DRIOUICH Aicha	MC	Anesthésie-réanimation
337	TOURAIF Mariem	MC	Chirurgie pédiatrique
338	BENNAOUI Yassine	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
339	SABIR Es-said	MC	Chimie bio organique clinique
340	LAATITIOUI Sana	MC	Radiothérapie
341	IBBA Mouhsin	MC	Chirurgie thoracique
342	SAADOUNE Mohamed	MC	Radiothérapie
343	TLEMCANI Younes	MC	Ophtalmologie
344	SOLEH Abdelwahed	MC	Traumato-orthopédie
345	OUALHADJ Hamza	MC	Immunologie
346	BERGHALOUT Mohamed	MC	Psychiatrie
347	EL BARAKA Soumaya	MC	Chimie analytique-bromatologie
348	KARROUMI Saadia	MC	Psychiatrie
349	EL-OUAKHOUMI Amal	MC	Médecine interne
350	AJMANI Fatima	MC	Médecine légale
351	ZOUITEN Othmane	MC	Oncologie médicale
352	MENJEL Imane	MC	Pédiatrie
353	BOUCHKARA Wafae	MC	Gynécologie-obstétrique
354	ASSEM Oualid	MC	Pédiatrie
355	ELHANAFI Asma	MC	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
356	ABDELKHALKI Mohamed Hicham	MC	Gynécologie-obstétrique
357	ELKASSEH Mostapha	MC	Traumato-orthopédie
358	EL OUAZZANI Meryem	MC	Anatomie pathologique
359	HABBAB Mohamed	MC	Traumato-orthopédie
360	KHAMLIJ Aimad Ahmed	MC	Anesthésie-réanimation
361	EL KHADRAOUI Halima	MC	Histologie-embryologie-cyto-génétique
362	ELKHETTAB Fatimazahra	MC	Anesthésie-réanimation
363	SIDAYNE Mohammed	MC	Anesthésie-réanimation

364	ZAKARIA Yasmina	MC	Neurologie
365	BOUKAIDI Yassine	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
366	NABIL Mehdi	MC	Anesthésie-réanimation
367	KAAKOUA Mohamed	MC	Oncologie médicale
368	FIQHI Mohammed Kamal	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
369	BEN ELHEND Salah	MC	Radiologie
370	KHERRAB Anass	MC	Rhumatologie
371	AWATI El Mehdi	MC	Hématologie
372	HAOUANE Mohamed Amine	MC	Anatomie pathologique
373	BOUABBADI Salah eddine	MC	Ophtalmologie
374	MOUNIR Reda	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
375	AHCHOUCH Siham	MC	Hématologie clinique
376	AZRIOUIL Ouhib	MC	Traumato-orthopédie
377	CHALOUAH Badr	MC	Traumato-orthopédie
378	EL BEJJAJ Latimad	MC	Anatomie pathologique
379	BABA Zineb	MC	Rhumatologie
380	OUSSAYEH Imane	MC	Anesthésie-réanimation

LISTE ARRÊTÉE LE 08/10/2025



DÉDICACES





Je me dois d'avouer pleinement ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenue durant mon parcours, qui ont su me hisser vers le haut pour atteindre mon objectif. C'est avec amour, respect et gratitude que

Je dédie cette thèse ... 



Tout d'abord à Allah,

اللهم لك الحمد حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه حمد خلقك ورضى نفسك وزنة
عرشك ومداد كلماتك اللهم لك الحمد ولك الشكر حتى ترضى ولك الحمد ولك
الشكر عند الرضى ولك الحمد ولك الشكر دائماً وأبداً على نعمتك

*Au bon Dieu tout puissant, qui m'a inspiré, qui m'a guidé dans le
bon chemin, je vous dois ce que je suis devenu louanges et
remerciements pour votre clémence et miséricorde « Qu'il nous
couvre de sa bénédiction ». AMEN!*

À la mémoire de mon cher père Azzouz ABOUBI,

Ton absence a laissé un vide immense, mais ton souvenir continue d'éclairer chacun de mes pas. Tu as cru en moi avant même que je croie en moi-même, et c'est dans tes valeurs, ton courage et ton intégrité que j'ai puisé la force d'aller au bout de ce parcours. Chaque réussite, chaque étape franchie, porte la trace de ton amour et de ton éducation. Même si tu n'es plus à mes côtés pour partager ce moment, je sais que tu veilles sur moi, fier et bienveillant.

Cette thèse est un hommage à ta mémoire et au père exceptionnel que tu as été.

Que ton âme repose en paix

À ma chère maman Mama BOUDANY,

Je te dédie cette thèse avec une profonde gratitude et un cœur rempli d'amour. Ta foi inébranlable et tes sacrifices inestimables m'ont permis de poursuivre mes rêves. Chaque nuit que tu as passé à veiller sur moi, chaque effort que tu as fourni pour m'offrir une éducation, chaque mot d'encouragement que tu as prononcé ont été des pierres angulaires de mon parcours. Ta sagesse et ta résilience sont une source d'inspiration inépuisable. Je suis fière de porter en moi les valeurs que tu m'as transmises, et c'est grâce à toi que j'ai appris à surmonter les défis et à poursuivre l'excellence. Que Dieu te bénisse pour tout ce que tu as fait et continues de faire. Cette réussite est autant la tienne que la mienne.

إلى أمي الغالية،

**أنتِ النور الذي يضيء حياتنا، وتضحياتك هي الأثر الذي لا يُنسى. لقد بذلتِ كل شيء من أجلنا،
حنانك ودعواتك هما أعلى ما نملك. بارك الله فيك وأدامك لنا.**

محبتتي لك دائماً،

À mon frère Imad ABOUBI,

Tu es bien plus qu'un simple frère ; tu es un père, un ami et une âme sœur. Ta sagesse et ton amour inconditionnel m'accompagnent à chaque étape de ma vie. Merci d'être là dans les moments de joie comme dans les épreuves, d'écouter sans juger et de soutenir mes rêves comme si c'étaient les tiens. Je suis tellement reconnaissante de t'avoir à mes côtés. Chaque instant partagé avec toi est un cadeau précieux. Je te dédie cette gratitude éternelle, car tu es véritablement un trésor dans ma vie.

À ma sœur Hanae ABOUBI et son mari Zinar MOHAMED,

En témoignage de mon amour, de mon attachement et de ma gratitude, je te dédie ce modeste travail. Ton affection, ton soutien et ta serviabilité ont été des cadeaux inestimables dans ma vie. Chaque moment que nous avons partagé a contribué à tisser des souvenirs précieux, et je suis reconnaissante pour chaque instant de joie et de complicité. Je t'aime profondément, et je veux que tu saches que je serai toujours là à tes côtés, quoi qu'il arrive ; que ce soit pour célébrer tes succès ou pour traverser les épreuves, je m'engage à te soutenir et à t'encourager. Ta présence dans ma vie est précieuse, et je chéris chaque moment que nous partageons ensemble. Ton rôle précieux au sein de ta famille, avec ton mari et vos enfants, me rappellent chaque jour la force de l'amour familial. Merci pour tes encouragements inébranlables et pour être ce modèle de douceur et de sagesse. Je suis tellement chanceuse de t'avoir dans ma vie. Que Dieu nous garde à jamais unis dans la joie et la prospérité. Je prie pour qu'il te préserve du mal et t'accorde santé et réussite dans tout ce que tu entreprends. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Zinar, ton merveilleux mari, qui m'a apporté un soutien inestimable durant mon parcours. Sa présence bienveillante et son soutien ont été des piliers essentiels, et je suis reconnaissante pour sa générosité et son encouragement. Que Allah veuille sur vous deux, vous protège de tout mal, et comble vos vies de santé et de bonheur. Mes vœux les plus sincères sont pour une vie longue, épanouissante et pleine de réussites. Avec tout mon amour et ma reconnaissance infinie.

À mes trésors, Elînar et Zayne,

À ma douce Eli, ma petite étoile ton sourire illumine mes journées et apaise mes fatigues. A travers ton innocence et ta joie de vivre, tu me rappelles la beauté des débuts, la curiosité du monde et la pureté des rêves.

Ta présence m'inspire à donner le meilleur de moi-même, pour bâtir un avenir dont tu pourras être fière. Que cette thèse soit pour toi un symbole de persévérance et d'amour, un témoignage de ce que l'on peut accomplir quand on croit en ses rêves. Puisses-tu grandir dans la lumière, la tendresse et la connaissance et briller à ton tour et devenir comme ta Tati.

À mon petit trésor Zayne, encore à venir, Petit trésor encore blotti au creux du ventre de ta maman, tu ne le sais pas encore, mais ta seule existence remplit déjà nos cœurs d'amour et d'impatience. Tu es la promesse d'un avenir lumineux, le symbole de la vie qui se renouvelle et de l'espoir qui grandit.

Que ce travail, fruit de tant d'efforts et de passion, soit un humble témoignage de l'amour qui t'attend dans ce monde. Puisse ton arrivée être douce, et ta vie empreinte de santé, de bonheur et de sagesse.

À toute la famille BOUDANY et ABOUBI, À mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines,

Aucun mot ne saurait rendre pleinement hommage au respect et à la gratitude que je ressens pour vos encouragements constants. Je vous dédie ce travail en signe de reconnaissance pour l'amour que vous m'offrez chaque jour et pour votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout-Puissant vous garde et vous accorde santé et bonheur.

À la mémoire de mes grands-pères maternel et paternel,

Qui demeurent toujours présents dans mes pensées et dans mon cœur, je vous dédie ce travail aujourd'hui. Votre fierté a été ma plus grande récompense. Que Dieu, vous accueille dans son éternel paradis.

À ma chère Sanae SBAITI,

Mon alliée depuis neuf ans, je tiens à te remercier du fond du cœur pour ton soutien inébranlable et pour ta présence constante à mes côtés. Dans cette aventure qu'est la vie, nous avons traversé tant de moments, qu'ils soient joyeux ou difficiles, et chaque instant partagé a renforcé notre lien. Tu as toujours su apporter de la lumière même dans les périodes sombres, et je suis infiniment reconnaissante d'avoir une amie comme toi. Tes encouragements et ta bienveillance m'ont permis de surmonter des obstacles, et je chéris chaque souvenir que nous avons créé ensemble. Je profite de cette occasion pour te dire combien je t'aime et combien tu es importante pour moi. Je suis persuadée que tu vas briller dans ta vie professionnelle et personnelle, car tu as en toi toutes les qualités nécessaires pour réussir. Je suis impatiente de voir toutes les belles choses qui t'attendent et de continuer à partager notre chemin ensemble. Merci d'être toi, tout simplement.

À Hanae Hamida

Notre amitié, patiemment tissée au fil des années, s'est épanouie telle une fleur rare, nourrie par des instants précieux et une complicité sincère.

Polyglotte et ambitieuse, à la fois rêveuse et déterminée, tu es cette lumière douce qui éclaire mon ciel, une âme d'exception à la beauté intérieure éclatante.

Ton cœur généreux reflète la pureté de ton être, tout comme ta grâce naturelle évoque la clarté du matin. Ton élégance, ta bienveillance et ton soutien indéfectible ont illuminé ce parcours exigeant, tel un astre bienveillant guidant mes pas.

Merci pour les souvenirs partagés, pour ta chambre devenue refuge, pour ton lit qui offrait un havre de repos, et pour tes mots apaisants qui savaient calmer mes tensions et alléger mes pensées.

Tu es un trésor rare, un poème vivant, et je suis infiniment reconnaissante de t'avoir eue à mes côtés tout au long de cette aventure.

À Hajar EL JARSIFI

Une dédicace particulièrement distinguée s'adresse à une âme véritablement exceptionnelle, qui n'a jamais hésité à m'apporter son soutien, à me prodiguer ses conseils éclairés, et à illuminer mon chemin de sa sagesse. Ta profonde connaissance, tes recommandations judicieuses, et ta générosité intellectuelle ont constitué des sources constantes de motivation pour moi. Ta précieuse guidance a été une boussole essentielle, m'aidant à évoluer et à surmonter les défis et obstacles qui se sont présentés. Je te souhaite de tout cœur que Dieu te guide dans ta carrière et dans ta vie personnelle. Je suis convaincue que tu as un avenir radieux devant toi, et je sais que tu vas accomplir des choses merveilleuses. Merci d'être une amie si précieuse et de rendre chaque moment partagé mémorable. Je suis heureuse de t'avoir à mes côtés.

A Assia OUAJOUR

Ton soutien a été mon ancre dans les tempêtes de ces années d'études. Merci d'avoir été là, tout au long de mon parcours, avec ton cœur immense et ton soutien sans faille. Tu as été ma force dans les moments de doute, ma lumière dans les jours de fatigue, et ma complice dans les éclats de rire. Ton écoute, ta présence, et ta bienveillance ont rendu ce parcours plus doux, plus humain.

*Je t'admire pour la passion et la rigueur avec lesquelles tu avances dans ta carrière, pour la manière dont tu soignes les cœurs...
tout en gardant le tien grand ouvert.*

Tu es bien plus qu'une amie : tu es une sœur de cœur, un exemple de courage et de générosité.

*Merci d'avoir cru en moi, même quand moi je doutais.
Continue de briller, comme tu l'as toujours fait.*

À ma chère Souad AIT FQUIRT

Pour ton soutien inébranlable, ta présence rassurante et ton aide précieuse tout au long de mon parcours. Tu as été une source constante de force et de réconfort, et sans toi, ce chemin aurait été bien plus difficile. Merci d'avoir cru en moi, de m'avoir encouragée, et d'avoir toujours été là quand j'en avais le plus besoin. Cette réussite est aussi grâce à toi, à ta patience et à ta confiance en moi. Avec toute ma gratitude et mon affection.

À Dr EL KADIRI Ouassima, Dr ZAYTOUNE Ikram, Dr HAMDANE Jihane, Dr AKHATAR Fatima Ezzahra, Dr BEN EL FAKIR Makrame

Je tiens à vous exprimer ma gratitude la plus profonde pour votre précieuse aide et pour m'avoir guidée avec tant de bienveillance tout au long de ce travail. Votre soutien inestimable, vos conseils avisés, et votre disponibilité ont été des piliers essentiels à la réussite de cette thèse. Je vous suis profondément reconnaissante pour tout ce que vous avez fait, et je garderai en mémoire l'impact positif que vous avez eu sur ce parcours. Merci infiniment.

*Aux précieux amis (e) rencontrés à la FMPM, entre autres :
Maryam AABOUBI, Hajar ABDENAJIH, Hajar ENNAIMI Abidi
Oussama, Issahaku SAYIBU....*

Écrire mes sentiments pour chacun de vous me demandera surement plusieurs thèses. Je vous considère tous, sans exception, comme mes amis(e), frères et soeurs. Nous avons partagé des moments qui m'ont laissé me rapprocher de vous. Vous êtes tous des personnes honnêtes, généreuses, bienveillantes et loyales, et c'est pour cela que vous avez une place particulière dans ma vie. En étant parmi vous, tout mon parcours en médecine n'a été que joie et bonheur. Je serai toujours là pour vous, car je sais que vous êtes et seriez toujours là pour moi. Je vous aime.

À mes chers amis(es) rencontrés au fil de mon aventure en tant qu'interne au CHU :

Imane ANJAR, Salma FENANE, Manal OUZINE, Nehaila OUACHOU, Kenza AJARRA, Wiam ALMAZDI, Zineb BELKHATTAF, Ilham ELJAZOULI, Sara SOUKRAT, Boutaina MOUZEYAR, Maryam ZIDOUH, Hajar EL FADIL, Fatimezhra TEFAHI, Hosna DAHMOUNI, Zaineb EL MOUTAALIK BILLAH, Imane BOULMANI, Ghalia EL ADNANI, Chaïmae MORAU Nada KARKORI, Aya TARIKI, Khaoula BOULLALI, Ghita GHENNANE, Souhaila KHAYI, Kenza LAOUSY, Maria SADEDDINE, Hafsa RZAMA, Oumaima MOHAMMADI, Khadija SETLI, Meriam BOUKRIMI, Nassima BOULEMNAZEL Amal EJJAIDALI, Houda HAKAM, Aya BOUDALAOUI, Hafsa BELOUALI, Asma BOUABBOU, Kaouter SOULAIMANI, Hiba MOUSTAHFID, Manal KATIF, Hiba KHOUIAMMI, Abdelhakim BRADIA, Ismail AZIZI SAMIR Salah Eddine LASRI, Oussama WACHKAD, Soufiane AIT OZZOU, Zakaria AGINANE, Abdelouahab KABIL, Adil HECHADI, Bilal JAFFAL, Younes BOUGHALEM, Ilyas ELAMRANI, Mohamed KABBAJ, Zakaria SERHANI, Ayoub BENMANSOUR, Youness AIT ABBOU, Mohamed BERRAKKOUCH, Hamza ZRIKEM, Abderahman EL JAZOULI, Younes MOUSA, Amine HAJJI, Imane ZOULAKI, Latifa OUMAILOUF Bassam BENCHARFA, Abdellah BOUELHAZ...etc.

C'est avec une immense fierté et une profonde reconnaissance que je vous dédie ces lignes.

Ces deux années d'internat passées à vos côtés resteront gravées dans ma mémoire. C'est une période unique, faite de gardes interminables, de caravanes médicales, d'événements scientifiques et de moments d'amitié partagés.

Au-delà de l'apprentissage médical, j'y ai découvert la richesse du travail d'équipe, la force de l'engagement collectif et la beauté des liens humains.

Vous avez été ma deuxième famille — une famille choisie, unie autour de valeurs sincères : solidarité, partage et générosité.

Chaque instant vécu ensemble — les nuits sans sommeil, les moments de doute, et de fatigue, mais aussi les rires, les instants de joie, de fierté et demeure un souvenir précieux que je garderai à jamais dans mon cœur.

Vous m'avez rappelé que notre métier dépasse la technique et la connaissance : il est une flamme vivante, douce et persistante, qui éclaire nos vies, nourrit notre humanité et donne sens à nos efforts.

Ensemble, nous avons laissé des empreintes invisibles mais indélébiles — des marques d'espoir, de bienveillance et de dévouement auprès de nos patients.

Merci de m'avoir accompagnée dans ce parcours, d'avoir transformer les difficultés en forces, les épreuves en souvenirs, d'avoir partagé vos sourires et vos rêves.

Je suis fière d'avoir cheminé à vos côtés, d'avoir grandi avec vous et d'avoir trouvé dans notre amitié une source constante d'inspiration et de soutien.

*Avec toute ma gratitude, mon affection et mon admiration infinie.
Cette réussite est aussi la vôtre.*

À mes chères amis(e) anciens internes de la 22 -ème et internes de la 24 -ème promotion de la famille AMIMA

À ceux et celles avec qui j'ai partagé bien plus que des gardes et des dossiers. Je vous dédie ce travail avec une profonde reconnaissance, une amitié sincère et un immense respect.

À professeur BELAABIDIA Badia et cabinet d'anatomie pathologique VICTOR HUGO

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude, pour votre précieux soutien.

Ainsi qu'à l'ensemble de l'équipe du Cabinet d'Anatomie Pathologique Victor Hugo pour leur précieux soutien tout au long de l'élaboration de ce travail.

Votre disponibilité, votre rigueur et votre générosité intellectuelle ont largement contribué à la qualité de ce travail.

À TOUS LES ENSEIGNANTS DE LA FMPM

Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre accueil et votre bienveillance. Votre soutien et votre expertise ont été d'une grande aide, et je suis vraiment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait. Merci de rendre cette expérience si positive !

*À tous ceux qui m'ont transmis leur savoir depuis la
maternelle jusqu'à ce jour
À tous ceux dont l'oubli de la plume n'est pas celui du cœur
À tous ceux qui aiment MANAL, Et ceux qui ont marqué ma
vie de près ou de loin
À tous ceux qui ont contribué à ce que devienne celle que je
suis aujourd'hui*

.....

Last but not least:

*To myself,
For the strength to keep going when giving up felt easier.
For the sleepless nights, the tears, the doubts, and the endless
perseverance that carried me through seven demanding years of
medical studies.
For standing tall in the face of pressure, for choosing courage over fear,
and for never losing sight of my dream — even when the path seemed
impossible.
I thank myself for the discipline, the resilience, and the faith that
guided me through every challenge.
For believing that I was capable, even when I wasn't sure.
For growing, learning, and becoming not only a doctor, but also a
stronger and the best version of myself.
This achievement is the reflection of every small victory, every
sacrifice, and every ounce of determination that I poured into this
journey.
Today, I celebrate not perfection, but perseverance.
And I thank myself deeply for never giving up*



REMERCIEMENTS



À Notre Maître Et Président De Thèse,
Monsieur Professeur AIT BENALI Saïd,
Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service De
neurochirurgie Au Chu Mohammed VI De Marrakech

C'est un immense honneur que vous avez accepté, sans la moindre hésitation, de juger et présider le jury de cette thèse. J'en profite pour vous remercier de m'avoir, si aimablement, accueilli au sein de votre service pendant mon externat, en particulier durant la période difficile de la pandémie de COVID-19. Malgré les défis uniques de cette période, vous et votre équipe avez su créer un environnement à la fois sécurisant et formateur, me permettant d'apprendre énormément tout en participant activement aux activités du service. Votre soutien et celui de votre personnel ont rendu cette expérience inestimable, et j'en garde des connaissances et des souvenirs précieux qui resteront gravés dans ma mémoire.

Nous vous exprimons notre profonde admiration de la qualité des efforts que vous ne cessez de fournir et pour la cause que vous ne cessez de défendre. Recevez, nous vous en prions, nos sincères remerciements pour votre présence et la bienveillance que vous nous témoignez.

À Notre Maître Et Rapporteur De Thèse KHOUCHANI
Mouna
Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service
D'oncoologie radiothérapie AU CHU Mohammed VI
Marrakech

Permettez-moi de vous remercier du fin fond de mon cœur, pour la confiance que vous m'avez accordé, en me donnant à traiter un sujet aussi original. Travailler sous votre direction était un réel honneur. Votre sérieux, vos qualités pédagogiques et votre intarissable bonté m'inspirent beaucoup d'admiration et de respect.

J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes, et vous rendre fière. J'en profite pour vous remercier de m'avoir, si aimablement, accueilli au sein de votre service pendant mon externat. Ainsi que votre méthode d'enseignement par la classe inversée, qui est unique et spéciale, m'a beaucoup étonnée et motivée.

Veuillez trouver ici le témoignage, de mes plus profonds sentiments, de ma gratitude et ma reconnaissance les plus sincères.

À Notre Maître Et Juge De Thèse Professeur ANIBA Khalid,
Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service de
neurochirurgie, A Hôpital Universitaire Ibnou tofaïl De
Marrakech

Nous vous remercions d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse. Nous n'aurions pas assez de place sur ces quelques lignes pour exprimer notre admiration et plus grande reconnaissance à l'enseignant exemplaire que vous êtes. Toute notre gratitude pour votre enseignement de qualité sur les bancs de l'amphithéâtre comme dans votre service hospitalier. Soyez assurée de notre profond respect.

À Notre Maître Et Juge De Thèse Professeur RAIS Hanane
Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service
d'anatomopathologie au CHU Mohamed VI Marrakech

Je vous dois bien plus que ce que vous croyez, à l'enseignante, au pédagogue et à la personne remarquable et inspirante que vous êtes, pour votre temps, votre disponibilité, votre bon cœur, votre sens du partage et votre bienveillance. Pour tout ceci et pour bien plus encore, je vous témoigne reconnaissance, respect et particulièrement, admiration. Je vous remercie d'avoir, si naturellement, accepté de juger ce travail, que j'espère sera à la hauteur de vos attentes. Qu'Allah vous bénisse.

À Notre Maître Et Juge De Thèse Professeur IDRISSE
GANOUNI Najat Professeur de l'enseignement supérieur et
chef de service de radiologie du CHU Mohammed VI
Marrakech

Je vous remercie sincèrement pour la spontanéité avec laquelle vous avez accepté de juger ce travail, qui fut réalisé en collaboration avec votre service. Je tiens également à exprimer ma gratitude pour votre disponibilité, votre modestie et votre bienveillance, qui accompagnent si harmonieusement votre rigueur scientifique. Veuillez recevoir, chère Maître, l'expression de mon respect sincère.



LISTE D'ABRÉVIATIONS



Liste des abréviations

- **AANS:** American Association of Neurological Surgeons
- **AICA :** Artère cérébelleuse antéroinférieure
- **AMO :** Assurance maladie obligatoire
- **APC :** Angle ponto-cérébelleux
- **APS :** Automatic positioning system (système de positionnement automatique)
- **BED :** Biologically Effective Dose (dose biologique efficace)
- **CBCT :** Cône Beam Computed Tomography (Tomographie volumique à faisceau conique)
- **CT :** Computed Tomography (TDM)
- **CISS:** Constructive Interference in Steady State (Interférence Constructive en État Stationnaire)
- **CNRNR :** Centre de national de réhabilitation et neuroscience de rabat
- **CNSS :** Caisse national de sécurité sociale
- **CHU :** Centre Hospitalier universitaire
- **DVP :** Dérivation ventriculo-péritonéale
- **DVH :** Dose-volume histogramme
- **EVA :** Echelle visuelle analogique
- **GI :** Gradient index
- **GY :** Gray
- **HTIC :** Hypertension intracrânienne
- **IMRT:** Intensity-Modulated Radiation Therapy (Radiothérapie avec Modulation d'Intensité)
- **IP :** Inverse planification (planification inversée)
- **LET :** Linear Energy Transfer (Transfert Linéaire d'Énergie)
- **LINAC :** Linear Accelerator (accélérateur linéaire)
- **LGKS:** Leksell gamma knife surgery
- **LPL :** Lethal-Potentially Lethal (Lésions Létales-Potentiellement Létales)
- **LQ :** Linear Quadratic (Modèle Linéaire Quadratique)
- **MAV :** Malformation artérioveineuse
- **MeV :** Mégaélectronvolt
- **MIBS:** Medical Institute Berezin Sergey
- **PA :** Professeur Assistant
- **P.Ag :** Professeur Agrégé

- **PES** : Professeur de l'Enseignement Supérieur
- **PDC**: Produit de contrast
- **PCI** : Pedick Conformity Index (l'indice de Conformité de Pedick)
- **PIV** : Prescription Isodose Volume (Volume de l'Isodose de Prescription)
- **PTV**: Planning Target Volume (Volume Cible Planifié)
- **RCGK**: Radio-chirurgie gamma knife
- **RCP** : Réunion de concertation pluridisciplinaire
- **RT**: Radio-therapy
- **RTOG**: Radiation therapy oncology group
- **SNC**: Systeme nerveux central
- **SI** : Selectivity Index (Index de Sélectivité)
- **SRS**: Stereotactic Radiosurgery (radiochirurgie stéréotaxique)
- **TCR** : Target covering ratio (Ratio de Couverture de la Cible)



Liste des figures

- **Figure 1** : Pose du cadre stéréostatique à l'aide de vis serrés sur la table externe de la voute crânienne sous anesthésie locale.
- **Figure 2** : Formation de l'équipe multidisciplinaire de radiochirurgie Gamma Knife du CHU Mohammed VI.
- **Figure 3** : Dispositif du Gamma Knife du CHU Mohammed VI.
- **Figure 4** : IRM cérébrale avec cadre stéréotaxique en place au service de radiologie Arrazi du CHU Mohammed VI.
- **Figure 5** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente S.F en coupe axiale pondérées T1, T2* et FLAIR.
- **Figure 6** : IRM stéréotaxique de la patiente S.F en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 7** : IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente S.F en coupe axiale pondérées T1, T2 et FLAIR.
- **Figure 8** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente D.A en coupes sagittale, axiale et frontale pondérées T1, T1 FATSAT et T2.
- **Figure 9** : IRM stéréotaxique de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 10** : IRM encéphalique de contrôle après 1an de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T1 et T2.
- **Figure 11** : IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T1 et T2.
- **Figure 12** : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient A.M en coupe axiale pondérée T2, TOF artériel et FLAIR.
- **Figure 13** : Angio-IRM encéphalique pré thérapeutique du patient A.M.
- **Figure 14** : Artériographie cérébrale du patient A.M.
- **Figure 15** : IRM stéréotaxique du patient A.M en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 16** : IRM encéphalique du contrôle du patient A.M après 1 ans en coupes axiale, frontale et sagittale pondérées T1 et T2.
- **Figure 17** : Angio-IRM du patient A.M de contrôle après 1 an de la radiochirurgie cérébrale Gamma Knife.
- **Figure 18** : IRM encéphalique du contrôle du patient A.M après 2 ans en coupes axiale, sagittale et frontale pondérée T1, T2 et FLAIR.
- **Figure 19** : Angio-IRM du contrôle du patient A.M après 2 ans de la radiochirurgie Gamma Knife.
- **Figure 20** : Image d'une lame du patient E.S HE x40
- **Figure 21** : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient E.S en coupes axiale et frontale pondérée T1 sans et avec injection du gadolinium.
- **Figure 22** : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient E.S en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 23** : IRM stéréotaxique du patient E.S en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 24** : IRM encéphalique de contrôle du patient E.S après 1 an en coupe axiale pondérée T1 et T2.

- **Figure 25** : IRM encéphalique du contrôle du patient E.S après 2 ans en coupe axiale pondérée T1 et T2.
- **Figure 26** : Image d'une lame de la patiente B.F HE x40
- **Figure 27** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente B.F en coupe axiale pondérée T1, T2, FLAIR et diffusion.
- **Figure 28** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente B.F en coupe frontale pondérée T1 avec injection du gadolinium.
- **Figure 29** : IRM stéréotaxique de la patiente BF en coupe axiale et frontal pondérée T2
- **Figure 30** : IRM encéphalique de la patiente B.F de contrôle après 1an en coupe axiale pondérée T1 et T2 FLAIR.
- **Figure 31** : IRM encéphalique de la patiente B.F de contrôle après 2 ans en coupes axiale et frontale pondérées T2 et T2 STIR.
- **Figure 32** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2 CISS.
- **Figure 33** : IRM stéréotaxique de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 34** : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 35** : IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 36** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T1 sans et avec injection du gadolinium.
- **Figure 37** : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 38** : IRM stéréotaxique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T2.
- **Figure 39** : IRM encéphalique de contrôle après 1an de la patiente I.F en coupes axiale et frontale pondérées T1.
- **Figure 40** : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente I.F en coupes axiale, frontale et sagittale pondérées T2.
- **Figure 41** : L'IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente I.F en coupes axiale, frontale et sagittale pondérée T1 sans et avec injection du gadolinium.
- **Figure 42** : L'IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente I.F en coupes axiale et frontale pondérées T2.
- **Figure 43** : Répartition des patients selon l'âge
- **Figure 44** : Répartition des patients selon le sexe.
- **Figure 45** : Répartition des patients selon l'origine géographique.
- **Figure 46** : Répartition des patients selon la couverture sociale.
- **Figure 47** : Répartition des patients selon la symptomatologie révélatrice.
- **Figure 48** : Répartition des patients selon la nature de la lésion.
- **Figure 49** : Localisation de la lésion à l'IRM des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife au CHU Mohammed VI.
- **Figure 50** : Indications de la radiochirurgie par Gamma Knife des patients traités au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Figure 51** : Evolution clinique des patients traités par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

- **Figure 52** : Evolution radiologique des patients traites par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Figure 53** : Principe général d'une irradiation stéréotaxique par Gamma Knife.
- **Figure 54** : Photographie de Mr L.Leksell.
- **Figure 55** : Professeur LARS LEKSELL avec le premier appareil Gamma Knife en 1968.
- **Figure 56** : Gamma Knife® MODEL U 1987.
- **Figure 57**: Gamma Knife MODEL B 1996.
- **Figure 58**: Gamma Knife MODEL C 1999.
- **Figure 59**: Gamma Knife Model perfeXion™ (Elekta Instrument AB. Stockholm. Sweden).
- **Figure 60**: Gamma Knife Model ICON 2015.
- **Figure 61**: Gamma Knife Model ESPRIT 2022
- **Figure 62** : Casque en plâtre de Paris utilisé pour le premier patient traité par Gamma Knife en 1967 (actuellement exposé dans le bloc opératoire de Dade Lunsford à Pittsburgh, Pennsylvanie, États-Unis).
- **Figure 63** : Cadre Leksell classique (image à gauche), extraite du premier article de Leksell sur la radiochirurgie (image à droite).
- **Figure 64** : Coussin de tête Moldcare.
- **Figure 65** : Masque hybride thermoplastique.
- **Figure 66_**: Dosimétrie d'un schwannome vestibulaire Koos II-III réalisée à partir d'un scanner stéréotaxique (en haut à droite) et d'une IRM.
- **Figure 67** : APS pour le déplacement robotisé des coordonnées du patient.
- **Figure 68** : Unité Gamma Knife modèle 4-C.
- **Figure 69** : Dosimétrie d'un schwannome vestibulaire Koos II-III G1 utilisant des tirs hybrides (GammaPlan).
- **Figure 70** : Distribution de la dose (LINAC).
- **Figure 71**: Histogramme Dose/profondeur (particules lourdes).
- **Figure 72** : Modèle linéaire quadratique (relation dose/survie cellulaire).
- **Figure 73** : Prolifération de cellules inflammatoires au niveau de la région sous-endothéliale de la paroi vasculaire d'une MAV après irradiation.
- **Figure 74** : Malformation artérioveineuse centrale gauche (A) oblitérée 3 ans après un traitement par radiochirurgie Gamma Knife (B).
- **Figure 75** : Métastase cérébrale d'adénocarcinome pulmonaire (A) contrôlée à 3 mois (B) et à 6 mois (C) d'un traitement par radiochirurgie Gamma Knife.
- **Figure 76** : Schwannome vestibulaire gauche avant (A) et 4 ans après un traitement par radiochirurgie Gamma Knife (B).
- **Figure 77** : Age moyen des patients traités dans les différents centres de radiochirurgie Gamma Knife dans le monde (compris entre 50 et 55 ans).
- **Figure 78** : Control tumoral d'un neurinome de l'acoustique après 4 ans de la radiochirurgie Gamma Knife.



LISTE DES TABLEAUX

- **Tableau I** : Répartition des patients selon le sexe.
- **Tableau II** : Répartition des patients selon l'origine géographique.
- **Tableau III** : Répartition des patients selon la couverture sociale.
- **Tableau IV** : Répartition des patients selon la nature de la lésion à l'IRM encéphalique.
- **Tableau V** : Taille des lésions traitées par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Tableau VI** : Paramètres dosimétriques des patients traités par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Tableau VII** : Evolution clinique des patients traités par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Tableau VIII** : Evolution radiologique des patients traités par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech.
- **Tableau IX** : Récapitulatif du nombre des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife dans les différents centres internationaux.
- **Tableau X** : Statistiques d'ELEKTA.
- **Tableau XI** : Répartition par sexe des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife selon les différents centres.



PLAN



INTRODUCTION	1
I. Généralités	2
II. Objectifs de l'étude	3
1. Objectif principal	4
2. Objectifs secondaires	4
MATÉRIELS ET MÉTHODES	5
I. Type de l'étude	6
II. Critères d'inclusion	6
III. Critères d'exclusion	6
IV. Recueil des données	7
V. Cadre de l'étude	7
1. Le plateau technique	8
2. Les intervenants	9
3. Description du dispositif	11
4. Déroulement du traitement par Gamma Knife	13
VI. Considérations éthiques	13
OBSERVATIONS	14
RESULTATS	55
I. Récapitulatif des résultats	56
1. Données épidémiologiques	56
2. Données cliniques et radiologiques	59
3. Evolution et suivi	62
DISCUSSION	66
I. Revue de littérature	67
1. Définitions et historique	67
2. Evolutions technologiques	74
3. Principes physiques de la radiochirurgie stéréotaxique	87
4. Les principes biologiques de la radiochirurgie Gamma Knife	96
5. Intérêt de la radiochirurgie Gamma Knife	99
6. Indications	100
7. Tolérance	116
II. Discussion des résultats	118
1. Aperçu sur la radiochirurgie Gamma Knife à l'échelle internationale et nationale	118
2. Données épidémiologiques	121
3. Données cliniques et radiologiques	124
4. Données thérapeutiques	125
5. Evolution clinique et radiologique	126
FORCES ET LIMITES	130
CONCLUSION	134
RÉSUMÉ	137
ANNEXES	144
BIBLIOGRAPHIE	150



INTRODUCTION



I. Généralités :

La radiochirurgie cérébrale se définit comme l'irradiation en dose unique élevée d'une lésion précisément identifiée dans l'espace intracrânien, reposant sur l'utilisation conjointe de la méthodologie stéréotaxique et de l'imagerie multimodale. Cette technique permet une localisation tridimensionnelle extrêmement précise de la cible, autorisant l'administration d'une dose thérapeutique élevée tout en assurant une protection maximale des tissus cérébraux sains adjacents. Elle constitue actuellement une modalité thérapeutique reconnue dans la prise en charge de certaines tumeurs cérébrales, de malformations vasculaires intracrâniennes ainsi que de pathologies fonctionnelles du système nerveux central. La radiochirurgie s'impose ainsi comme une alternative ou un complément à la neurochirurgie conventionnelle et à la radiothérapie externe fractionnée, avec l'avantage d'être le plus souvent réalisée sans anesthésie générale ni geste chirurgical proprement dit, réduisant de ce fait la morbidité et la durée d'hospitalisation [1,2].

Le développement de la radiochirurgie à l'échelle mondiale est étroitement lié aux progrès réalisés dans plusieurs domaines médicaux et scientifiques, notamment la neurochirurgie, l'oncologie radiothérapie et la radiologie, ainsi qu'en physique médicale et en ingénierie biomédicale. La collaboration étroite entre ces disciplines a permis la mise au point de techniques de radiochirurgie de plus en plus sophistiquées, caractérisées par une amélioration continue de la précision balistique, de la conformité dosimétrique et de la sécurité des traitements. Ces avancées ont contribué à une réduction significative des complications neurologiques et à une amélioration notable de la qualité de vie des patients traités [1].

La radiochirurgie par Gamma Knife représente l'une des techniques les plus emblématiques et les plus largement utilisées dans ce domaine. Elle repose sur l'association des principes de la neurochirurgie stéréotaxique et de la radiothérapie multifaisceaux. La stéréotaxie consiste en la mise en place d'un cadre de référence rigide fixé au crâne du patient, servant de système de coordonnées tridimensionnelles. Ce dispositif permet de

localiser la lésion avec une précision submillimétrique dans les trois dimensions de l'espace, à partir des données issues de l'imagerie multimodale.

La radiothérapie multifaisceaux, quant à elle, repose sur la convergence simultanée d'un grand nombre de faisceaux de rayonnements ionisants, chacun délivrant une faible dose lors de son passage à travers les tissus cérébraux[3]. La sommation de ces faisceaux au niveau de la cible permet d'obtenir une dose élevée et hautement focalisée, responsable de l'effet thérapeutique, tout en limitant l'irradiation des structures cérébrales avoisinantes. Ce principe physique explique la grande efficacité clinique et la bonne tolérance de la radiochirurgie Gamma Knife, qui s'est imposée comme une modalité de référence dans le traitement de nombreuses pathologies intracrâniennes[1,2].

Ainsi, la radiochirurgie stéréotaxique, et en particulier par Gamma Knife, occupe aujourd'hui une place centrale dans l'arsenal thérapeutique des affections intracrâniennes. Son évolution constante, soutenue par les avancées technologiques et l'approche multidisciplinaire, justifie l'intérêt croissant porté à l'évaluation de ses résultats cliniques et dosimétriques, ainsi qu'à la confrontation de l'expérience locale aux données de la littérature internationale [1,2].

II. Objectifs de l'étude :

Dans le cadre du développement des techniques de neurochirurgie non invasive, la radiochirurgie cérébrale par Gamma Knife occupe une place croissante dans la prise en charge des pathologies neurologiques. Reconnue pour sa précision millimétrique et sa capacité à délivrer une dose élevée de rayonnement sur une cible définie tout en préservant les tissus sains environnants, elle représente une alternative efficace et sûre à la chirurgie conventionnelle dans de nombreuses indications.

Ce travail s'inscrit dans cette perspective et a pour ambition de valoriser l'expérience du Centre hospitalier universitaire (CHU) Mohammed VI de Marrakech dans l'utilisation du Gamma Knife pour le traitement de diverses affections cérébrales à travers une prise en charge multidisciplinaire structurée, impliquant étroitement les services d'oncologie

radiothérapie, de neurochirurgie (Hôpitaux Arrazi et Ibn Tofail) et de radiologie (Hôpitaux Arrazi et Ibn Tofail).

1. Objectif principal :

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'évaluation de l'efficacité et de la sécurité (sûreté) de la radiochirurgie par Gamma Knife dans le cadre de la prise en charge des diverses affections cérébrales au sein de notre contexte de pratique quotidienne.

2. Objectifs secondaires :

Pour répondre à cet objectif principal, notre travail se fixe les objectifs spécifiques suivants :

- Préciser les indications thérapeutiques : Identifier les pathologies intracrâniennes (vasculaires, tumorales ou fonctionnelles) ayant bénéficié de cette modalité au CHU Mohammed VI.
- Décrire les modalités pratiques de réalisation : Détailler le parcours du patient, du plateau technique au déroulement technique du traitement (fixation, imagerie, planification).
- Évaluer les résultats thérapeutiques : Analyser l'évolution clinique et radiologique des patients après le traitement par Gamma Knife.
- Analyser le profil de tolérance : Évaluer les effets secondaires éventuels et la sécurité globale de cette approche innovante.
- Apporter des éléments de réflexion : Proposer des pistes pour optimiser l'intégration de la radiochirurgie dans la stratégie thérapeutique multidisciplinaire des affections cérébrales au Maroc

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I. Type de l'étude :

Il s'agit d'une étude rétrospective et descriptive portant sur un échantillon de sept patients traités par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife au sein du CHU Mohammed VI de Marrakech, au mois d'août 2023.

II. Critères d'inclusion :

Tous les patients ayant bénéficiés d'un traitement par radiochirurgie Gamma Knife dont l'indication a été validé après une réunion de concertation pluridisciplinaire, pendant la période d'étude.

III. Critères d'exclusion :

Tous les patients dont les dossiers médicaux sont incomplets ou inexploitable.

IV. Recueil des données :

Une fiche d'exploitation préétablie a été utilisée pour le recueil standardisé des données, incluant notamment le numéro de dossier, la date du traitement, l'âge, le sexe, la pathologie traitée, le volume lésionnel, le nombre de tirs, ainsi que la durée d'irradiation. L'ensemble des données a été saisi et analysé à l'aide de l'outil Excel, permettant une organisation et une interprétation systématique des résultats obtenus.

Pour chaque patient, les données épidémiologiques, cliniques, thérapeutiques ainsi que celles relatives au suivi ont été recensées à partir de différentes sources.

Ces informations ont été extraites des dossiers médicaux individuels, des dossiers informatisés, de la base de données du logiciel Leksell Gamma Plan, des registres du service, ainsi que des comptes rendus d'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Cette approche a permis de constituer un ensemble de données complet et fiable, garantissant la cohérence et la qualité de l'analyse réalisée.

V. Cadre de l'étude :

Cette étude a été réalisée au sein du CHU Mohammed VI de Marrakech, établissement de référence de niveau tertiaire, doté d'un plateau technique moderne et diversifié répondant aux normes internationales de qualité et de sécurité. Le CHU Mohammed VI dispose d'une unité de radiochirurgie cérébrale Gamma Knife, spécifiquement dédié au traitement des pathologies intracrâniennes.

1. Le plateau technique :

Le service d'oncologie radiothérapie du CHU Mohammed VI de Marrakech dispose d'un plateau technique complet et hautement spécialisé, réparti en plusieurs unités fonctionnelles.

Il comprend notamment une salle dédiée à la planification dosimétrique, deux salles d'irradiation externe et interne (curiethérapie), ainsi qu'une unité de radiochirurgie Leksell Gamma Knife Infini.

Cette unité constitue une plateforme médico-technique transversale, dédiée à la prise en charge des pathologies intracrâniennes et fonctionnant selon un modèle multidisciplinaire, associant étroitement les services d'oncologie radiothérapie, de neurochirurgie et de radiologie.

Ainsi qu'une salle opératoire dédiée est intégrée à cette unité, où se déroule la pose du cadre stéréotaxique, première étape indispensable du protocole de radiochirurgie. Cet acte est réalisé par le neurochirurgien sous anesthésie locale au niveau des points d'appui frontaux et occipitaux, parfois associée à une sédation légère pour le confort du patient.

Une attention particulière est portée à la stabilité et à la symétrie de la fixation, conditions essentielles pour garantir une reproductibilité optimale du repérage spatial et une précision géométrique constante tout au long de la procédure (Figure 1).



Figure 1 : Pose du cadre stéréotaxique à l'aide de vis serrés sur la table externe de la voute crânienne sous anesthésie locale

2. Les intervenants :

L'équipe pluridisciplinaire intervenant dans la prise en charge des patients comprend :

- Equipe d'oncologie radiothérapie faite d'oncologues radiothérapeutes, physiciens, techniciens et anesthésistes
- Equipe de neurochirurgie des hôpitaux Arrazi et Ibn Tofail
- Equipe de radiologie faite de radiologues et de techniciens des hôpitaux Arrazi et Ibn Tofail

Assurant le bon déroulement des procédures dans des conditions optimales de sécurité et de précision (Figure 2).

Ce cadre technique et humain performant permet de garantir une prise en charge de haute qualité des patients bénéficiant d'un traitement par radiochirurgie Gamma Knife au sein du CHU Mohammed VI de Marrakech



Figure 2 : Formation de l'équipe multidisciplinaire de radiochirurgie Gamma Knife du CHU Mohammed VI

3. Description du dispositif :

Le service est doté d'une machine Gamma Knife nouvelle génération type infini :

Infini est une machine à rayons gamma entièrement automatisée et rotative, conçue pour la radiochirurgie stéréotaxique intracrânienne (Figure 3).

Elle utilise 30 sources de cobalt-60 rotatives, qui tournent autour de l'iso centre mécanique selon une méthode de focalisation en spirale multi source non isométrique.

Ces sources de cobalt sont disposées en six rangées de cinq sources chacune et effectuent une rotation complète par minute.

La machine propose quatre tailles de collimateurs (4, 8, 14 et 18 mm) ainsi que trois angles différents (70°, 90° et 110°), adaptés au maintien de la tête et au tourillon de la machine.

La portée intracrânienne est de 180/180/230 mm selon les axes X/Y/Z respectivement.

Les opérations des collimateurs et le positionnement du patient sont entièrement automatisés, permettant un flux de travail continu et optimisé.

Enfin, la machine dispose d'un interrupteur de faisceau indépendant, capable d'activer ou de couper le passage du rayonnement tous les 5 degrés.



Figure 3 : Dispositif du Gamma Knife infini du CHU Mohammed VI

4. Déroulement du traitement par Gamma Knife :

Le traitement par Gamma Knife suit un protocole strict, standardisé et multidisciplinaire, garantissant à la fois la précision thérapeutique et la sécurité du patient. Il se déroule en plusieurs étapes successives, réalisées au cours d'une même journée et sous la supervision conjointe de l'équipe neurochirurgicale, radiothérapeutique et de physique médicale.

- **Préparation du patient :**

Avant la séance, une consultation d'évaluation clinique est réalisée afin de confirmer l'indication radio chirurgicale et de vérifier l'absence de contre-indication. Le jour du traitement, le patient est installé en position allongée, puis un cadre stéréotaxique Leksell est fixé sous anesthésie locale (ou sédation légère). Ce dispositif assure une immobilisation rigoureuse de la tête et permet la localisation tridimensionnelle précise de la lésion à traiter (Figure 1).

- **Acquisition des images :**

L'acquisition des images constitue une étape fondamentale du protocole de radiochirurgie Gamma Knife.

Elle est réalisée au service de radiologie du CHU Mohammed VI de Marrakech, avant la planification du traitement.

Une IRM cérébrale est systématiquement effectuée, incluant des séquences pondérées T1 avec injection de gadolinium et des séquences T2, permettant une visualisation précise du volume cible ainsi que de ses rapports anatomiques avec les structures avoisinantes.

Ces images de haute résolution servent de base à la définition dosimétrique et balistique du traitement, garantissant la conformité et la sécurité de l'irradiation (Figure 4).



Figure 4 : IRM cérébrale avec cadre stéréotaxique en place réalisée au service de radiologie du CHU Mohammed VI, s'inscrivant dans l'approche pluridisciplinaire de la prise en charge en radiochirurgie Gamma Knife

- **Planification du traitement :**

Les images sont transférées dans le système de planification Leksell Gamma Plan™, où le neurochirurgien, le radiothérapeute et le physicien médical définissent conjointement la cible (volume à traiter), les structures à risque et la dose prescrite. Le logiciel calcule alors la distribution optimale des faisceaux de rayonnement issus des sources de Cobalt-60, permettant de concentrer la dose sur la lésion tout en préservant les tissus sains environnants.

- **Irradiation :**

Une fois le plan validé, le patient est positionné sur le lit de traitement, qui s'introduit automatiquement dans l'unité de rayonnement. L'irradiation est délivrée de manière totalement automatisée, selon les paramètres prédéfinis, avec un contrôle continu du

positionnement et du déroulement du traitement. La durée d'irradiation varie en fonction du volume traité et de la dose prescrite, oscillant généralement entre 26 minutes et 64 minutes.

- **Fin de procédure et suivi :**

À la fin du traitement, le cadre stéréotaxique est retiré, et le patient est observé pendant quelques heures avant de regagner son domicile le jour même. Un suivi clinique et radiologique régulier est assuré, comportant notamment des IRM de contrôle afin d'évaluer la réponse thérapeutique, la stabilité lésionnelle et la tolérance du traitement.

VI. Considérations éthiques :

Cette étude a été conduite dans le respect des principes éthiques et réglementaires en vigueur. Les patients ont été informés de manière claire et exhaustive sur les objectifs de l'étude, la nature des données recueillies ainsi que l'utilisation éventuelle de leurs images médicales. Leur participation s'est faite sur la base d'un consentement libre et éclairé, après explication complète et possibilité de poser des questions.

Les données cliniques et radiologiques ont été anonymisées avant leur exploitation. Les images personnelles utilisées à des fins d'analyse ou d'illustration scientifique ont été intégrées uniquement après accord explicite de la personne concernée. Les informations ont été conservées de manière confidentielle et sécurisée.



I. Observations :

Les observations présentées ci-dessous illustrent concrètement les différents profils de patients pris en charge par radiochirurgie Gamma Knife au CHU Mohamed VI de Marrakech. Chaque observation décrit de manière détaillée les aspects épidémiologiques, cliniques, radiologiques et thérapeutiques spécifiques à chaque patient, tout en mettant en lumière les particularités techniques du traitement et l'évolution observée au cours du suivi. L'ensemble de ces observations permet d'appréhender la diversité des indications de la radiochirurgie cérébrale, la rigueur de la planification dosimétrique, ainsi que les résultats cliniques et radiologiques obtenus dans notre expérience.

1. Observation n°1 : Méningiome du clivus

Il s'agit de Madame S.F, âgée de 69 ans, veuve, d'origine urbaine, sans profession, bénéficiant d'une couverture médicale AMO Tadamon. Elle ne présentait aucun antécédent pathologique notable.

La patiente s'est présentée pour la prise en charge d'un méningiome du clivus révélé par un syndrome d'hypertension intracrânienne incomplet, se manifestant par des céphalées chroniques d'évolution progressive rebelles au traitement, avec troubles visuels, sans vomissements, ni déficit moteur ou sensitif associé.

À l'examen clinique, la patiente était en bon état général, consciente, avec un score de Glasgow à 15/15. Aucun signe de focalisation neurologique n'a été retrouvé. L'examen des paires crâniennes, de la motricité et de la sensibilité était normal.

L'IRM cérébrale pré thérapeutique a mis en évidence une formation lésionnelle extra-axiale du clivus latéralisé à droite, à large base d'implantation méningée sur le clivus, avec épaissement méningé en iso signal T1 et T2 réalisant le signe de la queue dure, sans restriction de diffusion et présentant un rehaussement intense après injection de gadolinium.

La lésion mesurait 15 × 28 × 26 mm et comblait la citerne pré-pontique, avec un effet compressif sur le pont. Elle était en contact étroit avec le tronc basilaire et le sinus

caverneux homolatéral, avec engainement de la portion intra-caverneuse de la carotide interne droite. En dehors, la lésion arrivait en contact avec le nerf trijumeau (V) droit, évoquant un méningiome du clivus droit. Aucun signe d'engagement cérébral ni d'hydrocéphalie n'a été mis en évidence (Figure 5).

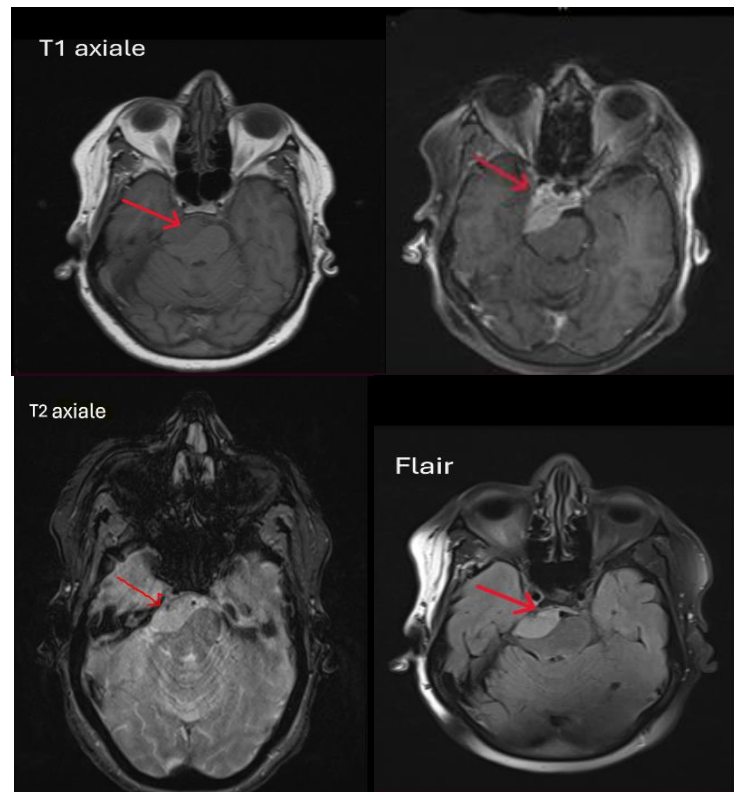


Figure 5 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente S.F en coupe axiale pondérées T1, T2*, et FLAIR montrant une formation lésionnelle extra-axiale du clivus latéralisé à droite, à large base d'implantation méningée, avec épaissement méningé en faveur d'un méningiome du clivus et de l'apex pétreux (flèche rouge)

La patiente n'avait reçu aucun traitement préalable, notamment pas de chirurgie d'exérèse, ni radiothérapie. Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, il a été décidé de procéder à un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique type Leksell G-frame, réalisée sous anesthésie locale aux points frontaux et occipitaux, permettant une immobilisation rigoureuse de la tête et un repérage spatial millimétrique.

Une IRM stéréotaxique en coupe axiale pondérée T2 a permis la planification dosimétrique via le logiciel Leksell Gamma Plan™. Le contourage manuel du volume cible ainsi que des organes à risque (tronc cérébral, chiasma optique, nerfs optiques) a été effectué avec précision (Figure 6).

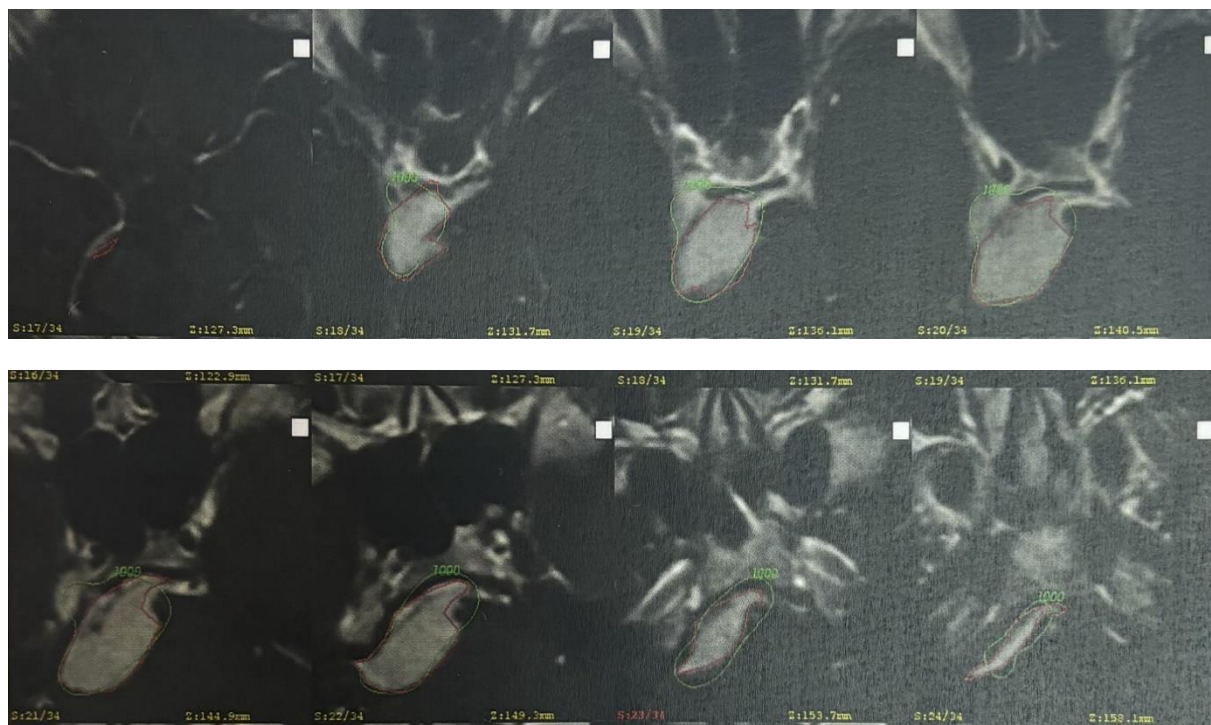


Figure 6 : IRM stéréotaxique de la patiente S.F en coupe axiale pondérée T2 montrant le contourage du méningiome du clivus et de l'apex pétreux (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La patiente a reçu une dose de 10 gy sur l'iso dose 50 %, administrée en une seule séance, avec un volume cible de 0,0109 cm³

Le traitement a nécessité 23 tirs (shots) et une collimation mixte (4-8-14-18 mm), adaptée à la configuration tridimensionnelle de la cible. La durée totale d'irradiation a été de 62 minutes.

La procédure s'est déroulée sans incident technique, sous surveillance continue et dans des conditions optimales de sécurité.

Les suites immédiates ont été simples, marquées uniquement par de légères céphalées transitoires, bien contrôlées par traitement symptomatique.

Le suivi clinique a mis en évidence une nette amélioration des céphalées, sans apparition de déficit neurologique.

Une IRM de suivi à un an avait été demandée, mais la patiente était perdue de vue. L'IRM réalisée deux ans après a montré la persistance du méningiome du clivus droit avec une légère réduction de sa taille, sans signe de récurrence ni d'œdème péri-lésionnel, traduisant une excellente réponse thérapeutique. (Figure 7)

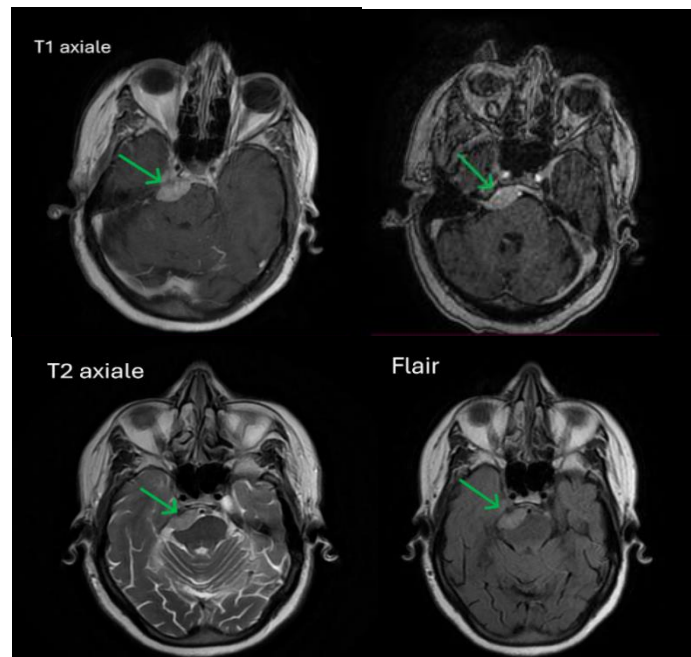


Figure 7 : IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente S.F en coupe axiale pondérées T1, T2 et FLAIR montrant la persistance avec diminution en taille du méningiome du clivus droit (flèche en vert)

2. Observation n°2 : Cavernome protubérantielle

Il s'agit de Madame D.A, âgée de 50 ans, mariée, d'origine urbaine, sans profession, bénéficiant d'une couverture médicale AMO Tadamon, et ne présentant aucun antécédent pathologique particulier.

Elle s'est présentée pour la prise en charge d'un cavernome protubérantielle gauche découvert dans le cadre d'un bilan de céphalées résistantes au traitement antalgique, sans vomissements, ni troubles visuels ni déficit neurologique associé.

À l'examen clinique, la patiente était en bon état général, consciente, avec un score de Glasgow à 15/15. L'examen neurologique n'a révélé aucun signe de focalisation, ni atteinte des paires crâniennes, ni déficit moteur ou sensitif.

L'IRM cérébrale réalisée avant traitement a objectivé une lésion protubérantielle gauche arrondie, bien limitée, mesurant $10,5 \times 7,4 \times 7,2$ mm, en hyposignal T1 et T2, sans rehaussement après injection de gadolinium.

Sur la séquence T2*, la lésion présentait un aspect en "poivre et sel", évocateur d'un cavernome protubérantielle.

Aucune hydrocéphalie ni signe d'engagement n'a été observé (Figure 8).

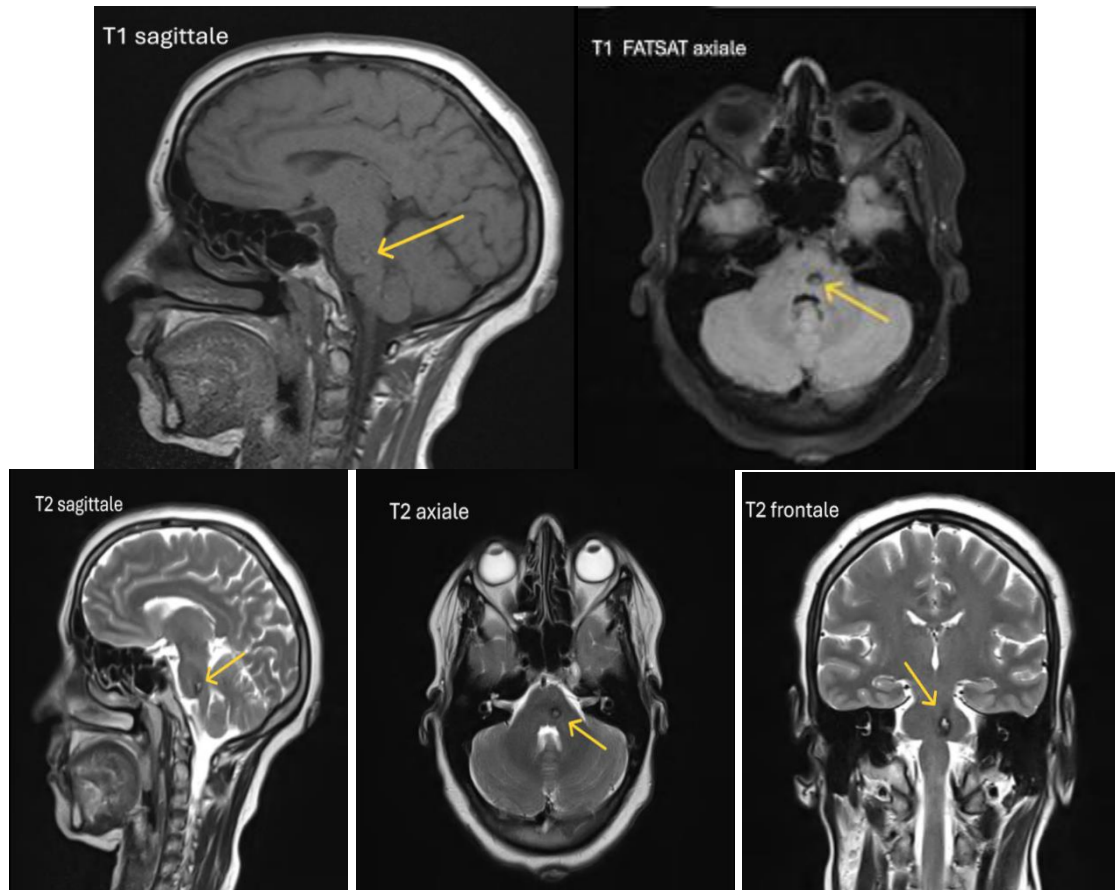


Figure 8 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente D.A pondérée T1, T1 FATSAT, T2 en coupes sagittale, axiale et frontale montrant un cavernome protubérantiel (flèche jaune)

Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, la patiente a été retenue pour un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame, réalisée sous anesthésie locale, assurant une immobilisation rigoureuse de la tête. Une IRM stéréotaxique pondérée T2 a ensuite été effectuée et utilisée pour la planification dosimétrique sur le logiciel Leksell Gamma Plan™.

Le contourage manuel du volume cible ($0,559 \text{ cm}^3$) a permis une délimitation précise de la lésion et l'identification des organes à risque adjacents, notamment le chiasma optique et les nerfs optiques. (Figure 9)

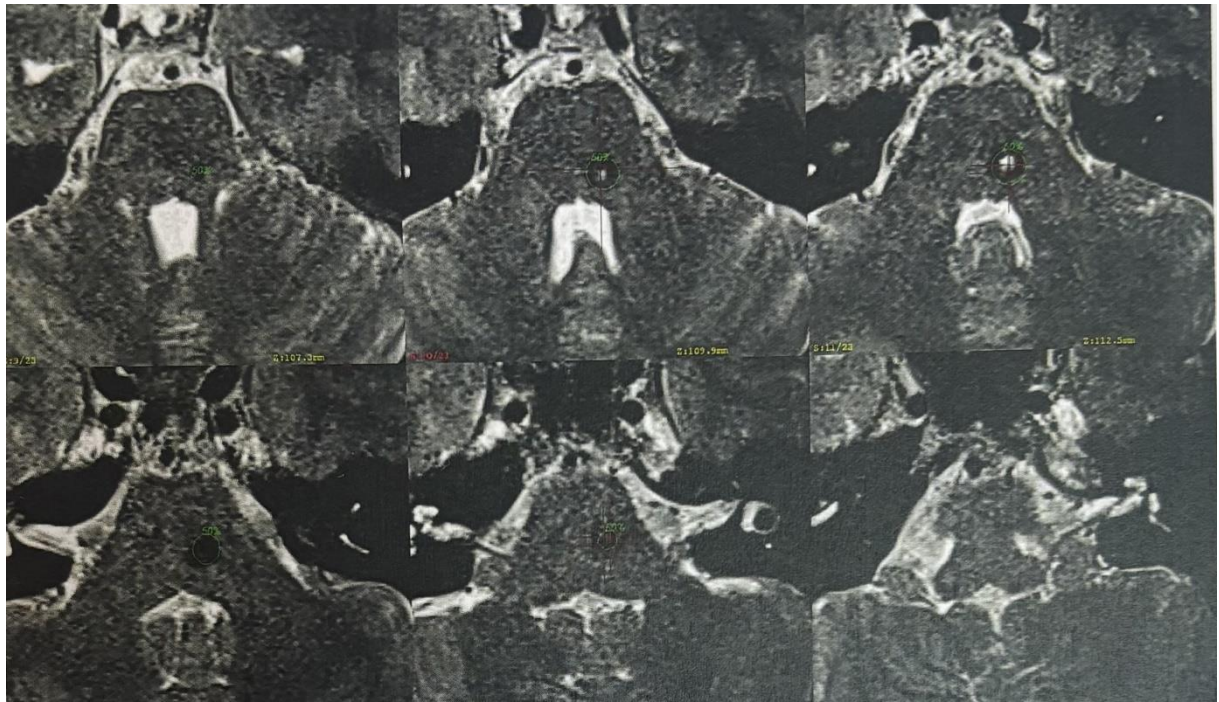


Figure 9 : IRM stéréotaxique de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T2 montrant le contourage du cavernome protubérantiel (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 10 Gy sur une iso dose de 50 %.

Le traitement a été administré en une seule séance, à l'aide de cinq tirs (shots), avec une collimation de 4 mm adaptée à la morphologie de la lésion.

La durée totale d'irradiation a été de 26 minutes, sans incident technique. Le positionnement et le déroulement du traitement ont été assurés sous surveillance continue.

Les suites immédiates ont été simples, marquées par de légères céphalées transitoires bien contrôlées par traitement symptomatique, sans déficit neurologique associé. Au suivi clinique, la patiente a rapporté une disparition progressive des céphalées.

L'IRM de contrôle réalisé à 1 an a mis en évidence la persistance du cavernome protubérantiel gauche mesurant 7.5 mm de diamètre maximal hyposignal hétérogène T2 et en vide de signal sur la séquence T2* sans traduction sur la séquence diffusion sans signe de complication. (Figure 10)

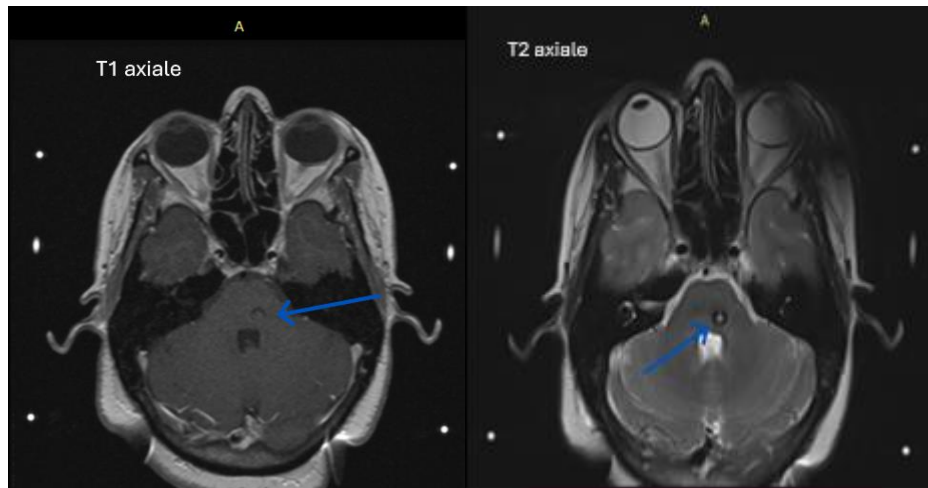


Figure 10 : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T1 et montrant la persistance du cavernome protubérantiel (flèche bleu)

L'IRM encéphalique après 2 ans a montré un aspect quasi stable du cavernome protubérantiel, mesurant 7 mm contre 7,5 mm initialement.

Aucune complication tardive n'a été observée (figure11).

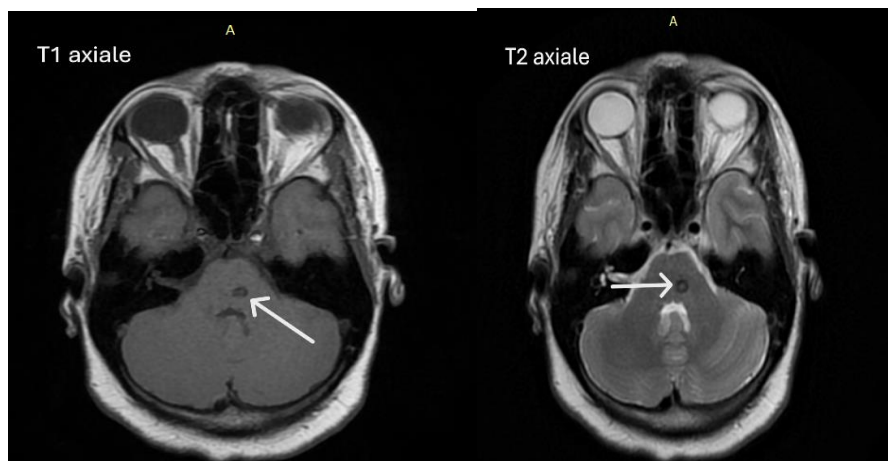


Figure 11 : IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente D.A en coupe axiale pondérée T1 et T2 sans injection du gadolinium montrant la persistance avec discrète diminution en taille du cavernome protubérantiel (flèche blanche)

3. Observation n°3 : Malformation artérioveineuse frontale gauche

Il s'agit de Monsieur A.M., âgé de 24 ans, célibataire, d'origine urbaine, exerçant en tant qu'agent commercial, bénéficiant d'une couverture médicale CNSS, sans antécédents médicaux ni chirurgicaux notables.

Le patient s'est présenté pour la prise en charge d'une malformation artérioveineuse (MAV) frontale gauche, révélée par un syndrome frontal associant des troubles du comportement et de la mémoire, accompagnés de crises comitiales bien contrôlées sous traitement antiépileptique.

À l'examen clinique, le patient était en bon état général, conscient, avec un score de Glasgow à 15/15. L'examen neurologique n'a montré aucun déficit moteur ni sensitif, ni atteinte des paires crâniennes ou des fonctions supérieures.

L'angio-IRM cérébrale a montré la présence, au niveau frontal gauche, de structures vasculaires serpigineuses mal limitées en hyposignal T1 et T2, rehaussées après injection de gadolinium, mesurant 5 × 4 cm .

Ces structures reçoivent des artères afférentes provenant de l'artère carotide interne gauche et se drainent au niveau du sinus longitudinal supérieur à travers des veines corticales dilatées. Il n'existait pas d'hydrocéphalie, ni signe d'engagement ou de thrombose veineuse (Figure 12-13).

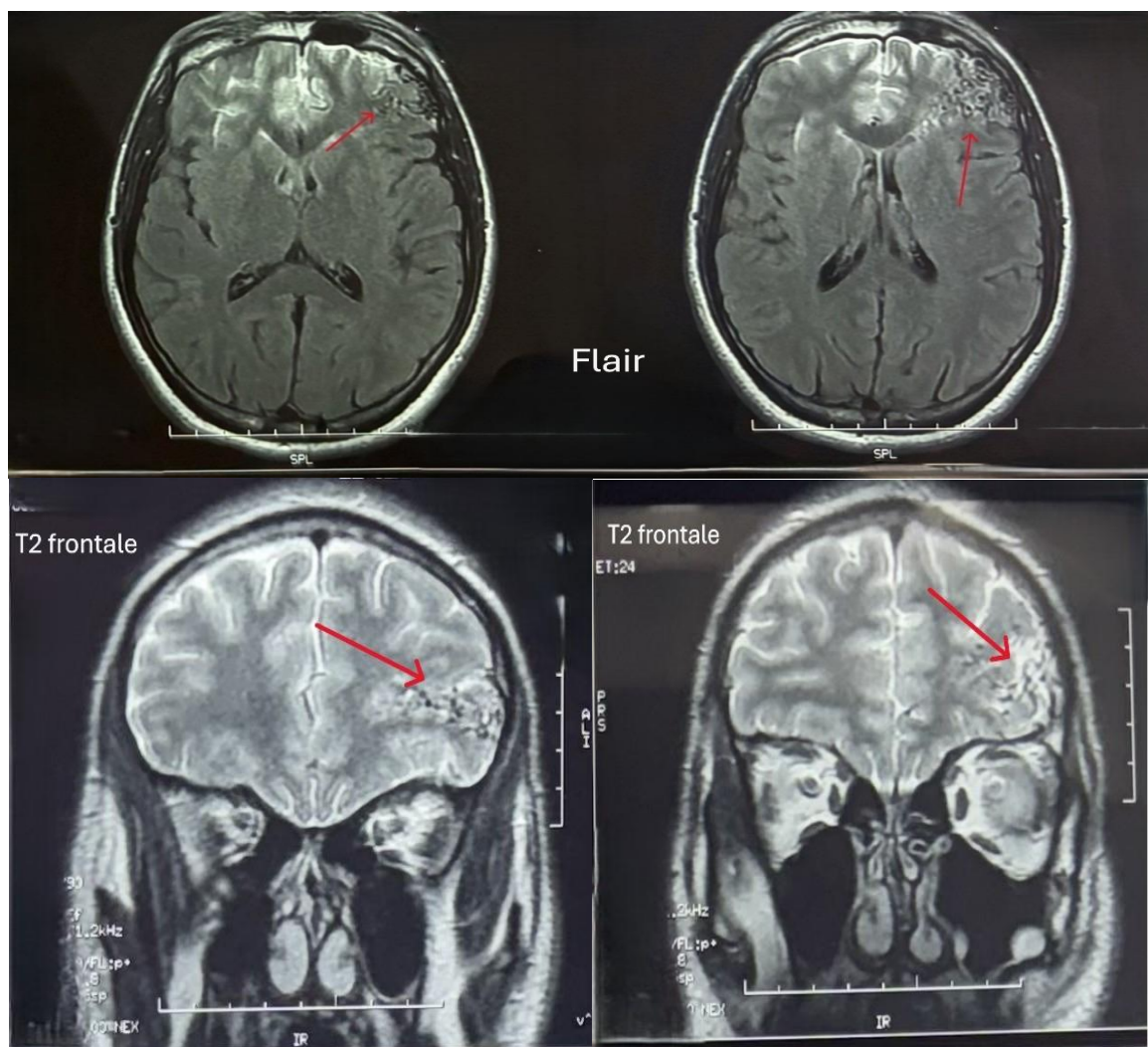


Figure 12 : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient A.M en coupe axiale pondérée T2 ,TOF artériel et FLAIR montrant un amas de structures vasculaires serpigneuses au niveau frontal gauche en vide de signal T2 alimente par une branche de l'artère cérébrale moyenne en faveur d'une MAV frontale antérieure gauche (flèche rouge)



Figure 13 : Angio-IRM encéphalique du patient A.M montrant une MAV frontale antérieure gauche (flèche rouge), avec respect de l'intégrité du polygone de willis

Le complément par artériographie cérébrale a montré une MAV basifrontale antérieure gauche à haut débit, alimentée par des branches modérément hypertrophiées provenant des artères cérébrales antérieure et moyenne gauches. Elle se draine par un collecteur veineux dilaté rejoignant le sinus longitudinal supérieur (Figure14). Le diagnostic de malformation artérioveineuse superficielle frontale gauche non rompue a été retenu avec un score de Spetzler-Martin a 3 points.

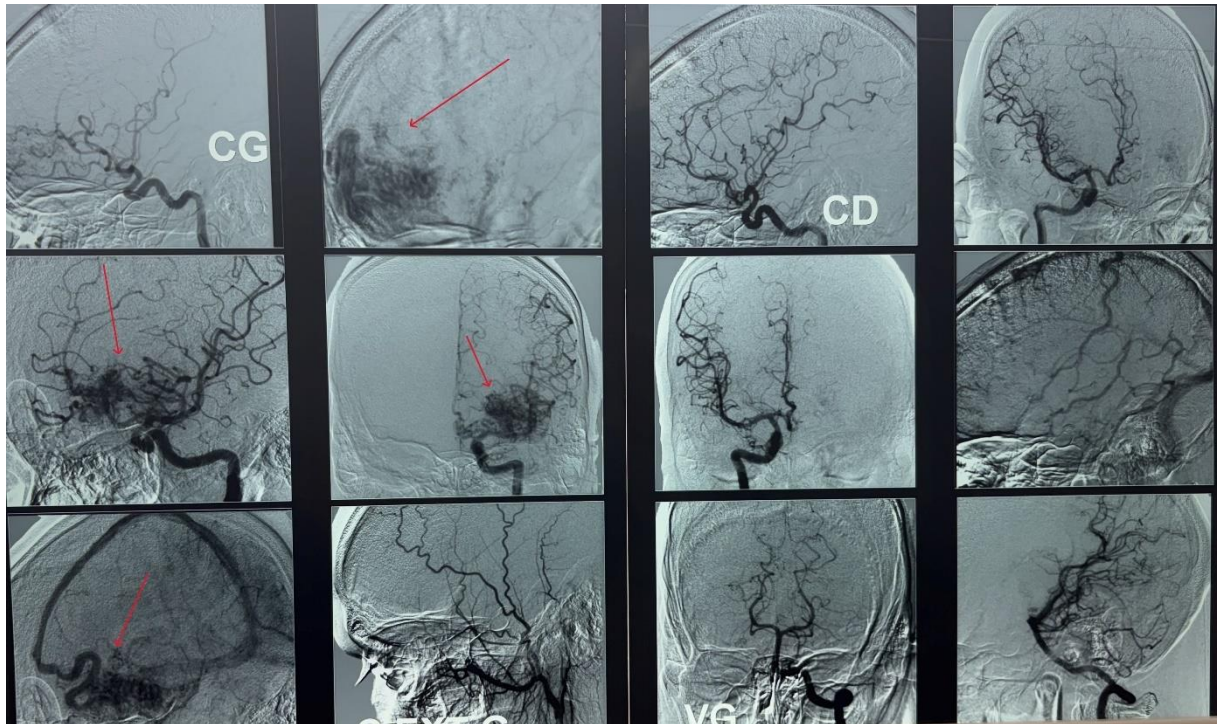


Figure 14 : Artériographie cérébrale du patient A.M montrant une MAV basifrontale antérieure gauche à haut débit, alimentée par des branches modérément hypertrophiées provenant des artères cérébrales antérieure et moyenne gauches. (Flèche rouge)

Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, le patient a été retenu pour un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife. La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame, réalisée sous anesthésie locale, assurant une immobilisation rigoureuse et stable de la tête. Une IRM stéréotaxique pondérée T2 a été utilisée pour la planification dosimétrique sur le logiciel Leksell GammaPlan™.

Le contourage manuel du volume cible, estimé à 20 cm³, a permis une délimitation précise du nid vasculaire et des structures à risque adjacentes (Figure 15).

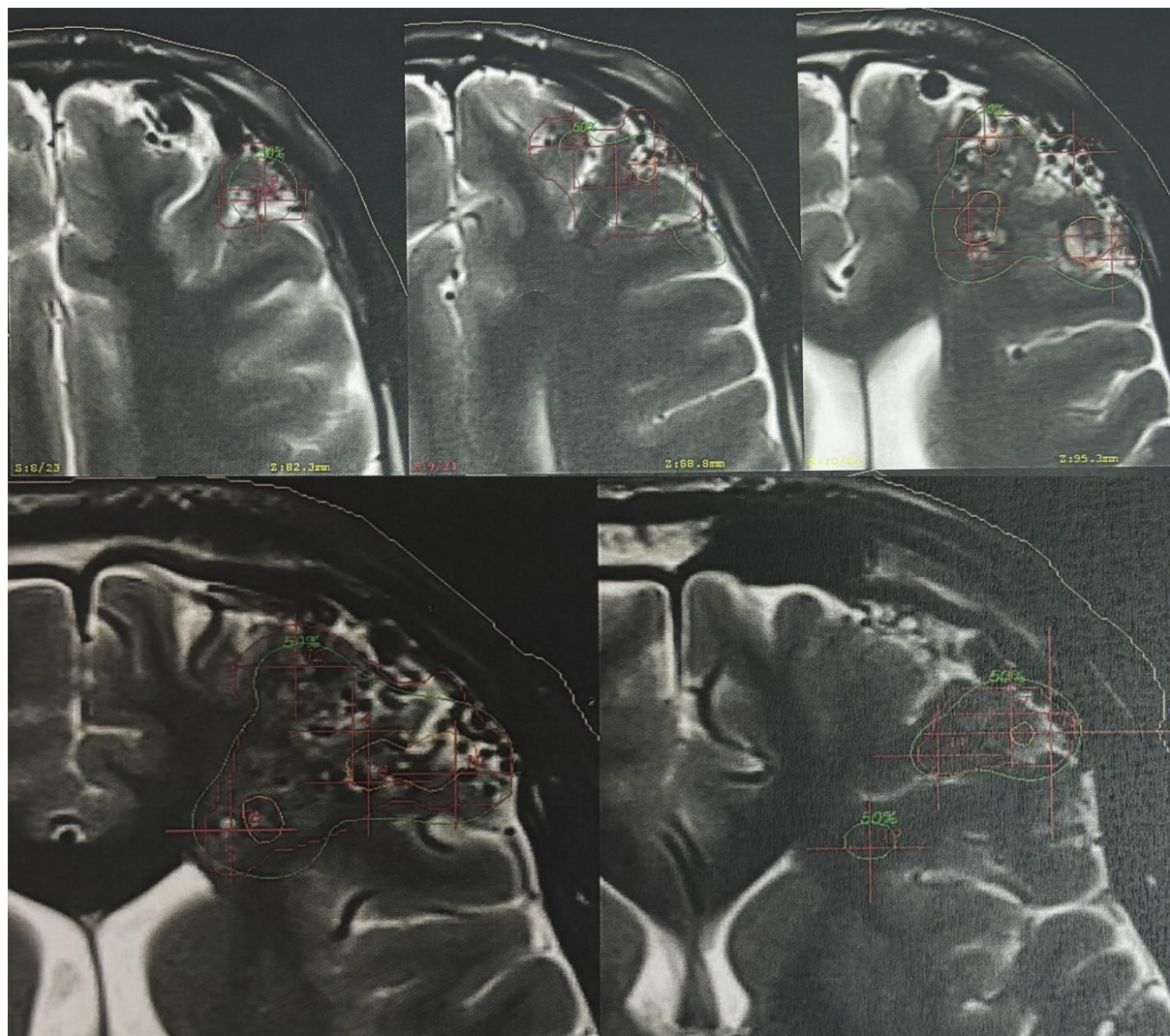


Figure 15 : IRM stéréotaxique du patient A.M en coupe axiale pondérée T2 montrant le countourage des structures vasculaires serpigneuses (MAV) (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 12 Gy sur l'iso dose de 50 %.

Le plan de traitement a été exécuté en 20 tirs (shots), avec une collimation mixte (4–8–14) adaptée à la configuration tridimensionnelle du nid vasculaire.

La durée totale d'irradiation a été de 63 minutes, sans incident technique, sous surveillance continue. Les suites immédiates ont été simples.

Au suivi clinique, l'évolution a été favorable, avec disparition des troubles du comportement et du langage, et absence de crises comitiales.

L'angio-IRM de contrôle après un an a montré une persistance d'une lésion frontale gauche intéressant le parenchyme et les espaces sous-arachnoïdiens, mal limitée, mesurant $32,5 \times 31$ mm, hétérogène et rehaussée après injection du gadolinium. Elle est siège de multiples structures vasculaires linéaires se drainant vers le sinus longitudinal supérieur et entourée d'un œdème en plage, sans signe de nécrose radique (Figure 16-17).

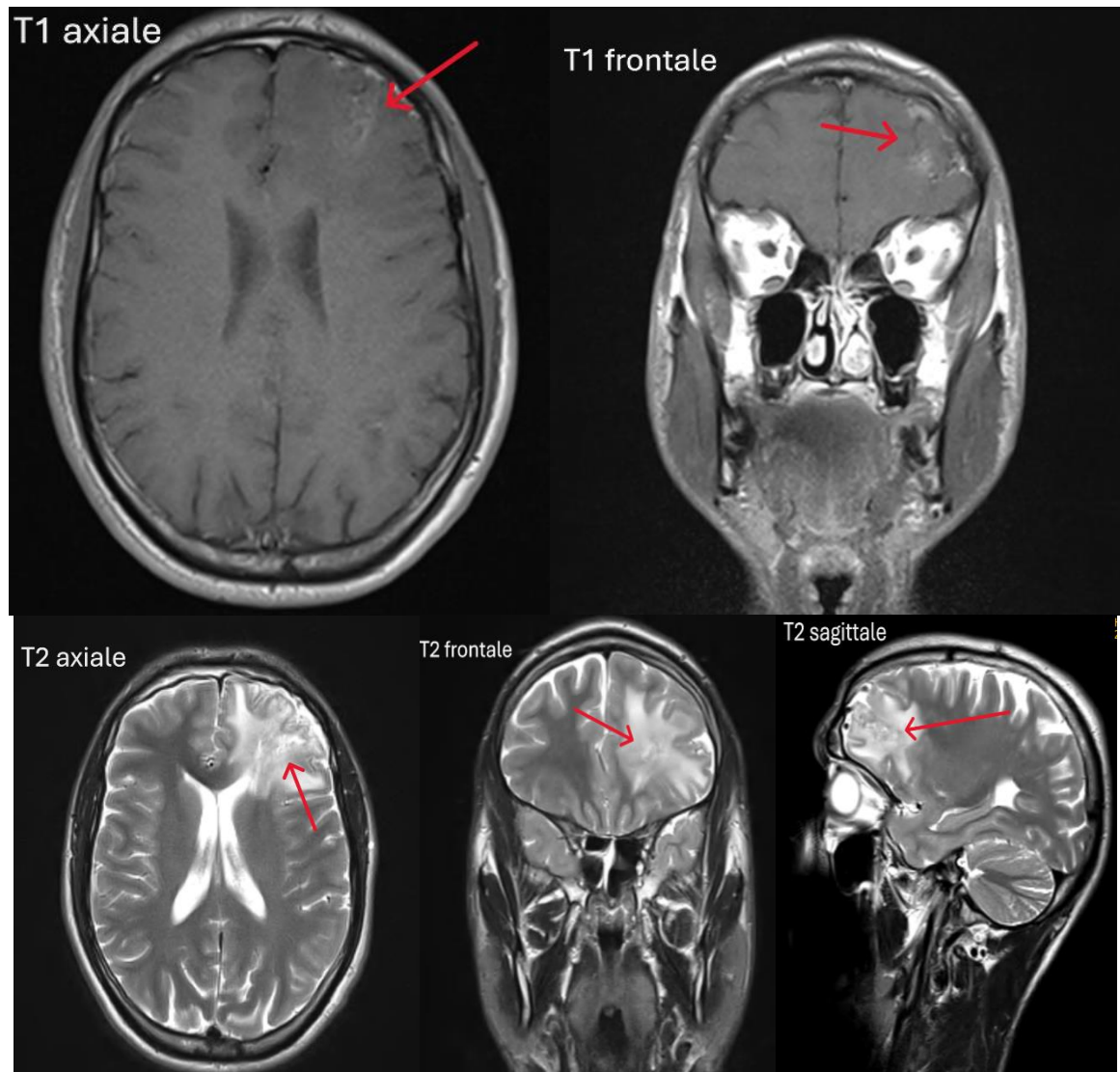


Figure 16: IRM encéphalique du contrôle du patient A.M après 1 an pondérées T1 et T2 en coupes axiale, frontale et sagittale montrant une régression quasi totale de la MAV avec présence d'une plage en hypersignal T2 et FLAIR frontale gauche séquellaire (flèche rouge)

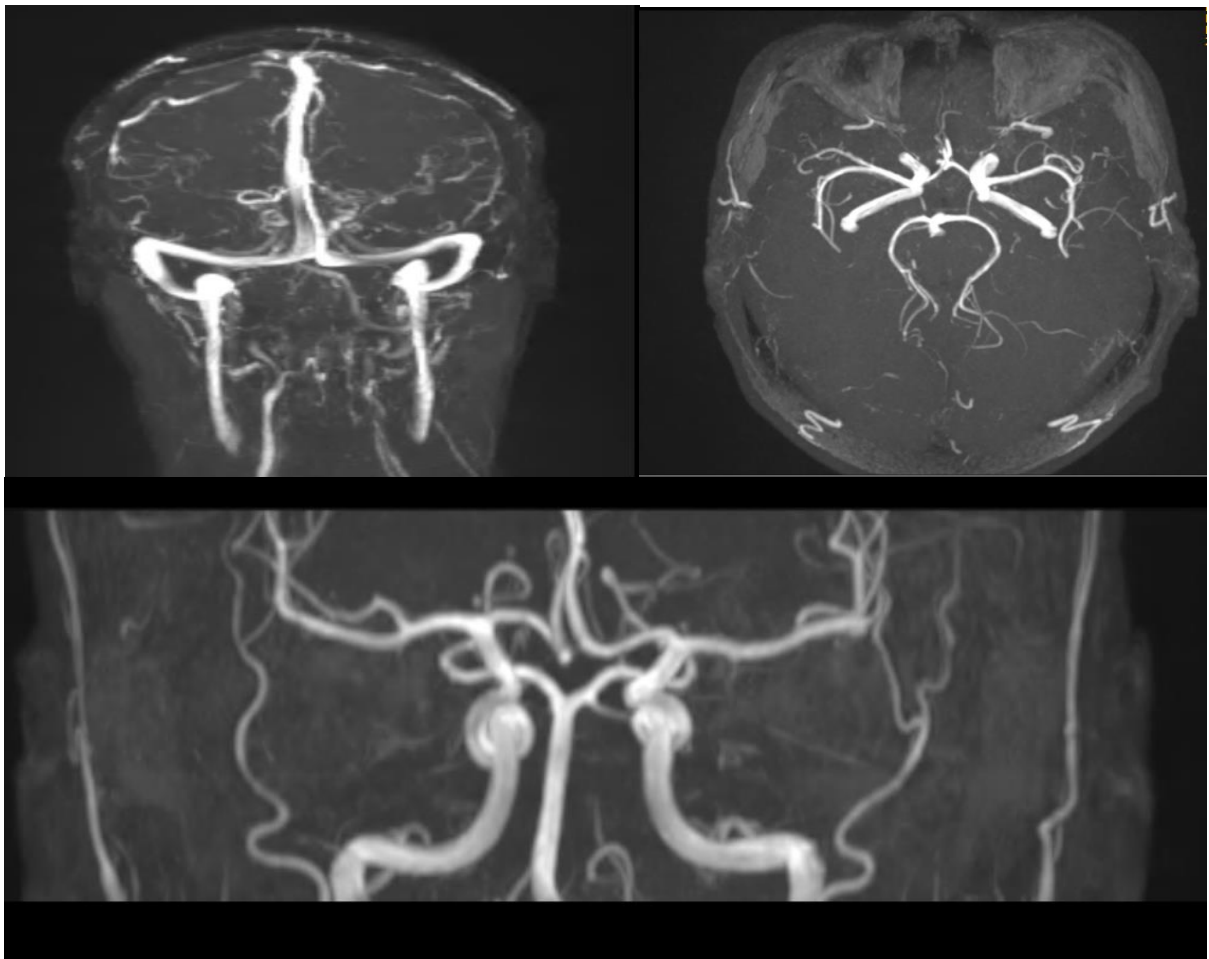


Figure 17 : Angio-IRM du patient A.M de contrôle après 1 an de la radiochirurgie cérébrale Gamma Knife montrant la régression de la MAV

L'angio-IRM de contrôle après 2 ans a objectivé une importante régression de la lésion frontale gauche, mesurant 10×6 mm versus $32,5 \times 31$ mm initialement. Elle demeure hétérogène, rehaussée après injection de gadolinium, avec persistance de structures vasculaires linéaires au niveau des espaces sous-arachnoïdiens frontaux gauches se drainant vers le sinus longitudinal supérieur, et régression marquée de l'œdème en plage. (Figure18-19).

Aucune complication post-thérapeutique n'a été rapportée.

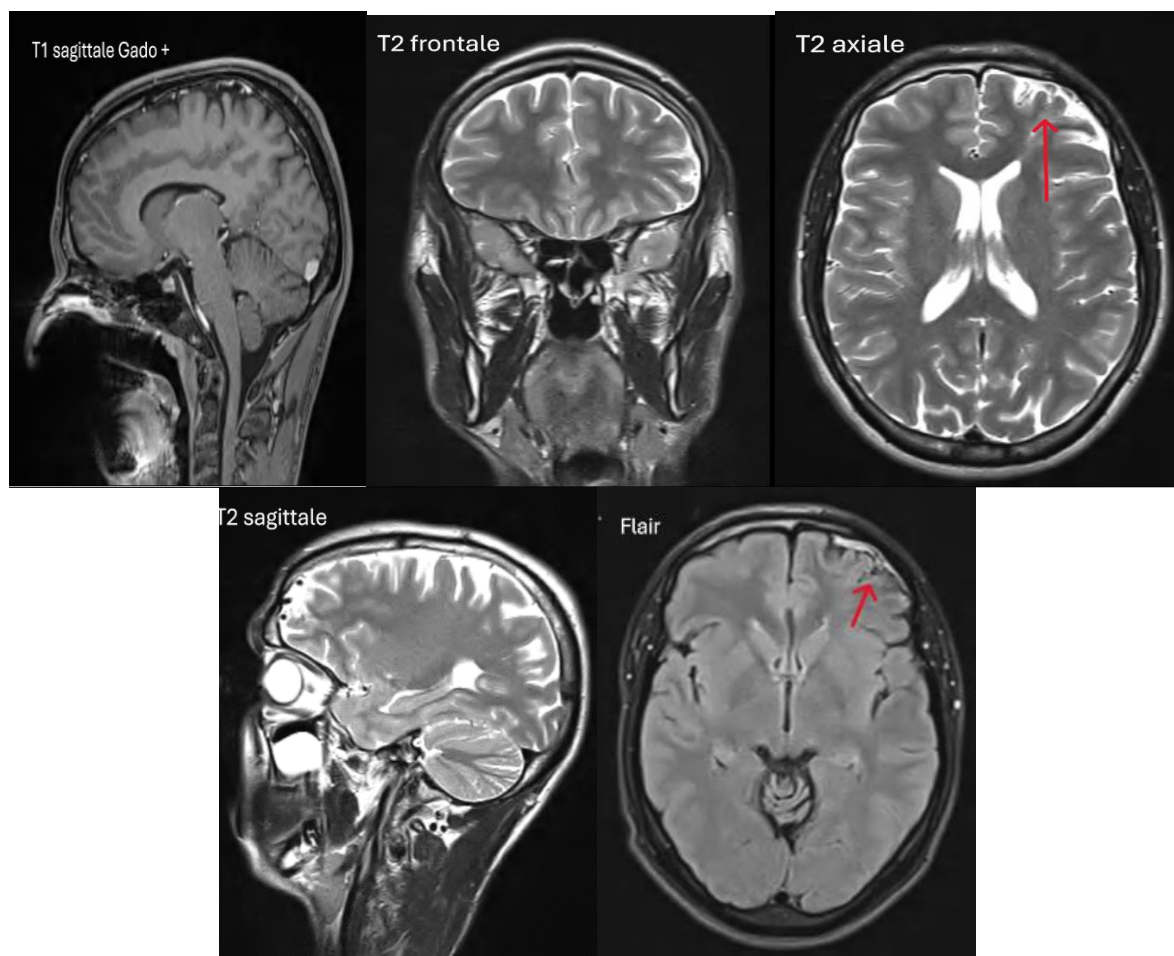


Figure 18 : IRM encéphalique de contrôle du patient A.M après 2 ans du traitement pondérée T1, T2, FLAIR en coupes sagittale, axiale et frontale montrant une importante régression de la MAV frontale antérieure gauche

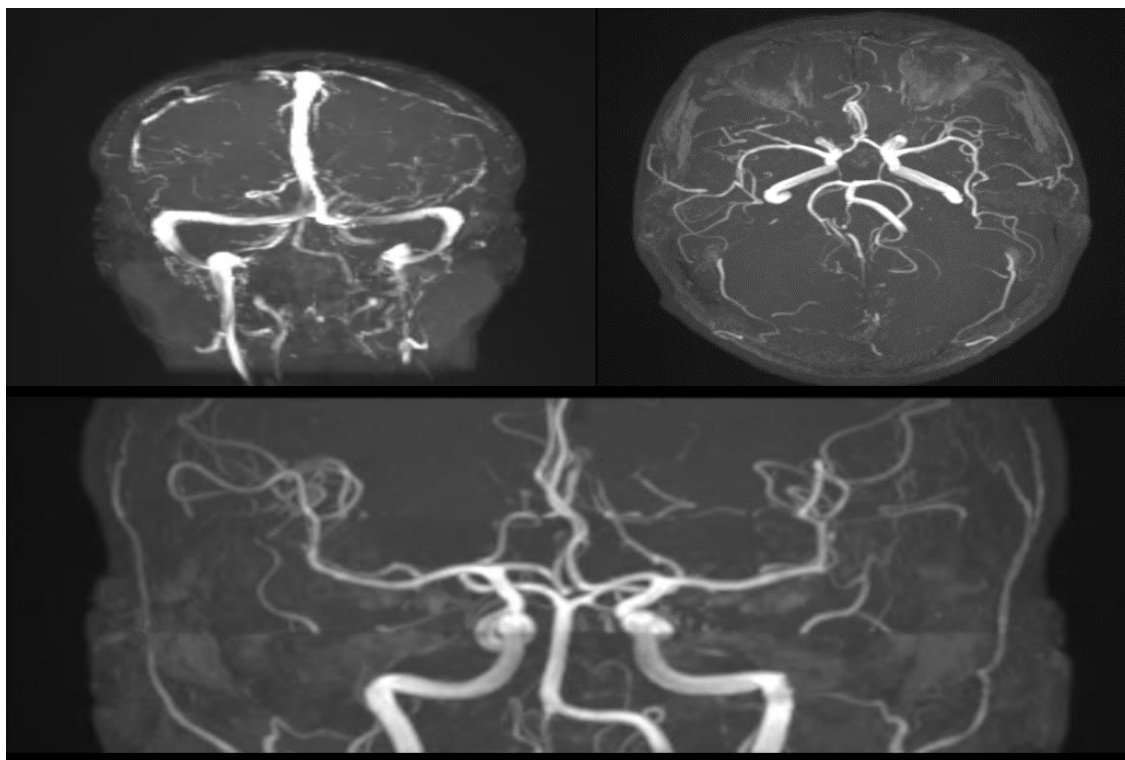


Figure 19 : Angio-IRM de contrôle du patient A.M après 2 ans de la radiochirurgie Gamma Knife montrant une régression de la MAV frontale gauche

4. Observation n°4 : Récidive d'un neurinome de l'APC droit

Il s'agit de Monsieur E.S, âgé de 53 ans, marié, d'origine urbaine, ouvrier, bénéficiant d'une couverture médicale CNSS, avec comme antécédents une goutte depuis 3 ans sous Zyloric. Le patient a été opéré en 2017 pour neurinome de l'APC dont l'examen anatomopathologique avait montré un aspect morphologique compatible avec un schwannome de type cellulaire (figure 20)

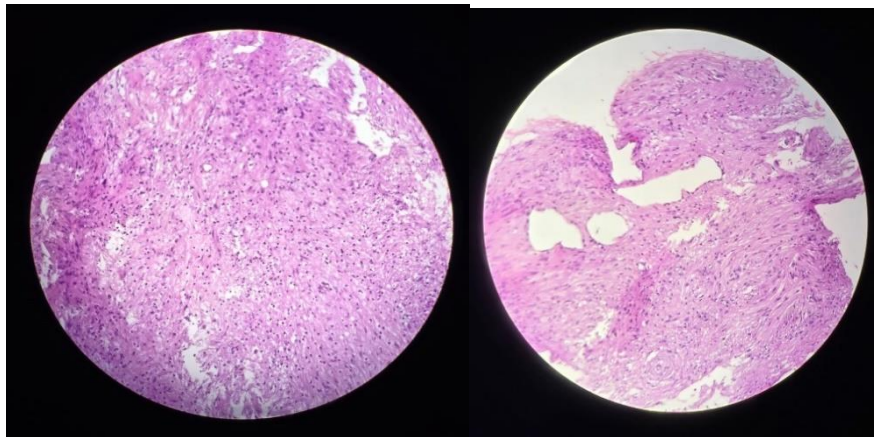


Figure 20 : HE x40 prolifération schwannienne régulière riche en vaisseaux

Le patient s'est présenté pour la prise en charge d'une récurrence de neurinome de l'APC droite, révélée par la réapparition en 2020 d'un syndrome vestibulaire fait d'acouphènes droits, d'hypoacousie droite et de vertiges, associé à un syndrome d'hypertension intracrânienne incomplet fait de céphalées en casque (EVA 6/10) sensibles aux antalgiques usuels, d'une baisse d'acuité visuelle bilatérale et d'une névralgie faciale sous forme de décharges électriques dans le territoire de V2 droit.

À l'examen clinique, le patient était en bon état général, conscient, avec un score de Glasgow à 15/15. L'examen neurologique objectivait une atteinte du nerf cochléo-vestibulaire donnant un syndrome vestibulaire fait d'hypoacousie droite, de vertiges et de troubles de l'équilibre sans nystagmus, sans déficit moteur ou sensitif associé.

L'IRM cérébrale pré-thérapeutique a mis en évidence la persistance du processus lésionnel extra-axial centré sur l'angle ponto-cérébelleux droit, en hyposignal hétérogène

T2 et FLAIR, sans traduction sur la séquence de diffusion, siège de zones en vide de signal T2*, se rehaussant de façon intense et hétérogène après injection du gadolinium, mesurant actuellement $28 \times 26 \times 30$ mm, Il s'y associe un œdème péri-lésionnel de voisinage. Evoquant une récurrence du neurinome de l'APC.

Sur le plan topographique, le processus lésionnel refoule médialement le pont et le bulbe, avec une légère compression du quatrième ventricule, sans hydrocephalie d'amont. En arrière, il entraîne un refoulement de l'hémisphère cérébelleux homolatéral. En avant et en dehors, la lésion s'insinue dans le conduit auditif interne, responsable de son élargissement. En haut, elle arrive au contact de la tente du cervelet, sans extension sustentoriale, tandis qu'en bas, elle est au contact intime du golfe de la veine jugulaire, lequel demeure perméable.

Sur le plan vasculaire, la lésion présente un contact étroit avec les branches de l'artère cérébelleuse supérieure et de l'artère cérébelleuse antéro-inférieure droites. (Figure 21-22).

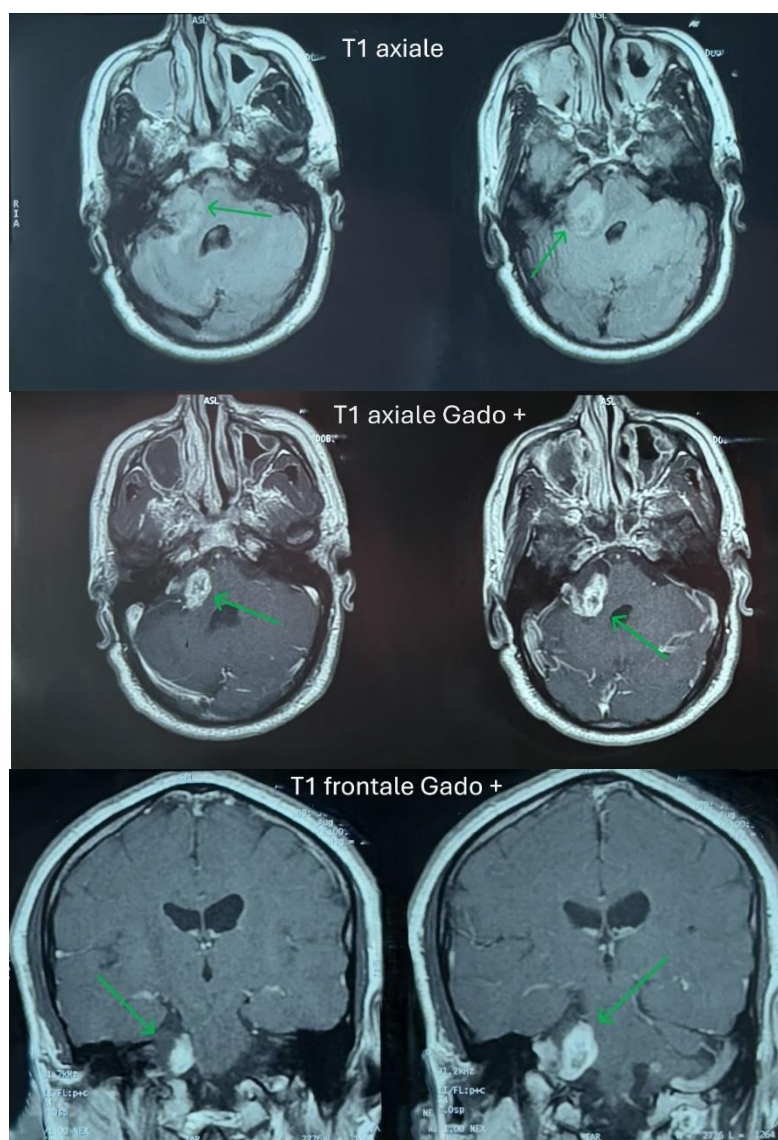


Figure 21 : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient E.S pondérée T1 en coupes axiale et frontale sans et avec injection du gadolinium montrant un processus lésionnel extra-axial centré sur l'angle ponto-cérébelleux droit en hyposignal hétérogène, se rehaussant de façon intense après injection du gadolinium, en faveur d'une récidence du neurinome de l'APC (flèche verte)

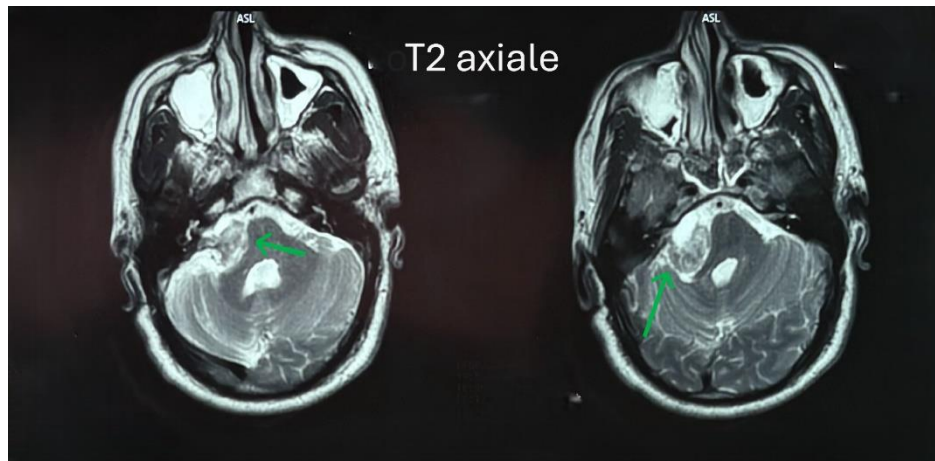


Figure 22 : IRM encéphalique pré thérapeutique du patient E.S en coupe axiale pondérée T2 montrant un processus lésionnel extra-axial centré sur l'angle ponto-cérébelleux droit en hyposignal hétérogène en faveur d'une récurrence du neurinome de l'APC (flèche verte)

Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, le patient a été retenu pour un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame, réalisée sous anesthésie locale, assurant une immobilisation rigoureuse de la tête. Une IRM stéréotaxique pondérée T2, a été utilisée pour la planification dosimétrique sur le logiciel Leksell GammaPlan™.

Le contourage manuel du volume cible, estimé à 0,021 cm³, a permis de délimiter la tumeur ainsi que les organes à risque adjacents, notamment le chiasma optique, le nerf optique, le nerf facial et la cochlée. (Figure23-24)

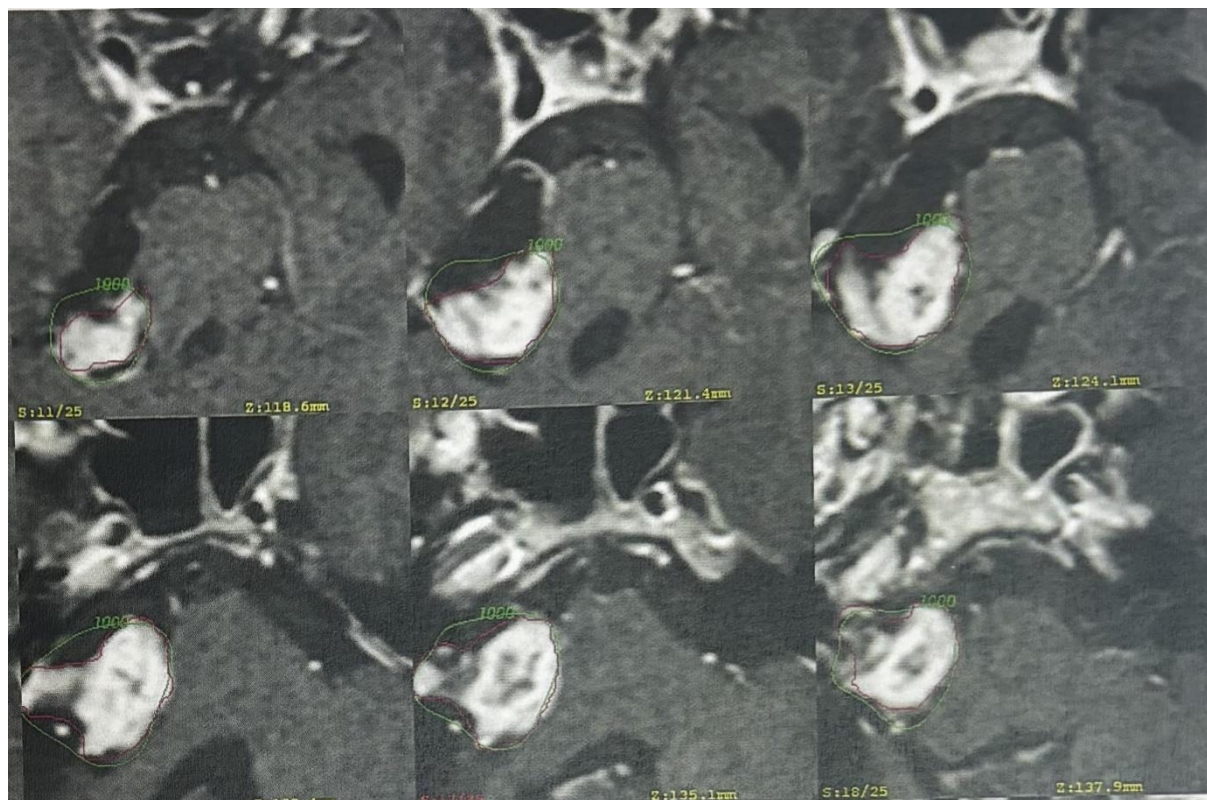


Figure 23 : IRM stéréotaxique du patient E.S en coupe axiale pondérée T2 montrant le countourage du neurinome de l'APC (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

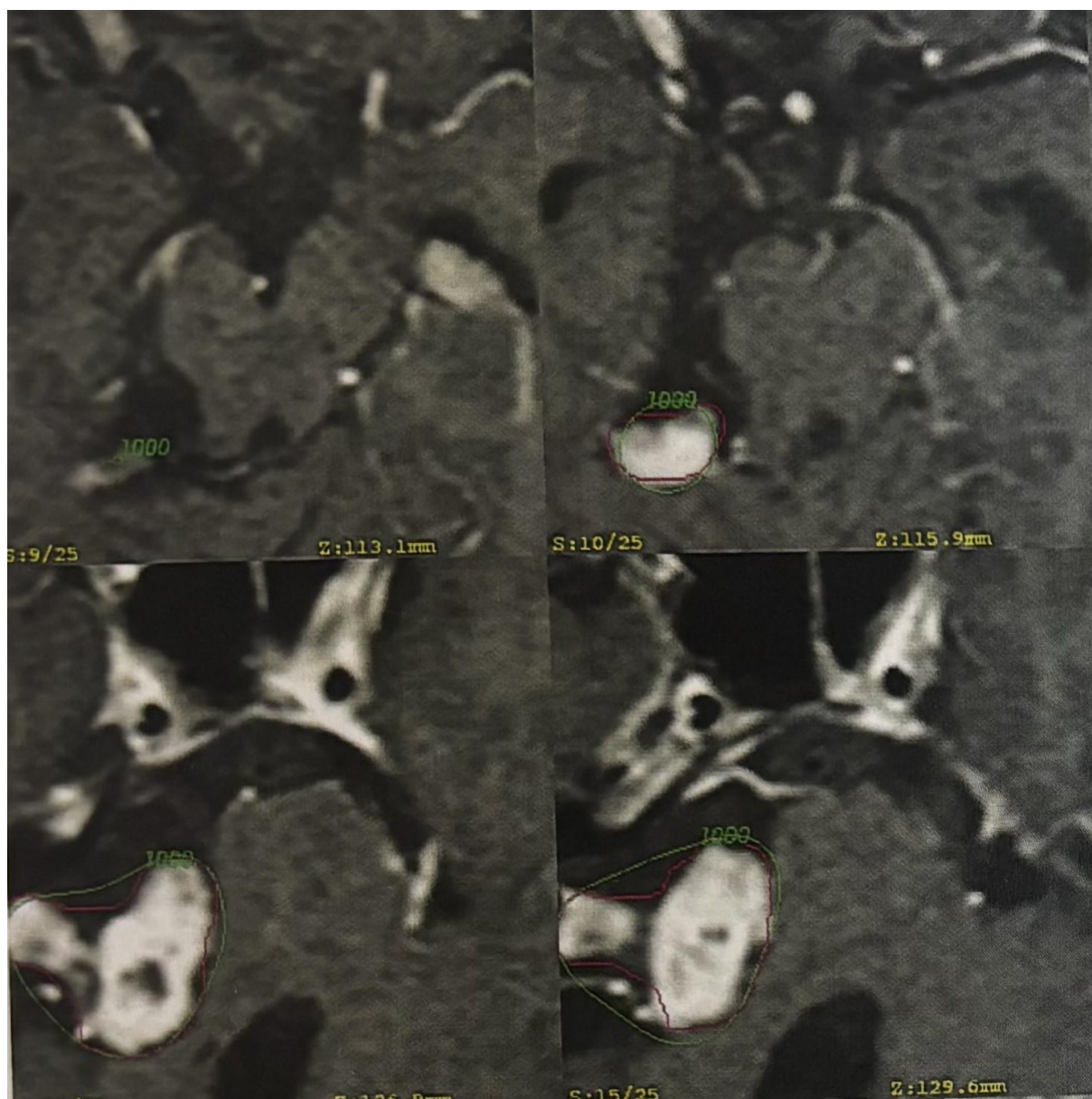


Figure 24 : IRM stéréotaxique du patient E.S en coupe axiale pondérée T2 montrant le countourage du neurinome de l'acoustique (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 10 Gy sur l'iso dose de 50 %.

Le plan de traitement a été exécuté en 21 tirs (shots) avec une collimation mixte (4-8-14-18 mm), permettant une adaptation optimale à la morphologie tridimensionnelle de la tumeur.

La durée totale d'irradiation a été de 45 minutes, sans incident technique, sous surveillance continue.

Les suites immédiates ont été simples, sans déficit facial ni vertige post-traitement.

Au suivi clinique, le patient a rapporté une persistance de l'hypoacousie droite, une disparition des céphalées et une amélioration progressive des acouphènes.

L'IRM cérébrale de contrôle a 1 an a montré une persistance avec discrète diminution en taille du processus lésionnel solido-kystique extra-axial, centré sur l'angle ponto-cérébelleux droit, en hyposignal T1, hypersignal T2 hétérogène et FLAIR, sans traduction sur la séquence de diffusion, siège de zones en vide de signal T2*, se rehaussant de façon intense et hétérogène après injection du gadolinium, mesurant actuellement $24 \times 20 \times 30$ mm versus $28 \times 26 \times 30$ mm.(Figure 25)



Figure 25 : L'IRM encéphalique de contrôle du patient E.S après 1 an en coupe axiale pondérée T1 avec injection du gadolinium et T2 axiale montrant une persistance avec discrète diminution en taille du neurinome de l'APC droit(flèche jaune)

L'IRM cérébrale de contrôle à 2 ans a montré une persistance avec aspect quasi stable du processus lésionnel solido-kystique extra-axial centré sur l'angle ponto-cérébelleux droit, en iso signal T1, hypersignal hétérogène T2 et FLAIR, siège des remaniements hémorragiques, présentant un rehaussement hétérogène après injection du gadolinium, gardant les mêmes mensurations ($24 \times 20 \times 27$ mm vs $24 \times 20 \times 30$ mm). (Figure 26)

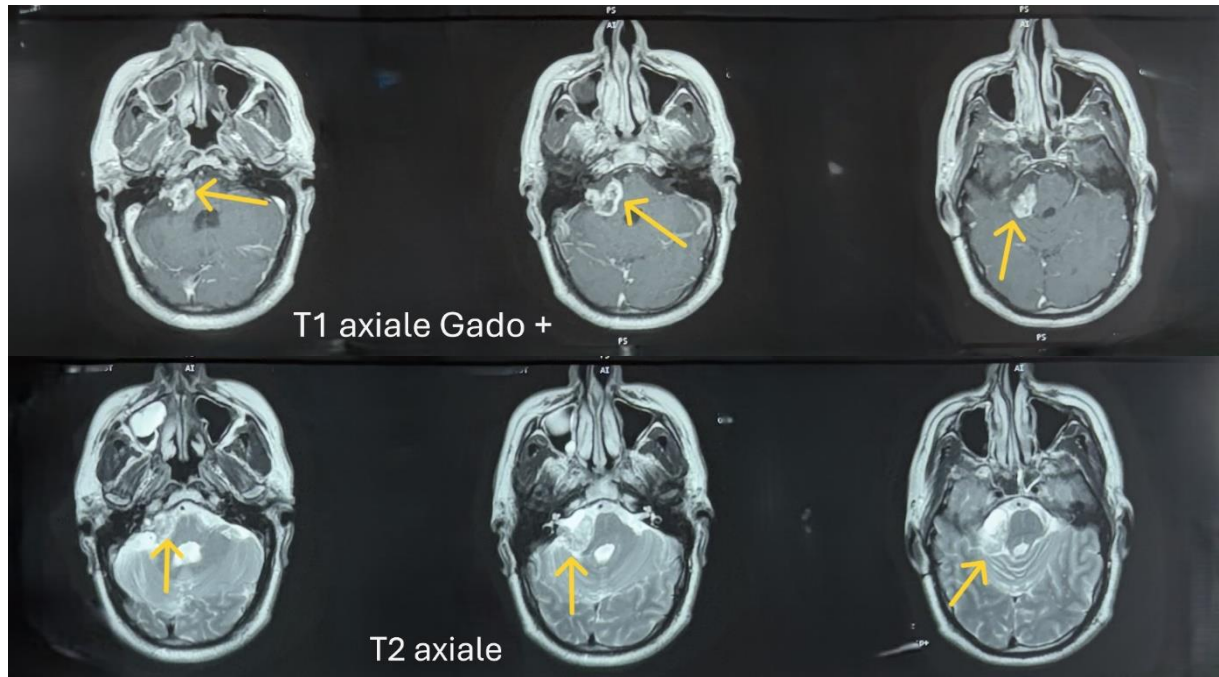


Figure 26 : IRM encéphalique du contrôle après 2 ans du patient E.S en coupe axiale montrant un aspect quasi stable du neurinome de l'APC droit, en iso signal présentant un rehaussement à prédominance périphérique sur la séquence T1 avec injection du gadolinium et en hypersignal hétérogène sur la séquence T2 (flèche jaune).

Aucune complication post-thérapeutique n'a été notée.

5. Observation n°5 : récurrence d'un méningiome sphéno-orbito-temporal gauche

Il s'agit de Madame B.F, âgée de 51 ans, mariée, d'origine urbaine, sans profession, bénéficiant d'une couverture médicale AMO Tadamon. Elle a été opérée pour thyroïdectomie en 2013 et à deux reprises, en 2017 et 2019, pour méningiome sphéno-orbitaire gauche. L'examen anatomopathologique pratiqué lors de ces dernières interventions avait conclu à un méningiome de type méningothélial (figure 27).

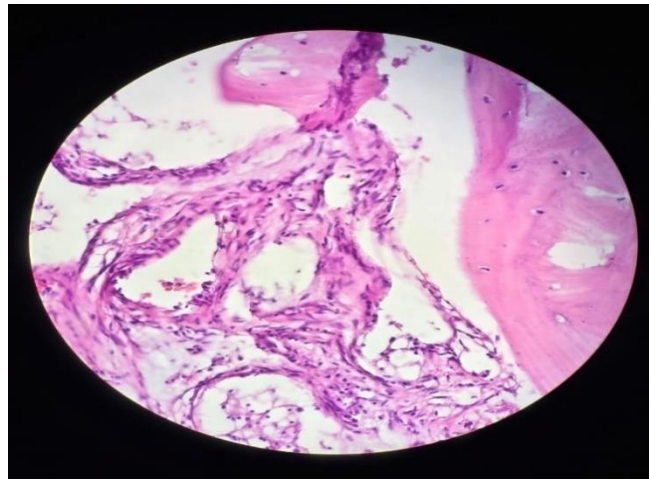


Figure 27 : HE x40 prolifération tumorale méningothéliomateuse de localisation osseuse

La patiente s'est présentée pour la prise en charge d'une récurrence de méningiome sphéno-orbito-temporal gauche. Cette récurrence a été révélée par la réapparition d'un syndrome d'HTIC incomplet fait de céphalées en casque rebelles au traitement antalgique, associées à une baisse de l'acuité visuelle gauche, sans vomissements ni déficit neurologique associé.

À l'examen clinique, la patiente était en bon état général, consciente, avec un score de Glasgow à 15/15, présentant une exophtalmie gauche axiale sans aucun signe de focalisation, ni atteinte des paires crâniennes, ni déficit moteur ou sensitif objectivé.

L'IRM cérébrale pré thérapeutique avait mis en évidence la persistance stable du méningiome temporo-sphéno-orbitaire gauche, en iso signal T1, T2, FLAIR et diffusion, se rehaussant fortement après injection de produit de contraste, gardant les mêmes mensurations : 28 × 13 mm au niveau orbitaire et 24 × 11 mm à l'étage temporal.

En antérieur, il comblait la graisse intra- et extra-conique, infiltrait le muscle droit externe et refoulait le nerf optique qu'il comprimait, lequel conservant toutefois un signal respecté, s'accompagnant d'une exophtalmie de grade III. En arrière, il envahissait la fissure orbitaire supérieure et arrivait au contact du sinus caverneux, avec une artère carotide interne gauche discrètement réduite de calibre mais restant perméable. Il s'associait à une réaction osseuse hyperostotante avec une lyse osseuse sphénoïdale adjacente. Par ailleurs, une formation lésionnelle frontale parafalcique présentant des caractéristiques similaires, mesurant $6 \times 9,6$ mm a été mise en évidence. (Figure 28–29)

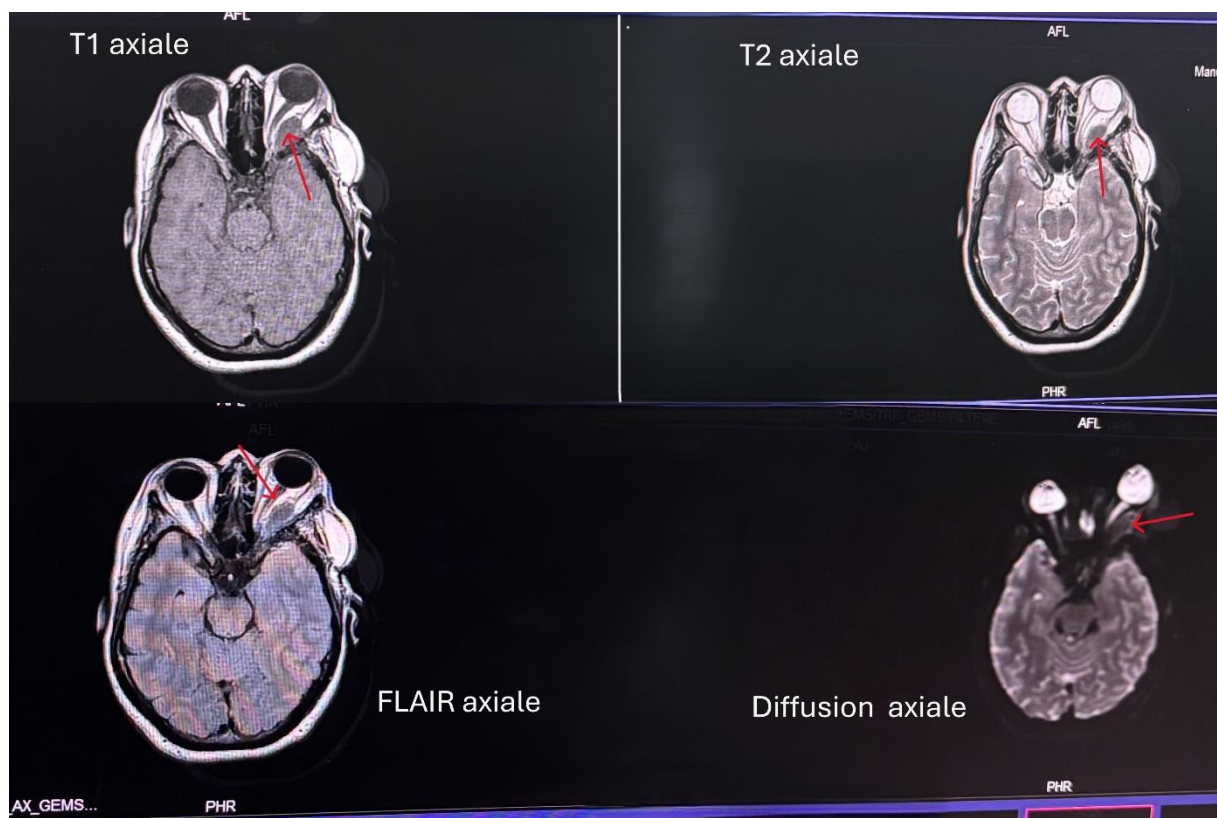


Figure 28 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente B.F pondérées T1, T2, FLAIR, Diffusion montrant un processus lésionnel temporo-sphéno-orbitaire gauche, en iso signal T1, T2 en faveur d'une récidence de méningiome (flèche rouge)

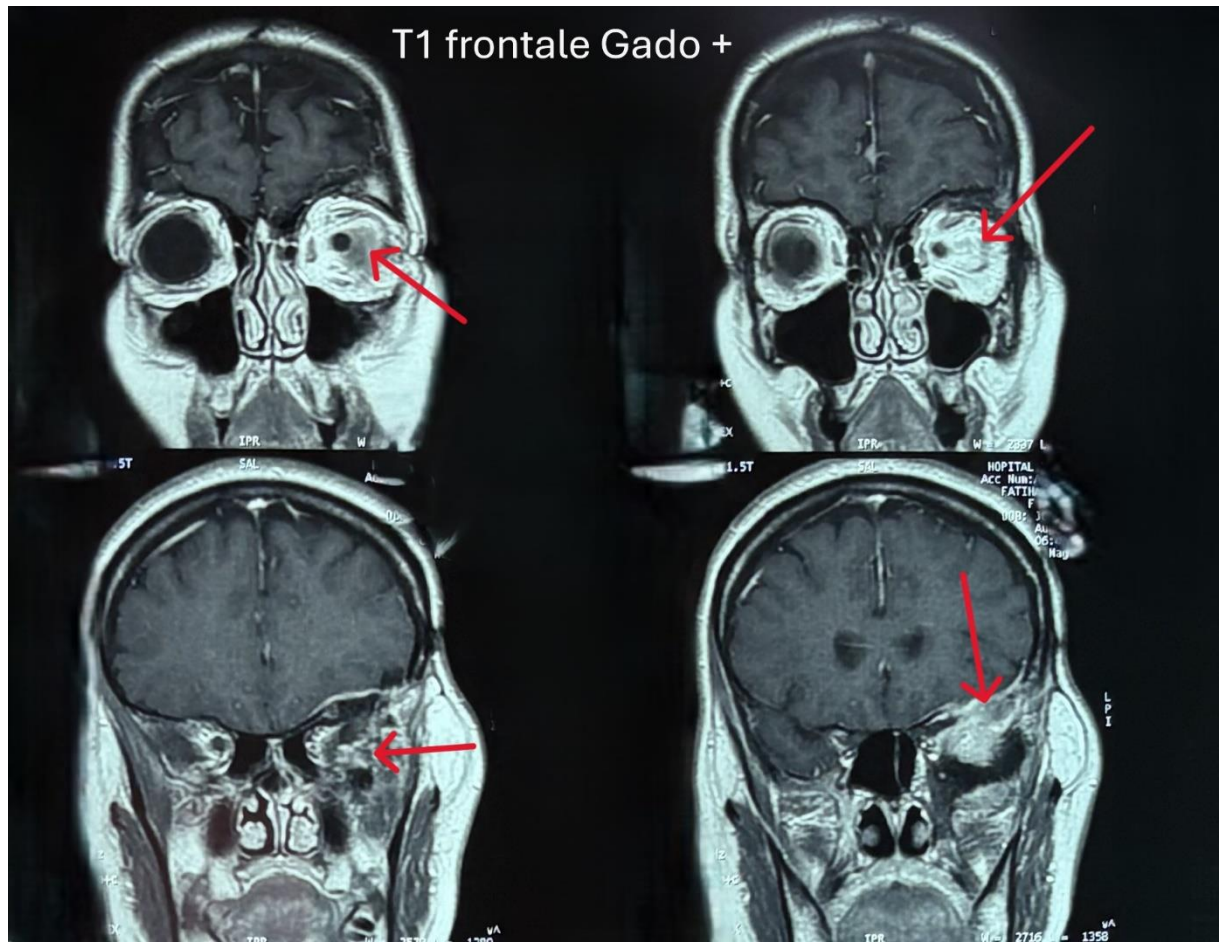


Figure 29 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente B.F en coupe frontale pondérée T1 avec injection du gadolinium montrant un processus lésionnel temporo-sphéno-orbitaire gauche en faveur d'une récidence de méningiome (flèche rouge)

Après discussion en réunion de concertation pluridisciplinaire, l'indication d'un traitement complémentaire par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife a été retenue.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame, réalisée sous anesthésie locale, garantissant une immobilisation rigoureuse de la tête.

Une IRM stéréotaxique pondérée T2 a ensuite permis la planification dosimétrique sur le logiciel Leksell Gamma Plan™, avec un contourage manuel précis du volume cible (0,037 cm³) et des organes à risque adjacents (nerfs optiques, chiasma) (Figure 30).

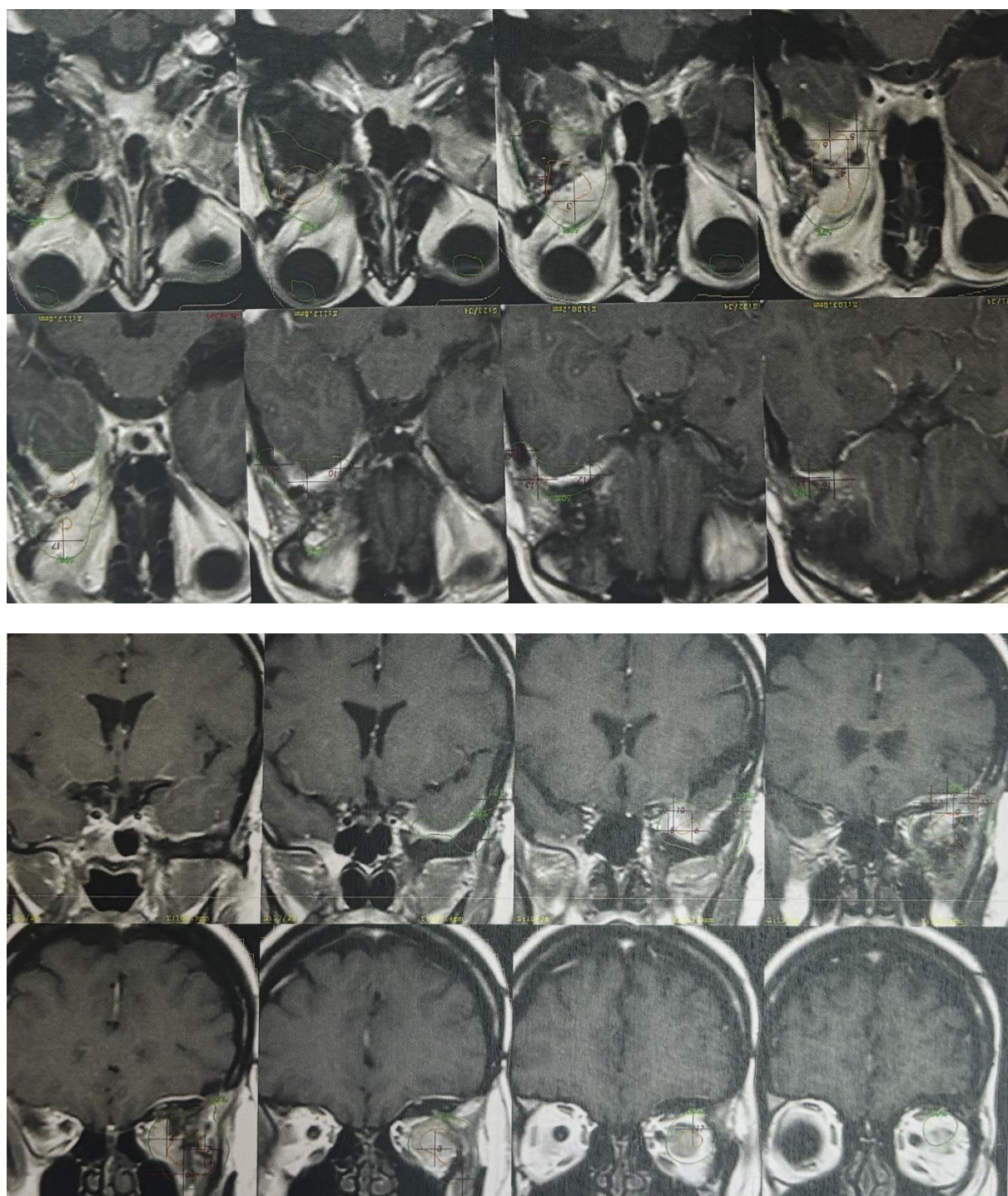


Figure 30 : IRM stéréotaxique de la patiente BF en coupe axiale pondérée T1 avec injection du gadolinium montrant le countourage du méningiome sphéno-orbito-temporal (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 8 Gy sur l'iso dose de 50% délivrée en une seule séance. Le traitement a nécessité 17 tirs (shots) avec collimation mixte (8 – 14 – 18 mm), adaptée à la configuration anatomique tridimensionnelle de la lésion.

La durée totale d'irradiation était de 42 minutes, sans incident technique.

Les suites immédiates ont été simples, marquées uniquement par de légères céphalées transitoires, bien contrôlées par traitement symptomatique, sans déficit neurologique associé.

Le suivi clinique a montré une nette amélioration des céphalées avec persistance de l'exophtalmie axiale gauche et l'absence de tout nouveau signe neurologique.

L'IRM cérébrale de contrôle à 1 an a objectivé :

La persistance avec aspect quasi stable du processus lésionnel temporo-sphéno-orbitaire gauche, en iso signal T1, T2, FLAIR et diffusion, fortement rehaussé après injection de produit de contraste, mesurant 26×13 mm au niveau orbitaire et 17×8 mm à l'étage temporal (vs 24×11 mm). (Figure 31).

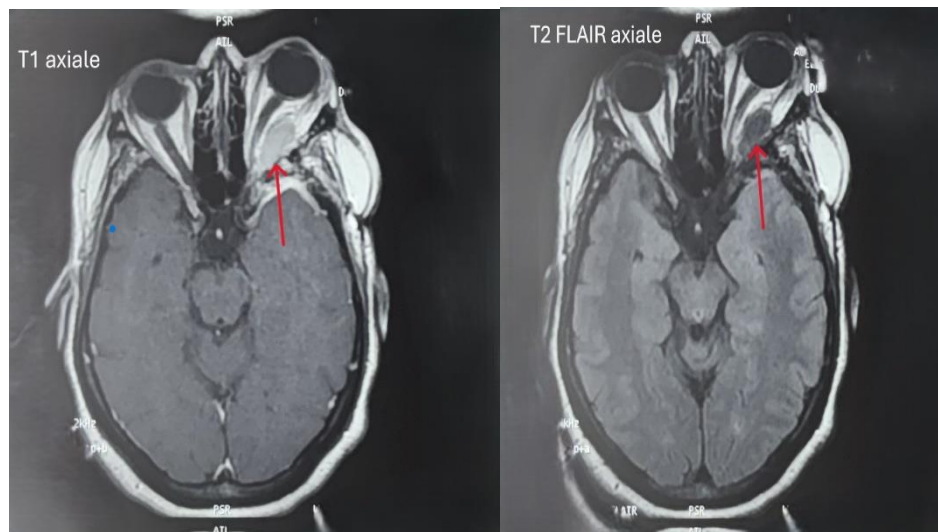


Figure 31 : IRM encéphalique de la patiente B.F de contrôle après 1 an en coupe axiale pondérée T1 et T2 FLAIR montrant un aspect quasi stable du méningiome temporo-sphéno-orbitaire gauche (flèche rouge)

L'IRM de contrôle à 2 ans a objectivé :

Une persistance avec aspect quasi stable du processus lésionnel temporo-sphéno-orbitaire gauche, en iso signal T1, T2, FLAIR et diffusion, se rehaussant fortement après

injection de produit de contraste, mesurant 23×10 mm (vs 26×13 mm) au niveau orbitaire et 16×6 mm (vs 17×8 mm) à l'étage temporal. (Figure 32)

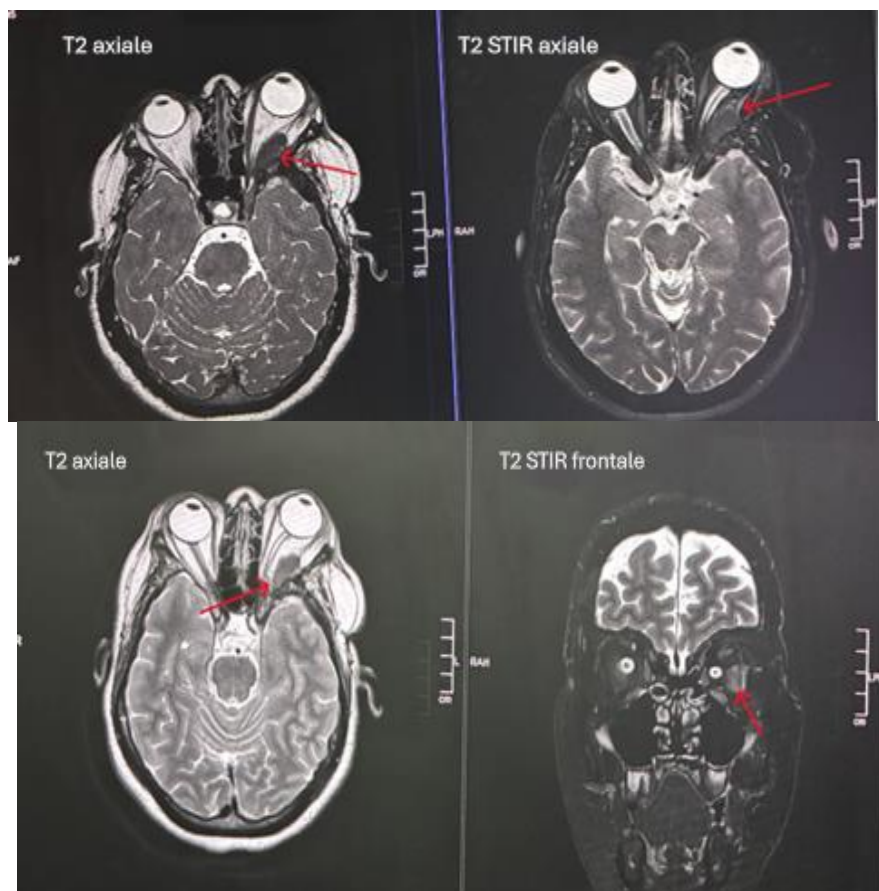


Figure 32 : IRM encéphalique de la patiente B.F de contrôle après 2 ans pondérées T2 et T2 STIR en coupes axiale et frontale montrant un aspect quasi stable du méningiome temporo-sphéno-orbitaire gauche, en iso signal (flèche rouge)

6. Observation n°6 : Névralgie essentielle du trijumeau gauche

Il s'agit de Madame L.L., âgée de 55 ans, mariée, d'origine urbaine, sans profession, bénéficiant d'une couverture médicale CNSS. Ses antécédents comportent une cholécystectomie il y a un an et une hystérectomie il y a six mois.

La patiente s'est présentée pour la prise en charge d'une névralgie essentielle du trijumeau gauche, évoluant depuis plusieurs années et caractérisée par des douleurs paroxystiques intenses en décharges électriques intéressant les territoires V2 et V3 gauches, déclenchées par la mastication et le toucher, et résistantes au traitement médicamenteux.

À l'examen clinique, la patiente était en bon état général, consciente, avec un score de Glasgow à 15/15. Aucun déficit sensitif ni moteur facial n'a été mis en évidence, et l'examen des autres nerfs crâniens était sans particularité.

L'IRM cérébrale pré thérapeutique a montré la présence d'une structure vasculaire mesurant 2×5 mm, arrivant au contact du nerf trijumeau gauche à 2,5 mm de son émergence, sans anomalie de signal nerveux détectable, compatible avec un conflit neuro-vasculaire responsable de la symptomatologie douloureuse. Aucune autre anomalie intracrânienne n'a été observée (Figure 33).

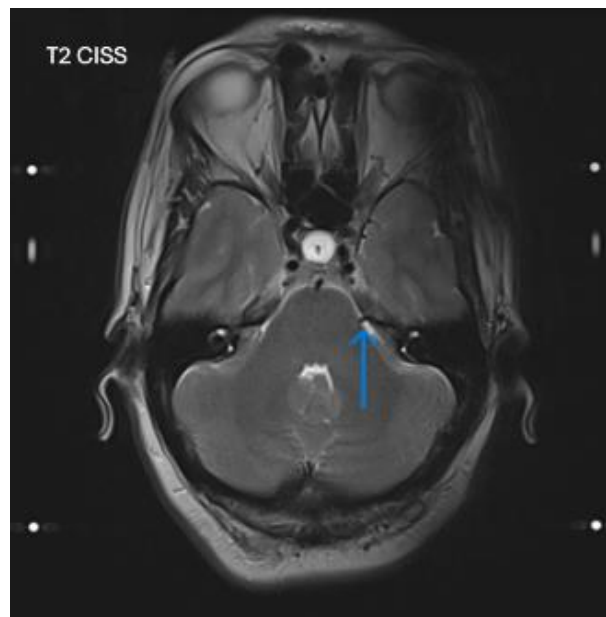


Figure 33 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2 CISS montrant une structure vasculaire arrivant au contact de l'émergence du nerf trijumeau gauche (flèche bleu)

Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, la patiente a bénéficié d'un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame sous anesthésie locale, assurant une immobilisation rigoureuse de la tête. Une IRM stéréotaxique pondérée T2 a permis une planification dosimétrique précise sur le logiciel Leksell GammaPlan™. Le contournage manuel du nerf trijumeau gauche a défini un volume cible de $0,016 \text{ cm}^3$, en veillant à épargner les structures à risque (Figure 34).

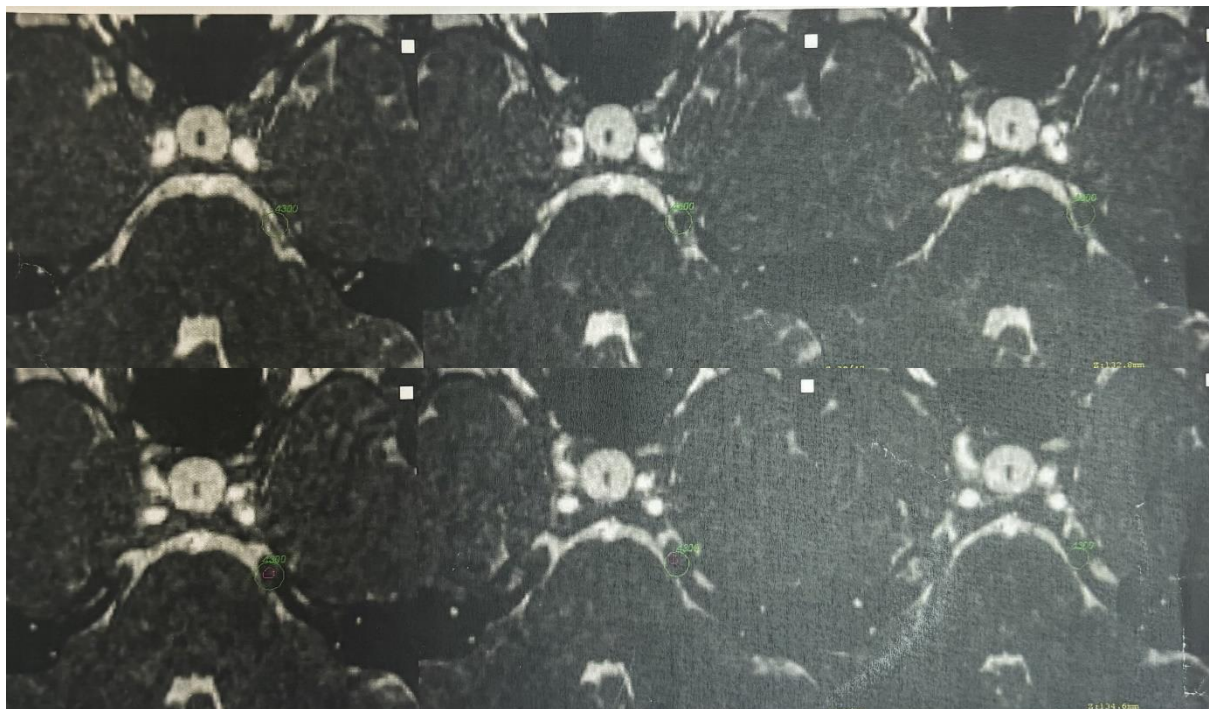


Figure 34 : IRM stéréotaxique de la patiente L.L en coupe axiale pondérée T2 montrant le countourage de l'émergence du nerf trijumeau (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 43 Gy sur l'iso dose de 50 % délivrée en une seule séance, avec un tir unique (shot) et une collimation de 4 mm La durée totale d'irradiation a été de 54 minutes, sans incident technique, sous surveillance continue.

Les suites immédiates ont été simples, avec une disparition progressive des douleurs dans les semaines suivant l'irradiation. Aucun déficit sensitif facial ni effet secondaire radio-induit n'a été observé.

L'évaluation clinique a montré une rémission partielle des crises douloureuses sans complication neurologique.

Les IRM de contrôle à 1 an et à 2ans ont objectivé la persistance de la structure vasculaire arrivant au contact du nerf trijumeau gauche à 2,5 mm de son émergence, sans anomalie de signal nerveux ni signe de compression décelable, et sans signe de nécrose radio induite, confirmant la bonne tolérance et l'efficacité durable du traitement (Figure 35).

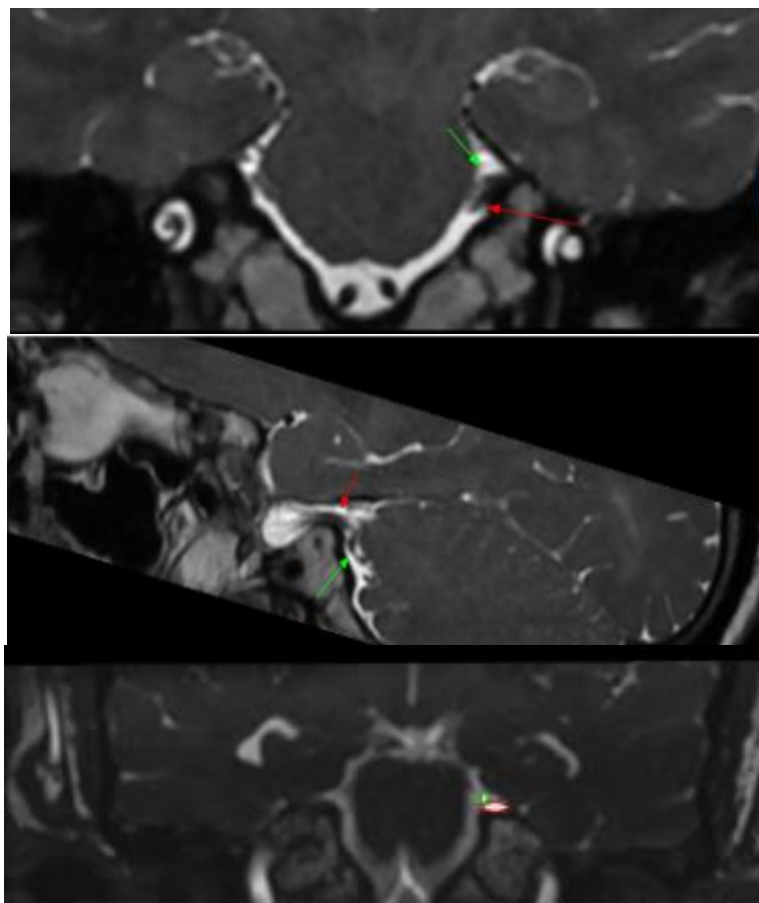


Figure 35 : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente L.L en coupes coronale et sagittale pondérée T2 Cube objectivant le contact entre une structure vasculaire (flèche verte) et le nerf trijumeau (fleche rouge) à 2mm de son origine (zone de REZ)

7. Observation n°7 : Neurinome de l'APC gauche

Il s'agit de Madame I.F., âgée de 71 ans, veuve, d'origine rurale, sans profession, bénéficiant d'une couverture médicale CNSS. La patiente avait bénéficié, deux ans auparavant, d'une dérivation ventriculo-péritonéale.

La patiente s'est présentée pour la prise en charge d'un neurinome de l'APC gauche, révélé par une hypoacousie de perception bilatérale associée à des acouphènes et des vertiges, sans paralysie faciale. Le tableau clinique était complété par un syndrome d'HTIC complet fait de céphalées en casque, de vomissements en jet et de troubles visuels.

À l'examen clinique, la patiente était en bon état général, consciente, avec un score de Glasgow à 15/15. L'examen neurologique objectivait une ataxie cérébelleuse avec une atteinte cochléovestibulaire droite, sans atteinte du nerf facial ni autre anomalie des nerfs crâniens.

L'IRM cérébrale pré thérapeutique a mis en évidence un processus lésionnel de l'APC gauche, englobant le paquet acoustico-facial avec élargissement du conduit auditif interne. La lésion se présentait en hyposignal T1 et hypersignal hétérogène T2, mesurant $25,8 \times 20 \times 22$ mm Elle se rehaussait intensément après injection de gadolinium, exerçant un effet de masse sur le tronc cérébral et le cervelet sans signe d'infiltration, en faveur d'un neurinome de l'APC. On notait également une hydrocéphalie tétra ventriculaire sans signe de résorption au niveau sus-tentorial (Figure 36-37).

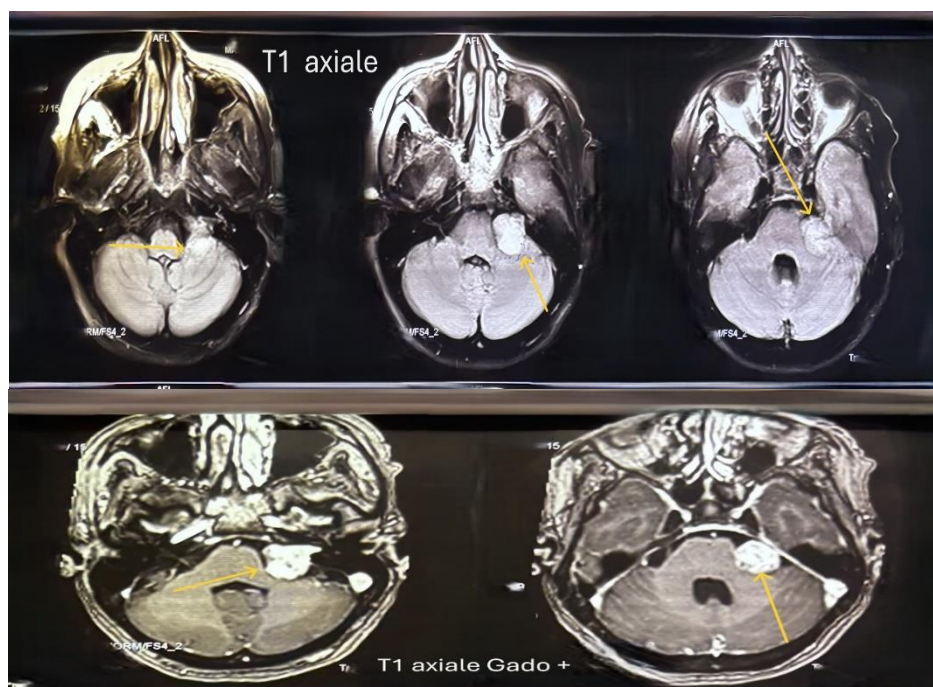


Figure 36 : IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T1 sans et avec injection du gadolinium montrant un processus lésionnel de l'APC gauche en hypersignal se rehaussant intensément après injection de gadolinium en faveur d'un neurinome de l'APC (flèche jaune)

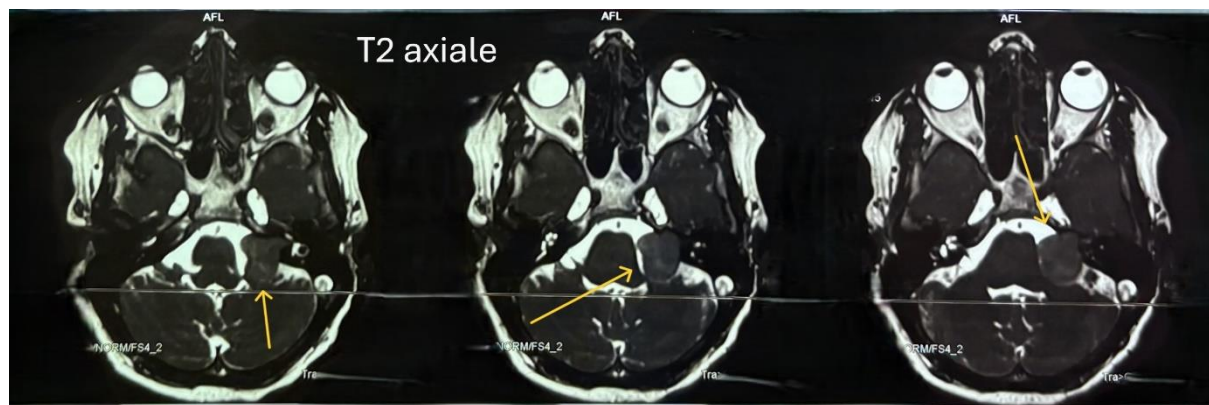


Figure 37: IRM encéphalique pré thérapeutique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T2 montrant un processus lésionnel de l'APC gauche, en hyposignal hétérogène en faveur d'un neurinome de l'APC (flèche jaune)

Après validation de l'indication en réunion de concertation pluridisciplinaire, la patiente a bénéficié d'un traitement par radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife.

La procédure a débuté par la pose du cadre stéréotaxique Leksell G-frame, sous anesthésie locale, assurant une immobilisation rigoureuse de la tête.

Une IRM stéréotaxique pondérée T2 a permis la planification dosimétrique sur le logiciel Leksell GammaPlan™. Le contourage manuel du volume cible a permis de délimiter avec précision la lésion (volume : 0,42 cm³) ainsi que les organes à risque adjacents. (Figure 38)

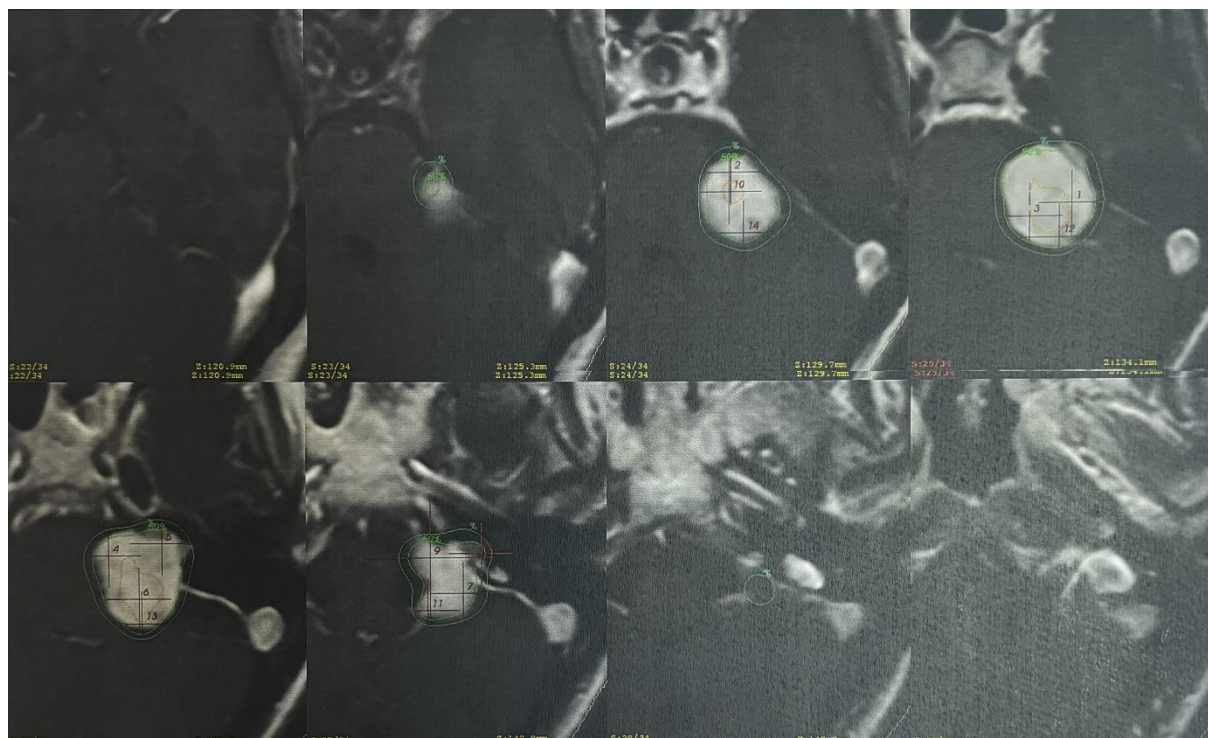


Figure 38 : IRM stéréotaxique de la patiente I.F en coupe axiale pondérée T2 montrant le contourage du neurinome de l'APC (en rouge) et la courbe d'isodose à 50 % (en vert), correspondant à l'isodose marginale

La dose prescrite était de 8 Gy sur l'iso dose de 50 % délivrée en une seule séance à l'aide de 16 tirs (shots) avec une collimation mixte (4–8–14 mm).

La durée totale d'irradiation a été de 35 minutes, sans incident technique, sous surveillance continue.

Les suites immédiates ont été simples, sans apparition de déficit facial ni de vertiges post-traitement.

Au suivi clinique, la patiente a rapporté une amélioration notable des acouphènes et des vertiges, avec stabilité de l'hypoacousie droit.

L'IRM de contrôle à 1 an a montré la persistance avec aspect quasi stable du processus lésionnel de l'angle ponto-cérébelleux gauche, mesurant 24,5 × 24,5 × 22,7 mm versus

25,8 × 19 × 20 mm La lésion était en hyposignal T1 et hypersignal T2, avec rehaussement hétérogène après injection de gadolinium. Elle s'étendait dans le conduit auditif interne, refoulait le nerf trijumeau, et comprimait légèrement le tronc cérébral ainsi que l'hémisphère cérébelleux gauche.

La sonde de dérivation ventriculaire était en place au niveau du ventricule latéral droit. Le paquet acoustico-facial droit apparaissait d'aspect normal, sans signe de nécrose ni d'œdème (Figure 39–40).

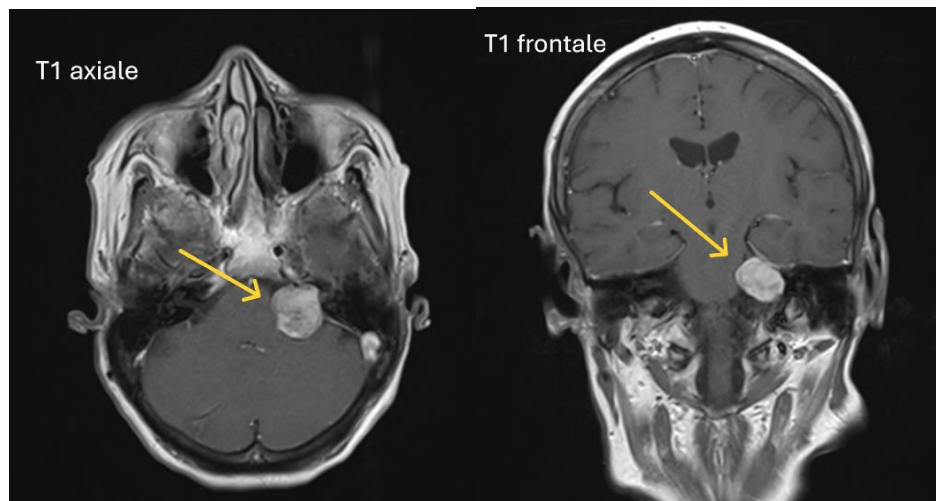


Figure 39 : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente I.F en coupes axiale et frontale pondérées T1 montrant un aspect quasi stable du neurinome de l'APC gauche (flèche jaune)

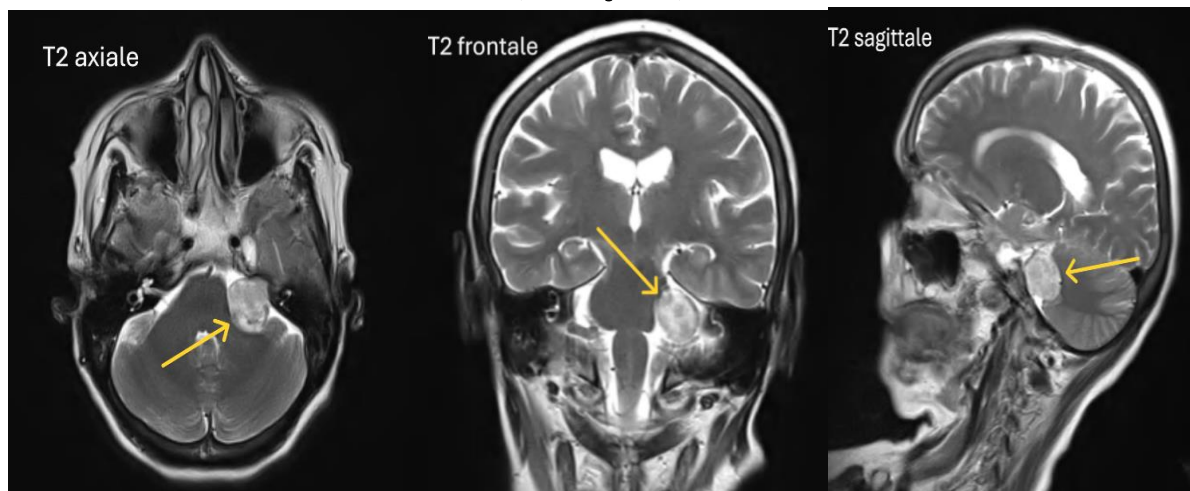


Figure 40 : IRM encéphalique de contrôle après 1 an de la patiente I.F en coupes axiale, frontale et sagittale pondérées T2 montrant un aspect quasi stable du neurinome de l'APC gauche (Flèche jaune)

L'IRM de contrôle à 2 ans a objectivé une persistance avec aspect quasi stable du processus lésionnel de l'angle ponto-cérébelleux gauche, mesurant $24,2 \times 23,2 \times 20,8$ mm versus $24,5 \times 24,5 \times 22,7$ mm. Les caractéristiques en hyposignal T1 et hypersignal T2, avec rehaussement hétérogène post-gadolinium, étaient inchangées.

La lésion s'étendait toujours au niveau du conduit auditif interne, refoulant le nerf trijumeau et comprimant le tronc cérébral et l'hémisphère cérébelleux gauche. La sonde de dérivation restait en place, et le paquet acoustico-facial droit demeurait d'aspect normal, sans nécrose ni œdème (Figure 41–42).

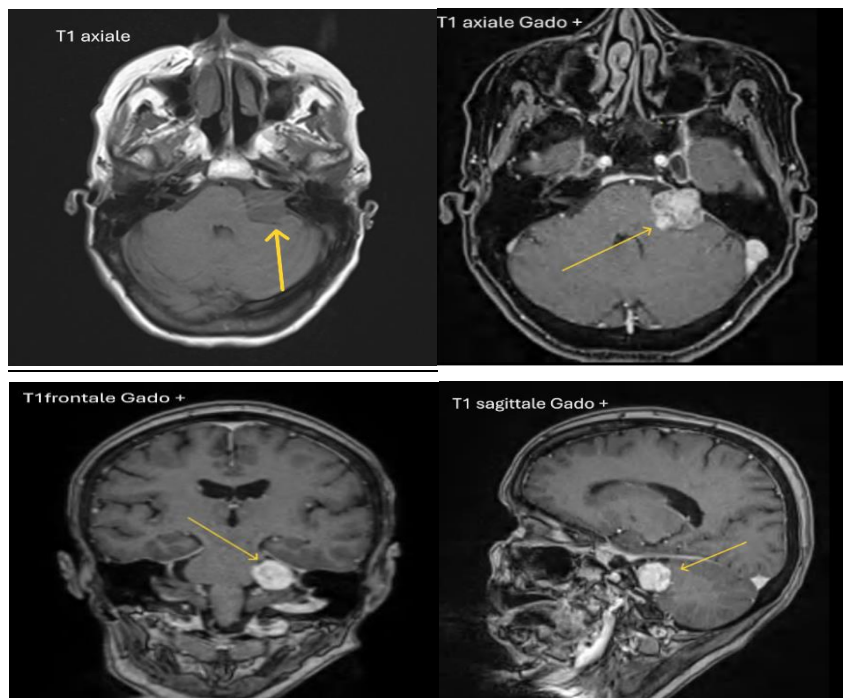


Figure 41 : L'IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente I.F pondérée T1 en coupe axiale, frontale et sagittale sans et avec injection du gadolinium a objectivé un aspect quasi stable du neurinome de l'APC gauche en hyposignal se rehaussant de manière hétérogène (flèche jaune)

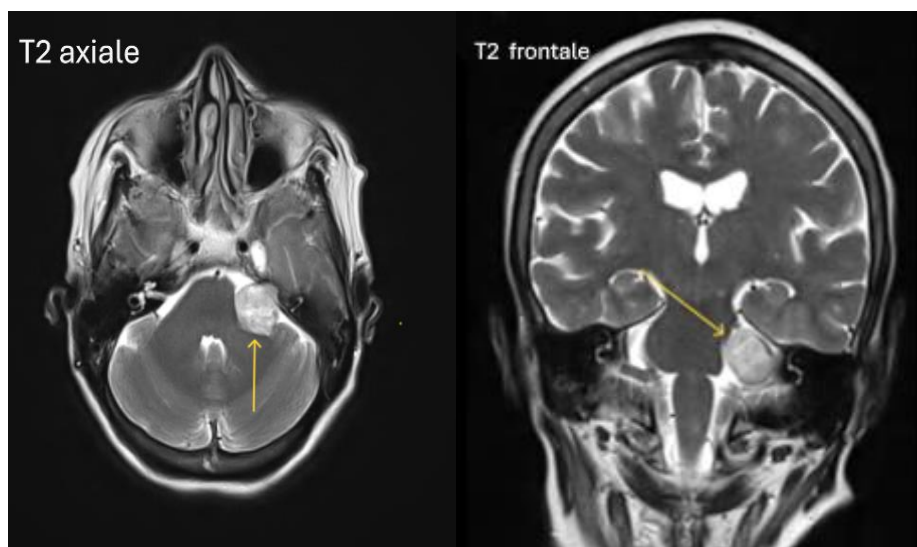


Figure 42 : L'IRM encéphalique de contrôle après 2 ans de la patiente I.F en coupes axiale et frontale pondérées T2 a objectivé un aspect quasi stable du neurinome de l'angle ponto-cérébelleux gauche en hypersignal T2 (flèche jaune)



I. Récapitulatif des résultats :

1. Données épidémiologiques :

1.1 Répartition selon l'âge :

L'âge moyen des patients inclus dans notre étude était de 53,3 ans, avec des extrêmes allant de 24 à 71 ans.

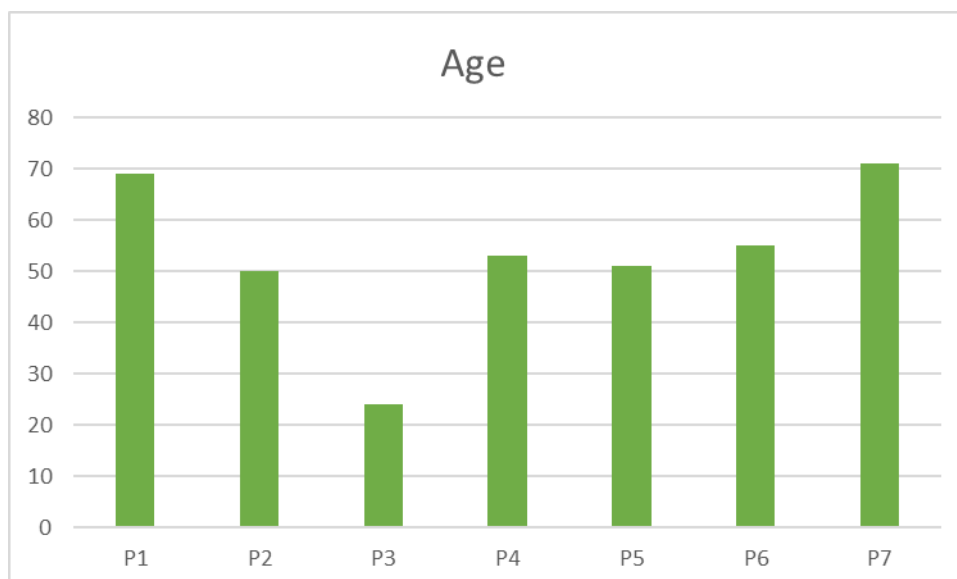


Figure 43 : Répartition des patients selon l'âge

1.2 Répartition selon le sexe :

La population étudiée présentait une prédominance féminine 71,4 % (n =5) soit un sexe ratio (H/F) de 0,4. Cet effectif est reparti comme suit :

Tableau I : Répartition des patients selon le sexe

Le sexe	Nombre de patient	Pourcentage %
Féminin	5	71
Masculin	2	29

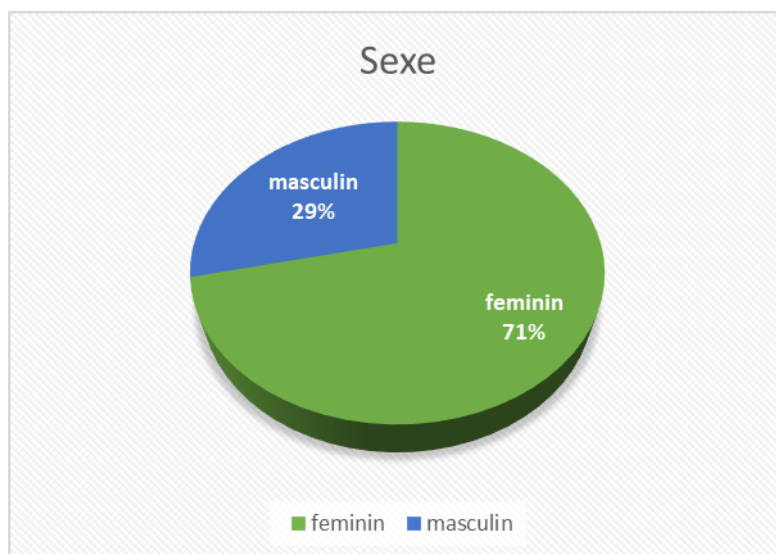


Figure 44 : Répartition des patients selon le sexe

1.3 Répartition selon origine géographique :

Concernant l'origine géographique, la majorité des patients étaient issus du milieu urbain (86 %) contre 14% du milieu rural.

Tableau II : Répartition des patients selon origine géographique

Origine géographique	Nombre de patients	Pourcentage %
Urbaine	6	86
Rurale	1	14

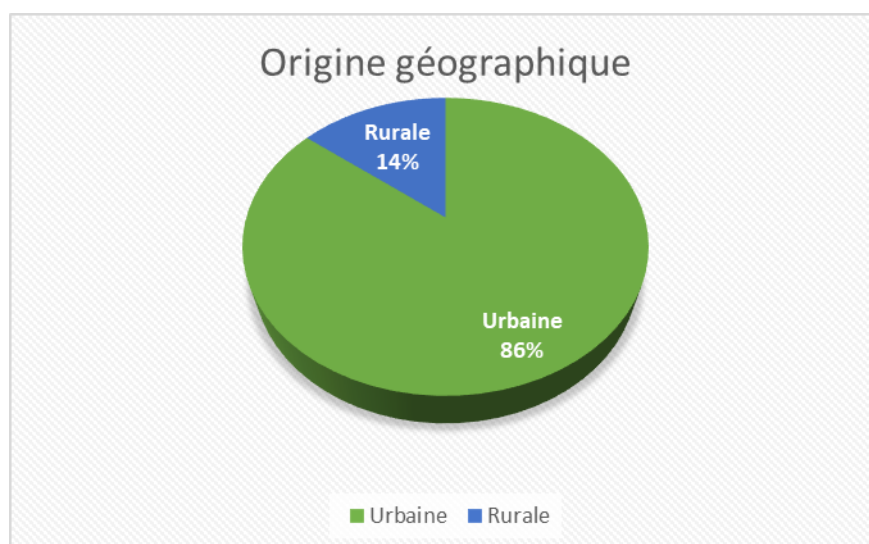


Figure 45 : Répartition des patients selon l'origine géographique

1.4 Répartition selon la couverture sociale :

Sur le plan socio-économique, l'ensemble des patients bénéficiaient d'une couverture médicale, dominée par le régime CNSS (57 %), suivi de l'AMO TADAMON (43%)

Tableau III : Répartition des patients selon la couverture sociale

Couverture sociale	Nombre des patients	Pourcentage %
CNSS	4	57
AMO TADAMON	3	43

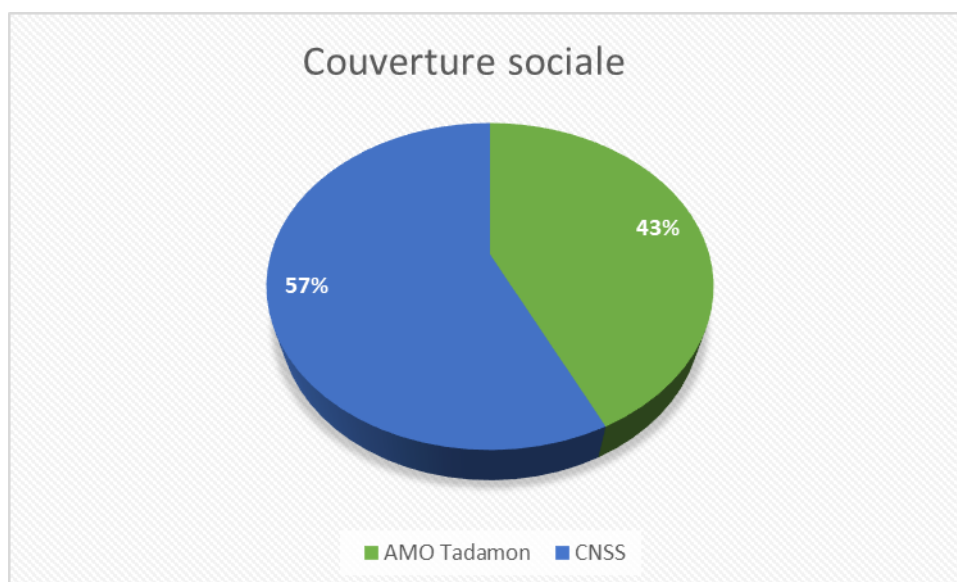


Figure 46 : Répartition des patients selon la couverture sociale

2. Donnés cliniques et radiologiques :

2.1 La répartition selon la symptomatologie révélatrice :

La symptomatologie révélatrice des patients inclus dans notre étude était dominée par les signes d'hypertension intracrânienne, complets ou incomplets, observés chez plus de la moitié des cas.

Les troubles vestibulaires (vertiges, acouphènes, hypoacousie) ont été retrouvés chez deux patients porteurs d'un neurinome de l'angle ponto-cérébelleux.

Un syndrome frontal associant des troubles du comportement, des troubles mnésiques et des crises comitiales a permis de révéler une malformation artérioveineuse frontale chez un seul patient.

Enfin, une névralgie essentielle du trijumeau, caractérisée par des douleurs paroxystiques a constitué le mode de révélation d'un cas de conflit neurovasculaire

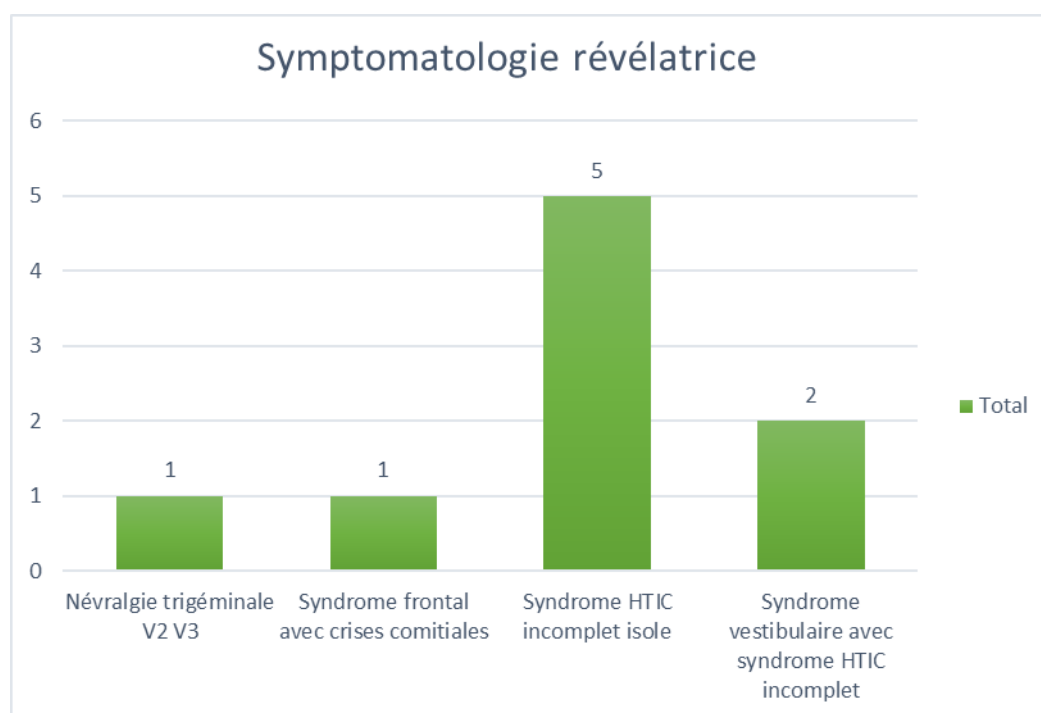


Figure 47 : Répartition des patients selon la symptomatologie révélatrice

2.2 Répartition selon la nature de la lésion à IRM :

La répartition des patients selon la nature de la lésion montre une prédominance des méningiomes et des neurinomes de l'angle ponto-cérébelleux, représentant chacun 29 % des cas.

Les autres lésions observées étaient un cavernome (14 %), une malformation artérioveineuse (14 %), ainsi qu'un conflit neurovasculaire responsable d'une névralgie trigéminal fonctionnelle (14 %).

Tableau IV : Répartition des patients selon la nature de la lésion à l'IRM encéphalique

Nature de la lésion	Nombre de patient	Pourcentage %
Neurinome de l'APC	2	29
Méningiome	2	29
MAV	1	14
Cavernome	1	14
Névralgie trigéminal	1	14

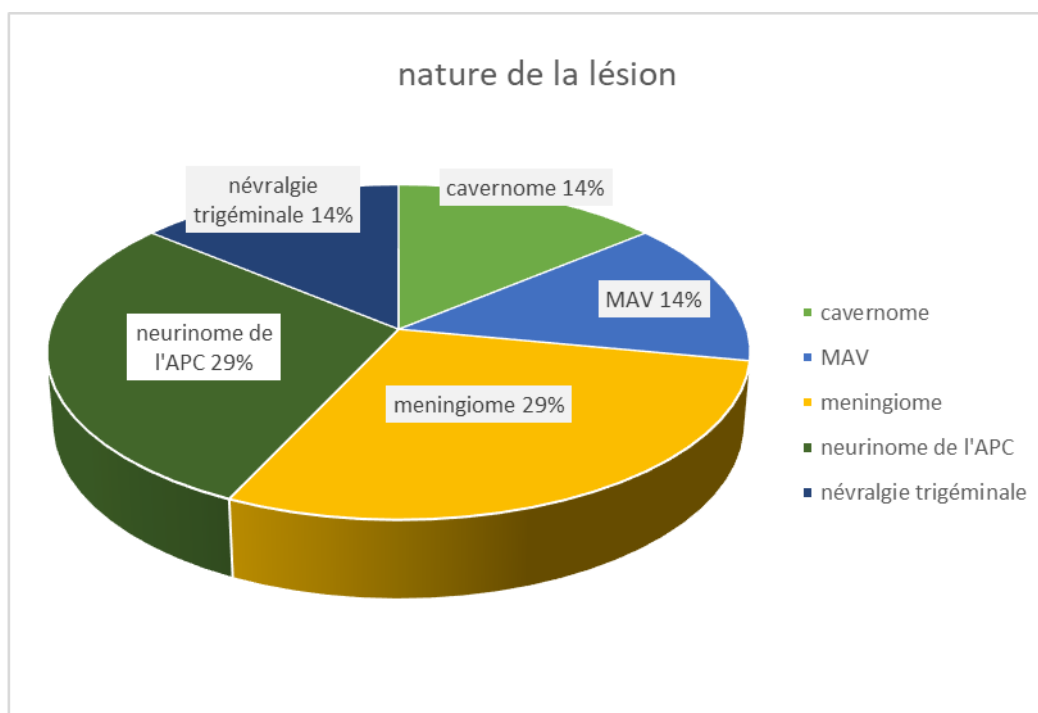


Figure 48 : Répartition des patients selon la nature de la lésion

2.3 Répartition selon la localisation à IRM :

L'analyse des localisations lésionnelles montre une prédominance des atteintes de la base du crâne

L'atteinte de l'APC a été retrouvée dans deux cas, soit 29 % des patients, Les méningiomes présentaient également des localisations caractéristiques : un cas au niveau du clivus (14%) et un autre de type sphéno orbito-temporal (14%)

Les lésions vasculaires étaient représentées par un cavernome protubéranti du tronc cérébral (14%) et une malformation artérioveineuse basifrontale (14%)

Une lésion fonctionnelle correspondant à un conflit neurovasculaire au niveau de l'émergence du nerf trijumeau a été identifiée, avec une structure vasculaire au contact du nerf. (14%)

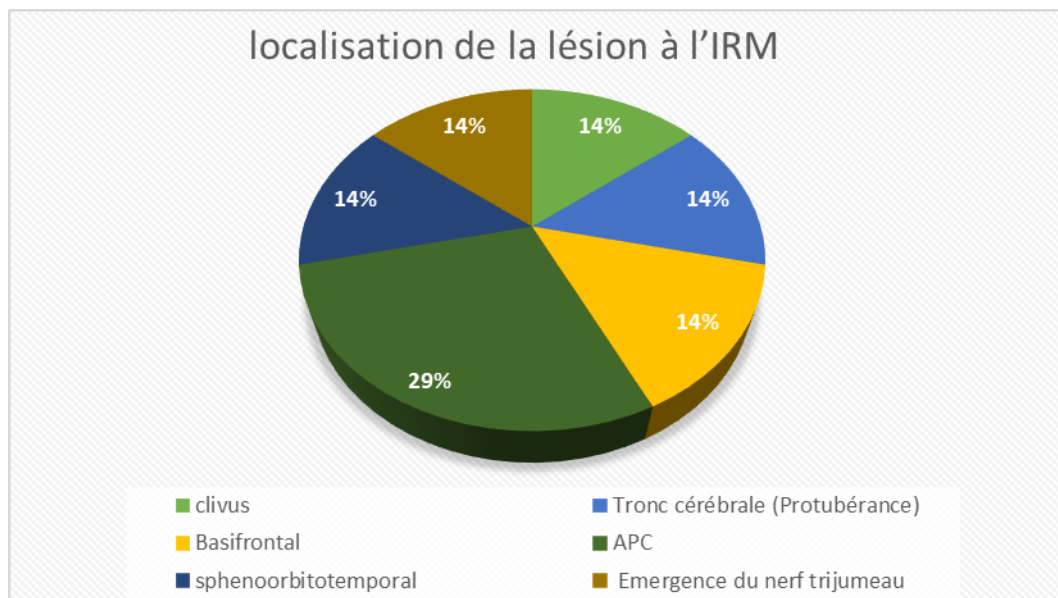


Figure 49 : Localisation de la lésion à l'IRM des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife au CHU Mohammed VI

2.4 Répartition selon la taille de la lésion à IRM :

Les tailles observées variaient de quelques millimètres (2×5 mm) à plusieurs centimètres (5×4 cm), traduisant la grande variabilité des volumes traités.

Tableau V : Taille des lésions traitées par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

Pathologie	Taille en mm
Méningiome du clivus	15×18×26
Cavernome protubérantiel	10,5×7,4×7,2
MAV frontale	50×40
Neurinome de l'APC (récidive)	28×26×30
Méningiome sphéno-orbito-temporal (récidive)	28×13 (orbitaire) 24×11 (temporal)
Névralgie trigéminal	2×5
Neurinome de l'APC	25,8×20×22

3. Données thérapeutiques :

3.1 Répartition selon l'indication de la radiochirurgie Gamma Knife :

Dans notre série, les indications de la radiochirurgie Gamma Knife ont concerné des pathologies intracrâniennes variées : deux cas de méningiome (29 %), deux cas de neurinome de l'APC (29 %) un cas de cavernome (14 %), un cas de MAV frontale (14 %), et un cas de névralgie essentielle du trijumeau d'origine fonctionnelle (14 %).

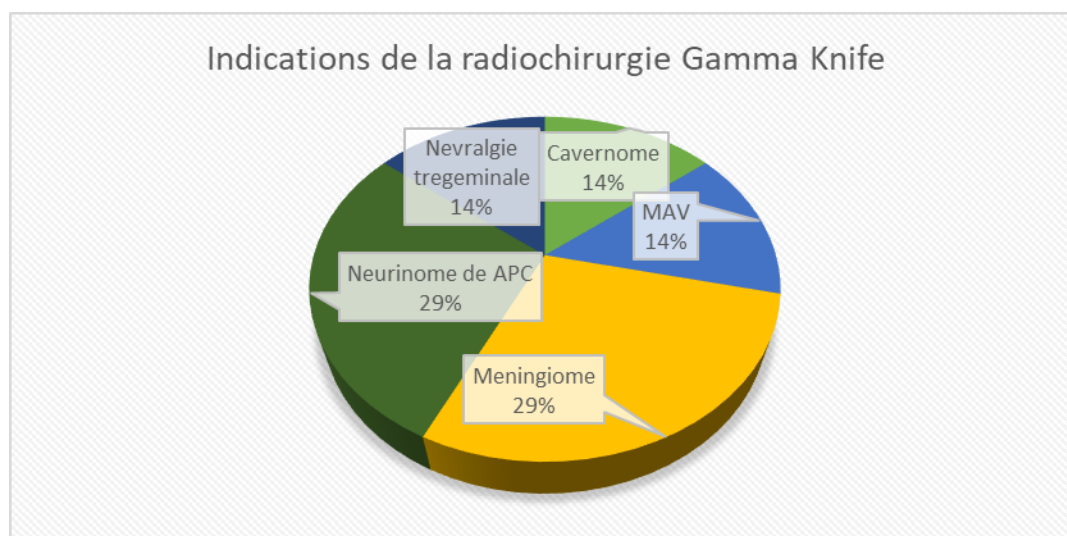


Figure 50 : Indications de la radiochirurgie par Gamma Knife des patients traités au CHU Mohammed VI de Marrakech

3.2 Répartition selon les paramètres dosimétriques :

Les paramètres dosimétriques appliqués dans notre série ont été adaptés à la nature, à la taille et à la localisation de chaque lésion. Le volume cible variait de 0,0109 cm³ à 20 cm³, La dose prescrite sur l'iso dose de 50 % oscillait entre 8 Gy et 43 Gy, en fonction du type de

lésion : les tumeurs bénignes telles que les méningiomes et les neurinomes ont reçu des doses maximales comprises entre 16 et 20 Gy, tandis que la névralgie essentielle du trijumeau a nécessité une dose plus élevée, de 86 Gy, ciblant la zone cisternaire du nerf.

Le nombre de tirs ("shots") utilisés variait de 1 à 23, avec une collimation mixte (4 à 18 mm) pour la majorité des cas, permettant une adaptation optimale à la morphologie tridimensionnelle des cibles. Le temps d'irradiation moyen était d'environ 47 minutes, variant de 26 minutes pour les lésions de petit volume (comme le cavernome) à 63 minutes pour les lésions volumineuses ou complexes (comme la MAV frontale). Ces paramètres sont représentés en détails dans le tableau ci-dessous

Tableau VI: Paramètres dosimétriques des patients traités par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

Patient N°	Indications	Volume cible en Cm3	Dose prescrite a l'iso dose 50%	Nombre de tirs (shot)	Collimation en mm	Temps d'irradiation en minutes
1	Méningiome	0,0109	10	23	Mixte 4-8-14-18	62
2	Cavernome	0,559	10	5	4	26
3	MAV	20	12	20	Mixte 4-8-14	63
4	Neurinome de l'APC (récidive)	0,021	10	21	Mixte 4-8-14-18	45
5	Méningiome(récidive)	0,037	8	17	Mixte 8-14-18	42
6	Névralgie trigéminal	0,016	43	1	4	54
7	Neurinome de APC	0,42	8	16	Mixte 4-8-14	35

4. Evolution et suivi :

4.1 Evolution clinique :

L'évaluation clinique globale des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife dans notre CHU a montré des résultats satisfaisants. Une rémission totale de la symptomatologie a été obtenue chez 3 patients (42,8%). Une rémission partielle a été observée chez 1 patient (14,3 %), marquée par une amélioration notable mais incomplète des symptômes. Enfin, 3

patients (42,8 %) ont présenté une stabilité clinique, sans aggravation ni apparition de nouveaux signes neurologiques.

Aucune complication post-thérapeutique ni effet secondaire radio-induit n'a été observé au cours du suivi.

Tableau VII : Evolution clinique des patients traites par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

Evolution clinique	Nombre des patients	Pourcentage %
Rémission partielle	1	14,3
Rémission totale	3	42,8
Stabilité	3	42,8

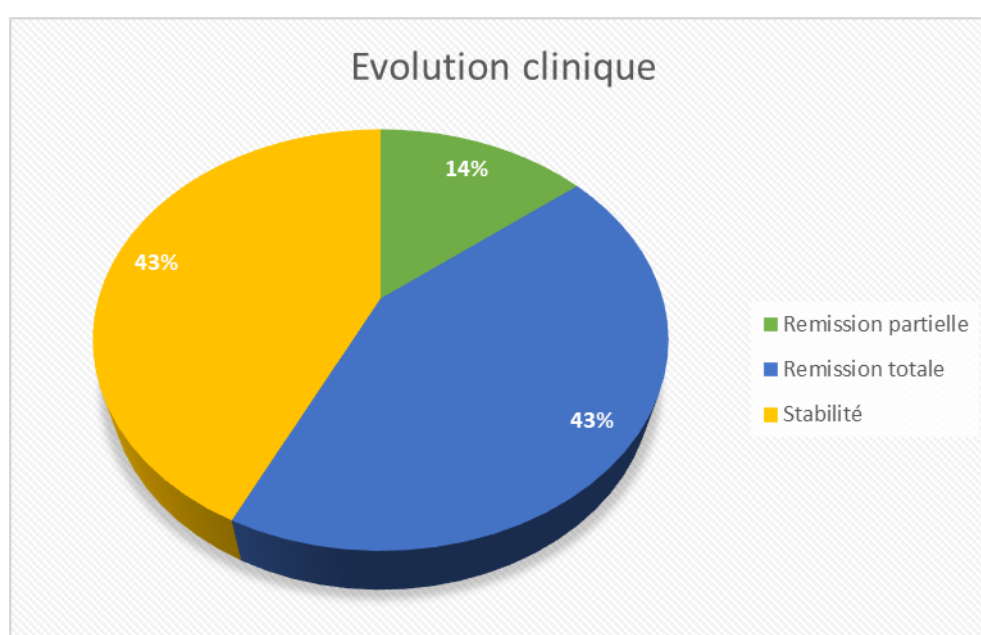


Figure 51 : Evolution clinique des patients traites par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

4.2 Evolution radiologique :

Sur le plan radiologique, le suivi par IRM à 1 an et à 2 ans a mis en évidence une évolution globalement favorable chez l'ensemble des patients. Une régression importante du volume lésionnel a été observée chez un seul patient (14,3 %), traduisant une réponse radiologique significative au traitement. Les six autres patients (85,7 %) ont présenté une stabilité morphologique des lésions traitées, sans signe de progression ni apparition de nouvelles anomalies de signal.

Aucun effet secondaire radio-induit n'a été noté sur les examens de contrôle notamment pas de nécrose radio induite mais un seul patient a présenté une plage d'œdème péri lésionnel à l'IRM encéphalique de contrôle a 1 an mais sans traduction clinique.

Tableau VIII : Evolution radiologique des patients traites par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech

Evolution radiologique	Nombre de patients	Pourcentage %
Régression importante	1	86
Stabilité	6	14

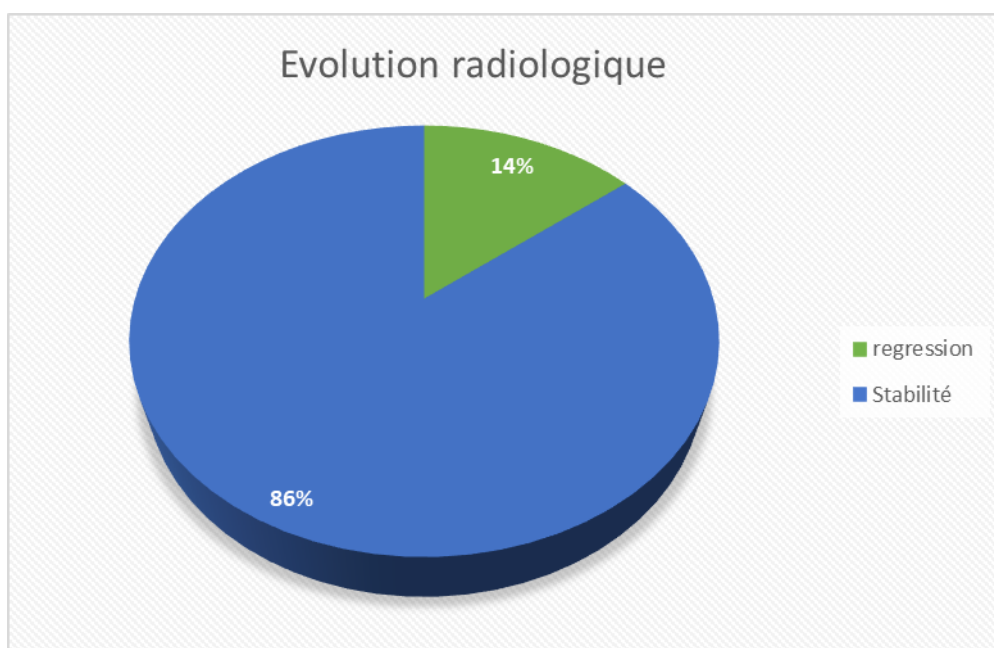


Figure 52 : Evolution radiologique des patients traites par Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech



I. Revue de littérature :

1. Définitions et historique :

1.1 Définitions :

La radiochirurgie est un concept introduit et popularisé par Lars Leksell en 1949, désignant une technique innovante consistant à focaliser de multiples faisceaux de rayonnements ionisants sur un volume intracrânien déterminé, dans le but de détruire une lésion tumorale ou un processus pathologique sans recours à la chirurgie ouverte.

Depuis les années soixante, cette méthode n'a cessé d'évoluer, donnant lieu à plusieurs définitions et perfectionnements technologiques qui ont progressivement affiné ses principes, ses indications et ses applications cliniques actuelles.

- **Définition de Lars Leksell :**

La définition de Leksell était la suivante : « La radiochirurgie stéréotaxique est une technique permettant la destruction non invasive de tissus ou de lésions intracrâniennes qui peuvent être inaccessibles ou inadaptés à la chirurgie ouverte »[4].

- **Définition de Börje Larsson :**

Le physicien Leksell, co-inventeur du Gamma Knife, a élargi la définition pour aboutir à « La radiochirurgie désigne toute application d'énergie de rayonnement ionisant, en biologie expérimentale ou en médecine clinique, visant à la destruction précise et complète de structures cibles choisies contenant des cellules saines et/ou pathologiques sans dommages significatifs concomitants ou tardifs aux tissus adjacents »[4].

La définition de Larsson précise que le rayonnement est l'agent responsable des dommages tissulaires. Elle énonce également de manière explicite ce qui est implicite pour les chirurgiens dans la définition de Leksell.

- **La définition officielle actuelle aux États-Unis :**

Une définition moderne a été approuvée aux États-Unis. « Le conseil d'administration de l'AANS, le comité exécutif du Congrès des neurochirurgiens et le conseil d'administration

de l'American Society for Therapeutic Radiology and Oncology se sont mis d'accord sur une définition contemporaine de la radiochirurgie stéréotaxique[5].

La radiochirurgie stéréotaxique est une discipline à part entière qui utilise des rayonnements ionisants externes dans certains cas pour inactiver ou éliminer une cible définie dans la tête ou la colonne vertébrale et sans qu'il soit nécessaire de procéder à une incision. La cible est définie par imagerie stéréotaxique de haute résolution. Pour garantir la qualité des soins aux patients la procédure implique une approche pluridisciplinaire avec une équipe composée d'un neurochirurgien, radio oncologue, et physicien médical. Le caractère "chirurgical" de ce procédé naît de l'important gradient de dose entre le volume cible et les tissus sains voisins ainsi que la précision balistique permise par l'utilisation d'un cadre stéréotaxique. Le cadre stéréotaxique est mis en place de façon invasive (vis implantées) ou non sur le crâne du patient avant la réalisation des différentes étapes d'imagerie (IRM, scanner, angiographie) et laissé jusqu'à la réalisation de l'irradiation pour garder un repère géométrique invariable[6].

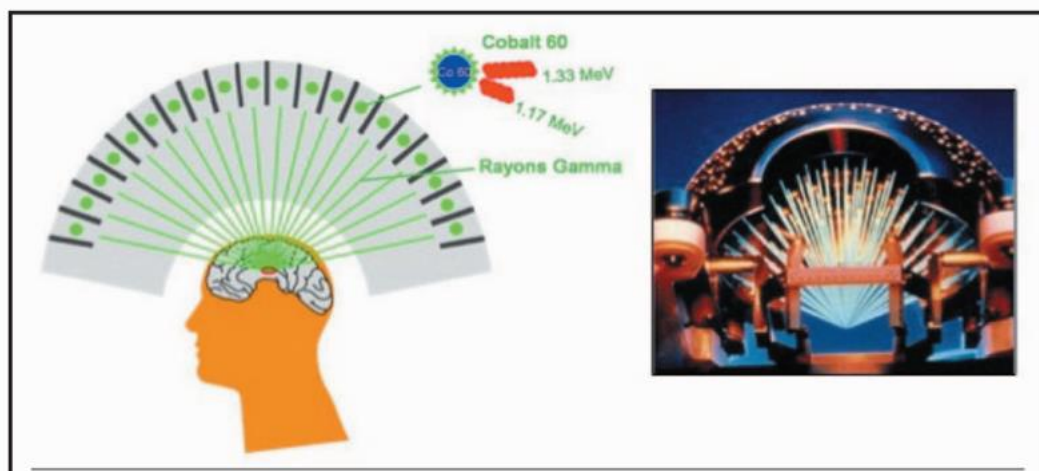


Figure 53 : Principe général d'une irradiation stéréotaxique par Gamma Knife [2]

1.2 Historique :

La radiochirurgie stéréotaxique (SRS) a été conçue par L. Leksell en 1951[7]. À l'origine, L. Leksell a développé le Gamma Knife comme une méthode alternative aux

électrodes de thermo coagulation guidées par stéréotaxie en neurochirurgie fonctionnelle[8,9].

Le concept initial de la SRS visait la destruction précise d'une cible choisie par des faisceaux ionisants délivrés en une seule séance, sans endommager de manière significative les tissus adjacents[10].

Ce principe reposait sur la rotation de la source de rayonnement autour d'un plan semi-circulaire, la lésion souhaitée étant fixée au centre du dispositif de guidage stéréotaxique.

Une télé thérapie précoce a d'abord été utilisée, mais elle a ensuite été remplacée par un faisceau de protons généré par un cyclotron, puis par un accélérateur linéaire.

Ces techniques, complexes et peu efficaces, ont été remplacées par un appareil contenant 179 sources de cobalt-60 disposées à l'intérieur d'une hémisphère lourdement blindée[11].

Ainsi est née la radiochirurgie par Gamma Knife (RCGK).

Le concept de la RCGK repose sur des faisceaux bien collimatés issus d'un grand nombre de sources de ^{60}Co réparties autour d'un casque collimateur hémisphérique, convergeant vers une cible précise dans le cerveau.

La direction et la position des faisceaux sont contrôlées par des mesures stéréotaxiques[9].

La RCGK implique généralement des iso centres multiples de faisceaux de taille variable afin d'obtenir une planification conforme.

Le nombre d'iso centres varie en fonction de la taille, de la forme et de la topographie de la cible ; chaque iso centre est défini par des coordonnées stéréotaxiques (x, y, z)[12].

Bien que l'objectif initial ait été de réaliser des traitements non invasifs en neurochirurgie fonctionnelle, dans son premier article, L. Leksell a également suggéré d'utiliser la technique pour le traitement de tumeurs profondes et bien circonscrites[7].

La première procédure de RCGK fut réalisée en 1967 à l'Institut Karolinska de Stockholm[13].

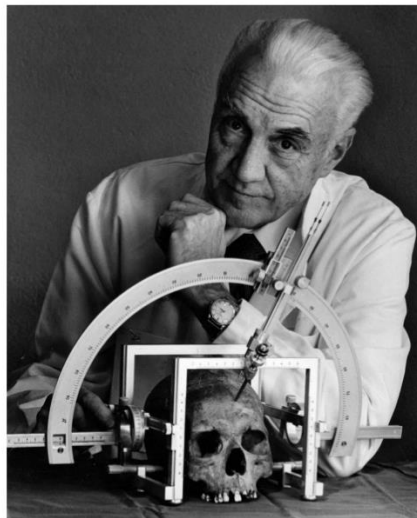
Elle concernait un cas de craniopharyngiome chez un jeune patient ayant déjà subi plusieurs interventions chirurgicales.

La composante kystique récidivante fut traitée par irradiation intra cavitaire à l'yttrium-90 (^{90}Y) colloïdal, tandis que la composante solide, de petite taille, a pu être irradiée en dose unique à l'aide du plus petit collimateur. Une dose de 20 Gy fut administrée.

La tête du patient était immobilisée par un casque en plâtre, fixé au crâne à l'aide de trois vis en aluminium servant d'interface mécanique avec le dispositif Gamma Knife, assurant ainsi un ancrage précis selon les coordonnées stéréotaxiques prédéterminées[9].

Le patient est décédé quatre mois plus tard à la suite d'une dysfonction de la dérivation ventriculopéritonéale (DVP), et une autopsie fut réalisée.

L'examen post-mortem a confirmé l'obtention d'une nécrose de coagulation bien circonscrite au sein du volume cible, stable dans le temps et présentant une frontière nette entre la zone nécrosée et les structures normales adjacentes, en parfaite corrélation avec les iso doses de rayonnement[9].



'I was born under the sign of Sagittarius and I liked the motto: to ride, to shoot with the bow, and to tell the truth.'

Figure 54 : Photographie de Mr L.Leksell avec le cadre stéréotaxique [14]



Figure 55 : Professeur LARS LEKSELL avec le premier appareil Gamma Knife en 1968. [14]



Figure 56: Gamma Knife® MODEL U 1987 [14]



Figure 57: Gamma Knife MODEL B 1996[14]



Figure 58: Gamma Knife Model C 1999 [14]

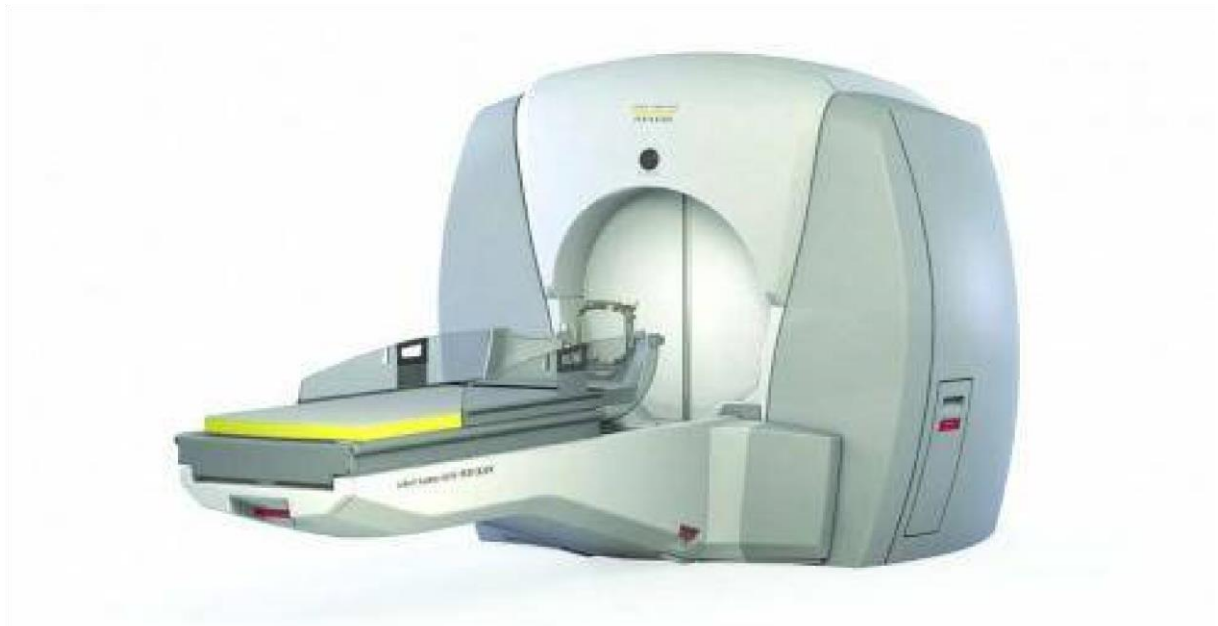


Figure 59: Gamma Knife model perfeXion™ (Elekta Instrument AB, Stockholm, Sweden) [14]



Figure 60: Gamma Knife model ICON 2015[15]



Figure 61: Gamma Knife model ESPRIT 2022 [14]

2. Evolutions technologiques :

2.1 Fixation :

L'obtention d'un haut degré de précision constitue une exigence essentielle en radiochirurgie stéréotaxique. La méthode la plus classique et la plus fiable repose sur l'utilisation d'un cadre stéréotaxique rigide, solidement fixé à la tête du patient. Ce dispositif fournit les coordonnées stéréotaxiques tridimensionnelles nécessaires à la planification et à la réalisation des procédures chirurgicales ou radio chirurgicales.

Le premier prototype du Gamma Knife (Gamma Knife I, également dénommé U)[16] fut conçu de manière à positionner la tête du patient au plus près de la source de rayonnement, conformément aux contraintes radiophysiques[9].

Cette configuration impliquait un espace très limité entre la tête du patient et le casque de traitement, rendant impossible l'installation d'un cadre stéréotaxique conventionnel.

Pour pallier cette limitation, la tête du patient était immobilisée à l'aide d'un casque en plâtre, fixé directement au crâne par des vis, assurant ainsi une stabilité optimale et une reproductibilité précise du positionnement[9]. (Figure 62)



Figure 62 : Casque en plâtre de Paris utilisé pour le premier patient traité par Gamma Knife en 1967 (actuellement exposé dans le bloc opératoire de Dade Lunsford à Pittsburgh, Pennsylvanie, États-Unis)[17]

Leksell développa son premier cadre stéréotaxique en 1949, basé sur des coordonnées cartésiennes, permettant de localiser avec précision n'importe quel point à l'aide de trois coordonnées axiales (figure 63)[18]. Ce n'est qu'avec le développement du Gamma Knife modèle II que le cadre stéréotaxique fut spécifiquement adapté au Gamma Knife (G-frame)[9]. Depuis cette innovation, le G-frame est utilisé pour l'ensemble des procédures de radiochirurgie Gamma Knife (GKRS), accompagné de bobines adaptées aux examens de scanner, d'IRM et d'angiographie.

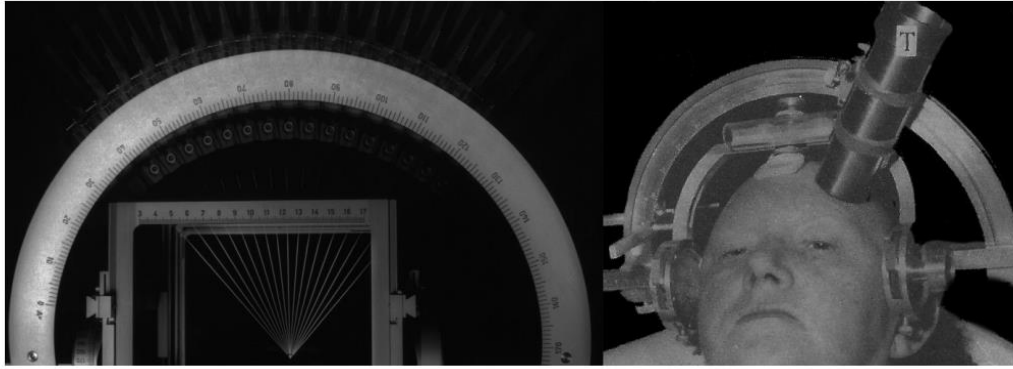


Figure 63 : Cadre Leksell classique extraite du premier article de Leksell sur la radiochirurgie[4]

Le cadre stéréotaxique, en lui-même, n'est pas considéré comme une source d'inexactitude.

Cependant, pour atteindre un haut niveau de précision au cours de ces procédures, la stabilité de l'ensemble des éléments du système est essentielle. En particulier, la stabilité mécanique du cadre stéréotaxique constitue un enjeu central, puisqu'il représente le point de référence principal pour la définition des coordonnées stéréotaxiques et le positionnement précis de la cible.[19].

Il a été démontré que le cadre stéréotaxique présente une stabilité submillimétrique tout au long de la procédure de traitement[20]. Le risque d'inexactitude augmente en cas de torsion du cadre lors de sa fixation[19].

Ces dernières années, une nouvelle évolution du cadre stéréotaxique a été mise au point : le cadre Vantage (V-frame). Ses principaux avantages résident dans l'absence de torsion lors du réglage du cadre, l'absence d'artefacts liés aux broches sur les images stéréotaxiques, ainsi que dans la possibilité de réaliser de nouvelles séquences IRM, telles que l'imagerie stéréotaxique par tenseur de diffusion et la tractographie des fibres.

Depuis plus de 50 ans, la localisation des cibles cérébrales adaptées à la radiochirurgie stéréotaxique (SRS) est réalisée après l'application d'un dispositif guide intracrânien sur la voûte crânienne[21].

Les systèmes d'immobilisation non invasifs utilisant un masque thermoplastique ont d'abord été proposés pour les technologies basées sur l'accélérateur linéaire (LINAC) et ont désormais été développés pour le Gamma Knife ICON. La technologie ICON intègre un scanner tomographique à faisceau conique (CBCT), offrant une représentation tridimensionnelle de la voûte crânienne du patient et définissant ainsi l'espace stéréotaxique[21].

Les principaux avantages de ce système résident dans le fait que le masque ne nécessite pas de broches, qu'il est généralement bien toléré, et qu'une refixation est possible pour des procédures répétées dans la semaine, en cas de traitements hypo fractionnés. En revanche, le masque n'est pas adapté aux cibles situées dans des zones extrêmes (très inférieure, très antérieure ou postérieure de la voûte crânienne), ni pour des patients agités, claustrophobes, anxieux, endormis, confus ou obèses[21,22].

Bien que le masque semble moins invasif que le cadre stéréotaxique, cela ne signifie pas nécessairement qu'il soit préféré par les patients.

Alors que Pavlica et al. ont rapporté que les patients sont plus à l'aise et ressentent moins de douleur avec la GKRS sans cadre qu'avec le cadre[22], ils ont montré dans une étude prospective randomisée qu'il n'existe aucune preuve claire de l'avantage du masque en termes de confort[23].

En termes de précision, pour garantir que la radiation soit concentrée au plus près de la zone cible tout en limitant la dose aux structures cérébrales adjacentes, il est essentiel d'assurer une localisation exacte de la lésion ainsi qu'une immobilisation stricte de la tête. Carminucci et al.[24], comparant la GKRS avec et sans cadre, ont montré que les erreurs de mouvement étaient faibles pour les deux systèmes, mais que l'immobilisation par masque induisait des erreurs de positionnement et de mouvement intra fractions significativement plus importantes par rapport aux patients traités avec fixation par cadre. Seneviratne et al. ont rapporté que les déplacements moyens et maximums lors de la RCGK sans cadre variaient respectivement de 0,1 mm à 1,25 mm et de 0,1 mm à 3,2 mm[25]. Toutefois, pour des lésions proches de structures critiques (par exemple la cochlée, le tronc

cérébral...), des mouvements même de 1 à 2 mm peuvent avoir des conséquences majeures. De plus, les interruptions lors de la RCGK sans cadre induites par des mouvements excessifs augmentent le temps de traitement et peuvent modifier la radiobiologie globale.

Actuellement, les traitements avec masque représentent environ 10 % des indications de RCGK, avec des caractéristiques spécifiques : plans de dose relativement simples, temps de délivrance du traitement court, et patients non anxieux, la plupart présentant des cancers cérébraux métastatiques ou primaires. Le patient idéal doit être coopératif et détendu, avec une cible géométriquement simple, permettant un temps d'exposition du faisceau de 20 à 60 minutes[21,23,26].

À ce jour, quelques séries ont rapporté l'utilisation de la GKRS sans cadre en dose unique pour les schwannomes vestibulaires (VS)[27], mais l'immobilisation par cadre reste la référence pour la majorité des traitements des lésions intracrâniennes bénignes avec le Gamma Knife.

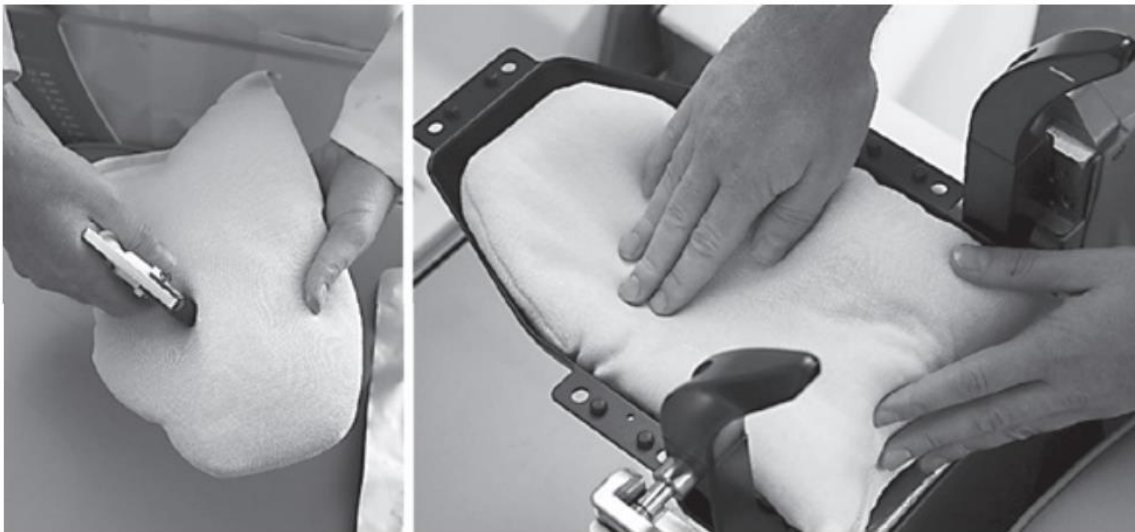


Figure 64 : Coussin de tête Moldcare : Le revêtement est en polypropylène et le matériau d'empreinte est constitué de billes de polystyrène. L'agent de liaison est une résine uréthane hydraulique. En pulvérisant de l'eau et en massant le coussin, celui-ci durcit et prend la forme souhaitée. Le support de tête est compatible CT et CBCT et peut être utilisé en association avec les adaptateurs CT existants[12]

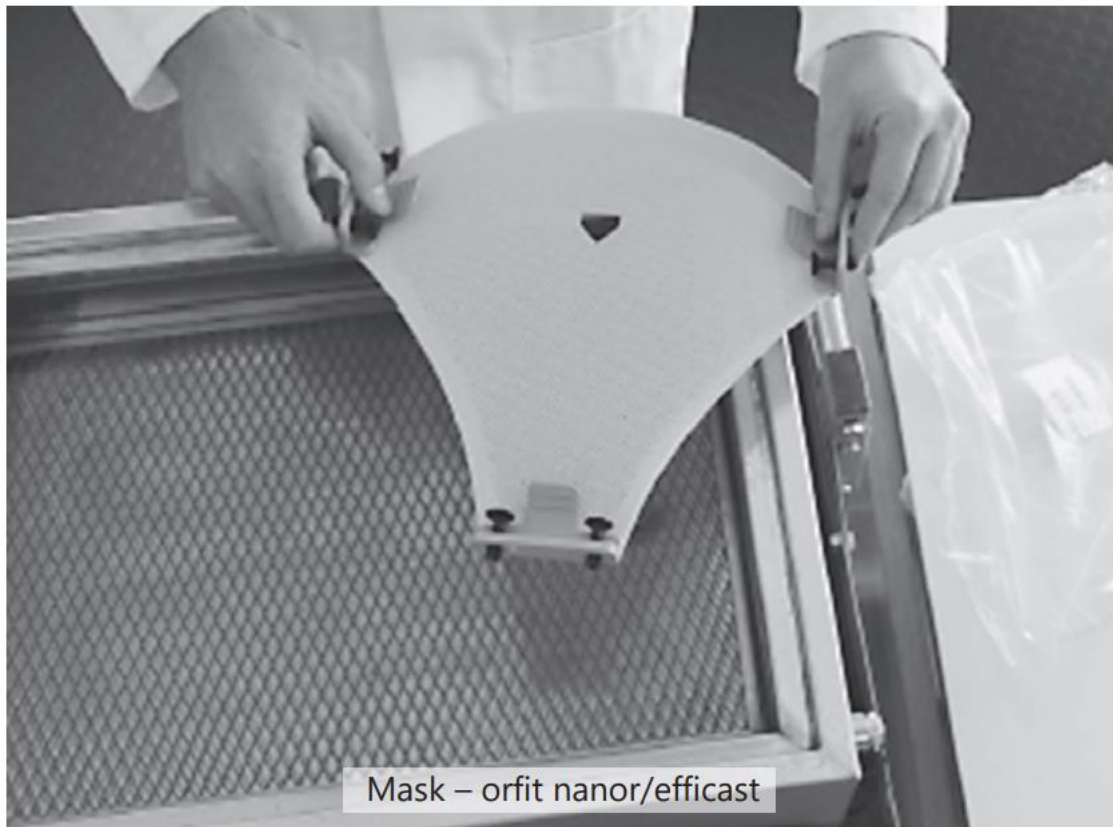


Figure 65 : Masque hybride thermoplastique [12]

La couche supérieure, d'une épaisseur de 1,6 mm, est microperforée afin d'augmenter la rigidité à la flexion, ce qui permet d'obtenir un masque à la fois fin et stable. La couche de support, également d'une épaisseur de 1,6 mm, est microperforée.

2.2 Imagerie et délimitation de la cible en radiochirurgie :

L'un des aspects majeurs de la radiochirurgie concerne l'imagerie de la cible[12]. En tant que technique exclusivement guidée par l'image, la radiochirurgie nécessite une attention particulière dans le choix des modalités d'imagerie, ainsi qu'une grande rigueur dans le réglage des paramètres d'acquisition[28].

Au début des années 1990, il a été clairement établi qu'une IRM avec injection de produit de contraste offrait une meilleure identification des cibles intracrâniennes qu'un scanner conventionnel[29].

L'introduction de la planification de traitement basée sur l'IRM a permis d'élaborer des plans de traitement plus complexes, intégrant un plus grand nombre d'iso centres. Chez les patients bénéficiant d'une telle planification, une diminution significative du risque de neuropathie faciale et trigéminal a été observée après radiochirurgie stéréotaxique (SRS) pour schwannome vestibulaire, sans différence notable en termes de contrôle tumoral[30].

Cependant, la présence d'un cadre stéréotaxique fixé au crâne du patient limite la qualité de l'imagerie obtenue, en raison des distorsions du champ magnétique qu'il induit[29].

Par ailleurs, des erreurs de ciblage comprises entre 0,5 et 1 mm peuvent entraîner une baisse significative de la dose délivrée à de petites cibles complexes, ou, inversement, une surexposition des structures critiques adjacentes.

Dans une étude comparant la localisation des cibles sur l'IRM et sur le scanner pour les schwannomes vestibulaires intra canaliculaires, Borden et al. ont mis en évidence des décalages moyens de 0,9 mm selon l'axe y et de 0,8 mm selon l'axe z, entraînant une diminution du taux de couverture tumorale de 98 % à 77 %[31].

Ainsi, un ciblage reposant exclusivement sur l'IRM ne peut être recommandé.

L'épaisseur de coupe constitue également un paramètre essentiel pour la dosimétrie en radiochirurgie Gamma Knife. Snell et al. ont montré que, pour garantir une précision de ciblage satisfaisante, la lésion devait être visible sur au moins cinq coupes axiales[32], et que l'épaisseur de coupe ne devait pas excéder 1 mm[32,33].

L'estimation précise du volume tumoral et des structures anatomiques environnantes représente l'un des fondements du traitement et du suivi radiochirurgicaux. Afin de minimiser les erreurs, la définition de la cible à partir d'une imagerie multimodale à résolution millimétrique est indispensable.

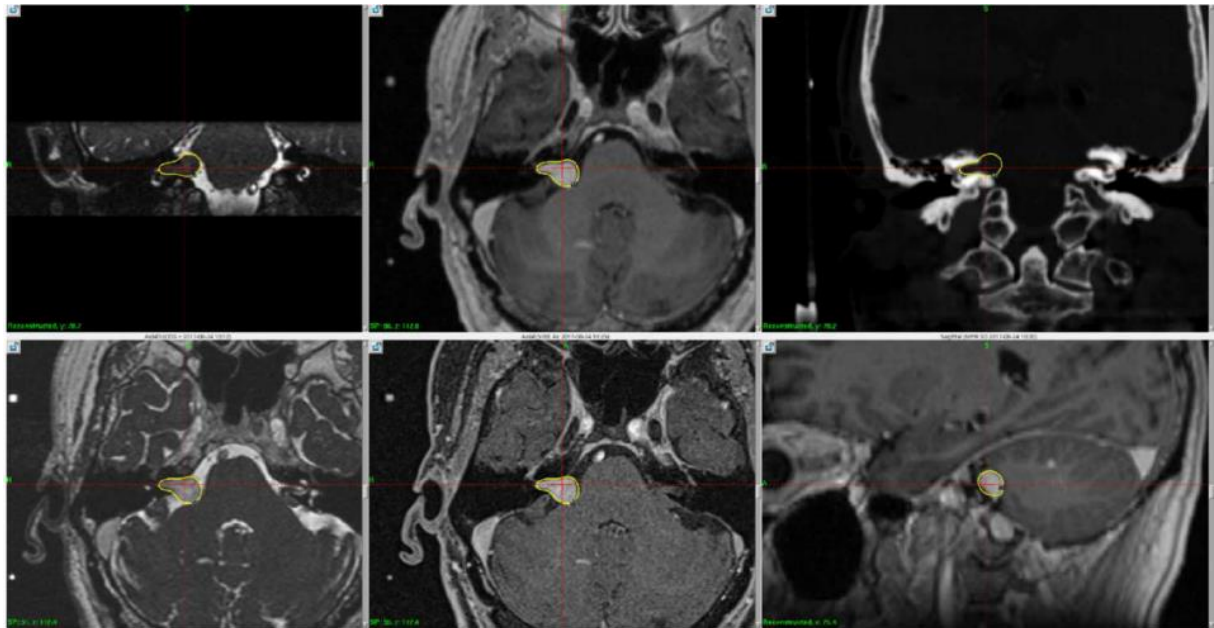


Figure 66 : Dosimétrie d'un schwannome vestibulaire Koos II-III réalisée à partir d'un scanner stéréotaxique (en haut à droite) et d'une IRM utilisant les séquences suivantes : T1 volumique avec injection de contraste (au centre à droite et en bas à gauche), CISS avec (en bas à gauche) et sans injection (en haut à gauche), ainsi que la séquence avec saturation de graisse (au centre en bas)[34]

2.3 Logiciels de planification de dose et indices de qualité :

Au début de l'ère de la radiochirurgie, les procédures étaient réalisées sans véritable système dédié à la planification dosimétrique. L'introduction du logiciel GammaPlan en 1997 a constitué une étape déterminante dans l'évolution de la technique. Ce développement a progressivement permis de passer d'une approche rudimentaire à une plateforme multiparamétrique hautement performante, offrant des outils de visualisation tridimensionnelle, une précision accrue du ciblage et des fonctionnalités avancées de planification du traitement.[35].

Ainsi, l'utilisation conjointe de ces indices et outils dosimétriques permet non seulement d'optimiser la planification de la dose, mais aussi de prévoir et d'évaluer de manière quantitative l'efficacité et la sécurité des traitements, facilitant le suivi clinique et l'adaptation des protocoles en fonction des résultats observés.

Le développement de stations de travail informatiques puissantes a permis des progrès majeurs dans l'application technique de la radiochirurgie Gamma Knife (GKRS) et dans l'amélioration de ses résultats cliniques [30]

La planification de dose constitue l'un des aspects les plus déterminants de la radiochirurgie. L'objectif prioritaire est d'obtenir une couverture conforme de la tumeur tout en préservant les fonctions faciale, cochléaire et trigéminale[36].

Le succès de la radiochirurgie repose sur la grande précision de la distribution de dose autour de la cible, ce qui justifie la nécessité de disposer d'outils quantitatifs permettant de décrire cette conformité.

L'évaluation de la qualité d'un traitement radio chirurgical repose sur deux critères essentiels :

- La bonne couverture du volume tumoral,
- Et la protection des tissus sains adjacents[37].

Pour un volume cible planifié (PTV) et un volume correspondant à l'iso dose de prescription (PIV) :

- le Target Coverage Ratio (TCR), défini comme $(PTV \cap PIV)/PTV$, évalue l'efficacité du traitement ;
- le Selectivity Index (SI), défini comme $(PTV \cap PIV)/PIV$, évalue sa sécurité[38].

L'efficacité et la sécurité optimales sont atteintes lorsque ces deux indices tendent vers 1. L'indice de conformité de Paddick (PCI) évalue la qualité globale du traitement, en combinant ces deux paramètres selon la formule : $PCI = TCR \times SI$ [39].

Enfin, le Gradient Index (GI), défini comme $PIV_{0.5} / PIV$ (où $PIV_{0.5}$ correspond au volume englobé par la demi-iso dose de prescription), mesure la pente de décroissance de dose ; une valeur inférieure à 3 est considérée comme optimale[40].

L'ensemble de ces indices — TCR, SI, PCI et GI — est intégré au logiciel GammaPlan, qui fournit également les histogrammes dose-volume (DVH), permettant une planification dosimétrique fine et optimisée[41].

2.4 Positionnement automatique :

Les premières machines utilisaient des casques contenant des collimateurs de différents diamètres, afin d'augmenter la flexibilité du traitement. Le changement de ces casques était long et fastidieux.

Sur le modèle U, le patient était introduit dans la machine de l'intérieur vers le haut, à l'aide d'un système hydraulique.

Un modèle plus simple, appelé B, a ensuite été conçu : le patient pouvait simplement entrer et sortir de la machine. Cependant, le problème du changement de casque restait présent.

Le modèle C a ensuite été introduit, intégrant un système de positionnement automatique (APS) (figure 67) permettant de régler automatiquement la position du patient[35].

Grâce à l'APS, il était possible d'administrer une série de multiples tirs dans une session automatisée et séquentielle, sans qu'aucun membre de l'équipe n'ait à entrer dans la salle[42].

Le système APS a non seulement réduit le temps nécessaire pour définir les coordonnées stéréotaxiques de chaque iso centre, mais il a également minimisé la dose de radiation reçue par le personnel en dehors de la cible et diminué le risque d'erreur lié au réglage manuel des coordonnées[43-45].

De plus, ce système facilitateur a permis une planification avec un plus grand nombre de tirs et l'utilisation de collimateurs de petite taille, conduisant à une augmentation de la conformité, de la sélectivité et de la pente de décroissance de dose[42-47].

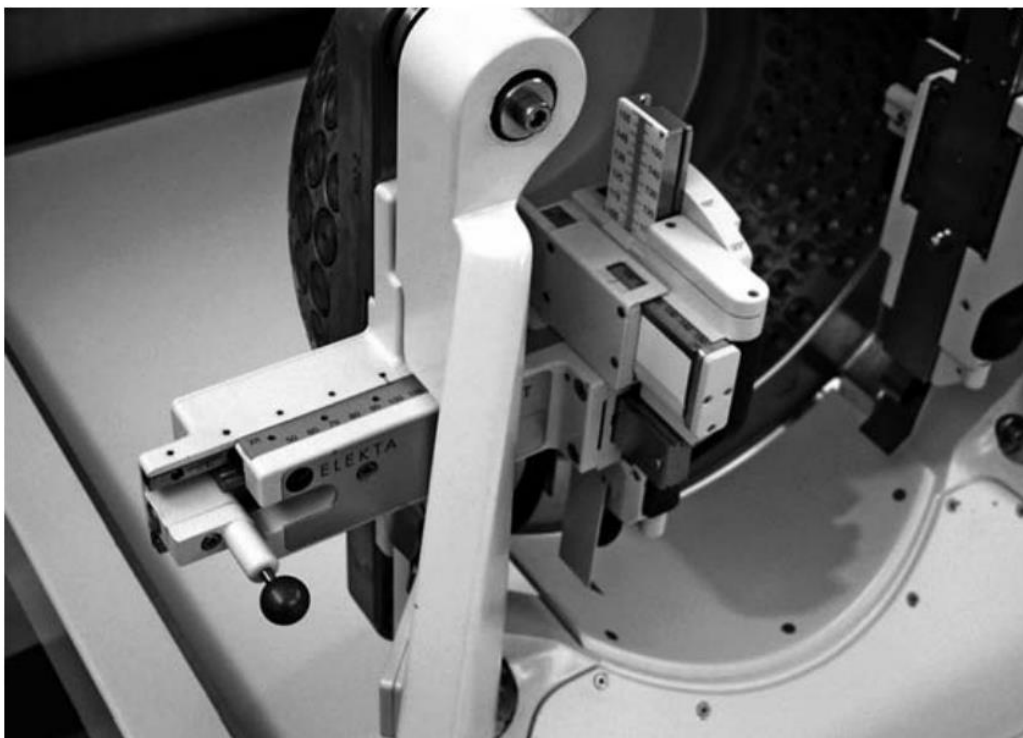


Figure 67 : APS pour le déplacement robotisé des coordonnées du patient [48]



Figure 68 : Unité Gamma modèle 4-C [48]

2.5 Tirs composites :

Dans les modèles U, B et C du Gamma Knife, la collimation du faisceau était répartie entre une collimation interne et un système de collimation externe basé sur un casque amovible.

Chaque casque externe comprenait un ensemble de collimateurs en tungstène amovibles (un par source), avec des ouvertures circulaires permettant de créer des champs de différents diamètres au point focal.

Un sous-ensemble de ces collimateurs pouvait être retiré et remplacé par des bouchons pleins en tungstène afin de bloquer certains faisceaux individuels.

Avec le Gamma Knife Perfexion, les collimateurs du casque externe ont été remplacés par un unique système de collimation interne.

Les sources de cobalt sont regroupées en 8 secteurs, chacun pouvant se déplacer linéairement d'avant en arrière au-dessus du système de collimation interne, avec plusieurs positions d'arrêt.

Comme chacun des 8 secteurs peut se déplacer indépendamment, il est désormais possible de créer des tirs composites, dans lesquels chaque secteur utilise un diamètre de collimateur différent.

Le changement le plus significatif en planification de traitement est la possibilité de générer un isocentre unique composé de faisceaux de diamètres différents (Figure 69). Un tel tir composite permet une distribution de dose optimisée, adaptée à chaque tir individuel[49].

Bien que la distribution d'iso doses résultant des tirs hybrides ne soit pas intuitive et nécessite une certaine expérience, un gain clinique majeur peut être obtenu pour des cibles spécifiques proches de structures critiques, comme les schwannomes vestibulaires[50].

Par rapport aux secteurs bloqués, l'utilisation des tirs hybrides constitue une méthode efficace pour réaliser des traitements conformes, tout en minimisant le temps d'irradiation, ce qui peut également influencer la radiobiologie du traitement[51,52].

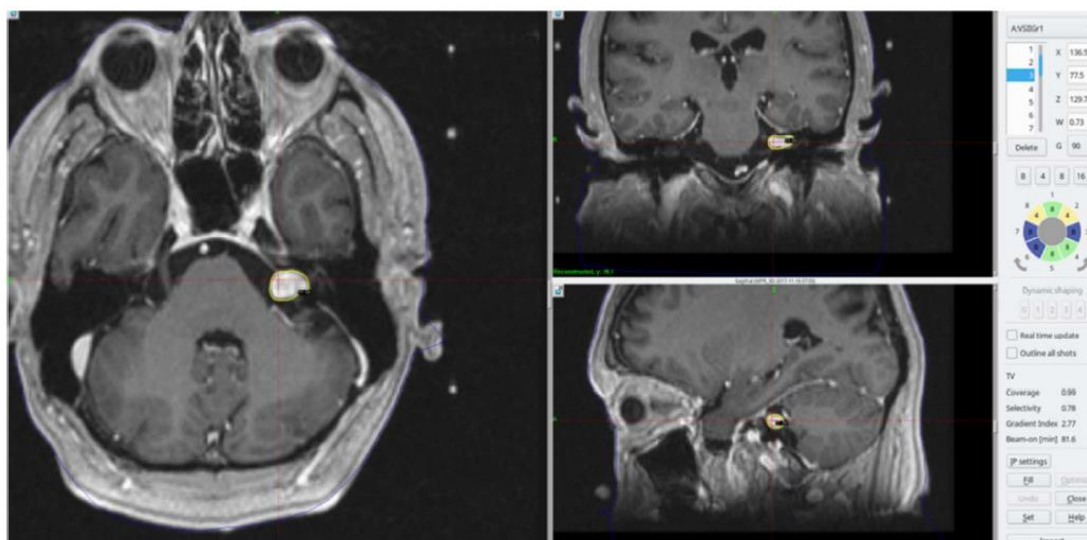


Figure 69 : Dosimétrie d'un schwannome vestibulaire Koos II-III G1 utilisant des tirs hybrides (GammaPlan) [34].

2.6 Planification inverse :

Depuis l'apparition du Gamma Knife II et ses évolutions ultérieures, des plans de traitement plus complexes utilisant plusieurs iso centres permettent d'adapter précisément le volume cible souhaité tout en assurant une haute couverture et sélectivité[53]. Grâce à cette conception particulière, la technique offre des caractéristiques dosimétriques uniques, avec une pente de dose très raide[40,53].

À ce jour, la planification manuelle reste la méthode dominante : chaque iso centre (taille, bouchons, pondération et coordonnées stéréotaxiques) est défini par l'opérateur. Cependant, la planification manuelle nécessite non seulement une expertise technique et de l'expérience, notamment pour les tirs composites, mais elle peut également conduire à une durée de traitement sous-optimale[54].

Des logiciels de planification inverse (IP, Inverse Planning) ont été développés au cours de la dernière décennie.

Ces systèmes reposent sur les caractéristiques de la région cible : l'opérateur prescrit une distribution de dose souhaitée au sein de la cible et définit des contraintes de dose pour certaines structures à risque.

Le système IP automatique recherche alors un ensemble de paramètres permettant d'obtenir un plan de traitement aussi proche que possible de la distribution de dose désirée[54].

L'utilisation de l'IP interactive en temps réel, en combinaison avec GammaPlan, ouvre de nouvelles perspectives.

Les principaux avantages sont la réduction du temps de planification fastidieux, tout en permettant d'interagir intuitivement avec les résultats dosimétriques, en relâchant certaines contraintes ou en renforçant d'autres en fonction de l'expérience clinique et des connaissances radiobiologiques[54].

La mise en œuvre de la planification inverse pourrait également faciliter l'apprentissage des opérateurs moins expérimentés[55].

Une validation par un expert reste nécessaire, afin de tenir compte des informations cliniques individuelles du patient et des spécificités anatomiques locales et de modifier la distribution de dose en fonction de critères cliniques, fonctionnels ou anatomiques[56].

3. Principes physiques de la radiochirurgie stéréotaxique :

La radiochirurgie stéréotaxique (SRS) repose sur la délivrance d'une dose de rayonnement hautement focalisée à l'intérieur d'un volume intracrânien restreint, généralement compris entre 1 et 30 cm³.

Cette technique permet d'obtenir un gradient de dose très élevé, indispensable à la protection des tissus sains avoisinants, grâce à la convergence de multiples faisceaux ionisants en un point précis.

La précision géométrique, de l'ordre du dixième de millimètre, est assurée par l'utilisation d'un cadre stéréotaxique, garantissant une localisation tridimensionnelle exacte de la cible[34].

3.1 Nature des faisceaux ionisants :

Les rayonnements utilisés en radiochirurgie stéréotaxique sont principalement de deux types : les photons et les particules lourdes.

- Photons

Les photons employés peuvent être de deux origines : les rayons gamma et les rayons X.

- Les rayons gamma : principe de la radiochirurgie Gamma Knife®
- La radiochirurgie Gamma Knife® repose sur l'utilisation de rayons gamma issus de la désintégration radioactive du Cobalt-60.
- Les rayons X : principe de la radiochirurgie par accélérateur linéaire (LINAC)
- La radiochirurgie à base de rayons X repose sur l'utilisation de radiations d'origine électronique, produites par l'impact d'un faisceau d'électrons accélérés sur une cible en tungstène à l'intérieur d'un accélérateur linéaire (LINAC)[57].

Les faisceaux ainsi générés peuvent être dynamiques, sous forme d'arcs non coplanaires convergeant vers un volume cible (arc-thérapie), ou statiques, selon les protocoles et la configuration du traitement.

En radiothérapie stéréotaxique par LINAC, l'irradiation est délivrée par de multiples faisceaux selon deux principaux modes :

- L'arc-thérapie, qui consiste à déterminer un iso-centre unique où se croisent plusieurs arcs d'irradiation non coplanaires. Cette approche permet une distribution de dose homogène au sein du volume cible.
- Pour traiter des lésions de forme irrégulière ou non sphérique, des techniques avancées de conformation ont été développées, telles que l'utilisation de multi-iso-centres, ou encore l'optimisation du diamètre et de la pondération des collimateurs pour chaque arc. Leavitt a notamment introduit un système de collimation dynamique, ajustant la taille du faisceau à chaque incrémentation du bras du LINAC le long de sa trajectoire d'arc-thérapie.
- La technique par champs fixes, quant à elle, utilise de petits faisceaux statiques façonnés par un microcollimateur multi-lames ou des caches personnalisés, avec ou sans modulation d'intensité (IMRT).

- Le microcollimateur multi-lames est constitué de lames de tungstène motorisées individuellement, permettant d'adapter avec précision la forme du faisceau à la géométrie de la cible et d'ajuster la dose à l'intérieur de chaque champ d'irradiation.

Par ailleurs, Adler et collaborateurs ont développé un système innovant appelé CyberKnife®, combinant un accélérateur linéaire compact (6 MeV) à un bras robotisé à six axes de rotation. Ce dispositif permet de diriger les faisceaux sous des angles multiples, sans recours à un cadre stéréotaxique rigide.

Le positionnement du patient est assuré en temps réel par deux capteurs radiographiques orthogonaux, qui déterminent en continu la position de la tête et ajustent dynamiquement l'orientation du bras robotisé, garantissant ainsi une précision submillimétrique du traitement [57]

La Distribution de dose est homogène en LINAC, alors qu'elle est hétérogène en Gamma Knife.

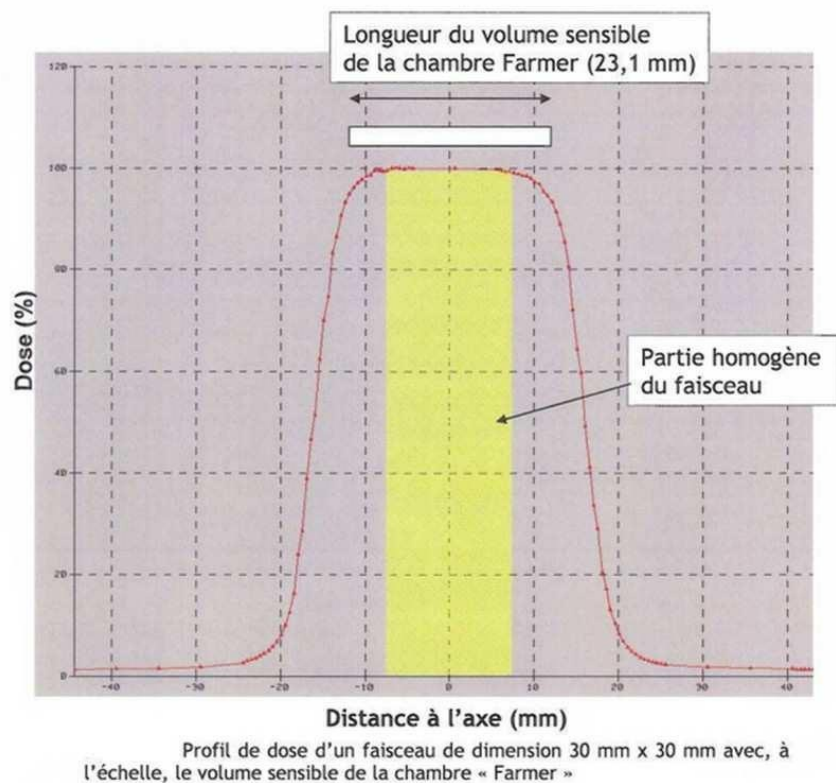


Figure 70 : Distribution de la dose (LINAC)[58]

- **Particules lourdes**

Dès les années 1950, l'utilisation de particules lourdes a été explorée dans le traitement de diverses affections intracrâniennes. Ces particules peuvent être chargées (telles que les protons, les ions d'hélium, de néon ou de carbone) ou non chargées.

- **Principe**

Les particules lourdes se distinguent par un transfert linéique d'énergie (TEL) supérieur à celui des photons, entraînant une ionisation plus dense au niveau de la cible et une diffusion latérale plus faible. Cette particularité permet d'obtenir un gradient de dose extrêmement élevé, limitant davantage l'irradiation des tissus sains environnants.

Des comparaisons dosimétriques ont été réalisées entre différents modes d'irradiation — protons, ions d'hélium, ions de néon, ions de carbone, Gamma Knife et LINAC en arc-thérapie.

L'analyse des histogrammes dose-volume (HDV) issus de traitements par protons, ions de carbone ou photons de 8 MV a montré que le volume cible reçoit une dose uniforme à $\pm 5 \%$, avec 100 % du volume irradié recevant plus de 90 % de la dose prescrite.

Il a également été démontré que la taille du volume cible influence fortement la forme des HDV. Pour les particules chargées (protons, ions carbone), le volume de tissu sain exposé à 80 % de la dose est environ trois fois inférieur à celui de la cible, tandis qu'avec les photons, ce volume est équivalent à celui de la lésion.

Ainsi, la différence devient d'autant plus significative que le volume traité augmente, soulignant la supériorité dosimétrique des faisceaux de particules lourdes pour la préservation des tissus normaux [59]

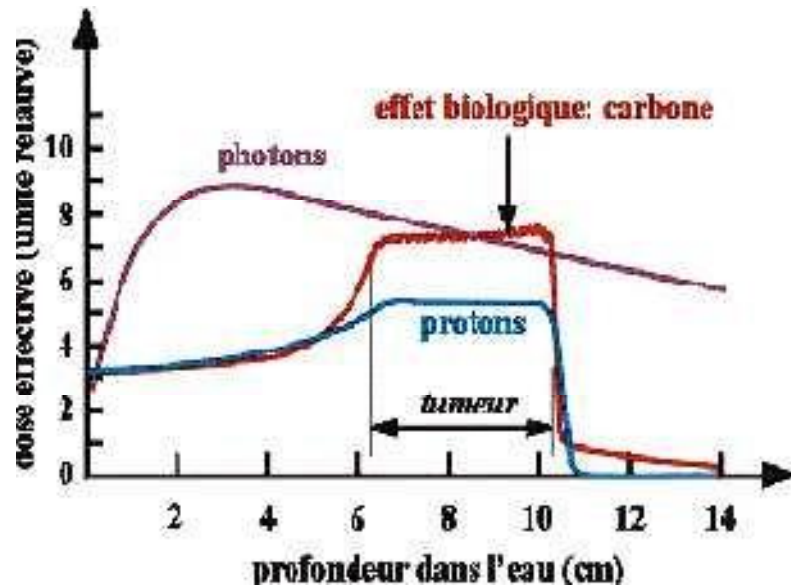


Figure 71 : Histogramme Dose/profondeur (particules lourdes) [60]

3.2 Sélection de la dose et modèle linéaire-quadratique :

La radiothérapie repose sur la différence biologique de radiosensibilité entre les tissus normaux et pathologiques. En pratique, la dose d'irradiation cérébrale fractionnée est généralement comprise entre 1,8 Gy et 3 Gy par fraction, afin de préserver la tolérance du parenchyme cérébral[61].

À l'inverse, la SRS administre en une seule séance une dose élevée de rayonnements ionisants à une cible précisément définie, tout en épargnant les structures avoisinantes.

Le principe fondamental de la radiochirurgie repose sur le fait que de très petits volumes de tissu normal peuvent supporter des doses élevées d'irradiation avec un risque de complication nettement moindre que lorsqu'un volume plus important est irradié[11].

Le modèle linéaire-quadratique (LQ) [36] est la méthode mathématique la plus couramment utilisée pour évaluer les effets équivalents de différents schémas de fractionnement en radiothérapie[11,62].

Ce modèle théorique estime la probabilité de survie cellulaire après une irradiation donnée. Il distingue deux composantes :

- La composante α , qui représente les cassures irréversibles et immédiates de l'ADN double brin causées par chaque fraction de dose,

- La composante β , correspondant à des lésions simples de l'ADN pouvant s'additionner jusqu'à provoquer la mort cellulaire.

La probabilité que la composante β entraîne une destruction cellulaire est proportionnelle au carré de la dose administrée. Le rapport α/β caractérise ainsi la sensibilité d'un tissu donné à la dose et au fractionnement[11].

Les tissus à réponse tardive, comme le cerveau ou la moelle épinière, présentent des valeurs faibles d' α/β (environ 2), tandis que les tissus à prolifération rapide affichent des valeurs de 5 à 8, et la majorité des tumeurs malignes avoisinent 10[11]. Ainsi, les faibles doses par fraction entraînent proportionnellement moins de dommages aux tissus à faible α/β , ce qui justifie le fractionnement en radiothérapie conventionnelle. Les schwannomes vestibulaires, tumeurs à croissance lente, ont un α/β estimé entre 1,6 et 4, avec un consensus autour de 2,4 à 2,5[63,64].

D'après ce modèle, l'équivalence entre différents schémas thérapeutiques peut être calculée selon la formule suivante [36] :

Le modèle linéaire-quadratique, illustré par la relation $EQD2 = D \times [(d + \alpha/\beta) / (2 + \alpha/\beta)]$, traduit mathématiquement cette relation entre la dose délivrée et la survie cellulaire, soulignant le rôle crucial du fractionnement dans la modulation de la réponse tissulaire à l'irradiation.

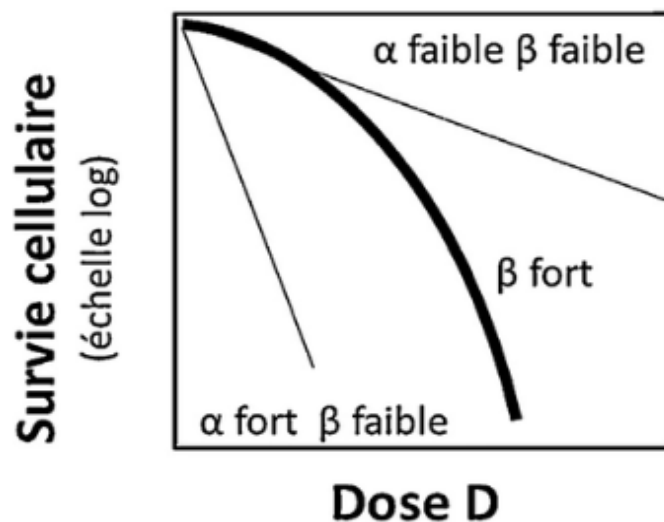


Figure 72 : Modèle linéaire quadratique (relation dose/survie cellulaire) [65]

Cependant, l'application du modèle LQ à la SRS demeure controversée, car il a été validé principalement pour des doses comprises entre 1 et 5 Gy par fraction. Au-delà de ces valeurs, notamment pour les fortes doses utilisées en SRS, ce modèle tend à sous-estimer le contrôle tumoral, ne prenant pas en compte d'autres mécanismes biologiques, tels que les dommages vasculaires ou les réponses immunitaires indirectes [63,66].

Afin de mieux rendre compte des effets biologiques spécifiques de la SRS, plusieurs auteurs ont proposé des modèles alternatifs, adaptés aux fortes doses uniques, notamment le modèle LPL (lethal-potentially lethal)[67].

D'autres variantes du modèle LQ ont intégré de nouveaux paramètres, dérivés d'expériences in vitro et in vivo, permettant une estimation plus précise des effets biologiques à hautes doses uniques. Ces modèles modifiés conservent les avantages de généralisation du modèle LQ original tout en restant valables jusqu'à des doses de 15 à 18 Gy par fraction[62,68].

L'un des principes clés de la SRS repose sur la corrélation entre la tolérance du tissu normal et le volume irradié[69].

La dose délivrée à la périphérie du volume cible ne suffit pas à prédire à elle seule les effets biologiques ou la toxicité du traitement[70].

Cette relation entre dose et effet peut être représentée par deux courbes sigmoïdes dose-réponse, l'une pour l'efficacité et l'autre pour la probabilité de complications. Ainsi, la SRS vise à réduire au maximum le volume irradié, en utilisant des plans hautement conformes, sans marge supplémentaire autour de la cible. À l'inverse, la radiothérapie fractionnée conventionnelle inclut habituellement une marge de sécurité pour compenser les imprécisions de positionnement[69].

La réduction du volume tissulaire exposé augmente l'écart entre les probabilités de guérison et de complication, optimisant ainsi le rapport bénéfice/risque[69].

Enfin, des facteurs tels que l'homogénéité de la distribution de dose, la qualité du gradient, la topographie, la nature de la lésion ou encore la présence de parenchyme cérébral dans le volume cible (comme dans les malformations artérioveineuses ou les

cavernomes) influencent également les effets biologiques sur les cellules tumorales et les tissus sains[37,63,70,71]

3.3 Dose Biologiquement Efficace (BED) :

Les principes physiques fondamentaux du Gamma Knife sont demeurés globalement inchangés depuis sa conception initiale.

L'appareil utilise le Cobalt 60 (^{60}Co) comme source de rayonnement. Cet isotope possède une demi-vie estimée à 5,26 ans, au terme de laquelle il se désintègre pour donner un isotope stable du nickel (^{60}Ni).

Au cours de ce processus de désintégration, il émet un électron d'une énergie maximale de 315 keV ainsi que deux rayons gamma d'énergies respectives 1,17 MeV et 1,33 MeV.

C'est cette radiation gamma qui est exploitée en pratique pour produire les effets thérapeutiques cliniques du Gamma Knife.

Cette décroissance radioactive du Cobalt 60 entraîne des variations notables du débit de dose au fil du temps, et donc du temps total d'irradiation nécessaire pour délivrer une dose prescrite identique au cours d'une séance unique.

De plus, l'utilisation de plusieurs iso centres — avec de courts intervalles entre les tirs (shots) — influence également la durée totale du traitement, indépendamment de la dose prescrite.

Les premières études de radiobiologie appliquées à la radiochirurgie supposaient que la SRS n'entraînait que des effets biologiques aigus, sans prendre en compte l'impact de la variation du débit de dose ni des intervalles entre les tirs, alors que les lésions sublétales peuvent être partiellement réparées durant ces pauses[53].

Le concept de Dose Biologiquement Efficace (BED) remet en question cette vision simplifiée. Il introduit l'idée que les variations de BED, liées à ces paramètres (débit de dose, durée du traitement, intervalle entre tirs), peuvent influencer les résultats cliniques[53]. Cette hypothèse a d'abord été formulée par Hopewell et al., qui ont proposé un modèle de réparation du dommage subléta à deux composantes :

- Une composante rapide, d'une durée inférieure à 15 minutes, représentant un peu moins de la moitié du processus de réparation total ;
- Une composante lente, s'étalant sur 2 à 3 heures[53].

Ce modèle suggère qu'une augmentation de la durée totale du traitement pourrait être associée à une diminution de l'effet biologique global.

Concernant les résultats du Gamma Knife dans le traitement des schwannomes vestibulaires (VS), plusieurs études récentes ont montré que la BED est corrélée de manière linéaire à la variation du volume tumoral [72].

De plus, la morbidité des nerfs crâniens s'est révélée plus élevée chez les patients traités avec un débit de dose initial élevé (sources de Cobalt récentes) que chez ceux traités après décroissance radioactive des sources[53,73].

De la même manière, la préservation auditive après Gamma Knife pour schwannome vestibulaire a été meilleure dans les groupes présentant une BED plus faible[73,74]. Ces résultats suggèrent que la BED doit être prise en considération lors de l'évaluation du bénéfice–risque du traitement radio chirurgical.

Cependant, d'autres études, notamment celle de Villafuerte et al., n'ont trouvé aucune corrélation significative entre la BED, le débit de dose et le contrôle tumoral ou la toxicité[75].

Une limite majeure du concept de BED réside dans sa définition même, certains auteurs prenant en compte uniquement le temps d'irradiation effectif tandis que d'autres intègrent la durée totale de la procédure dans leurs calculs[72,76–78].

Ainsi, l'interprétation radiobiologique des données issues de la SRS demeure encore à un stade préliminaire, et nécessite des études complémentaires pour être standardisée et validée.

3.4 Nature du fractionnement : unique ou multiple :

L'un des principes fondamentaux de la radiothérapie conventionnelle, principalement utilisée dans le traitement des tumeurs malignes, repose sur le fractionnement des doses.

Ce mode d'irradiation permet aux tissus sains de réparer les lésions de l'ADN entre chaque séance, contrairement aux cellules tumorales dont la capacité de réparation est plus limitée.

Le fractionnement favorise également la réoxygénation tumorale, augmentant ainsi la radiosensibilité des cellules cancéreuses, phénomène connu sous le nom d'effet oxygène.

À l'inverse, la radiochirurgie se distingue par l'administration d'une dose unique en une seule séance, exploitant la précision millimétrique du ciblage pour délivrer un traitement à visée curative et anatomique, comparable à un acte chirurgical. C'est de cette analogie entre le scalpel du chirurgien et la focalisation des faisceaux gamma que provient l'appellation "Gamma Knife".

Toutefois, certaines équipes ont étendu le concept en explorant des protocoles fractionnés en conditions stéréotaxiques, désignés sous le terme de radiothérapie stéréotaxique fractionnée, afin de traiter des lésions de volume important ou situées à proximité de structures critiques.

4. Les principes biologiques de la radiochirurgie Gamma Knife :

4.1 Effet biologique des radiations ionisantes :

Les connaissances actuelles en radiobiologie proviennent essentiellement de la radiothérapie conventionnelle [70], où de faibles doses répétées sont administrées à de larges volumes tissulaires. En revanche, la SRS repose sur l'administration unique d'une dose élevée à un volume restreint, ce qui modifie considérablement les mécanismes radiobiologiques impliqués[70].

L'effet antitumoral des radiations ionisantes est complexe et multifactoriel. Selon Withers et Peacock, cinq mécanismes principaux interviennent lors de l'irradiation fractionnée : la réparation des lésions sublétales, la redistribution cellulaire au sein du cycle, la réoxygénation tumorale, la repopulation des cellules survivantes et la radiosensibilité intrinsèque[63,79–81]. Ces principes fondent la logique thérapeutique de la radiothérapie.

Les radiations ionisantes exercent des effets à la fois directs et indirects sur les cellules tumorales[82]. Elles provoquent l'ionisation de l'eau intracellulaire, générant des radicaux libres responsables de la majorité (environ deux tiers) des lésions de l'ADN. Ces

altérations persistent au-delà de l'exposition immédiate. Par ailleurs, les radiations peuvent causer des cassures directes de l'ADN, affectant un ou deux brins de l'hélice. Si une cassure simple est souvent réparée, plusieurs lésions sur un même brin entraînent généralement une destruction cellulaire irréversible. En comparaison avec la RT fractionnée, la SRS augmente la probabilité d'un dommage permanent à l'ADN en raison de la dose beaucoup plus élevée délivrée aux cellules ciblées[10].

Lorsqu'une cellule détecte une atteinte de son ADN, le cycle cellulaire s'interrompt temporairement pour permettre la réparation[8]. Si cette réparation est défectueuse, plusieurs issues sont possibles : catastrophe mitotique, apoptose ou nécrose. La catastrophe mitotique se produit lorsqu'une cellule endommagée entre en mitose malgré l'altération de son matériel génétique, souvent en raison d'un défaut de contrôle du cycle. La mort cellulaire survient alors par apoptose ou nécrose. L'apoptose, caractérisée par la condensation nucléaire et la fragmentation de l'ADN sans inflammation, est plus fréquemment observée dans les tumeurs malignes que dans les tumeurs bénignes après SRS[69,83].

La radiosensibilité varie selon la phase du cycle cellulaire : les phases mitotique et G1 tardive sont les plus vulnérables, tandis que la phase S est relativement résistante[81]. En radiothérapie fractionnée, les irradiations successives permettent une redistribution des cellules dans le cycle, favorisant une exposition cumulative efficace[81]. En revanche, la SRS, administrée en dose unique, ne permet pas d'exploiter cette redistribution[63].

De même, la réoxygénation entre les fractions, essentielle pour sensibiliser les cellules tumorales hypoxiques, ne peut être exploitée en SRS[63]. À l'inverse, la SRS présente un avantage radiobiologique notable : elle limite la repopulation cellulaire tumorale, qui tend à réduire l'efficacité de la RT lorsque la durée de traitement est prolongée[81].

La délivrance d'une dose unique élevée en SRS induit également des effets spécifiques au niveau cellulaire, tissulaire et systémique, distincts de ceux observés avec les schémas fractionnés classiques (1 à 3 Gy/fraction). Les lésions vasculaires locales et l'activation de

réponses immunitaires à distance — connues sous le nom d'effet abscopal — participeraient également à l'action antitumorale de la SRS[63,81].

Enfin, la radiosensibilité différentielle entre le tissu tumoral et le tissu sain environnant détermine le choix du schéma d'irradiation[70]. Toutefois, l'extrapolation directe des données issues de la radiothérapie conventionnelle à la radiochirurgie stéréotaxique demeure limitée et ne doit être envisagée qu'avec prudence

4.2 Effet antitumoral :

L'efficacité de la radiochirurgie Gamma Knife repose avant tout sur l'action biologique des radiations ionisantes, dont l'impact varie selon la cinétique de prolifération des tissus irradiés. Les tissus à croissance lente présentent une réponse retardée à l'irradiation, tandis que ceux à renouvellement rapide réagissent de manière plus précoce. Selon les principes fondamentaux de la radiobiologie cancérologique, décrits par le modèle linéaire-quadratique, le fractionnement des doses permet de protéger les tissus à réponse tardive tout en accentuant les effets létaux sur les tissus à prolifération rapide[84]. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet différentiel, constitue le fondement du ratio thérapeutique, optimisant la sélectivité du traitement radiothérapique[84].

À l'inverse, pour les lésions à prolifération lente — telles que les MAV ou certaines tumeurs bénignes intracrâniennes — l'administration d'une dose unique élevée, comme en radiochirurgie Gamma Knife, permet de préserver les tissus à division rapide tout en induisant des modifications irréversibles dans le tissu pathologique. Ces considérations radiobiologiques ont conduit à une distinction thérapeutique : la radiothérapie stéréotaxique fractionnée est privilégiée pour les tumeurs malignes cérébrales, qu'elles soient primitives (gliales) ou secondaires (métastatiques), tandis que la radiochirurgie en dose unique est réservée aux lésions bénignes ou à croissance lente[85,86].

4.3 Effet anti angiomateux :

Dans le traitement des malformations artérioveineuses, l'intérêt de la radiochirurgie Gamma Knife repose sur son effet anti angiogénique et scléro-oblitérant. Les radiations ionisantes induisent une réaction inflammatoire au niveau des parois

vasculaires, se traduisant par une activation fibroblastique, une prolifération des cellules endothéliales et une augmentation du dépôt de collagène dans la média. Cette cascade d'événements conduit progressivement à une fibrose de l'adventice et à un épaississement pariétal, reproduisant un tableau d'endartérite oblitérante.

À terme, ces modifications morphologiques favorisent la réduction du calibre vasculaire, puis la thrombose complète de la malformation, aboutissant à une oblitération progressive du nidus vasculaire. Ainsi, la radiochirurgie agit non seulement par destruction cellulaire directe, mais également par remodelage tissulaire et vasculaire différé, mécanisme clé de son efficacité dans les pathologies vasculaires intracrâniennes

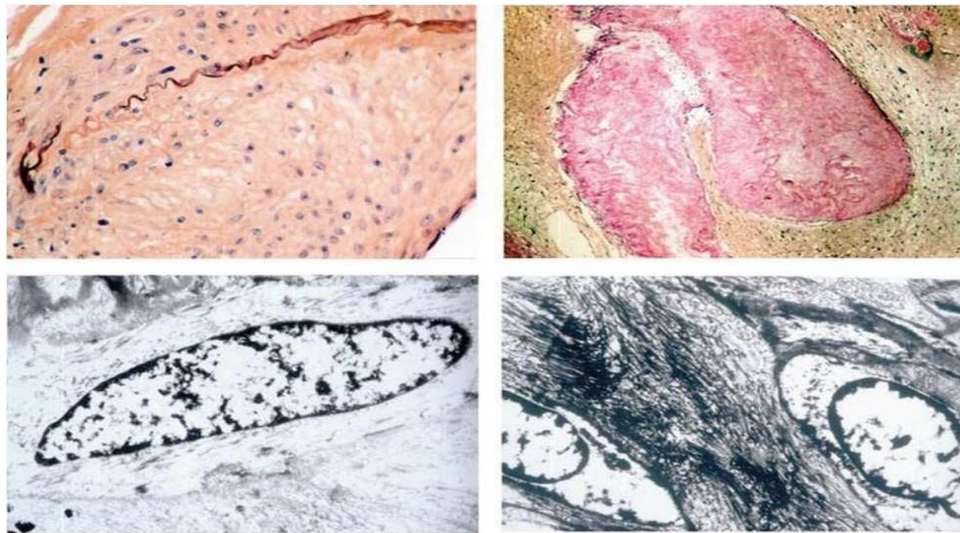


Figure 73 : Prolifération de cellules inflammatoires au niveau de la région sous-endothéliale de la paroi vasculaire d'une MAV après irradiation[87]

5. Intérêt de la radiochirurgie Gamma Knife :

La radiochirurgie Gamma Knife occupe aujourd'hui une place centrale dans la prise en charge des pathologies intracrâniennes, tant tumorales que fonctionnelles ou vasculaires. Son principal intérêt réside dans sa capacité à délivrer une dose de rayonnement hautement focalisée sur une cible déterminée, avec une précision submillimétrique et une épargne maximale des tissus sains environnants.

Cette technique, fondée sur le principe de la convergence de multiples faisceaux gamma issus du Cobalt-60, permet de réaliser une ablation lésionnelle non invasive, sans incision ni anesthésie générale, réduisant ainsi les risques opératoires et les complications postopératoires[88].

Sur le plan clinique, la RCGK représente une alternative thérapeutique efficace pour les patients inopérables ou présentant des contre-indications à la chirurgie conventionnelle. Il offre également la possibilité d'un traitement complémentaire après chirurgie ou radiothérapie, notamment en cas de récurrence ou de résidu tumoral.

La radiochirurgie se distingue par une morbi mortalité faible, un temps d'hospitalisation réduit et une reprise rapide des activités, contribuant ainsi à une meilleure qualité de vie pour les patients[89].

Sur le plan scientifique, cette modalité illustre les avancées majeures de la neuro-oncologie moderne, alliant technologie de pointe, précision géométrique et efficacité thérapeutique. Elle incarne aujourd'hui un outil incontournable de la neurochirurgie fonctionnelle et de la radiothérapie stéréotaxique, dont l'intérêt ne cesse de croître grâce à l'évolution des systèmes de planification et des techniques d'imagerie intégrées[90].

6. Indications :

Les indications de la radiochirurgie Gamma Knife concernent de nombreuses pathologies intracrâniennes, qu'elles soient vasculaires, tumorales ou fonctionnelles.

6.1 Pathologies vasculaires :

a. Malformations artérioveineuses cérébrales :

Les malformations artérioveineuses cérébrales constituent une indication historique de la radiochirurgie Gamma Knife. En effet, le premier traitement avec succès de MAV par radiochirurgie Gamma Knife a été réalisé par Steiner dès 1970. Cet auteur établit qu'une dose d'irradiation suffisante délivrée en une seule séance sur l'ensemble du nidus permettait un processus thrombo-oblitérant aboutissant à l'occlusion des vaisseaux anormaux du nidus (Fig74).

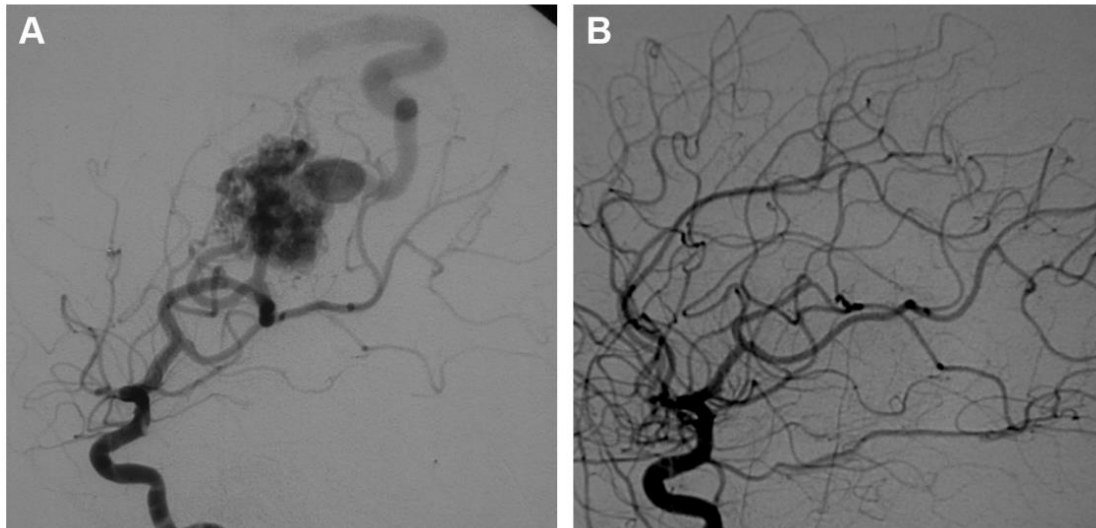


Figure 74 : Malformation artérioveineuse centrale gauche (A) oblitérée 3 ans après un traitement par radiochirurgie Gamma Knife (B).

Il est vrai que l'idée du traitement d'une MAV par irradiation est ancienne puisque dès 1914 Magnus utilisa les propriétés radioactives du radium pour traiter une MAV de la région centrale responsable d'une épilepsie réfractaire. Deux ans après ce traitement il constatait la cessation des crises. À sa suite, plusieurs auteurs dont Cushing et Bailey ont rapporté un effet thérapeutique de l'irradiation de certaines MAV. En dépit de la faible efficacité de la radiothérapie fractionnée dans le traitement des MAV, l'irradiation en une seule fraction, à dose élevée des MAV de petit volume s'est révélée être efficace avec l'avantage d'être non invasive. Depuis l'observation princeps de Steiner, des milliers de patients présentant une MAV ont été traité par radiochirurgie à travers le monde. De manière générale, le volume lésionnel à traiter par radiochirurgie et donc la possibilité de délivrer ou non la dose optimale sont déterminants pour le taux de succès. Cela explique probablement que certaines méta-analyses concernant tous types de MAV rapportent un taux moyen d'oblitération relativement faible de 38 % mais avec des extrêmes allant de 0 à 75 %[91]. Cela illustre la nécessité d'une sélection rigoureuse des indications. La radiochirurgie apparaît particulièrement indiquée pour les MAV de volume limité (grades I et II de Spetzler–Martin). Dans ces indications sélectionnées, le taux d'oblitération peut atteindre 90 % à 5 ans avec une morbidité de 3 % et un temps médian avant oblitération de 30 mois[92]. Ce caractère

retardé de l'effet thérapeutique de la radiochirurgie constitue incontestablement son principal inconvénient avec un taux de saignement de 6 % durant ce délai avant oblitération, parfois à l'origine du décès du patient. La radiochirurgie des MAV est également une option thérapeutique dans la population pédiatrique. Le taux d'oblitération rapporté dans plusieurs séries est de 70 % avec un délai médian avant oblitération de 30 à 49 mois et une morbidité de 2,2 % [93,94]. Le taux de saignement durant la période avant oblitération apparaît équivalent à celui des séries adultes. De fait, il est préférable de proposer la radiochirurgie aux patient présentant une MAV inaccessible chirurgicalement (zone fonctionnelle ou de localisation profonde, telle que le thalamus, les noyaux gris centraux ou le tronc cérébral, même si ces localisations profondes semblent corrélées à une morbidité un peu supérieure de la radiochirurgie), l'exérèse chirurgicale de ces MAV de petit volume en zone non-fonctionnelle permettant leur guérison immédiate avec une morbidité faible inférieure à 2 %. L'augmentation du volume nidal rend souvent nécessaire le recours à des traitements combinés. La radiochirurgie peut parfaitement être envisagée pour le traitement d'un reliquat nidal postopératoire ou après embolisation au même titre qu'une exérèse ou une embolisation puisse être envisagées après la réduction d'un volume nidal par radiochirurgie. Il semblerait toutefois que l'embolisation première réduise le taux d'oblitération de la radiochirurgie et ne doive être proposée qu'en cas de volume nidal inaccessible à la radiochirurgie seule. Cette constatation a encouragé certains auteurs à proposer pour les volumineuses MAV une radiochirurgie en plusieurs temps, traitant différents compartiments du nidus à plusieurs mois d'intervalle. Néanmoins, le taux d'oblitération dans ces conditions est inférieur à 30 % avec une morbidité de 13 % [95]. À noter qu'en cas de reliquat nidal au-delà du délai de l'effet thérapeutique de la radiochirurgie (3 à 4 ans), il est envisageable de proposer un 2^e voire un 3^e traitement par radiochirurgie permettant d'obtenir une oblitération dans 77 % des cas à 5 ans. Néanmoins, la morbidité de ces procédures répétées est augmentée à 10 %.

b. Cavernomes cérébraux :

Les cavernomes constituent une indication controversée de la radiochirurgie. En effet, seul un suivi clinique prolongé permet d'apprécier si ce traitement a modifié l'évolution naturelle du cavernome. Il s'agit en effet d'évaluer si au-delà du délai d'effet thérapeutique de la radiochirurgie le risque annuel de resaignement a diminué. Il peut également être constaté le contrôle d'une épilepsie symptomatique et/ou une diminution du volume lésionnel. Certains auteurs ont ainsi rapporté sur une série significative de patients une réduction du risque annuel de resaignement de 2 à 0,5 %, une amélioration de l'épilepsie dans 45 % des cas et une réduction du volume lésionnel dans 53 % des cas[96]. Il semble donc raisonnable de proposer une radiochirurgie aux patients présentant un cavernome ayant prouvé son potentiel hémorragique par 1 voire 2 épisodes hémorragiques et de localisation d'accès chirurgical difficile. Il s'agit typiquement des cavernomes du tronc cérébral ou des noyaux gris centraux ayant saigné avec le plus souvent une expression clinique.

6.2 Pathologies tumorales :

a. Métastases cérébrales <solides> :

Au cours de la dernière décennie, la radiochirurgie a pris une place croissante dans la prise en charge des métastases cérébrales dites solides. Ces indications concernent des patients présentant un nombre limité de métastases cérébrales, idéalement 1 à 3, mais certains proposent la radiochirurgie pour des métastases multiples plus nombreuses. Le rationnel de la radiochirurgie dans les métastases cérébrales, est, là encore, de proposer un traitement le moins invasif possible et préservant au maximum la qualité de vie, chez des patients dont la pathologie primitive et sa prise en charge impactent déjà cette qualité de vie. La radiothérapie pan encéphalique a longtemps constitué le traitement de référence des métastases cérébrales et ce d'autant que 70 % des patients présentent des métastases multiples au moment du diagnostic. L'émergence de la radiochirurgie dans la prise en charge des métastases cérébrales vient donc remettre en cause le dogme de la radiothérapie pan encéphalique systématique issu des études datant maintenant de plus de 20 ans. En effet les travaux de Patchell et al. en 1990 avaient déjà mis en évidence le bénéfice d'associer à la

radiothérapie pan encéphalique un traitement focal par exérèse chirurgicale en cas de métastase unique. Néanmoins, ces mêmes auteurs en 1998 avaient confirmé l'intérêt de la radiothérapie adjuvante à l'exérèse chirurgicale en termes de contrôle tumoral local et de diminution des récives cérébrales ainsi que des décès d'origine neurologique. Par contre, la radiothérapie pan encéphalique n'apportait pas dans ces études d'augmentation de la survie globale. De la même façon, l'association de la radiochirurgie à la radiothérapie pan encéphalique s'est révélée bénéfique en termes de contrôle tumoral et de score fonctionnel pour des patients présentant jusqu'à 4 métastases (recommandation de niveau 1) et bénéfique en termes de survie pour les patients présentant une métastase unique. Ce bénéfice en termes de survie semble néanmoins exister jusqu'à 3 métastases cérébrales (recommandation de niveau 2)[97]. La radiochirurgie seule a également été comparée à l'association radiothérapie + chirurgie et radiothérapie + radiochirurgie. Les résultats de la radiochirurgie seule apparaissent équivalents à ceux du traitement de référence associant chirurgie et radiothérapie panencéphalique en termes de survie, de décès d'origine neurologique ou de score fonctionnel en cas de métastase unique (recommandation de niveau 1) et probablement jusqu'à 3 métastases (recommandation de niveau 3)[97]. En définitive, l'association de la radiothérapie panencéphalique à la radiochirurgie (comme à la chirurgie) en cas d'un nombre limité de métastases (1 à 3) n'augmente pas la survie globale mais diminue uniquement le risque de récive locale et cérébrale[98]. Ces données permettent d'envisager la radiochirurgie comme traitement premier d'un nombre limité de métastases cérébrales sous couvert d'une surveillance remnographique permettant le traitement par radiochirurgie de nouvelles métastases selon un schéma de « radiochirurgie à la demande ». Cette proposition thérapeutique doit naturellement s'inscrire dans une prise en charge globale tenant compte de la situation oncologique de chaque patient déterminant sa classe pronostique. Il est toutefois à noter que l'étude de patients longs survivants traités par radiochirurgie de métastases cérébrales a révélé des patients présentant initialement une mauvaise classe pronostique. La nature de la pathologie primitive ne conditionne pas l'indication de la radiochirurgie, à l'exception des carcinomes pulmonaires à petites cellules.

La radiochirurgie peut néanmoins être proposée en cas de nouvelles métastases cérébrales d'un carcinome pulmonaire à petites cellules chez les patients ayant déjà été traités par radiothérapie pan-cérébrale. De manière générale, l'antécédent de radiothérapie pan-cérébrale ne contre indique pas la radiochirurgie (et vice et versa), ne nécessitant qu'une adaptation de la dose délivrée. Il est intéressant de constater que les métastases cérébrales réputées radio-résistantes comme celles des carcinomes rénaux ou des mélanomes sont sensibles à la radiochirurgie compte tenu de sa radiobiologie liée à la dose unique. En définitive, la radiochirurgie, compte tenu de son caractère peu invasif et de sa faible morbidité est devenue une option thérapeutique importante dans la prise en charge des patients présentant un nombre limité de métastases cérébrales dont la préservation de la qualité de vie apparaît essentielle (Figure 75). Selon la situation oncologique, elle peut être utilisée seule ou en association avec les autres options thérapeutiques, qu'il s'agisse de la chirurgie, de la radiothérapie panencéphalique fractionnée, la radiothérapie stéréotaxique hypo fractionnée ou la chimiothérapie.

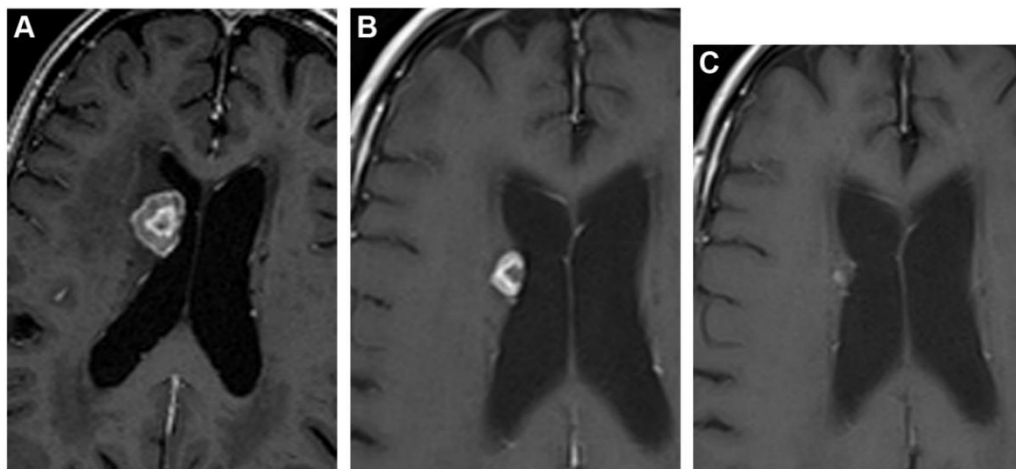


Figure 75 : Métastase cérébrale d'adénocarcinome pulmonaire (A) contrôlée à 3 mois (B) et à 6 mois (C) d'un traitement par radiochirurgie Gamma Knife[97]

b. Les schwannomes intracrâniens :

Les schwannomes intracrâniens constituent un cadre nosologique illustrant particulièrement bien les champs d'application de la radiochirurgie. Il s'agit en effet de tumeurs bien limitées, souvent de petit volume développé au dépend et au contact de structures fonctionnelles.

- **Schwannome vestibulaires :**

Les schwannomes vestibulaires (neurinomes de l'acoustique) sont des tumeurs bénignes, à croissance généralement lente, développées au dépend de la portion vestibulaire de la 8e paire de nerfs crâniens. Ils sont généralement révélés par une baisse progressive unilatérale de l'audition. Dès 1969, Leksell et Noren ont défendu la radiochirurgie comme alternative à la chirurgie dans la prise en charge des schwannomes vestibulaires. Cette prise en charge chirurgicale, proposée dès le début du XXe siècle par Cushing et Dandy, était alors la seule option thérapeutique avec bien souvent comme principal objectif la préservation du pronostic vital face à des tumeur de volume significatif. Le diagnostic précoce de ces tumeurs par l'imagerie moderne, à un stade d'audition encore fonctionnelle, a permis une meilleure compréhension de leur histoire naturelle et d'évaluer des prises en charge non invasives telles que la surveillance ou la radiochirurgie. Les objectifs de la radiochirurgie sont alors le contrôle de la croissance tumorale (Figure 76), la préservation d'une audition encore fonctionnelle, avec un minimum de risque fonctionnel, notamment à l'égard du nerf facial au contact du schwannome et une préservation de la qualité de vie.

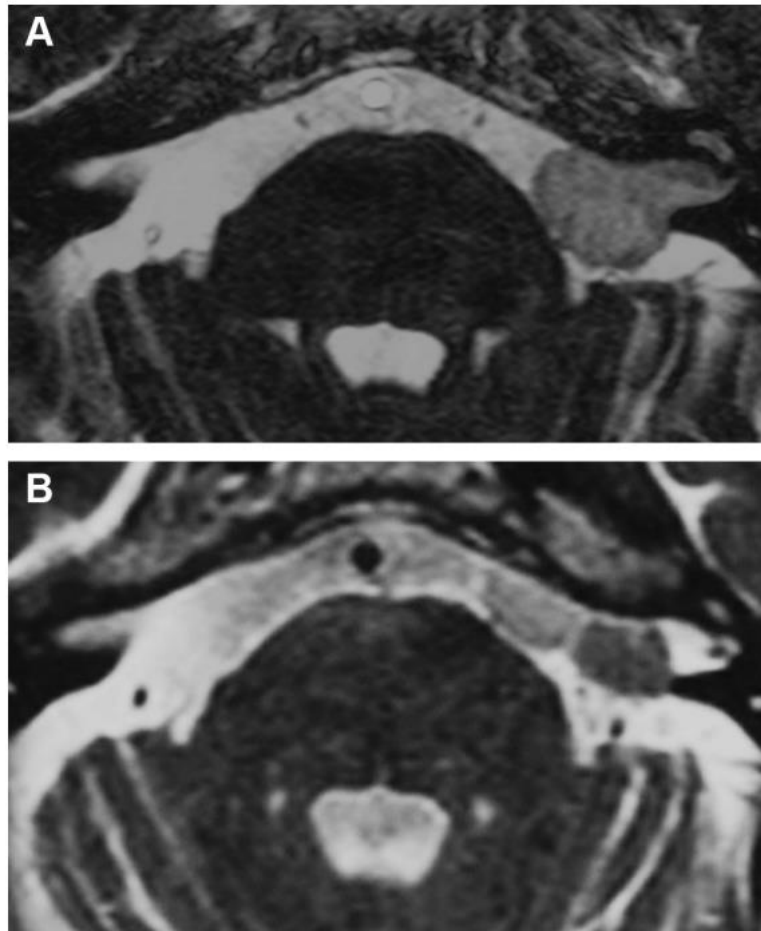


Figure 76 : Schwannome vestibulaire gauche avant (A) et 4 ans après un traitement par radiochirurgie Gamma Knife (B)[99]

Depuis 40 ans que la radiochirurgie est proposée dans cette indication, 50 000 patients ont été traités par radiochirurgie Gamma Knife à travers le monde. Ses résultats à long terme sont aujourd'hui bien documentés[99]. Les améliorations techniques concernant les logiciels de planification dosimétrique, l'imagerie stéréotaxique de haute résolution, l'optimisation de la dose et la robotique ont considérablement amélioré les résultats et diminué la morbidité. Les indications de la radiochirurgie en matière de schwannomes vestibulaires doivent être, à notre sens, systématiquement discutées en concertation multidisciplinaire. Elles concernent essentiellement les schwannomes de petit volume, selon le grading de KOOS à savoir les stades 1 (intra-canalaires) et 2 (avec extension dans l'angle ponto-cérébelleux sans contact avec le tronc). Néanmoins, ces indications peuvent

régulièrement être étendues aux stades 3 (contact du schwannome avec le tronc) en tenant compte du risque chirurgical que représente le terrain du patient. Les stades 4 (déformation du tronc et du 4^e ventricule) sont des indications chirurgicales tant que le terrain du patient les permet. D'après les résultats publiés les plus récents, le contrôle tumoral peut être obtenu dans 93 à 100 % des cas, en fonction du volume traité[99,100]. Tous stades confondus, le contrôle tumoral est obtenu dans 98 % des cas (réduction de volume : 73 %, stabilité : 25 %) avec un taux d'augmentation de volume nécessitant une exérèse chirurgicale de 2 %. Dans certaines séries de schwannomes intra-canalaire, le contrôle tumoral a été obtenu dans 100 % des cas[101]. En termes de préservation de l'audition, une revue de la littérature (45 publications, 4234 patients) a permis de documenter une préservation de l'audition pré-thérapeutique dans 61 % des cas tous stades confondus[102]. Cette préservation d'audition peut atteindre 70 à 85 % pour les meilleures classes d'audition pré-thérapeutique (classes I et II de Gardner-Robertson) et les schwannomes de très petit volume (intra-canalaire)[101]. En définitive, les meilleurs facteurs pronostiques de conservation d'audition sont un index d'intelligibilité de 80 %, une perte tonale de moins de 20 dB, un âge inférieur à 60 ans, un développement purement intra canalaire, un volume inférieur à 0,75 cm³ autorisant une dose à la cochlée inférieure à 4,5 Gy. De fait, certains auteurs argumentent le traitement précoce par radiochirurgie des schwannomes vestibulaires de stade I qui permettrait une meilleure préservation de l'audition que la surveillance[103]. Aux doses thérapeutiques actuellement pratiquées (12 à 13 Gy à l'iso dose marginale) le taux de déficit facial post-radique est devenu inférieur à 1 % et le taux de souffrance trigéminal inférieur à 3%[99].

- **Autres schwannomes intracrâniens :**

Avec les mêmes objectifs de contrôle de la croissance tumorale et de préservation fonctionnelle, les schwannomes du trijumeau, du facial et des nerfs mixtes constituent également de bonnes indications de la radiochirurgie permettant le contrôle de la croissance tumorale dans plus de 90 % des cas.

c. Méningiomes intracrâniens :

Les méningiomes, tous grades confondus, sont des tumeurs éminemment chirurgicales. En effet leur exérèse complète, et notamment celle de leur insertion méningée, permettent d'obtenir la guérison stricto sensu. La problématique est celle du caractère complet de cette exérèse qui s'avère difficile voire impossible dans certaines localisations telles que la base du crâne ou les localisations para-sagittales avec envahissement du sinus sagittal supérieur compte tenu des rapports vasculonerveux du méningiome. Dans ces situations, le recours à la radiochirurgie permet d'obtenir le contrôle de la croissance tumorale, à savoir la stabilisation du volume lésionnel voire sa diminution. Le contrôle tumoral à 5 ans et à 10 ans est obtenu dans 95 % et 88,5 % des cas respectivement[71]. Ainsi, les méningiomes du sinus caverneux constituent une indication de première intention de traitement par radiochirurgie, surtout s'ils sont symptomatiques par une diplopie, une hypoesthésie ou des paresthésies faciales. Dans cette indication, le contrôle tumoral peut être obtenu dans 86 % à 95 % des cas à 5 ans et dans 82 % à 92 % des cas à 10 ans[104]. La possibilité de traiter l'ensemble du volume lésionnel à une dose suffisante apparaît comme toujours déterminante. Dans les situations où le volume lésionnel est excessif ou lorsque les rapports anatomiques avec les voies visuelles sont trop contraints, le recours à une irradiation en mode fractionné s'avère plus indiqué. Quel que soit le traitement conservateur utilisé, il apparaît nécessaire d'en évaluer le résultat à long terme, au-delà de 10 ans, par un suivi clinique et par imagerie (IRM) régulier compte tenu de l'histoire naturelle des méningiomes[105]. Les méningiomes d'autres régions de la base du crâne, caractérisées par un accès chirurgical délicat et des rapports anatomiques neurovasculaires en particulier les localisations pétro-clivales, du foramen jugulaire et du foramen magnum constituent également des indications pertinentes de radiochirurgie, de première intention si le volume tumoral le permet ou en complément d'une exérèse chirurgicale incomplète ayant permis une réduction du volume tumoral tout en préservant le pronostic fonctionnel du patient en laissant un reliquat tumoral au contact ou englobant des structures fragiles tels que les nerfs mixtes, le tronc cérébral ou la carotide interne dans son trajet intra pétreux. Compte tenu de

l'efficacité de la radiochirurgie sur les méningiomes de petit volume, l'opérateur n'est donc plus obligé d'obtenir une exérèse complète dans ces localisations difficiles au prix de séquelles fonctionnelles. Dans les méningiomes agressifs (grades 2 et 3) la radiochirurgie peut permettre le contrôle d'une récurrence chez un patient ayant déjà été traité par chirurgie et radiothérapie, alors qu'une exérèse est difficilement envisageable compte tenu de l'envahissement d'un sinus veineux, notamment le sinus sagittal supérieur[105].

La littérature converge aujourd'hui vers l'utilisation d'une dose marginale d'environ 12 Gy, considérée comme le meilleur compromis entre contrôle tumoral et préservation des structures neurovasculaires. Cette tendance à la réduction des doses vise notamment à limiter les complications telles que l'œdème radio-induit ou les atteintes des nerfs crâniens.

En cas de progression tumorale après radiochirurgie, une re-irradiation par Gamma Knife peut être proposée, généralement bien tolérée, comme le rapportent plusieurs séries[106,107]. La majorité des travaux confirment qu'une dose de 12 Gy assure un contrôle satisfaisant. L'étude d'Iwai et al. (Osaka) constitue une exception notable : avec un schéma de faible dose (minimum 8 Gy), un taux de récurrence de 6 % a été observé, suggérant une couverture insuffisante [108]

Les données antérieures montrent par ailleurs que les récurrences sont plus fréquentes lorsque la dose marginale est inférieure à 12 Gy[109]. À ce jour, et malgré la dépendance actuelle aux analyses de survie type Kaplan-Meier, la dose de 12 Gy demeure la recommandation la plus fiable pour les méningiomes de petit à moyen volume, assurant un équilibre optimal entre efficacité et sécurité.

d. Autres tumeurs de la base du crâne :

À l'instar des méningiomes et pour les mêmes raisons d'environnement fonctionnel et de difficultés d'accès chirurgical, la radiochirurgie peut être proposée seule ou en complément d'une exérèse incomplète pour différents types lésionnels développés au niveau de la base du crâne. Il s'agit essentiellement des chondromes et chondrosarcomes ou des tumeurs glomiques jugulaires. Dans le cas des chondromes et chondrosarcomes, la radiochirurgie est le plus souvent indiquée pour le traitement d'un reliquat postopératoire.

Le contrôle local ainsi obtenu peut atteindre 80 % à 5 ans dans le cas des chondrosarcomes[110]. Le résultat obtenu sur les chondromes est moins bon tant ces tumeurs présentent une agressivité locale importante. Le contrôle de ces tumeurs par la radiochirurgie est évalué à 53 % à 5 ans après une seule procédure radio chirurgicale et à 63 % après 2 traitements par radiochirurgie. De fait, la place de la radiochirurgie dans la prise en charge des chondromes se positionne davantage comme une réirradiation après radiothérapie fractionnée de tumeurs opérées (et souvent multi opérées)[110]. Les tumeurs du glomus jugulaire quant à elles apparaissent sensibles à la radiochirurgie puisque le contrôle tumoral est obtenu dans 98 % des cas au prix d'une morbidité de 8,5 % et une mortalité nulle[111]. Cette modalité thérapeutique revêt un intérêt particulier dans la prise en charge des tumeurs à potentiel hémorragique, situées au sein d'un environnement anatomique riche en structures vasculaires et nerveuses essentielles (veine jugulaire, nerfs mixtes), bien que leur exérèse complète soit possible dans un certain nombre de cas. Là encore le choix de la radiochirurgie doit prendre en compte le volume lésionnel et les possibilités chirurgicales.

e. Tumeurs sellaires et sus sellaires :

- **Adénomes hypophysaires :**

Les deux objectifs d'un traitement par radiochirurgie dans ce cadre nosologique sont soit le contrôle d'une endocrinopathie pharmaco résistante liée à un adénome sécrétant, soit le contrôle de la croissance d'un volume tumoral, le plus souvent relatif à un adénome non fonctionnel, qui pourrait devenir menaçant pour les voies visuelles. De fait, il s'agit rarement d'une indication de première intention, l'exérèse chirurgicale permettant de répondre à ces objectifs de façon plus radicale lorsqu'elle est complète. La radiochirurgie constitue donc un traitement adjuvant à une exérèse chirurgicale incomplète alors que le traitement médicamenteux ne permet pas le contrôle de l'endocrinopathie ou que le reliquat d'un adénome non fonctionnel augmente de volume. Le contrôle de la croissance tumoral par radiochirurgie est bien documenté, souvent supérieur à 90 % des cas, et ce de façon comparable au taux de contrôle par radiochirurgie des autres tumeurs bénignes accessibles

à cette modalité thérapeutique. Le taux moyen de contrôle tumoral sur une revue de 1283 patients était de 96 % en considérant dans les critères de contrôle tumoral les réductions de volume mais également les stabilités lésionnelles[112]. Le contrôle de l'endocrinopathie est moins facile à évaluer dans la littérature tant les critères biologiques voire cliniques utilisés apparaissent variables d'une équipe à l'autre. De fait, le taux de contrôle de l'hypercorticisme de la maladie de cushing varie de 17 % à 83 % selon les séries, nécessitant parfois plusieurs procédures radiochirurgicales[112]. Les données les plus récentes sont en faveur d'un taux de contrôle de 54 %[113]. Pour les mêmes raisons, les taux de contrôle de l'acromégalie peuvent varier de 20 % à 96 %. Il apparaît envisageable d'obtenir dans cette indication une guérison (sans traitement médicamenteux) dans 47,5 % des cas et un contrôle de l'endocrinopathie dans 57,5 % des cas[114]. Le taux de contrôle de l'hyperprolactinémie semble inférieur, les résultats les plus récents d'une équipe de référence étant en faveur d'un taux de contrôle de l'endocrinopathie de 27 %, d'une diminution de l'hyperprolactinémie dans 54,5 % des cas, mais d'une aggravation de l'hyperprolactinémie dans 18 % des cas[115]. Quel que soit le type d'adénome traité, l'effet biologique de la radiochirurgie est retardé, survenant généralement dans les 2 ans après le traitement, parfois constaté à 4 ou 5 ans. La morbidité de la radiochirurgie dans la prise en charge des adénomes hypophysaires est faible. Un hypopituitarisme est rapporté dans 0 à 40 % des cas, selon les séries et le type d'adénome traité[112,114]. L'atteinte des voies visuelles sous la forme d'une anomalie du champ visuel ou d'une baisse d'acuité visuelle (jusqu'à la cécité) apparaît bien inférieure à 1 % si l'on considère les interactions avec d'éventuels traitements antérieurs (chirurgie et ou radiothérapie) et les comorbidités du patient (diabète et âge). Les autres neuropathies, oculomotrices ou trigéminales, sont de l'ordre de 1 %, sachant qu'elles sont régressives dans la moitié des cas[112]. La place de la radiochirurgie dans la prise en charge adénomes hypophysaires est donc celle d'un traitement adjuvant à la chirurgie et aux traitements médicamenteux en cas de reliquat ou de récurrence tumorale inopérable comme ceux développés au sein du sinus caverneux. Concernant la prescription on observe une tendance à prescrire des doses plus faibles pour les adénomes hypophysaires non fonctionnels,

puisque la seule finalité thérapeutique est le contrôle de la croissance tumorale. Dans la littérature, les doses moyennes ou médianes rapportées varient entre 12 et 20 Gy[116,117].

En revanche, pour les tumeurs responsables d'une endocrinopathie, la dose prescrite tend à être plus élevée, car une dose supérieure est nécessaire pour supprimer l'hypersécrétion hormonale, même lorsqu'une réduction volumétrique de la tumeur est observée[118]. Les valeurs de dose et les volumes cibles seront discutés plus en détail dans les sections consacrées à chaque type tumoral.

- **Craniopharyngiomes :**

La radiochirurgie s'est également révélée être un traitement adjuvant recevable en cas de reliquat ou de récurrence de craniopharyngiome dont l'exérèse complète conditionnant le pronostic n'est pas toujours aisée. Les craniopharyngiomes apparaissent sensibles aux doses de radiochirurgie habituellement délivrées aux tumeurs bénignes, voire à des doses plus faibles. Les courbes de survie sans progression révèlent un contrôle tumoral de 85 % à 3 ans et de 67 % à 5 ans[119]. Ces indications potentielles de radiochirurgie doivent naturellement être confrontées à celles d'une radiothérapie fractionnée, en fonction des rapports fonctionnels du reliquat tumoral et de l'âge du patient, les séquelles neuropsychologiques de la radiothérapie étant particulièrement redoutées chez l'enfant. Les reliquats ou récurrences kystiques, souvent volumineux, ne sont pas des indications de la radiochirurgie, et sont préférentiellement traités par brachythérapie (injection en condition stéréotaxique d'un isotope radioactif au sein du kyste).

Dans une série rétrospective spécifique, la dose marginale moyenne n'a pas été précisée en raison d'une grande variabilité des prescriptions, allant de 3 à 25 Gy, reflétant l'importante variabilité des volumes tumoraux observée dans les travaux d'Ulfarsson et al. Toutefois, cette série a démontré que le contrôle de la croissance tumorale était significativement associé à l'administration d'une dose marginale d'au moins 6 Gy[120].

- f. **Tumeurs de la région pinéale :**

Certaines tumeurs de la région pinéale, principalement les tumeurs primitives du parenchyme pinéale de bas grade (pinéalcytomes), compte tenu de leur volume limité et de

leur environnement fonctionnel, peuvent être traitées par radiochirurgie avec un taux de contrôle supérieur à 95 %[121].

6.3 Pathologies fonctionnelles :

Alors que l'idée initiale de Leksell était de développer la radiochirurgie pour le traitement de pathologies fonctionnelles, le développement de ces indications a eu lieu bien après celui des pathologies vasculaires et tumorales détaillées ici. En effet, plus que dans toute autre indication, la performance de l'imagerie apparaît décisive puisqu'il s'agit de cibler des structures anatomiques, souvent petites, et non des lésions. [1] La radiosensibilité varie d'un patient à l'autre. Ainsi, même lorsqu'une dose est délivrée avec précision, il demeure impossible de prédire avec certitude l'évolution de la lésion ni la trajectoire qu'elle adoptera à partir de son foyer. Une étude rigoureuse menée conjointement par le Pittsburgh Gamma Knife Center et l'Université du Maryland à Baltimore souligne que les connaissances actuelles restent insuffisantes et que le recul clinique manque encore pour établir des recommandations fermes concernant l'usage du RCGK dans les indications fonctionnelles. Les auteurs préconisent de réserver l'ablation par RCGK aux situations où l'intervention est clairement justifiée et où l'état général du patient contre-indique d'autres options thérapeutiques. Ils estiment également que l'emploi du RCGK devrait se limiter pour l'instant à la maladie de Parkinson et aux tremblements essentiels, considérant que son utilité dans d'autres pathologies demeure à ce jour incertaine[122].

a. Névralgies trigéminales :

L'utilisation de radiations ionisantes pour le traitement d'une névralgie trigéminal n'est pas une idée neuve, puisqu'un tel traitement a été effectué par radiothérapie en 1897 par Hermann Moritz. Cette radiothérapie non sélective est devenue obsolète au début des années 1960 avec le développement des traitements médicamenteux et l'amélioration des techniques chirurgicales. L'usage de la méthodologie radiochirurgicale pour le traitement des névralgies trigéminales s'est développé au début des années 1990 grâce à la précision du Gamma Knife et à l'intégration de l'imagerie de haute résolution dans les logiciels de planification permettant le ciblage du nerf trijumeau. La radiochirurgie peut être proposée

dans les névralgies trigéminales essentielles ou symptomatiques, y compris dans le contexte de la sclérose en plaques. Il convient naturellement d'exclure de cette indication les algies faciales neuropathiques, que la radiochirurgie pourrait d'ailleurs aggraver. La radiochirurgie Gamma Knife apporte dans les indications de névralgie trigéminal essentielle un taux élevé de contrôle de la symptomatologie douloureuse (75 % à 90 %) au prix d'une morbidité sous la forme d'une neuropathie trigéminal s'exprimant par une hypoesthésie ou des paresthésies dans 10 à 30 % des cas, mais quasiment jamais par une douleur neuropathique[123]. Le taux de succès est d'autant plus élevé que le patient n'a jamais été traité par une autre modalité thérapeutique. L'effet thérapeutique est retardé en moyenne de 6 semaines à 2 mois. Il ne faut pas méconnaître un taux de récurrence de 20 à 35 % comme dans les autres techniques percutanées[123]. De par son caractère totalement non invasif, son efficacité et sa faible morbidité, la radiochirurgie est devenue une alternative aux autres techniques percutanées, qu'il s'agisse de la thermo coagulation rétro-gasserienne par radiofréquence ou de la compression par ballonnet du ganglion de Gasser. Compte tenu de son efficacité immédiate et durable, la décompression microchirurgicale du trijumeau reste proposée aux patients les plus jeunes, acceptant les risques inhérents à toute intervention chirurgicale.

b. Mouvements anormaux :

Alors que la neurochirurgie fonctionnelle des mouvements anormaux a regagné un champ d'application grâce aux interventions de neuromodulation induite par la stimulation cérébrale profonde, celles-ci peuvent être limitées par le vieillissement de cette population de patients avec ses comorbidités associées. Le caractère totalement non invasif de la radiochirurgie permet d'envisager la réalisation de thalamotomies chez des patients pour lesquels la stimulation cérébrale profonde est contre indiquée. Celles-ci peuvent être envisagées dans le cadre des tremblements essentiels, de tremblements parkinsoniens ou de dyskinésies volitionnelles de la sclérose en plaque. La cible est la partie postéro-inférieure du noyau ventral intermédiaire du thalamus. Cette cible est le plus souvent unilatérale mais peut être envisagée de façon bilatérale en 2 temps distincts. Une étude récente [124]

rapporte une amélioration significative chez 79 % des patients, 19 % d'entre eux n'ayant présenté aucune amélioration. Les complications observées étaient à type d'hémi-parésie transitoire (2,3 %), de dysphagie (1,2 %) ou d'hypoesthésie faciale (1,2 %).

c. Epilepsies pharmaco résistantes :

Depuis une vingtaine d'années, les possibilités de traitement par radiochirurgie Gamma Knife des épilepsies pharmaco résistantes d'origine temporale ont été étudiées et font encore l'objet d'une étude multicentrique internationale. L'irradiation en dose unique des structures temporo-mésiales (amygdale, hippocampe, cortex entorhinal) permet d'obtenir chez 60 % des patients un contrôle durable de l'épilepsie[125]. Toutefois, cette efficacité de la radiochirurgie est corrélée au caractère purement temporo-mésial du foyer épileptogène et apparaît nettement plus faible en cas d'implication du pôle temporal et/ ou des structures néocorticales temporales[126]. Ce type d'indication de la radiochirurgie doit toujours être discuté avec le traitement de référence que constitue l'exérèse chirurgicale des structures temporo-mésiales.

Un autre champ des épilepsies pharmaco-résistantes accessible à la radiochirurgie Gamma Knife est celui des hamartomes hypothalamiques. En fonction de sa configuration anatomique, une radiochirurgie de l'hamartome permet une amélioration cognitive et comportementale très significative dans 59 % des cas avec absence de crise (37 %) ou persistance de crises rares non handicapantes (22 %)[127]. Qu'il s'agisse des épilepsies d'origine temporales ou symptomatiques d'un hamartome hypothalamique, l'inconvénient de la radiochirurgie consiste, là encore, au caractère retardé de son effet thérapeutique.

7. Tolérance :

La tolérance de la radiochirurgie Gamma Knife est globalement excellente, ce qui explique son utilisation croissante dans le traitement des pathologies intracrâniennes.

Les effets indésirables liés à l'irradiation sont classiquement distingués en deux catégories chronologiques : les effets aigus, survenant au cours des trois premiers mois suivant le traitement, et les effets tardifs, qui apparaissent de manière différée, parfois plusieurs mois ou années après l'irradiation[60].

a. Effets aigus :

Les effets indésirables précoces apparaissent généralement dans les semaines suivant la séance et sont le plus souvent mineurs, transitoires et réversibles.

Ils se manifestent typiquement par des céphalées, nausées, vomissements, vertiges ou encore une exacerbation temporaire des symptômes neurologiques préexistants.

Ces signes cliniques sont principalement liés à la survenue d'un œdème cérébral aigu localisé au niveau de la zone irradiée. Leur prise en charge repose sur l'administration de corticoïdes, entraînant une amélioration rapide des symptômes.

Les réactions aiguës sévères demeurent exceptionnelles ; de rares cas de déficits neurologiques transitoires peuvent nécessiter une hospitalisation à visée symptomatique.

La tolérance globale du traitement dépend toutefois de plusieurs paramètres : le volume irradié, la dose délivrée, la localisation de la cible et la proximité de structures critiques[128].

En comparaison avec la radiothérapie conventionnelle, la radiochirurgie Gamma Knife se distingue par une incidence nettement plus faible des complications aiguës, grâce à la focalisation millimétrique de la dose et à la préservation du parenchyme sain[60].

b. Effets tardifs :

Les effets secondaires tardifs sont rares, mais peuvent concerner le parenchyme cérébral et se manifester par une radionécrose focale, conséquence d'une ischémie et d'une destruction tissulaire progressive dans la zone à forte dose.

Le risque de ces complications augmente proportionnellement au volume irradié et à la dose maximale délivrée, en particulier lors d'une irradiation en fraction unique.

Des études expérimentales sur le modèle animal ont permis d'établir les seuils de tolérance tissulaire : chez le singe, aucune anomalie histologique n'est observée à 10 Gy, des micro nécroses de la substance blanche apparaissent à 15 Gy, tandis qu'à 20 Gy, on observe des lésions nécrotiques diffuses, létales pour l'animal.

Chez l'homme, les données restent limitées pour l'irradiation encéphalique en dose unique.

Une étude du Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) a montré qu'une dose de 10 Gy pouvait être administrée sans complication à court terme dans le cadre du traitement de métastases cérébrales, bien que le suivi à long terme ait été restreint en raison de la mortalité élevée des patients dans les mois suivant l'irradiation [128]

Dans la pratique clinique, la radiochirurgie Gamma Knife bénéficie d'un excellent profil de tolérance, du fait de la limitation du volume irradié et du gradient de dose particulièrement abrupt, qui assurent une préservation optimale des tissus sains environnants.

II. Discussion des résultats :

1. Aperçu sur la radiochirurgie gamma knife à l'échelle internationale et nationale :

Depuis sa mise en service, la radiochirurgie par Gamma Knife a permis de traiter plus d'un million de patients à travers le monde, avec une activité annuelle estimée à plus de 75 000 nouveaux traitements. Cette technologie, devenue une référence mondiale en radiochirurgie intracrânienne, occupe aujourd'hui une place déterminante dans la prise en charge stéréotaxique des pathologies cérébrales[129,130].

Parmi les centres de référence , l'Hôpital de la Timone à Marseille se distingue avec environ 27 000 patients traités en 30 ans, illustrant l'ampleur et la maturité clinique de cette technique[131]. D'autres centres internationaux confirment cette dynamique. Ainsi, le Lancaster General Hospital (États-Unis) a documenté 1 188 procédures réalisées sur sept ans, soit une moyenne annuelle d'environ 170 traitements[132]. L'Université de Pittsburgh Medical Center, pionnière du domaine, a traité 445 patients en une seule année lors du lancement du modèle Perfexion™[133]. Au centre hospitalier universitaire de Sherbrooke (Canada) a rapporté 534 traitements sur une période de 2,4 ans, soit environ 225 procédures annuelles[134]. En Europe, le Centre ULB de Bruxelles a mené plus de 2 000 traitements en dix ans, avec une moyenne annuelle variant entre 225 et 287[135]. Le centre Medical Institute Berezin Sergey à Novosibirsk (Russie) a également rapporté environ 1 400 patients traités par an depuis la mise en service de son système Perfexion[136].

Plus récemment, une étude menée en Colombie entre 2010 et 2022 a recensé 1 906 interventions, soit environ 159 traitements par an, confirmant l'expansion de la radiochirurgie dans les pays à revenu intermédiaire[137]. De même, au Royaume-Uni, le Leeds General Infirmary a rapporté près de 4 000 lésions traitées par radiochirurgie stéréotaxique chez plus de 1 100 patients entre 2010 et 2020, témoignant du haut niveau d'intégration de cette technologie dans les systèmes de santé développés[138].

Ces comparaisons mettent en évidence une disparité importante du volume d'activité selon le niveau d'équipement, la disponibilité technologique et la formation des équipes médicales. Toutefois, les résultats cliniques et radiologiques de notre série concordent avec ceux rapportés par les grandes études internationales, confirmant la fiabilité, la précision et la sécurité du système Gamma Knife, même dans un contexte de démarrage d'activité.

À l'échelle africaine, la radiochirurgie Gamma Knife demeure limitée à un petit nombre de centres spécialisés, principalement en raison des contraintes économiques et des infrastructures médicales. Néanmoins, l'activité connaît une croissance soutenue, particulièrement en Afrique du Nord. Le Maroc se positionne aujourd'hui comme un acteur majeur du développement continental grâce à la présence du Centre National de Réhabilitation et de Neurosciences de Rabat, qui a traité plus de 2 000 patients depuis son ouverture, avec une moyenne annuelle comprise entre 200 et 250 procédures[139]. Le CHU Mohammed VI de Marrakech, à travers ses équipes de neurochirurgie et d'oncologie radiothérapie et de radiologie, participe activement à cette dynamique nationale.

Ainsi, le développement progressif du Gamma Knife au Maroc illustre l'intégration croissante des technologies de pointe dans le système de santé national, soutenue par la montée en compétence des équipes locales et l'amélioration continue des infrastructures. Cette évolution ouvre la voie à une autonomie technique accrue et à une participation plus active du Maroc à la recherche clinique internationale dans le domaine de la radiochirurgie cérébrale.

Tableau IX : Récapitulatif du nombre des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife dans les différents centres internationaux

Centre/Institution	Pays	Période d'activité en année	Nombre total de patients traités	Moyenne annuelle
Hôpital de la Timone Marseille	France	30	≈ 27 000	≈ 900
Lancaster General Hospital	États-Unis	7	1 188	170
University of Pittsburgh Medical Center	États-Unis	1	445	445
Centre Hospitalier Universitaire de Sherbrooke (CHUS)	Canada	3	534	225
Centre Universitaire Libre de Bruxelles (ULB)	Belgique	9	2 028	225–287
Medical Institute Berezin Sergey (MIBS), Novosibirsk	Russie	1	≈ 1 414	1 414
Colombian Gamma Knife Center, Bogotá	Colombie	12	1 906	159
Leeds General Infirmary	Royaume-Uni	10	1 113 patients (3 940 lésions)	≈ 394
Centre National de réhabilitation et neuroscience de Rabat (CNRN)	Maroc	8	> 2 000	200–250

Tableau X : Statistique par ELEKTA :[140]

Source	Elekta Global Registry
Période d'activité en année	50
Nombre total de patients traités	> 1 000 000 cumulés
Moyenne annuelle	> 75 000

2. Données épidémiologiques :

En synthèse, bien que limitée par son effectif restreint, notre étude reflète l'épidémiologie attendue des patients pris en charge par radiochirurgie Gamma Knife dans un centre en développement : âge moyen autour de 50-55 ans, prédominance féminine pour certaines indications, concentration des patients en milieu urbain et indications dominées par les tumeurs bénignes et les lésions vasculaires. Ces résultats soulignent la nécessité d'actions visant à améliorer la couverture géographique et l'équité d'accès au diagnostic et aux soins spécialisés au Maroc, afin d'élargir la population bénéficiaire de ces techniques.

2.1 Répartition selon l'âge :

L'analyse de notre étude de sept patients montre un âge moyen de 53,3 ans. Ces résultats rejoignent ceux rapportés par Hancevic et al. (2025), qui ont observé un âge moyen similaire dans une série de 241 patients traités par radiochirurgie Gamma Knife pour des malformations artérioveineuse[141,142].

De même, l'expérience menée à l'Université de Toronto a retrouvé un âge moyen de 55 ans[143], tout comme celle de l'Université de Virginie, qui rapporte un âge moyen de 54ans[144]. En Colombie, la série de Castro et al. portant sur 1 906 patients traités par Gamma Knife entre 2010 et 2022 montre un âge moyen de 52 ans [145] ; en Russie, le MIBS rapporte environ 1 400 patients traités par an, majoritairement pour des tumeurs bénignes du SNC, avec un âge moyen de 50 ans [136] ; tandis qu'au Royaume-Uni, la série du Leeds General Infirmary (2023) rapporte 3 940 lésions traitées chez 1 113 patients, avec un âge moyen de 51 ans[138].

Au CNRNR de Rabat, l'âge moyen était de 51 ans[139]. Ces variations selon les centres s'expliquent probablement par la diversité des pathologies traitées, les différences de recrutement et les spécificités démographiques régionales.

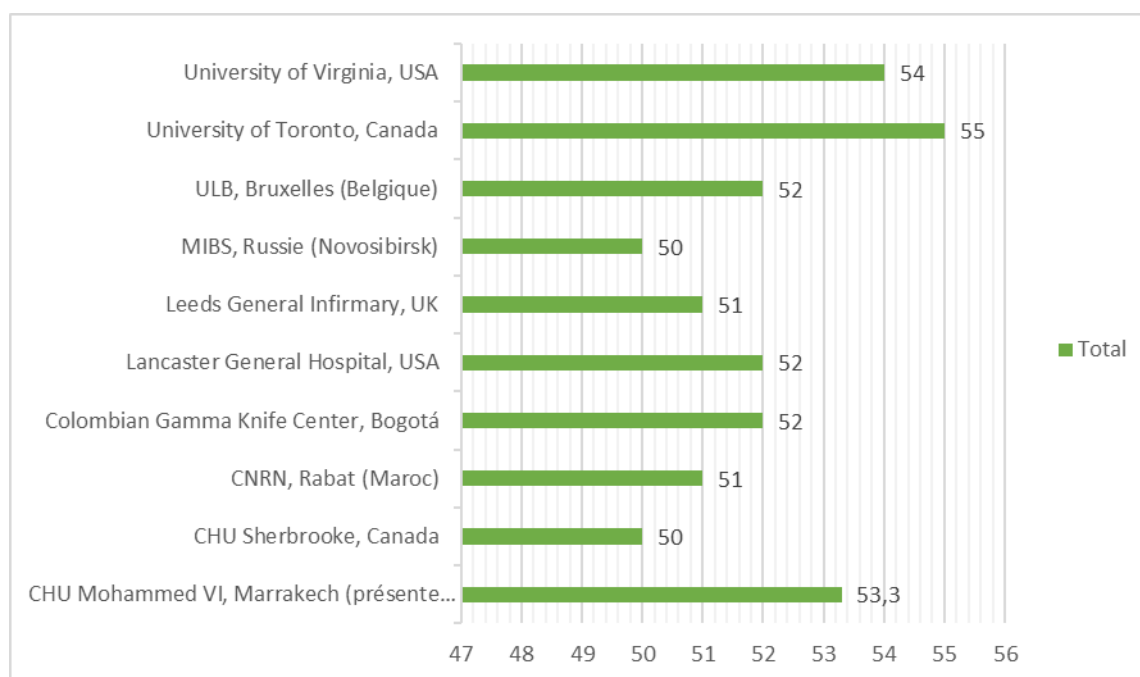


Figure 77 : Age moyen dans les différents centres de radiochirurgie Gamma Knife dans le monde (compris entre 50 et 55 ans)

2.2 Répartition selon le sexe :

L'analyse de notre étude de sept patients montre une prédominance féminine (71,4 %). Ces résultats rejoignent ceux rapportés par Hancevic et al. (2025), qui ont observé une nette prédominance féminine dans une série de 241 patients traités par radiochirurgie Gamma Knife pour des malformations artérioveineuses[141,142]. De même, l'expérience menée à l'Université de Toronto a retrouvé une prédominance féminine (59 % de femmes contre 41 % d'hommes)[143], tout comme celle de l'Université de Virginie, qui rapporte 60 % de femmes contre 40 % d'hommes[144]. En Colombie, la série de Castro et al. (2023) montre une légère prédominance féminine (54 %) [145] ; en Russie, le Medical Institute Berezin Sergey rapporte une légère prédominance féminine majoritairement pour des tumeurs bénignes du SNC[136] ; tandis qu'au Royaume-Uni, la série du Leeds General Infirmary (2023) rapporte 3 940 lésions traitées chez 1 113 patients, dont 57 % de femmes[138].

Au CNRNR de Rabat, la répartition est quasi équilibrée, avec 50,51 % d'hommes et 49,49 % de femmes, traduisant une absence de prédominance nette dans cette population[139]. Ces variations selon les centres s'expliquent probablement par la diversité

des pathologies traitées, les différences de recrutement et les spécificités démographiques régionales.

Tableau XI : Répartition selon le sexe des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife selon les différents centres

Centre / Pays	Répartition par sexe
CHU Mohammed VI, Marrakech (Maroc)	♀ 71,4 % / ♂ 28,6 %
CNRN, Rabat (Maroc)	♀ 49,5 % / ♂ 50,5 %
University of Virginia, USA	♀ 60 % / ♂ 40 %
University of Toronto, Canada	♀ 59 % / ♂ 41 %
ULB, Bruxelles (Belgique)	♀ 55 % / ♂ 45 %
Leeds General Infirmary, UK	♀ 57 % / ♂ 43 %
MIBS, Russie (Novosibirsk)	♀ 53 % / ♂ 47 %
Colombian Gamma Knife Center, Bogotá	♀ 54 % / ♂ 46 %

2.3 Répartition selon l'origine géographique et la couverture sociale :

Sur le plan de la couverture sociale et de l'origine géographique, notre série montre que 86 % des patients provenaient de zones urbaines et que la majorité bénéficiait d'une couverture sociale (AMO/CNSS). Ce profil reflète une double réalité : d'une part, la concentration des moyens diagnostiques et thérapeutiques (IRM, équipes spécialisées, plateaux techniques) en milieu urbain ; d'autre part, des barrières d'accès persistantes pour les patients résidant en zones rurales — un constat documenté par des rapports internationaux sur les inégalités d'accès aux technologies de pointe en santé[146,147].

Concernant la répartition des indications, notre série est dominée par les méningiomes et les lésions vasculaires (MAV, cavernome), et les neurinomes de l'angle ponto-cérébelleux suivis d'un cas de névralgie trigéminal. Cette distribution est conforme aux pratiques rapportées dans la littérature, où les tumeurs bénignes (méningiomes, schwannomes) et les malformations vasculaires constituent les principales indications de la RCGK dans les centres spécialisés[148,149].

3. Données cliniques et radiologiques :

3.1 Présentation clinique :

Dans notre série de sept patients, la symptomatologie révélatrice était dominée par les signes d'HTIC — complets ou incomplets — observés chez la majorité des cas, suivis par des troubles vestibulaires (neurinomes de l'angle ponto-cérébelleux), un syndrome frontal avec crises comitiales (MAV) et une névralgie trigéminale fonctionnelle. Cette diversité clinique correspond aux profils généralement rapportés dans la littérature : les méningiomes et les lésions comprimant les espaces sous-arachnoïdiens se manifestent fréquemment par des céphalées et des signes d'HTIC, tandis que les schwannomes vestibulaires se révèlent le plus souvent des troubles auditifs et vestibulaires.[150,151]

3.2 Imagerie et volumes cibles :

Les imageries pré-thérapeutiques de notre étude essentiellement des IRM ont permis un contournage précis des volumes cibles — volumes compris entre 0,01 et 20 cm³ selon la nature de la lésion ainsi que l'identification systématique des organes à risque (tronc cérébral, nerfs crâniens, chiasma optique). L'importance d'un contournage volumétrique rigoureux, en particulier pour assurer des taux élevés de contrôle local et une réduction des complications[152-154].

4. Données thérapeutiques :

4.1 Méningiome :

Pour les méningiomes de petit volume (10-15 cm³), la radiochirurgie Gamma Knife prescrit classiquement des doses marginales comprises entre 12 et 16 selon la taille, la proximité des organes à risque et l'histologie d'après les grandes séries internationales, telles que celles rapportées par Goldman et al. (Cancers, 2024) et Moraes et al.[149,155]. L'utilisation de dose marginale de 8Gy (observation n°5) et 10 Gy (observation n°1) sont conformes aux recommandations les plus conservatrices[109]. Le recours à une collimation mixte et au grand nombre de tirs est cohérent avec l'objectif d'obtenir une conformation dosimétrique fine autour d'une petite cible irrégulière.

4.2 Cavernome protubérantiél :

La radiochirurgie des cavernomes est moins standardisée que pour les MAV ou tumeurs bénignes ; les études décrivent des schémas variables — doses marginales généralement comprises entre 12 et 18 Gy[156], la collimation fine (4 mm) étant préférée pour réduire l'irradiation du parenchyme adjacent. La prescription d'une dose marginale de 10 Gy (observation n°2) se situe dans la plage la plus fréquemment rapportée pour réduire le risque d'œdème péri lésionnel, surtout dans les localisations profondes[157]. Néanmoins, pour des cavernomes symptomatiques et de petit volume, une stratégie plus agressive peut être choisie en balance du risque hémorragique naturel[158].

4.3 Neurinome de l'acoustique :

Pour les schwannomes de l'APC, la recommandation de dose marginale se situe classiquement autour de 12-13 Gy pour préserver l'audition et limiter la neuropathie faciale. Néanmoins une dose marginale ≤ 12.5 Gy est associée à un meilleur profil fonctionnel, mais des prescriptions de 14-16 Gy sont parfois utilisées pour des résidus ou des tumeurs à caractère plus agressif [159,160]. Les doses marginales utilisées dans notre série 8 Gy et 10 Gy correspondent aux recommandations rapportées dans la littérature, visant un contrôle local maximal et une préservation de l'audition (observation n°7, n°8).

L'utilisation d'une collimation mixte et d'un grand nombre de tirs reflète la tentative d'optimiser la conformation autour d'un résidu difficile.

4.4 Malformation artérioveineuse :

Pour les MAV, la pratique courante consiste à administrer une dose marginale unique comprise entre 18 et 25 Gy, ajustée en fonction de la taille du nid et de son débit vasculaire.

La littérature rapporte une relation dose-réponse positive, selon laquelle la probabilité d'oblitération complète augmente avec la dose marginale délivrée[161]. Cependant, lorsque le volume du nid est important, des approches alternatives telles que la radiochirurgie fractionnée ou la radiochirurgie en plusieurs étapes (staged GKS) sont souvent privilégiées afin de réduire le risque de complications neurologiques, notamment l'œdème ou l'hémorragie post-radique[162].

Dans notre série, le volume traité (20 cm³) peut être considéré comme relativement élevé pour une séance unique.(Observation n°3).

La prescription d'une dose marginale de 12 Gy adoptée dans notre série est non concordante avec les pratiques recommandées pour obtenir une oblitération complète du nid vasculaire mais s'est avérée nécessaire vu le risque majeur d'œdème post radique effectivement observée chez notre patient

4.5 Névralgie trigéminal :

En radiochirurgie pour névralgie trigéminal, la pratique la plus répandue est la délivrance d'une dose marginale élevée (généralement 40–45 Gy) au point de la racine sensitive, avec un tir unique et une collimation 4 mm[163]. La prescription de 42 Gy(observation n°6) correspond donc parfaitement aux pratiques établies et est associée à des taux élevés de soulagement initial (70–85 %), avec un risque de dysesthésie faciale lié au volume et à la dose délivrés[164].

5. Evolution clinique et radiologique :

5.1 Méningiome :

La plupart des séries de RCGK rapporte des taux de contrôle tumoral à moyen terme élevés pour les méningiomes de petit volume, généralement compris entre 80 % et 95 % à 3–5 ans, avec des taux de régression tumorale variables selon la durée du suivi (plus de 70 % de régression dans certaines séries à long terme)[165,166]. Nos deux observations montrent une stabilité radiologique au suivi (concordance radiologique 100 % pour cette sous-population) et une amélioration clinique faite d'une amélioration voire une disparition des symptômes. Ces résultats s'alignent avec la littérature qui signale une excellente maîtrise locale après RCGK pour méningiomes de petits à moyens volume

Les taux de radionécrose dans la littérature varient entre 1 % et 6 %, principalement pour des volumes >8–10 cm³.Un œdème post RCGK symptomatique survient dans 2–5 % des cas, habituellement réversible sous corticothérapie[167]. Nos deux patientes n'ont présenté aucune complication, ce qui est cohérent avec la littérature pour des méningiomes de petit volume (<5 cm³).

5.2 Cavernome :

La prise en charge radiochirurgicale des cavernomes reste discutée, mais des séries récentes montrent que la RCGK réduit l'incidence hémorragique annuelle et peut conduire à une stabilisation ou une diminution volumétrique des lésions, avec un risque faible mais réel d'effets indésirables radio-induits[168]. Dans notre série , la patiente (observation n°2) montre une stabilité radiologique à 1 an et 2ans et une amélioration clinique des céphalées — résultat compatible avec les séries récentes qui rapportent une réduction significative du taux annuel d'hémorragie et une proportion importante de stabilité/régression après RCGK[169].

Le risque principal après RCGK est la réaction œdémateuse péri-lésionnelle (jusqu'à 10 %), rarement symptomatique[170].

5.3 Neurinome de l'acoustique :

Les deux cas traités dans notre série ont présenté une stabilité radiologique et une amélioration clinique partielle faite d'une amélioration des céphalées et stabilisation de l'hypoacousie, sans détérioration fonctionnelle majeure rapportée au suivi intermédiaire. Ces résultats s'accordent avec les méta-analyses récentes qui documentent un bon contrôle tumoral de l'ordre de 87–98 % et des taux de conservation d'audition variables selon la dose reçue au niveau de la cochlée. Les taux de conservation de l'audition varient largement entre 40 % et 70 % après RCGK, tout en rappelant que la préservation auditive dépend fortement de la dose marginale[159,171].

Dans la littérature, les complications rapportées incluent une hypoacousie progressive (10–30 % à long terme), des troubles de l'équilibre (5–15 %) et une névrite faciale transitoire (<5 %).

Les séries récentes, telles que celle de Schumacher et al et Tuleasca et al[172,173], confirment que ces risques diminuent significativement avec les doses marginales ≤ 12 –13 Gy.

Dans nos deux cas, aucune aggravation auditive ni névrite faciale n'a été rapportée.

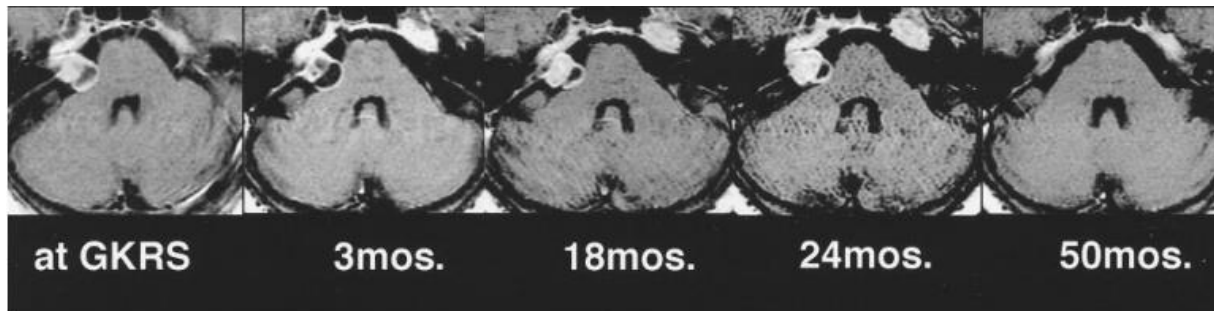


Figure 78:Contrôle tumoral d'un neurinome de l'acoustique après 50 mois [174]

5.4 MAV :

Dans la littérature, l'oblitération nidale après RGCK dépend de la dose marginale, de la compacité du nid et du volume ; des taux d'oblitération $> 60\%$ sont rapportés pour des doses marginales ≥ 18 Gy, mais la probabilité d'oblitération diminue significativement lorsque le volume dépasse $\sim 10\text{--}15\text{ cm}^3$, et les nids volumineux présentent un risque accru de complications[175]. Dans notre série, le patient porteur d'une MAV de 20 cm^3 traité par une dose marginale de 12 Gy a présenté une régression volumétrique importante (de $32,5 \times 31\text{ mm}$ à $10 \times 6\text{ mm}$ sur un an) et une amélioration clinique significative sans aucune complication, ce qui illustre la bonne tolérance malgré un grand volume traité. Ce résultat correspond aux descriptions de certaines séries où des nids « compacts » à haut débit peuvent répondre favorablement à des doses élevées, bien que la stratégie fractionnée soit souvent privilégiée pour les volumes comparables[176].

Les complications les plus décrites dans la littérature sont les hémorragies post-traitement (2–6 %), l'œdème radiogénique (jusqu'à 10 % dans les gros nids) et les crises comitiales transitoires. L'étude de Hasegawa et al. confirme que le risque est étroitement lié au volume nidal et à la dose marginale[177]. Notre observation a confirmé cette tendance avec une évolution stable sans complication.

5.5 Néuralgie trigéminal :

La RCGK pour néuralgie trigéminal montre dans la littérature des taux de soulagement initial élevés ($\geq 75\text{--}85\%$), avec une durabilité décroissante dans le temps ; 30–

60 % à moyen-long terme selon les séries[178,179].Les complications sont essentiellement sensorielles, notamment hypoesthésie faciale (6-10 %) et dysesthésie (<2 %), avec une corrélation forte à la dose appliquée (>90 Gy).Une revue récente de Lee S. et al rapporte une hypoesthésie transitoire dans <10 % des cas, sans impact fonctionnel majeur[180].

Dans notre série la patiente a rapporté une amélioration clinique partielle sans complication que ce soit à court ou à moyen terme.



I. Forces de l'étude :

L'une des principales forces de notre étude réside dans son originalité et sa pertinence clinique. Il s'agit en effet de la première étude menée au sein de notre formation consacrée spécifiquement à la radiochirurgie Gamma Knife, une technique de haute précision encore peu décrite dans le contexte marocain.

Notre travail se distingue par son caractère descriptif exhaustif, portant sur une série de patients pris en charge au CHU Mohammed VI de Marrakech. La diversité des indications traitées — méningiomes, neurinomes de l'angle ponto-cérébelleux, cavernome, malformation artérioveineuse et névralgie essentielle du trijumeau — illustre clairement l'étendue des applications cliniques de cette technologie.

Sur le plan méthodologique, l'étude s'appuie sur une collecte rigoureuse de données cliniques, radiologiques et dosimétriques, permettant une évaluation complète de la tolérance et de l'efficacité du traitement. Le suivi régulier annuel offre une analyse objective de l'évolution clinique et radiologique, mettant en évidence une stabilité lésionnelle dans la majorité des cas et une tolérance remarquable, sans complications post-thérapeutiques majeures.

Enfin, cette étude constitue une contribution scientifique originale et une base de référence nationale pour l'essor et l'intégration de la radiochirurgie stéréotaxique Gamma Knife dans la prise en charge des pathologies intracrâniennes bénignes et fonctionnelles au Maroc.

II. Limites de l'étude :

Cependant, certaines limites doivent être reconnues.

Le nombre restreint de patients ($n=7$) limite la force statistique et la généralisation des résultats.

De plus, la nature rétrospective et descriptive de l'étude ne permet pas d'établir de corrélation causale entre les paramètres dosimétriques et les réponses cliniques ou radiologiques.

Le suivi à moyen terme (1an et 2ans) reste insuffisant pour évaluer pleinement la stabilité tumorale à long terme ou la survenue d'effets secondaires tardifs.

Par ailleurs, l'absence d'un groupe comparatif traité par chirurgie conventionnelle ou radiothérapie fractionnée restreint la possibilité de mettre en évidence la supériorité relative de la radiochirurgie.

Enfin, certaines informations manquantes ou incomplètes dans les dossiers médicaux ont pu limiter la précision de certaines analyses. Malgré ces limites, les résultats obtenus demeurent cohérents avec les données de la littérature internationale et confirment la pertinence et la sécurité de la radiochirurgie Gamma Knife dans la prise en charge des lésions intracrâniennes bénignes ou fonctionnelles.

III. Perspectives et recommandations :

L'expérience acquise à travers cette première série de patients traités par radiochirurgie Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech ouvre plusieurs perspectives pour le développement futur de cette modalité thérapeutique dans notre institution.

Il apparaît nécessaire, en premier lieu, de renforcer le recrutement des patients en améliorant la collaboration interdisciplinaire entre les services de neurochirurgie, neurologie, radiologie, ORL et oncologie radiothérapie, afin d'identifier précocement les indications relevant de la radiochirurgie. La création d'un comité pluridisciplinaire de radiochirurgie permettrait d'optimiser la sélection des cas, d'uniformiser les protocoles de planification et de suivi, et de favoriser les échanges de compétences.

Sur le plan technique, l'investissement dans des protocoles d'imagerie pré- et post-thérapeutiques standardisés (IRM 3D haute résolution, angio-IRM, fusion multimodale) améliorerait la précision du contourage et la reproductibilité des résultats.

La mise en place d'un registre institutionnel ou national de radiochirurgie, regroupant les données cliniques, dosimétriques et radiologiques, permettrait d'assurer un suivi à long terme, de contribuer à la recherche multicentrique, et de positionner le Maroc comme un acteur reconnu dans le domaine de la neurochirurgie de précision.

Par ailleurs, il serait souhaitable de développer la formation continue du personnel médical et paramédical dans le domaine de la physique médicale, du contrôle qualité et des nouvelles technologies de planification. L'organisation de formations, de stages et de collaborations internationales avec des centres à haut volume (Chine, Marseille, Bruxelles, Pittsburgh) renforcerait l'expertise locale et la pérennité du programme.

Enfin, à moyen terme, l'élargissement de l'indication du Gamma Knife à certaines pathologies fonctionnelles (névralgies faciales, tremblements essentiels, épilepsies focales) pourrait être envisagé, dans le cadre de protocoles prospectifs validés, afin d'augmenter l'impact clinique de cette technologie.

Ainsi, la consolidation de cette activité repose sur une approche intégrée alliant développement technique, formation, recherche clinique et coopération inter hospitalière, permettant de faire du CHU Mohammed VI un centre de référence régional en radiochirurgie stéréotaxique



La radiochirurgie par Gamma Knife représente aujourd'hui l'une des avancées les plus marquantes en neuro-oncologie et en neurochirurgie fonctionnelle. Elle permet d'administrer, en une seule séance, une dose élevée de rayonnement ionisant avec une précision millimétrique, tout en préservant les tissus cérébraux sains environnants.

Notre étude, portant sur sept patients traités par RCGK au CHU Mohammed VI de Marrakech, illustre la mise en place progressive et maîtrisée de cette technologie au Maroc. Malgré le faible effectif, lié au caractère encore récent de l'introduction de la radiochirurgie dans notre établissement, les résultats obtenus sont encourageants, tant sur le plan clinique que radiologique.

La majorité des patients ont présenté une amélioration symptomatique ou une stabilisation clinique, en accord avec les grandes séries internationales rapportant des taux de contrôle local supérieurs à 85 % pour la plupart des pathologies traitées par Gamma Knife. Aucune complication majeure n'a été enregistrée, confirmant la sécurité et la fiabilité de cette modalité thérapeutique lorsqu'elle est correctement indiquée et planifiée.

Sur le plan épidémiologique, la prédominance féminine et l'âge moyen de 53 ans observés dans notre série concordent avec les profils rapportés dans les études internationales. Les pathologies traitées — essentiellement méningiomes, schwannomes vestibulaires, malformations artérioveineuses et névralgie du trijumeau — reflètent la diversité des indications du Gamma Knife et son rôle central dans la prise en charge de lésions cérébrales complexes.

L'analyse technique et dosimétrique confirme également la conformité de nos protocoles avec les recommandations internationales, notamment en termes de dose marginale, de volume cible et d'isodose prescrite. Ces résultats démontrent la capacité du centre de Marrakech à appliquer les standards internationaux de qualité et de sécurité en radiochirurgie stéréotaxique.

Enfin, au-delà des résultats cliniques, cette étude marque une étape importante dans le développement de la radiochirurgie au Maroc. Elle témoigne de la montée en compétence des équipes locales et du rôle stratégique du CHU Mohammed VI dans la diffusion de

technologies neurochirurgicales de pointe. À moyen terme, la consolidation de l'activité, la constitution de registres de suivi multicentriques et la participation à des essais internationaux permettront d'asseoir définitivement la place du Maroc sur la scène scientifique régionale dans le domaine de la radiochirurgie.

En conclusion, la radiochirurgie Gamma Knife constitue une option thérapeutique sûre, efficace et non invasive, parfaitement adaptée au contexte national. Notre expérience, bien que préliminaire, ouvre la voie à une intégration durable et structurée de cette technique au service de la radiochirurgie moderne au Maroc, au bénéfice des patients et de la recherche médicale.



RÉSUMÉ

Contexte de l'étude : La radiochirurgie Gamma Knife représente une avancée majeure dans le traitement non invasif des lésions intracrâniennes. Reposant sur la délivrance précise d'une forte dose de rayonnement focalisée sur une cible millimétrique, cette technique permet de traiter efficacement diverses pathologies, tout en préservant les tissus cérébraux sains avoisinants. Au Maroc, cette technologie de pointe est encore en cours d'implantation, notamment au sein du CHU Mohammed VI de Marrakech, qui s'inscrit dans la continuité du développement national initié par le Centre National de Réhabilitation et de Neurosciences (CNRNS) de Rabat.

Objectifs : Décrire les aspects cliniques, radiologiques, dosimétriques et évolutifs des patients traités par radiochirurgie Gamma Knife au CHU Mohammed VI de Marrakech, et comparer les résultats obtenus avec ceux rapportés dans la littérature internationale.

Méthodologie de l'étude : Il s'agit d'une étude descriptive rétrospective portant sur sept patients traités par radiochirurgie Gamma Knife pour des lésions intracrâniennes variées. Les données recueillies ont concerné les paramètres épidémiologiques (âge, sexe, couverture sociale), cliniques, radiologiques, thérapeutiques (dose, volume cible, nombre de tirs, collimation) ainsi que l'évolution clinique et radiologique au suivi. L'analyse des résultats a été réalisée à l'aide d'un tableau synthétique et comparée aux séries internationales publiées dans la littérature.

Résultats et analyse : L'âge moyen des patients était de 53,3 ans, avec une prédominance féminine (71,4 %). Les pathologies traitées étaient : méningiome (2 cas), neurinome de l'angle ponto-cérébelleux (2 cas), malformation artérioveineuse (1 cas), cavernome (1 cas) et névralgie essentielle du trijumeau (1 cas).

Les volumes cibles variaient entre 0,01 cm³ et 20 cm³, pour des doses marginales allant de 8 à 43 Gy, délivrées en 1 à 23 tirs selon la lésion avec une collimation adaptée. Sur le plan évolutif, 43 % des patients ont présenté une rémission totale, 14 % une rémission partielle, et 43 % une stabilité clinique et radiologique. Aucune complication majeure post-radio chirurgicale n'a été observée.

Discussion : Les résultats de notre étude confirment l'efficacité et la sécurité du Gamma Knife, en cohérence avec les grandes séries mondiales qui rapportent des taux de contrôle tumoral supérieurs à 85 % et une morbidité très faible. La stabilité radiologique et la bonne tolérance observées dans notre étude témoignent de la qualité de la planification dosimétrique et de la précision de la technique.

Les écarts observés en termes de volume traité et de dose prescrite s'expliquent par la diversité des pathologies incluses et par l'adaptation individualisée des paramètres selon la topographie et la nature de la lésion.

Malgré le nombre limité de patients, cette expérience constitue une première contribution marocaine documentant l'utilisation du Gamma Knife au sein de notre centre universitaire.

Conclusion : La radiochirurgie Gamma Knife s'impose comme une modalité thérapeutique sûre, efficace et bien tolérée dans la prise en charge des pathologies intracrâniennes sélectionnées.

Notre expérience préliminaire, bien que limitée en effectif, met en évidence des résultats cliniques et radiologiques comparables aux grandes séries internationales.

Le développement de cette technologie au Maroc, notamment au CHU Mohammed VI de Marrakech, ouvre la voie à une autonomie nationale en matière de radiochirurgie de haute précision et à une meilleure accessibilité thérapeutique pour les patients atteints de pathologies neurochirurgicales complexes.

ABSTRACT

Background: Gamma Knife radiosurgery (GKRS) represents a major advancement in the non-invasive treatment of intracranial lesions. Based on the precise delivery of high-dose ionizing radiation to a well-defined intracranial target, this technique allows effective treatment while sparing surrounding healthy brain tissue. In Morocco, this cutting-edge technology is still being developed, particularly within the Mohammed VI University Hospital of Marrakech, following the pioneering experience of the National Center for Rehabilitation and Neurosciences in Rabat.

Objective: To describe the clinical, radiological, dosimetric, and evolutionary outcomes of patients treated with Gamma Knife radiosurgery at the Mohammed VI University Hospital of Marrakech, and to compare our results with international literature.

Methods: A retrospective descriptive study was conducted on seven patients treated by Gamma Knife radiosurgery for various intracranial pathologies. Data collected included epidemiological (age, sex, social coverage), clinical, radiological, and therapeutic parameters (dose, target volume, number of shots, collimation), as well as clinical and radiological evolution during follow-up. Results were analyzed and compared with published international data.

Results: The mean age was 53.3 years, with a female predominance (71.4%). The treated pathologies were: meningioma (2 cases), vestibular schwannoma (2 cases), arteriovenous malformation (1 case), cavernoma (1 case), and trigeminal neuralgia (1 case). Target volumes ranged from 0.01 cm³ to 20 cm³, with marginal doses between 8 and 43 Gy, delivered in 1 to 23 shots depending on the lesion.

Clinically, 43% of patients achieved complete remission, 14% partial remission, and 43% remained stable both clinically and radiologically. No major post-treatment complications were observed.

Discussion: Our findings confirm the efficacy and safety of Gamma Knife, consistent with major international experiences, which report tumor control rates exceeding 85% with

minimal morbidity. The radiological stability and excellent clinical tolerance observed reflect the precision of dose planning and the reliability of the system.

Although the limited sample size remains a constraint, this preliminary experience represents the first Moroccan documentation of Gamma Knife radiosurgery within our university hospital.

Conclusion: Gamma Knife radiosurgery is a safe, effective, and well-tolerated therapeutic modality for selected intracranial pathologies. Our initial results demonstrate comparable clinical and radiological outcomes to those reported internationally. The progressive implementation of this technology in Morocco, especially at the Mohammed VI University Hospital of Marrakech, strengthens national autonomy in high-precision radiosurgery and expands patient access to advanced neurotherapeutic care.

ملخص

سياق الدراسة:

تُعدّ الجراحة الإشعاعية بواسطة جهاز غاما نايف (Gamma Knife) تقدّمًا نوعيًا في العلاج غير الجراحي للآفات داخل الجمجمة، إذ تعتمد على توزيع جرعة إشعاعية عالية بدقة متناهية نحو هدف مليمترّي، مما يسمح بعلاج فعال لمجموعة واسعة من الأمراض مع الحفاظ على الأنسجة الدماغية السليمة المجاورة. في المغرب، لا تزال هذه التقنية المتطورة في طور التنفيذ، لا سيما على مستوى المركز الاستشفائي الجامعي محمد السادس بمراكش، وذلك في إطار الامتداد الوطني الذي انطلق مع المركز الوطني لإعادة التأهيل وعلوم الأعصاب بالرباط.

الأهداف:

تهدف هذه الدراسة إلى وصف الخصائص السريرية، الشعاعية، الجرعية والتطورية للمرضى الذين خضعوا للجراحة الإشعاعية بواسطة غاما نايف بالمركز الاستشفائي الجامعي محمد السادس بمراكش، مع مقارنة النتائج المحصل عليها بالمعطيات المنشورة في الأدبيات العلمية الدولي.

منهجية الدراسة:

دراسة وصفية شملت سبعة مرضى عولجوا بالجراحة الإشعاعية غاما نايف لآفات متنوعة داخل الجمجمة. شملت المعطيات المدروسة الخصائص الوبائية (العمر، الجنس، التغطية الصحية)، والمعطيات السريرية، والشعاعية، والعلاجية (الجرعة الإشعاعية، حجم الهدف، عدد الطلقات، نوع التركيز)، إضافة إلى التطور السريري والشعاعي خلال المتابعة. تم تحليل النتائج اعتمادًا على جدول تلخيصي، مع مقارنتها بالسلاسل الدولية المنشورة.

النتائج والتحليل:

بلغ متوسط عمر المرضى 53,3 سنة، مع هيمنة أنثوية بلغت 71,4%. توزعت الأمراض المعالجة على النحو التالي: الأورام السحائية (حالتان)، أورام العصب السمعي في الزاوية الجسرية المخيخية (حالتان)، تشوه شرياني وريدي (حالة واحدة)، الورم الكهفي الوعائي (حالة واحدة)، وحالة واحدة من ألم العصب ثلاثي التوائم الأساسي.

تراوحت أحجام الأهداف بين 0,01 سم³ و 20 سم³، مع جرعات هامشية تتراوح من 8 إلى 43 غراي، أُعطيت عبر 1 إلى 23 طلقة حسب طبيعة الآفة، مع اعتماد تركيز ملائم لكل حالة. من حيث التطور، سُجل شفاء تام لدى 43% من المرضى، وتحسن جزئي لدى 14%، واستقرار سريري وشعاعي لدى 43%. ولم تُسجل أي مضاعفات كبرى بعد الجراحة الإشعاعية.

المناقشة :

تؤكد نتائج دراستنا فعالية وأمان الجراحة الإشعاعية غاما نايف، بما يتماشى مع السلاسل العالمية الكبرى التي تسجل نسب تحكم ورمي تفوق 85% ومخاطر منخفضة جداً. ويعكس الاستقرار الشعاعي والتحمل الجيد المسجل جودة التخطيط الجرعي والدقة العالية للتقنية. وتُفسر الفروقات المسجلة في أحجام الآفات المعالجة والجرعات الموصوفة بتنوع الأمراض المدرجة، وبالنهج العلاجي الفردي المعتمد وفق طبيعة وموقع كل آفة.

وعلى الرغم من محدودية عدد المرضى، تمثل هذه التجربة أول توثيق مغربي لاستخدام غاما نايف على مستوى مركزنا الجامعي.

الخلاصة:

تُعدّ الجراحة الإشعاعية بواسطة غاما نايف خياراً علاجياً آمناً وفعالاً وجيد التحمل في تدبير بعض الآفات داخل الجمجمة المختارة. وتُبرز تجربتنا الأولية، رغم محدودية العينة، نتائج سريرية وشعاعية مماثلة لما هو موثق في السلاسل الدولية الكبرى. إن تطوير هذه التقنية بالمغرب، ولا سيما بالمركز الاستشفائي الجامعي محمد السادس بمراكش، يفتح آفاقاً واسعة نحو تحقيق استقلالية وطنية في مجال الجراحة الإشعاعية عالية الدقة، وتحسين ولوج المرضى المصابين بأمراض عصبية معقدة إلى علاجات متقدمة.



Annexe 1 : fiche d'exploitation radiochirurgie cérébrale par Gamma knife

Identité du patient :

- ID :
- IP :
- Âge :
- Sexe : Masculin ☐ Féminin ☐
- État matrimonial : célibataire ☐ marié ☐ divorce ☐ veuf(ve) ☐
- Couverture médicale : AMO TADAMON ☐ CNOPS ☐ CNSS ☐ Privée ☐ Autre ☐
- Origine : Urbaine ☐ Rurale ☐
- Profession :

Antécédents :

- Médicaux : HTA ☐ Diabète ☐ Cardiopathie ☐ Néoplasie ☐ Autres ☐
- Chirurgicaux : opéré ☐ non opéré ☐
- Toxiques/Allergiques : Tabac ☐ Alcool ☐ Cannabis ☐
- Antécédent d'irradiation : oui ☐ non ☐
- Antécédents familiaux : Tumeurs cérébrales ☐ Autres ☐

Motif de consultation et symptomatologie :

- Date de consultation :
- Hypertension intracrânienne : Oui ☐ Non ☐
- (Céphalées ☐ Vomissements ☐ Troubles visuels ☐)
- Troubles moteurs : Oui ☐ Non ☐ (type : ...)
- Troubles sensitifs : Oui ☐ Non ☐ (type : ...)
- Troubles fonctions supérieures : Oui ☐ Non ☐ (Type : Mémoire ☐ Langage ☐ Comportement ☐)
- Crises comitiales : Oui ☐ Non ☐
- Altération de l'état général ☐
- Autres : ☐

Examen clinique à l'admission :

- Score de Glasgow :
- Déficit moteur : oui ☐ non ☐
Type : Monoparésie ☐ monoplégie ☐ para parésie ☐ paraplégie ☐ tétraparésie ☐
tétraplégie ☐ Hémiparésie ☐ Hémiplégie ☐ Autre ☐

- Atteinte des réflexes : oui ☐ non ☐
- Atteinte sensitive : oui ☐ non ☐
Type : Hypoesthésie ☐ anesthésie ☐
- Atteinte des nerfs crâniens : oui ☐ non ☐
- Atteinte des fonctions supérieures : oui ☐ non ☐
- Syndrome cérébelleux : oui ☐ non ☐

Imagerie cérébrale :

IRM cérébrale : Oui ☐ Non ☐

- Localisation : Hémisphère droit ☐ Gauche ☐ FCP ☐ Autres ☐
- Topographie : Frontal ☐ Pariétal ☐ Temporal ☐ Occipital ☐ Tronc cérébral ☐ Cervelet ☐ APC ☐
- T1 séquence : image hypo intense ☐ hétérogène ☐ , Nécrose ☐ mal limite ☐
- T2 séquence : image hyper intense ☐ Image hétérogène ☐
- Taille (mm) :
- Caractère : Métastase ☐ Méningiome ☐ cavernome ☐ MAV ☐ neurinome de l'acoustique ☐ Autre ☐
- Hydrocéphalie ☐ Signes of engagement ☐

TDM cérébrale : Oui ☐ Non ☐

- Localisation : Hémisphère droit ☐ Gauche ☐ FCP ☐ Autre ☐
- Topographie : Frontal ☐ Pariétal ☐ Temporal ☐ Occipital ☐ Tronc cérébral ☐ Cervelet ☐ APC ☐
- Taille (mm) :
- Caractère : Métastase ☐ Méningiome ☐ cavernome ☐ MAV ☐ neurinome de l'acoustique ☐ Autre ☐
- Hydrocéphalie ☐ signes engagement ☐
- Données histologiques (si disponible) :
- Biopsie stéréotaxique : Oui ☐ Non ☐
- Exérèse préalable : Oui ☐ Non ☐
- Diagnostic histologique :
- Immunohistochimie :

Traitement par Gamma knife

a. Date du traitement :

b. Indications du traitement :

Méningiome ☐ métastase ☐ neurinome de l'acoustique ☐ cavernome ☐ MAV ☐
névralgie du trijumeau ☐ Autre ☐

c. Mode de traitement :

Mono fractionné ☐ multi fractionné ☐ (nombre de fraction à préciser)

d. Imagerie utilisée pour la planification :

IRM cérébrale avec injection ☐ TDM cérébrale ☐ Pet scanner ☐ fusion d'image
(IRM+TDM) ☐

e. Fixation :

1. Cadre stéréotaxique :

- Type du cadre : Leksell G frame ☐ autres ☐
- Date de pose :
- Complications liées au cadre :
Aucune ☐ douleur ☐ hématome locale ☐ réaction vasovagal ☐ autres ☐

2. Masque thermoforme (si fractionnement) :

Masque 3pts ☐ masque 5 pts ☐

f. Contourage :

1. Contourage des volumes cibles :

- ❖ Nom de la lésion :
- ❖ Volume cible totale en cm³ :
- ❖ Méthode de contourage :
IRM T1 avec injection ☐ IRM T2 ☐ TDM ☐
- ❖ Type de contourage :
Manuel ☐ semi-automatique ☐ automatique ☐
- ❖ Fusion d'image :
Non ☐ oui ☐

2. Contourage des organes à risque :

Tronc cérébral ☐ chiasma optique ☐ nerfs optiques ☐ hypophyse ☐ cortex
moteur/aires fonctionnelles ☐

g. Volume tumoral cible en Cm3 :

h. Dosimétrie :

- ❖ Dose prescrite en gy :
- ❖ Volume recevant la dose prescrite :

✓ V100 % :

- ❖ Durée d'irradiation :
- ❖ Iso dose (%) :
- ❖ Nombre de tir (shots) :
- ❖ Validation du plan : plan valide par :
onco-radiothérapeute ☐ physicien médical ☐ neurochirurgien ☐
- ❖ Collimation utilisée :
- ❖ 4mm ☐ 8mm ☐ 16 mm ☐ mixte ☐
- ❖ • Dose maximale au centre de la cible :

Traitement préalable :

- Chimiothérapie : oui ☐ non ☐
- Radiothérapie : oui ☐ non ☐

Si oui

- Dose :
- Délai

- Chirurgie : oui ☐ non ☐

Si oui : Type de chirurgie :

Exérèse totale ☐ Exérèse partielle ☐ DVP ☐ Autre ☐

Délai :

Suivi clinique :

- Rémission totale ☐
- Stabilité ☐
- Aggravation ☐

Suivi radiologique (IRM) :

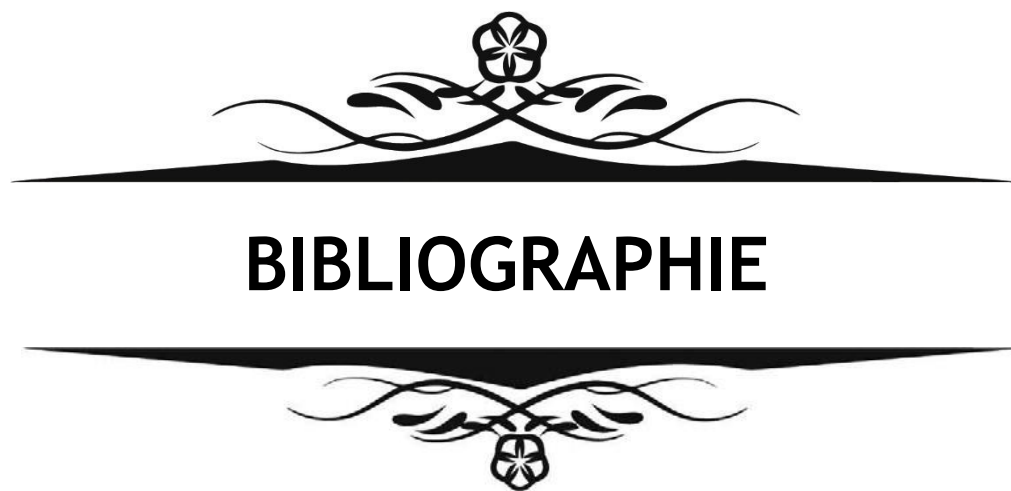
- Date de IRM de contrôle :
- Evolution radiologique :
 - Régression ☐
 - Stabilité ☐
 - Progression/Récidive ☐
- Délai de récidence :

Complications post thérapeutique :

- Aucune ☐
- Céphalées ☐
- Déficit neurologique : ☐ oui ☐ non type :

- Œdème cérébrale : ☐ Oui ☐ Non
- Engagement : ☐ Oui ☐ Non
- Nécrose radique : ☐ Oui ☐ Non
- Décès : ☐ Oui ☐ Non

- Date du décès :
- Cause du décès :



1. Reyns N, Sarrazin T.

Radiochirurgie Gamma Knife. Principes techniques et indications. Pratique Neurologique – FMC. 2014;5(3):184–192. doi:10.1016/j.praneu.2014.06.001.

2. Massager N.

La radiochirurgie par Gamma Knife / Gamma Knife radiosurgery. Rev Med Brux. 2012;33(4):367–370.

3. Lovo EE, Campos FJ, Caceros VE, Minervini MH, Reyes WA.

Dosimetry and treatment descriptions using the first completely automated stereotactic intracranial radiosurgery rotating gamma ray unit in America. Cureus. 2018 Apr 27;10(4):e2542. doi: 10.7759/cureus.2542.

4. Leksell L.

Stereotactic Radiosurgery. J Neurol Neurosurg Psychiatr 46: 797–803; 1983.

5. Chin LS, Regine WF eds.

Principles and Practice of Stereotactic Radiosurgery. Springer Verlag, New York; 2008.

6. Barcia-Salorio JL, Barcia JA, Hernandez G, Lopez-Gomez L

: Radiosurgery of epilepsy: Long term results. Acta Neurochir Suppl (Wien), 1994,62, 111–13.

7. Leksell L.

The stereotactic method and radiosurgery of the brain. Acta Chir Scand. 1951 Dec;102(4):316–9.

8. Levivier M.

Tissue changes after radiosurgery for vestibular schwannomas. Prog Neurol Surg. 2008;21:98–102.

9. Backlund EO.

Gamma Knife– The Early Story: Memoirs of a Privileged Man. Radiosurgery and Pathological Fundamentals. KARGER; p XXI–XXXIII.

10. Dougherty MC, Shibata SB, Hansen MR.

The biological underpinnings of radiation therapy for vestibular schwannomas: Review of the literature. Laryngoscope Investig Otolaryngol. 2021 Jun;6(3):458–68.

11. Kameron DB, Lunsford LD, Møller M.

Gamma knife: an alternative treatment for acoustic neurinomas. Ann Otol Rhinol Laryngol. 1988 Dec;97(6 Pt 1):631–5.

12. Niranjana A, Maitz AH, Lunsford A, Gerszten PC, Flickinger JC, Kondziolka D, et al.

Radiosurgery techniques and current devices. Prog Neurol Surg. 2007;20:50–67.

13. Stangerup S-E, Tos M, Thomsen J, Caye-Thomasen P.

True incidence of vestibular schwannoma? Neurosurgery. 2010 Nov;67(5):1335–40; discussion 1340.

14. 50 Years of Iconic Brain Care | Elekta [Internet]. [cité 2025 nov 28]; Available from:

<https://www.elekta.com/focus/celebrating-50-years-of-iconic-brain-care/>

15. <http://fr.ap-hm.fr/actu/la-timone-abrite-le-tout-dernier-appareil-de-radiochirurgie-gamma-knife-icon>.
16. **Porcheron D, Régis J.**
[Radiosurgery: basic principles]. Neurochirurgie. 2004 Jun;50 (2-3 Pt 2):265-9.
17. **Szeifert GT, Kondziolka D, Levivier M,**
Lunsford LD (eds): Radiosurgery and Pathological Fundamentals. Prog Neurol Surg. Basel, Karger, 2007, vol 20, pp XXI-XXVIII.
18. **Ganz JC.**
Stereotactic and radiosurgery concepts in Sweden. Prog Brain Res. 2014;215:47-56.
19. **Renier C, Massager N.**
Targeting inaccuracy caused by mechanical distortion of the Leksell stereotactic frame during fixation. J Appl Clin Med Phys. 2019 May;20(5):27- 36.
20. **Rojas-Villabona A, Miszkiel K, Kitchen N, Jäger R, Paddick I.**
Evaluation of the stability of the stereotactic Leksell Frame G in Gamma Knife radiosurgery. J Appl Clin Med Phys. 2016 May;17(3):75-89.
21. **Lunsford LD, Niranjan A, Fallon K, Kim JO.**
Frame versus Frameless Leksell Stereotactic Radiosurgery. Prog Neurol Surg. 2019;34:19-27.
22. **Pavlica M, Dawley T, Goenka A, Schulder M.**
Frame-Based and Mask-Based Stereotactic Radiosurgery: The Patient Experience, Compared. Stereotact Funct Neurosurg. 2021;99(3):241-9.
23. **Régis J, Merly L, Balossier A, Baumstarck K, Hamdi H, Mariani S, et al.**
Mask-Based versus Frame-Based Gamma Knife ICON Radiosurgery in Brain Metastases: A Prospective Randomized Trial. Stereotact Funct Neurosurg. 2022;100(2):86-94.
24. **Carminucci A, Nie K, Weiner J, Hargreaves E, Danish SF.**
Assessment of motion error for frame-based and noninvasive mask-based fixation using the Leksell Gamma Knife Icon radiosurgery system. J Neurosurg. 2018 Dec;129(Suppl1):133-9.
25. **Seneviratne DS, Vallow LA, Hadley A, Malouff TD, Stross WC, Herchko S, et al.**
Intracranial motion during frameless Gamma-Knife stereotactic radiosurgery. J Radiosurgery SBRT. 2020;6(4):277-85.
26. **Wegner RE, Horne ZD, Liang Y, Goss M, Yu A, Pace J, et al.**
Single Fraction Frameless Stereotactic Radiosurgery on the Gamma Knife Icon for Patients With Brain Metastases: Time to Abandon the Frame? Adv Radiat Oncol. 2021 Oct;6(5):100736.
27. **Vulpe H, Save AV, Xu Y, Elliston CD, Garrett MD, Wu C-C, et al.**
Frameless Stereotactic Radiosurgery on the Gamma Knife Icon: Early Experience From 100 Patients. Neurosurgery. 2020 Apr;86(4):509-16.
28. **Régis J, Tamura M, Wikler D, Porcheron D, Levrier O.**
Radiosurgery: operative technique, pitfalls and tips. Prog Neurol Surg. 2008;21:54-64.
29. **Knisely JPS, Apuzzo MLJ.**

Historical Aspects of Stereotactic Radiosurgery: Concepts, People, and Devices. *World Neurosurg.* 2019 Oct;130:593–607.

30. Flickinger JC, Kondziolka D, Pollock BE, Lunsford LD.

Evolution in technique for vestibular schwannoma radiosurgery and effect on outcome. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1996 Sep;36(2):275–80.

31. Borden JA, Tsai J-S, Mahajan A.

Effect of subpixel magnetic resonance imaging shifts on radiosurgical dosimetry for vestibular schwannoma. *J Neurosurg.* 2002 Dec;97(5 Suppl):445–9.

32. Snell JW, Sheehan J, Stroila M, Steiner L.

Assessment of imaging studies used with radiosurgery: a volumetric algorithm and an estimation of its error. Technical note. *J Neurosurg.* 2006 Jan;104(1):157–62.71.

33. Luppino FS, Grooters E, de Bruïne FT, Zwinderman AH, van der Mey AGL.

Volumetrical measurements in vestibular schwannoma, the influence of slice thickness and patient's repositioning. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol.* 2006 Oct;27(7):962–8.

34. Balossier A.

Gamma Knife radiosurgery for sporadic vestibular schwannomas: long-term results and prognosis factors [thèse de doctorat]. Aix-Marseille Université; 2022.

35. Ganz JC.

The History of the Gamma Knife. 2014;215:2–136.

36. Niranjan A, Flickinger JC.

Radiobiology, principle and technique of radiosurgery. *Prog Neurol Surg.* 2008;21:32–42.

37. Régis J, Tamura M, Porcheron D.

[Radiology of radiosurgery]. *Neurochirurgie.* 2004 Jun;50(2–3 Pt 2):257–64.

38. Torrens M, Chung C, Chung H-T, Hanssens P, Jaffray D, Kemeny A, et al.

Standardization of terminology in stereotactic radiosurgery: Report from the Standardization Committee of the International Leksell Gamma Knife Society: special topic. *J Neurosurg.* 2014 Dec;121 Suppl:2–15.

39. Paddick I.

A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans. Technical note. *J Neurosurg.* 2000 Dec;93 Suppl 3:219–22.

40. Paddick I, Lippitz B.

A simple dose gradient measurement tool to complement the conformity index. *J Neurosurg.* 2006 Dec;105 Suppl:194–201.

41. Simon S, Desmedt F, Vanderlinden B, Gevaert T, Vandekerckhove C, Grell A-S, et al. Medical physics principles of radiosurgery. *Prog Neurol Surg.* 2007;20:43–9.

42. Levivier M, Lorenzoni J, Massager N, Ruiz S, Devriendt D, Brotchi J.

Use of the Leksell gamma knife C with automatic positioning system for the treatment of meningioma and vestibular schwannoma. *Neurosurg Focus.* 2003 May;14(5):e8.

43. Régis J, Hayashi M, Porcheron D, Delsanti C, Muracciole X, Peragut JC.

Impact of the model C and Automatic Positioning System on gamma knife radiosurgery: an evaluation in vestibular schwannomas. *J Neurosurg.* 2002 Dec;97(5 Suppl):588–91.

44. Tlachacova D, Schmitt M, Novotny J, Novotny J, Majali M, Liscak R.

A comparison of the gamma knife model C and the automatic positioning system with Leksell model B. *J Neurosurg.* 2005 Jan;102 Suppl:25–8.

45. Horstmann GA, Van Eck ATCJ.

Gamma knife model C with the automatic positioning system and its impact on the treatment of vestibular schwannomas. *J Neurosurg.* 2002 Dec;97(5 Suppl):450–5.

46. Kuo JS, Yu C, Giannotta SL, Petrovich Z, Apuzzo MJ.

The Leksell gamma knife Model U versus Model C: a quantitative comparison of radiosurgical treatment parameters. *Neurosurgery.* 2004 Jul;55(1):168–72; discussion 172–173.

47. Kondziolka D, Maitz AH, Niranjan A, Flickinger JC, Lunsford LD.

An evaluation of the Model C gamma knife with automatic patient positioning. *Neurosurgery.* 2002 Feb;50(2):429–31; discussion 431–432.

48. Szeifert GT, Kondziolka D, Levivier M, Lunsford LD, editors.

Radiosurgery and Pathological Fundamentals. György T. Szeifert, MD, PhD; 2007.

49. Bhatnagar JP, Novotny J, Niranjan A, Kondziolka D, Flickinger J, Lunsford D, et al.

First year experience with newly developed Leksell Gamma Knife Perfexion. *J Med Phys.* 2009 Jul;34(3):141–8.

50. Yomo S, Tamura M, Carron R, Porcheron D, Régis J.

A quantitative comparison of radiosurgical treatment parameters in vestibular schwannomas: the Leksell GammaKnife Perfexion versus Model 4C. *Acta Neurochir (Wien).* 2010 Jan;152(1):47–55.

51. Vaughan P, Hampshire A, Soanes T, Kemeny A, Radatz M, Rowe J, et al.

The clinical application of plugging patterns for the Leksell gamma knife. *J Neurosurg.* 2002 Dec;97(5 Suppl):579–81.

52. Petti PL, Larson DA, Kunwar S.

Use of hybrid shots in planning Perfexion GammaKnife treatments for lesions close to critical structures. *J Neurosurg.* 2008 Dec;109 Suppl:34–40.

53. Gevaert T, Levivier M, Lacornerie T, Verellen D, Engels B, Reynaert N, et al.

Dosimetric comparison of different treatment modalities for stereotactic radiosurgery of arteriovenous malformations and acoustic neuromas. *Radiother Oncol J Eur Soc Ther Radiol Oncol.* 2013 Feb;106(2):192–7.

54. Levivier M, Carrillo RE, Charrier R, Martin A, Thiran J-P.

A real-time optimal inverse planning for Gamma Knife radiosurgery by convex optimization: description of the system and first dosimetry data. *J Neurosurg.* 2018 Dec;129(Suppl1):111–7.

55. Cui T, Nie K, Zhu J, Danish S, Weiner J, Chundury A, et al.
Clinical Evaluation of the Inverse Planning System Utilized in Gamma Knife Lightning. *Front Oncol.* 2022;12:832656.
56. Régis J, Hamdi H, Loundou A, Merly L, Castillo L, Balossier A, et al.
Clinical evaluation of a real-time inverse planning for Gamma Knife radiosurgery by convex optimization: a prospective comparative trial in a series of vestibular schwannoma patients. *Acta Neurochir (Wien).* 2021 Apr;163(4):981–9.
57. Levy RP, Fabrikant JI, Frankel KA, Phillips MH, Lyman JT.
Charged-particle Radiosurgery of the brain. *Neurosurg Clin N Am*, 1990, 1:4, 955–90.
58. Joseph J, Adler JR, Cox JR, Hancock SL.
Linear accelerator-based stereotactic radiosurgery for brain metastases: the influence of number of lesions on survival.
59. Cheick Oumar THIAM, D.E.A.
DE PHYSIQUE Option C : Rayonnements et leurs applications. RAPPORT DE STAGE
Simulation Monte Carlo de l'accélérateur linéaire clinique SLELEKTA, Etude dosimétrique dans un fantôme d'eau. Juin 2003.
60. Dr I. Latorzeff, Dr P. Bousquet, Pr Y. Lazorthes.
La radio chirurgie stéréotaxique des tumeurs du crâne. Pour le Centre Régional de Radio Chirurgie Stéréotaxique. Pour le groupe ONCORAD GARONNE.
61. Hadron Thérapie. Les centres et techniques d'hadron thérapie. 2010.
62. Fowler JF.
The linear-quadratic formula and progress in fractionated radiotherapy. *Br J Radiol.* 1989 Aug;62(740):679–94.
63. Brenner DJ.
The linear-quadratic model is an appropriate methodology for determining isoeffective doses at large doses per fraction. *Semin Radiat Oncol.* 2008 Oct;18(4):234–9.
64. Kondziolka D, Shin SM, Brunswick A, Kim I, Silverman JS.
The biology of radiosurgery and its clinical applications for brain tumors. *Neuro-Oncol.* 2015 Jan;17(1):29–44.
65. Vernimmen FJAI, Slabbert JP.
Assessment of the alpha/beta ratios for arteriovenous malformations, meningiomas, acoustic neuromas, and the optic chiasma. *Int J Radiat Biol.* 2010 Jun;86(6):486–98.
66. Julie Milia:
Implication de RHOB dans les mécanismes cellulaires de réponse aux rayonnements ionisants. Le 27 juin 2005.
67. Kirkpatrick JP, Meyer JJ, Marks LB.
The linear-quadratic model is inappropriate to model high dose per fraction effects in radiosurgery. *Semin Radiat Oncol.* 2008 Oct;18(4):240–3.
68. Curtis SB.
Lethal and potentially lethal lesions induced by radiation—a unified repair model. *Radiat Res.* 1986 May;106(2):252–70.

69. Guerrero M, Li XA.

Extending the linear–quadratic model for large fraction doses pertinent to stereotactic radiotherapy. *Phys Med Biol.* 2004 Oct;49(20):4825–35.

70. Kondziolka D, Niranjan A, Lunsford LD, Flickinger JC.

Radiobiology of radiosurgery. *Prog Neurol Surg.* 2007;20:16–27.

71. Santacrose A, Walier M, Régis J, Liščák R, Motti E, Lindquist C.

Long-term tumor control of benign intracranial meningiomas after radiosurgery in a series of 4565 patients. *Neurosurgery* 2012;

72. Hopewell JW, Millar WT, Lindquist C, Nordström H, Lidberg P, Gårding J.

Application of the concept of biologically effective dose (BED) to patients with Vestibular Schwannomas treated by radiosurgery. *J Radiosurgery SBRT.* 2013;2(4):257–71.

73. Tulasca C, Faouzi M, Maeder P, Maire R, Knisely J, Levivier M.

Biologically effective dose correlates with linear tumor volume changes after upfront single-fraction stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas. *Neurosurg Rev.* 2021 Dec;44(6):3527–37.

74. Smith DR, Saadatmand HJ, Wu C–C, Black PJ, Wu Y–R, Lesser J, et al.

Treatment Outcomes and Dose Rate Effects Following Gamma Knife Stereotactic Radiosurgery for Vestibular Schwannomas. *Neurosurgery.* 2019 Dec;85(6):E1084–94.

75. Berger A, Alzate JD, Bernstein K, Mullen R, McMenomey S, Jethanemest D, et al.

Modern Hearing Preservation Outcomes After Vestibular Schwannoma Stereotactic Radiosurgery. *Neurosurgery.* 2022 Aug DOI: 10.1227/neu.0000000000002090.

76. Villafuerte CJ, Shultz DB, Laperriere N, Gentili F, Heaton R, van Prooijen M, et al.

Radiation Dose Rate, Biologically Effective Dose, and Tumor Characteristics on Local Control and Toxicity After Radiosurgery for Acoustic Neuromas. *World Neurosurg.* 2021 Aug;152:e512–22.

77. Jones B, Hopewell JW.

Modelling the influence of treatment time on the biological effectiveness of single radiosurgery treatments: derivation of “protective” dose modification factors. *Br J Radiol.* 2019 Jan;92(1093):20180111.

78. Tulasca C, Knisely J, Levivier M.

Reply to the letter to the editor regarding “Biologically effective dose for vestibular schwannomas: the truth and nothing but the truth.” *Neurosurg Rev.* 2022 Jun;45(3):2497–8.

79. Jones B, Hopewell JW, Paddick I.

Biologically effective dose correlates with linear tumour volume changes after upfront single-fraction stereotactic radiosurgery for vestibular schwannomas. *Neurosurg Rev.* 2022 Jun;45(3):2493–5.

80. Withers HR.

The four R's of radiotherapy. *Advances in Radiation Biology.* New York: Academic Press; 1975; pp 241–71.

81. Steel GG, McMillan TJ, Peacock JH.

The 5Rs of radiobiology. *Int J Radiat Biol.* 1989 Dec;56(6):1045–8.

82. Herskind C, Ma L, Liu Q, Zhang B, Schneider F, Veldwijk MR, et al.
Biology of high single doses of IORT: RBE, 5 R's, and other biological aspects. *Radiat Oncol Lond Engl*. 2017 Jan;12(1):24.
83. Linskey ME.
Stereotactic radiosurgery versus stereotactic radiotherapy for patients with vestibular schwannoma: a Leksell Gamma Knife Society 2000 debate. *J Neurosurg*. 2000;93:6.
84. Tsuzuki T, Tsunoda S, Sakaki T, Konishi N, Hiasa Y, Nakamura M, et al.
Tumor cell proliferation and apoptosis associated with the Gamma Knife effect. *Stereotact Funct Neurosurg*. 1996;66 Suppl 1:39–48.
85. Hartmann GH, Bauer–Kirpes B, Serago CF, Lorenz WJ.
Precision and accuracy of stereotactic convergent beam irradiations from a linear accelerator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1994, 28:2,481–92.
86. Fertil, B. and Malaise, E. P.(1985).
Intrinsic radiosensitivity of human cell lines is correlated with radioresponsiveness of human tumors: analysis of 101 published survival curves. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 11, 1699–707.
87. G.T. Szeifert. D. Kondziolka. M. Levivier. L.D. Lunsford.
Radiosurgery and Pathological Fundamentals.
88. Karlsson B.
„Gamma Knife radiosurgery — current status and review“. *Journal of Neurosurgery* 1990;73(1):145–149.
89. Guadix SW, Tao AJ et al.
„Assessing the long–term safety and efficacy of Gamma Knife and linear accelerator radiosurgery for vestibular schwannoma: A systematic review and meta–analysis“. *Neuro–Oncology Practice* 2021;8(6):639–653.
90. „Why the Gamma Knife Offers Superior Treatment“. University of Pittsburgh – Department of Neurological Surgery. 2024.
91. van Beijnum J, van der Worp HB, Buis DR, Al–Shahi Salman R, Kappelle LJ, Rinkel GJ, et al.
Treatment of brain arteriovenous malformations: a systematic review and meta–analysis. *JAMA* 2011;306:2011–9.
92. Kano H, Lunsford LD, Flickinger JC, Yang HC, Flannery TJ, Awan NR, et al.
Stereotactic radiosurgery for arteriovenous malformations, part 1: management of Spetzler–Martin Grade I and II arteriovenous malformations. *J Neurosurg* 2012;116:11–20.
93. Kano H, Kondziolka D, Flickinger JC, Yang HC, Flannery TJ, Awan NR, et al.
Stereotactic radiosurgery for arteriovenous malformations, part 2: management of pediatric patients. *J Neurosurg Pediatr* 2012;9:1–10.
94. Reyns N, Blond S, Gauvrit JY, Touzet G, Coche B, Pruvo JP, et al.
Role of radiosurgery in the management of cerebral arteriovenous malformations in the pediatric age group: data from a 100–patient series. *Neurosurgery* 2007;60:268–76.

95. Kano H, Kondziolka D, Flickinger JC, Park KJ, Parry PV, Yang HC, et al.
Multistaged volumetric management of large arteriovenous malformations. *Prog Neurol Surg* 2013;27:73–80.
96. Liscak R.
Radiosurgery of brain cavernomas—long-term results. *Prog Neurol Surg* 2013;27:147–56.
97. Linskey ME, Andrews DW, Asher AL, Burri SH, Kondziolka D, Robinson PD.
The role of stereotactic radiosurgery in the management of patients with newly diagnosed brain metastases: a systematic review and evidence-based clinical practice guideline. *J Neurooncol* 2010;96:45–68.
98. Kocher M, Soffietti R, Abacioglu U, Villà S, Fauchon F, Baumert BG, et al.
Adjuvant whole-brain radiotherapy versus observation after radiosurgery or surgical resection of one to three cerebral metastases: results of the EORTC 22952–26001 study. *J Clin Oncol* 2011;29:134–1341.
99. Lunsford LD, Niranjan A, Flickinger JC, Maitz A, Kondziolka D.
Radiosurgery of vestibular schwannomas: summary of experience in 829 cases. *J Neurosurg* 2005;102(Suppl.):195–9.
100. Myrseth E, Møller P, Pedersen PH, Vassbotn FS, Wentzel–Larsen T, Lund–Johansen M.
Vestibular schwannomas: clinical results and quality of life after microsurgery or gamma knife radiosurgery. *Neurosurgery* 2005;56:927–35.
101. Kondziolka D, Mousavi SH, Kano H, Flickinger JC, Lunsford LD.
The newly diagnosed vestibular schwannoma: radiosurgery, resection, or observation? *Neurosurg Focus* 2012;33:E8.
102. Yang I, Sughrue ME, Han SJ, Aranda D, Pitts LH, Cheung SW, et al.
A comprehensive analysis of hearing preservation after radiosurgery for vestibular schwannoma. Clinical article. *J Neurosurg*.
103. Régis J, Carron R, Park MC, Soumare O, Delsanti C, Thomassin JM, et al.
Wait-and-see strategy compared with proactive Gamma Knife surgery in patients with intracanalicular vestibular schwannomas. Clinical article. *J Neurosurg* 2010;113 (Suppl.):105–11.
104. Skeie BS, Enger PO, Skeie GO, Thorsen F, Pedersen PH.
Gamma knife surgery of meningiomas involving the cavernous sinus: long-term follow-up of 100 patients. *Neurosurgery* 2010;66:661–8.
105. Couldwell WT, Cole CD, Al–Mefty O.
Patterns of skull base meningioma progression after failed radiosurgery. *J Neurosurg* 2007;106:30–5.
106. Ahn ES, Chin LS, Gyure KA, Hudes RS, Ragheb J, DiPatri AJ Jr.
Long term control after resection and gamma knife surgery of an intracranial clear cell meningioma: case report. *J Neurosurg* 102(3 Suppl): 303–306; 2005.

- 107. Kondziolka D, Flickinger JC, Perez B.**
Judicious resection and/or radiosurgery for parasagittal meningiomas: outcomes from a multicenter review. Gamma Knife Meningioma Study Group. *Neurosurgery* 43(3): 405-413; 1998.
- 108. Iwai Y, Yamanaka K, Ikeda H.**
Gamma knife radiosurgery for skull base meningioma: long term results of low dose treatment. *J Neurosurg* 109(5): 804-810; 2008.
- 109. Ganz JC, Backlund EO, Thorsen FA.**
The results of gamma knife surgery of meningiomas, related to size of tumor and dose. *Stereotact Funct Neurosurg* 61(Suppl 1): 23-29; 1993.
- 110. Martin JJ, Niranjan A, Kondziolka D, Flickinger JC, Lozano KA, Lunsford LD.** Radiosurgery for chordomas and chondrosarcomas of the skull base. *J Neurosurg* 2007;107:758-64.
- 111. Gottfried ON, Liu JK, Couldwell WT.**
Comparison of radiosurgery and conventional surgery for the treatment of glomus jugular tumors. *Neurosurg Focus* 2004;17:E4.
- 112. Sheehan JP, Niranjan A, Sheehan JM, Jane JA, Laws ER, Kondziolka D, et al.**
Stereotactic radiosurgery for pituitary adenomas: an intermediate review of its safety, efficacy, and role in the neurosurgical treatment armamentarium. *J Neurosurg* 2005; 102:678-91.
- 113. Jagannathan J, Yen CP, Pouratian N, Laws ER, Sheehan JP.**
Stereotactic radiosurgery for pituitary adenomas: a comprehensive review of indications, techniques and long-term results using the gamma knife. *J Neurooncol* 2009;92:345-56.
- 114. Liu X, Kano H, Kondziolka D, Park KJ, Iyer A, Niranjan A, et al.**
Gamma Knife radiosurgery for clinically persistent acromegaly. *J Neurooncol* 2012;109:71-9.
- 115. Liu X, Kano H, Kondziolka D, Park KJ, Iyer A, Niranjan A, et al.**
Gamma Knife stereotactic radiosurgery for drug resistant or intolerant invasive prolactinomas. *Pituitary* 2013;16:68-75.
- 116. Sheehan JP, Kondziolka D, Flickinger J, Lunsford LD.**
Radiosurgery for residual or recurrent nonfunctioning pituitary adenoma. *J Neurosurg* 97(5 Suppl): 408-414; 2002.
- 117. Wowra B, Stummer W.**
Efficacy of gamma knife radiosurgery for nonfunctioning pituitary adenomas: a quantitative follow up with magnetic resonance imaging based volumetric analysis. *J Neurosurg* 97(5 Suppl): 429-432; 2002.
- 118. Ganz JC, Aanderud S, Mørk S, Smievoll A I.**
Tumour volume reduction following gamma knife radiosurgery: the relationship between X ray and histological findings. In: 'Advances in Radiosurgery', (eds), Lindquist C, Kondziolka D, Loeffler J. Vienna, New York: Springer Verlag: pp 39-42; 1994.
- 119. Xu Z, Yen CP, Schlesinger D, Sheehan J.**
Outcomes of Gamma Knife surgery for craniopharyngiomas. *J Neurooncol* 2011;10:305-13.

120. Ulfarsson E, Lindquist C, Roberts M, Rahn T, Lindquist M, Thoren M, Lippitz B.
Gamma knife radiosurgery for craniopharyngiomas: long term results in the first Swedish patients. *J Neurosurg* 97(5 Suppl): 613-622; 2002.
121. Reyns N, Hayashi M, Chinot O, Manera L, Péragut JC, Blond S, et al.
The role of Gamma Knife radiosurgery in the treatment of pineal parenchymal tumours. *Acta Neurochir (Wien)* 2006;148: 5-11.
122. Oh S, Niranjan A, Weiner WJ.
Movement disorder in (eds) Chin LS, Regine WF. *Principles and Practice of Stereotactic Radiosurgery*. Springer Science & Business Media LLC, New York: pp 541-548; 2008.
123. Tuleasca C, Carron R, Resseguier N, Donnet A, Roussel P, Gaudart J, et al.
Patterns of pain-free response in 497 cases of classic trigeminal neuralgia treated with Gamma Knife surgery and followed up for least 1 year. *J Neurosurg* 2012;117(Suppl.): 181-8.
124. Kooshkabi A, Lunsford LD, Tonetti D, Flickinger JC, Kondziolka D.
Gamma Knife thalamotomy for tremor in the magnetic resonance imaging era. *J Neurosurg* 2013;118:713-8.
125. Bartolomei F, Hayashi M, Tamura M, Rey M, Fischer C, Chauvel P, et al.
Long-term efficacy of gamma knife radiosurgery in mesial temporal lobe epilepsy. *Neurology* 2008;70:1563-658.
126. Rheims S, Didelot A, Guenot M, Regis J, Ryvlin P.
Subcontinuous epileptiform activity after failed hippocampal radiosurgery. *Epilepsia* 2011;52:1425-9.
127. Régis J, Scavarda D, Tamura M, Nagai M, Villeneuve N, Bartolomei F, et al.
Epilepsy related to hypothalamic hamartomas: surgical management with special reference to gamma knife surgery. *Childs Nerv Syst* 2006;22:881-95.
128. ABOUD HILAL.
Apport de la radiochirurgie gammaknife dans le traitement des métastases cérébrales 07/12/2012.
129. Elekta surpasses one million patients treated with Leksell Gamma Knife – Elekta [Internet]. 2025 [cité 2025 oct 29]; Available from: <https://ir.elekta.com/investors/press-releases/2016/elekta-surpasses-one-million-patients-treated-with-leksell-gamma-knife/>
130. Kondziolka D, et al.
Radiochirurgie Gamma Knife: plus d'un million de patients traités dans le monde, *Neurosurgery Reports*, 2023.
131. 30 ANS DE RADIOCHIRURGIE GAMMA KNIFE L'AP-HM CONFIRME SON LEADERSHIP INTERNATIONAL [Internet]. [cité 2025 oct 29]; Available from: <https://fr.ap-hm.fr/sites/default/files/files/communiqués-et-dossiers-de-presse/09-sept-22-dp-gamma-knife-web.pdf>
132. Eddy Garrido, M.D.,
Lancaster Neuroscience & Spine Associates Kenneth Berkenstock, M.D., Lancaster Radiology Associates, Ltd. Charles Fuller, Ph.D., D.A.B.R. Medical Physicist, Lancaster General Cancer Center Christine Burfete, R.N., B.S.N., Gamma Knife Nurse, Lancaster General Hospital. 7

Years of Gamma Knife Radiosurgery: The Lancaster General Hospital Experience. Spring 2007 – Vol.2, No.1.

- 133. Jagdish P. Bhatnagar, Josef Novotny, Jr., Ajay Niranjana, Douglas Kondziolka, John Flickinger, Dade Lunsford, and M.**

Saiful Huq. University of Pittsburgh Medical Center. First year experience with newly developed Leksell Gamma Knife® Perfexion™.

- 134. Unité émise, direction de l'évaluation des modes d'intervention et des technologies en santé chus 2008. Service provincial le scalpel Gamma au CHUS.**

- 135. N. Massager, D. Devriendt, F. Desmedt, A. Wagner, F. Schoovaerts, R. Kamouni, E. Rios, D. Dumont, C. Watty, V. 'Tfelt, P. David, S. Simon, P. Van Houtte, O. De Witte** Centre de Radiochirurgie par Gamma Knife, U.L.B. – Hôpital Erasme. Bilan de 10 années d'activité clinique du centre de radiochirurgie cérébrale par Gamma Knife de l'ULB.

- 136. Siberia's First Gamma Knife Radiosurgery System | Elekta Focus [Internet].** [cité 2025 oct 30]; Available from: <https://www.elekta.com/focus/siberias-first-leksell-gamma-knife-radiosurgery-system/>

- 137. Molina-Romero OI, Segura-Hernandez A, Fonnegra-Caballero A, Diez-Palma JC, Cortés-Muñoz F, Fonnegra-Pardo JR.**

Gamma Knife radiosurgery – 12 years of experience in a high-complexity center of a middle-income country. Surg. Neurol. Int. 2022;13:582.

- 138. Wan MY, Halai DA, Zheng DH, Sinha R, Santarius MT, Mair MR, et al.**

A SINGLE CENTRE 10-YEAR EXPERIENCE WITH GAMMA KNIFE STEREOTACTIC RADIOSURGERY FOR CEREBRAL METASTASES.

- 139. RADIOCHIRURGIE GAMMAKNIFE PERFEXION EXPÉRIENCE DE L'UNITÉ DU CENTRE NATIONAL DE RÉHABILITATION ET DE NEUROSCIENCES. BILAN DE SIX ANNÉES D'ACTIVITÉ. [Internet].**

[cité 2025 oct 29]; Available from:

<https://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/27695/M0312016.pdf?sequence=1>

- 140. Elekta surpasses one million patients treated with Leksell Gamma Knife – Elekta [Internet].**

[cité 2025 oct 29]; Available from: [https://ir.elekta.com/investors/press-](https://ir.elekta.com/investors/press-releases/2016/elekta-surpasses-one-million-patients-treated-with-leksell-gamma-knife/)

[releases/2016/elekta-surpasses-one-million-patients-treated-with-leksell-gamma-knife/](https://ir.elekta.com/investors/press-releases/2016/elekta-surpasses-one-million-patients-treated-with-leksell-gamma-knife/)

- 141. Hancevic M, Nemir J, Marasanov S, Hrsak H, Luketin L, Peric I, et al.**

Gamma Knife radiosurgery for brain arteriovenous malformations – a single-center experience. Acta Neurochir. (Wien) 2025;167:121.

- 142. The 35-Year Evolution of Stereotactic Radiosurgery for Meningiomas.**

- 143. Kate Khu**

The University of Calgary Michael D Cusimano

University of Toronto Eva Knifed : University of Toronto Gamma Knife patients'

experience: Lessons learned from a qualitative study. ARTICLE in JOURNAL OF NEURO-

ONCOLOGY · JUNE 2009 Impact Factor: 3.07 · DOI: 10.1007/s11060-009-9830-7 ·

Source: PubMed.

- 144. Zhiyuan Xu**

University of Virginia David J Schlesinger

University of Virginia Multisession Gamma Knife Radiosurgery: A Preliminary Experience with a Non-invasive, Relocatable Frame. ARTICLE in WORLD NEUROSURGERY · AUGUST 2014, Impact Factor: 2.88 · DOI: 10.1016/j.wneu.2014.07.042. Available from: <https://doi.org/10.1097/neuro.0000000000001234>)

145. Surgical Neurology International [Internet]. [cité 2025 oct 29];Available from: <https://surgicalneurologyint.com/surgicalint-articles/gamma-knife-radiosurgery-12-years-of-experience-in-a-high-complexity-center-of-a-middle-income-country/>
146. World Health Organization (WHO) [Internet]. [cité 2025 oct 30];Available from: <https://www.who.int/fr>
147. Rapport Analyse iniquités en santé au Maroc (1).pdf [Internet]. [cité 2025 oct 30];Available from: [https://www.sante.gov.ma/Publications/Etudes_enquete/Documents/2022/Rapport%20Analyse%20iniquit%C3%A9s%20en%20sant%C3%A9%20au%20Maroc%20\(1\).pdf](https://www.sante.gov.ma/Publications/Etudes_enquete/Documents/2022/Rapport%20Analyse%20iniquit%C3%A9s%20en%20sant%C3%A9%20au%20Maroc%20(1).pdf)
148. **Seha B, Bogosavljevic V, Grujicic D, Djulejic V, Milićević M, Ilic R, et al.**
Outcomes, Predictors of Retreatment, and Complications After Repeat Gamma Knife Radiosurgery for Trigeminal Neuralgia: A Single-Center Retrospective Cohort Study. *Cureus* 2025;17:e89485.
149. **Goldman MJ, Teh BS, Lo SS, Butler EB, Baskin DS.**
Radiosurgery for Intracranial Meningiomas: A Review of Anatomical Challenges and an Update on the Evidence. *Cancers* 2024;17:45.
150. **Arthurs BJ, Lamoreaux WT, Giddings NA, Fairbanks RK, Mackay AR, Demakas JJ, et al.** Gamma Knife radiosurgery for vestibular schwannoma: case report and review of the literature. *World J. Surg. Oncol.* 2009;7:100.
151. Stereotactic radiosurgery for tumor-related trigeminal neuralgia: a systematic review and meta-analysis.
152. **Flickinger JC, Kondziolka D, Maitz AH, Lunsford LD.**
Gamma knife radiosurgery of imaging-diagnosed intracranial meningioma. *Int. J. Radiat. Oncol.* 2003;56:801-6.
153. The Utility of « Pre-Planning » MRI in the Prevention of Inadvertent Frame Placement for the Treatment of Brain Metastasis during Gamma Knife Radiosurgery [Internet]. [cité 2025 oct 30];Available from: <https://assets.cureus.com/uploads/abstract/pdf/784/20220211-27051-5j8oyi.pdf>
154. **Du P, Liu X, Shen L, Wu X, Chen J, Chen L, et al.**
Prediction of treatment response in patients with brain metastasis receiving stereotactic radiosurgery based on pre-treatment multimodal MRI radiomics and clinical risk factors: A machine learning model. *Front. Oncol.* 2023;13:1114194.
155. **Moraes FY, Chung C.**
Radiation for skull base meningiomas: review of the literature on the approach to radiotherapy. *Chin. Clin. Oncol.* 2017;6:S3-S3.
156. **Lee CC, Wang WH, Yang HC, Lin CJ, Wu HM, Lin YY, et al.**
Gamma Knife radiosurgery for cerebral cavernous malformation. *Sci. Rep.* 2019;9:19743.

157. Shen CC, Sun MH, Yang MY, You WC, Sheu ML, Chen YJ, et al.
Outcome of intracerebral cavernoma treated by Gamma Knife radiosurgery based on a double-blind assessment of treatment indication. *Radiat. Oncol. Lond. Engl.* 2021;16:164.
158. Ucuncu Kefeli A, Sengoz M, Peker S.
Gamma knife radiosurgery for hemorrhagic brainstem cavernomas. *Turk. Neurosurg.* [Internet] 2017 [cité 2025 oct 7];Available from: http://www.turkishneurosurgery.org.tr/summary_en_doi.php3?doi=10.5137/1019-5149.JTN.21690-17.1
159. Kang H, Ji SY, Kim CY, Koo JW, Song JJ, Choi BY, et al.
Hearing preservation after stereotactic radiosurgery for sporadic intracanalicular vestibular schwannomas classified as Koos grade 1. *Cancer Med.* 2024;13:e6990.
160. Yang I, Aranda D, Han SJ, Chennupati S, Sughrue ME, Cheung SW, et al.
Hearing preservation after stereotactic radiosurgery for vestibular schwannoma: A systematic review. *J. Clin. Neurosci.* 2009;16:742-7.
161. Flickinger JC, Kondziolka D, Maitz AH, Lunsford LD.
An analysis of the dose-response for arteriovenous malformation radiosurgery and other factors affecting obliterationq.
162. Franzin A, Panni P, Spatola G, Vecchio AD, Gallotti AL, Gigliotti CR, et al.
Results of volume-staged fractionated Gamma Knife radiosurgery for large complex arteriovenous malformations: obliteration rates and clinical outcomes of an evolving treatment paradigm. *J. Neurosurg.* 2016;125:104-13.
163. Boling W, Song M, Shih W, Karlsson B.
Gamma Knife Radiosurgery for Trigeminal Neuralgia: A Comparison of Dose Protocols. *Brain Sci.* 2019;9:134.
164. Park SH, Chang JW.
Gamma Knife Radiosurgery on the Trigeminal Root Entry Zone for Idiopathic Trigeminal Neuralgia: Results and a Review of the Literature. *Yonsei Med. J.* 2020;61:111.
165. Jang CK, Jung HH, Chang JH, Chang JW, Park YG, Chang WS.
Long-Term Results of Gamma Knife Radiosurgery for Intracranial Meningioma. *Brain Tumor Res. Treat.* 2015;3:103.
166. Lippitz BE, Bartek J, Mathiesen T, Förander P.
Ten-year follow-up after Gamma Knife radiosurgery of meningioma and review of the literature. *Acta Neurochir. (Wien)* 2020;162:2183-96.
167. Iwai Y. et al.
Neurosurgery, 2022;90(6):827-835.
168. Wen R, Shi Y, Gao Y, Xu Y, Xiong B, Li D, et al.
The Efficacy of Gamma Knife Radiosurgery for Cavernous Malformations: A Meta-Analysis and Review. *World Neurosurg.* 2019;123:371-7.
169. Park K, Kim JW, Chung HT, Paek SH, Kim DG.
Long-Term Outcome of Gamma Knife Radiosurgery for Symptomatic Brainstem Cavernous Malformation. *World Neurosurg.* 2018;116:e1054-9.

170. Shen J. et al.
Front Neurol, 2025.
171. Tucker DW, Gogia AS, Donoho DA, Yim B, Yu C, Fredrickson VL, et al.
Long-Term Tumor Control Rates Following Gamma Knife Radiosurgery for Acoustic Neuroma. World Neurosurg. 2019;122:366-71.
172. Schumacher AJ, Lall RR, Lall RR, III AN, Ayer A, Sejpal S, et al.
Low-Dose Gamma Knife Radiosurgery for Vestibular Schwannomas: Tumor Control and Cranial Nerve Function Preservation After 11 Gy. J. Neurol. Surg. Part B Skull Base 2017;78:2-10.
173. Tuleasca C, George M, Faouzi M, Schiappacasse L, Leroy HA, Zeverino M, et al.
Acute clinical adverse radiation effects after Gamma Knife surgery for vestibular schwannomas. J. Neurosurg. 2016;125:73-82.
174. Akabane A, Yoshimoto T, Nakamura H, Jokura H, Takahashi K.
Radiosurgery for Vestibular Schwannoma Serial Follow-up MR Imaging after Gamma Knife.
175. Raboud M, Tuleasca C, Maeder P, Schiappacasse L, Marguet M, Daniel RT, et al. Gamma knife radiosurgery for arteriovenous malformations: general principles and preliminary results in a Swiss cohort. Swiss Med. Wkly. 2018;148:w14602.
176. Hanakita S, Shin M, Koga T, Igaki H, Saito N.
Outcomes of Volume-Staged Radiosurgery for Cerebral Arteriovenous Malformations Larger Than 20 cm³ with More Than 3 Years of Follow-Up. World Neurosurg. 2016;87:242-9.
177. Hasegawa H, Yamamoto M, Shin M, Barfod BE.
Gamma Knife Radiosurgery For Brain Vascular Malformations: Current Evidence And Future Tasks. Ther. Clin. Risk Manag. 2019;15:1351-67.
178. Regis J, Arkha Y, Yomo S, Murata N, Roussel P, Donnet A, et al.
La radiochirurgie dans le traitement de la névralgie trigéminal : résultats à long terme et influence des nuances techniques. Neurochirurgie 2009;55:213-22.
179. Régis J, Tuleasca C, Resseguier N, Carron R, Donnet A, Gaudart J, et al.
Long-term safety and efficacy of Gamma Knife surgery in classical trigeminal neuralgia: a 497-patient historical cohort study. J. Neurosurg. 2016;124:1079-87.
180. Lee S, Lee JI.
Gamma Knife Radiosurgery for Trigeminal Neuralgia : Review and Update. J. Korean Neurosurg. Soc. 2022;65:633-9.



قسم الطبيب :

أقسم بالله العظيم

أن أراقب الله في مهنتي.

وأن أصون حياة الإنسان في كافة أطوارها في كل الظروف

والأحوال باذلة وسعي في إنقاذها من الهلاك والمرض

و الألم والقلق.

وأن أحفظ للناس كرامتهم، وأستر عورتهم، و أكتم

سرهم.

وأن أكون على الدوام من وسائل رحمة الله، باذلة رعايتي الطبية للقريب والبعيد، للصالح

والطالح، والصديق والعدو.

وأن أثابر على طلب العلم، وأسخره لنفع الإنسان لا لأذاه.

وأن أوقر من علمني، وأعلم من يصغرنى، وأكون أختا لكل زميل في المهنة الطبية متعاونين

على البر والتقوى.

وأن تكون حياتي مصداق إيماني في سري وعلايتي، نقيّة مما يشينها تجاه

الله ورسوله والمؤمنين.

والله على ما أقول شهيد





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

الأطروحة رقم 16

سنة 2026

جراحة الدماغ الإشعاعية باستخدام سكين جاما: تجربة المستشفى الجامعي محمد السادس بمراكش الأطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم 2026/01/02
من طرف

الآنسة منال اعبوبي
طبيبة داخلية بالمستشفى الجامعي محمد السادس
المزودة في 28 دجنبر 1999 بأسفي
لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية:

الجراحة الإشعاعية - الدماغ - سكين غاما - قياس الجرعة

اللجنة

الرئيس

السيد
س. أيت بنعلي
أستاذ في جراحة الدماغ

المشرف

السيدة
م. خوشاني
أستاذة في علم الأمراض السرطانية والعلاج الإشعاعي

الحكام

السيدة
ح. رايس
أستاذة في علم التشريح المرضي

