



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

Année 2024

Thèse N° 406

L'intelligence Artificielle et la Neurochirurgie

THESE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE :15/11/2024

PAR

Mlle. IKRAM YICHEN

Née le 22/12/1999 à Beni Mellal

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS :

Intelligence artificielle-Chirurgie Robotique-Voie endoscopique
-Neuronavigation

Jury

Mr. **A. RAJI**

PRESIDENT

Professeur D'oto-rhino-laryngologie

Mr. **S.AIT BENALI**

RAPPORTEUR

Professeur de Radiologie

Mr. **F. HAJHOUI**

JUGES

Professeur De Neurochirurgie

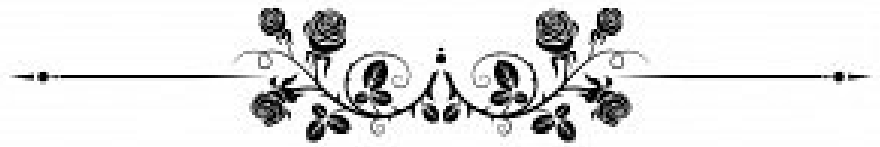
فَتَبَسَّ ضَاحِكًا مِّن قَوْلِهَا وَقَالَ
رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ
الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ
وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ
وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ

الْحَكِيمُ ﴿٣٢﴾

صَدِّقَ قَوْلِ اللَّهِ الْعَظِيمِ



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	Spécialité
01	ZOUHAIR Said (Doyen)	P.E.S	Microbiologie
02	BOUSKRAOUI Mohammed	P.E.S	Pédiatrie
03	CHOULLI Mohamed Khaled	P.E.S	Neuro pharmacologie
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	BENELKHAÏAT 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	ABOULFALAH Abderrahim	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
28	OULAD SAIAD Mohamed	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
29	DAHAMI Zakaria	P.E.S	Urologie
30	EL HATTAOUI Mustapha	P.E.S	Cardiologie
31	ELFIKRI Abdelghani	P.E.S	Radiologie
32	KAMILI El Ouafi El Aouni	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
33	MAOULAININE Fadl mrabih rabou	P.E.S	Pédiatrie (Néonatalogie)
34	MATRANE Aboubakr	P.E.S	Médecine nucléaire
35	AIT AMEUR Mustapha	P.E.S	Hématologie biologique

36	AMINE Mohamed	P.E.S	Epidémiologie clinique
37	EL ADIB Ahmed Rhassane	P.E.S	Anesthésie-réanimation
38	ADMOU Brahim	P.E.S	Immunologie
39	CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	P.E.S	Radiologie
40	TASSI Noura	P.E.S	Maladies infectieuses
41	MANOUDI Fatiha	P.E.S	Psychiatrie
42	BOURROUS Monir	P.E.S	Pédiatrie
43	NEJMI Hicham	P.E.S	Anesthésie-réanimation
44	LAOUAD Inass	P.E.S	Néphrologie
45	EL HOUDZI Jamila	P.E.S	Pédiatrie
46	FOURAIJI Karima	P.E.S	Chirurgie pédiatrique

47	ARSALANE Lamiae	P.E.S	Microbiologie-virologie
48	BOUKHIRA Abderrahman	P.E.S	Biochimie-chimie
49	KHALLOUKI Mohammed	P.E.S	Anesthésie-réanimation
50	BSISS Mohammed Aziz	P.E.S	Biophysique
51	EL OMRANI Abdelhamid	P.E.S	Radiothérapie
52	SORAA Nabila	P.E.S	Microbiologie-virologie
53	KHOUCANI Mouna	P.E.S	Radiothérapie
54	JALAL Hicham	P.E.S	Radiologie
55	OUALI IDRISSE Mariem	P.E.S	Radiologie
56	ZAHLANE Mouna	P.E.S	Médecine interne
57	BENJILALI Laila	P.E.S	Médecine interne
58	NARJIS Youssef	P.E.S	Chirurgie générale
59	RABBANI Khalid	P.E.S	Chirurgie générale

60	HAJJI Ibtissam	P.E.S	Ophthalmologie
61	EL ANSARI Nawal	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
62	ABOU EL HASSAN Taoufik	P.E.S	Anesthésie-réanimation
63	SAMLANI Zouhour	P.E.S	Gastro-entérologie
64	LAGHMARI Mehdi	P.E.S	Neurochirurgie
65	ABOUSSAIR Nisrine	P.E.S	Génétique
66	BENCHAMKHA Yassine	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
67	CHAFIK Rachid	P.E.S	Traumato-orthopédie
68	MADHAR Si Mohamed	P.E.S	Traumato-orthopédie
69	EL HAOURY Hanane	P.E.S	Traumato-orthopédie
70	ABKARI Imad	P.E.S	Traumato-orthopédie
71	EL BOUIHI Mohamed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
72	LAKMICH Mohamed Amine	P.E.S	Urologie
73	AGHOUTANE El Mouhtadi	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
74	HOCAR Ouafa	P.E.S	Dermatologie
75	EL KARIMI Saloua	P.E.S	Cardiologie
76	EL BOUCHTI Imane	P.E.S	Rhumatologie
77	AMRO Lamyae	P.E.S	Pneumo-phtisiologie

78	ZYANI Mohammad	P.E.S	Médecine interne
79	QACIF Hassan	P.E.S	Médecine interne
80	BEN DRISS Laila	P.E.S	Cardiologie
81	MOUFID Kamal	P.E.S	Urologie
82	QAMOUSS Youssef	P.E.S	Anesthésie réanimation
83	EL BARNI Rachid	P.E.S	Chirurgie générale

84	KRIET Mohamed	P.E.S	Ophthalmologie
85	BOUCHENTOUF Rachid	P.E.S	Pneumo-physiologie
86	ABOUCHADI Abdeljalil	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
87	BASRAOUI Dounia	P.E.S	Radiologie
88	RAIS Hanane	P.E.S	Anatomie Pathologique
89	BELKHOUS Ahlam	P.E.S	Rhumatologie
90	ZAOUI Sanaa	P.E.S	Pharmacologie
91	MSOUGAR Yassine	P.E.S	Chirurgie thoracique
92	EL MGHARI TABIB Ghizlane	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
93	DRAISS Ghizlane	P.E.S	Pédiatrie
94	EL IDRISSE SLITINE Nadia	P.E.S	Pédiatrie
95	RADA Nouredine	P.E.S	Pédiatrie
96	BOURRAHOUS Aicha	P.E.S	Pédiatrie
97	MOUAFFAK Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
98	ZIADI Amra	P.E.S	Anesthésie-réanimation
99	ANIBA Khalid	P.E.S	Neurochirurgie
100	TAZI Mohamed Illias	P.E.S	Hématologie clinique
101	ROCHDI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
102	FADILI Wafaa	P.E.S	Néphrologie
103	ADALI Imane	P.E.S	Psychiatrie
104	ZAHLANE Kawtar	P.E.S	Microbiologie- virologie
105	LOUHAB Nisrine	P.E.S	Neurologie
106	HAROU Karam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
107	BASSIR Ahlam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
108	BOUKHANNI Lahcen	P.E.S	Gynécologie-obstétrique

109	FAKHIR Bouchra	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
110	BENHIMA Mohamed Amine	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
111	HACHIMI Abdelhamid	P.E.S	Réanimation médicale
112	EL KHAYARI Mina	P.E.S	Réanimation médicale
113	AISSAOUI Younes	P.E.S	Anesthésie-réanimation
114	BAIZRI Hicham	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
115	ATMANE El Mehdi	P.E.S	Radiologie
116	EL AMRANI Moulay Driss	P.E.S	Anatomie
117	BELBARAKA Rhizlane	P.E.S	Oncologie médicale
118	ALJ Soumaya	P.E.S	Radiologie
119	OUBAHA Sofia	P.E.S	Physiologie
120	EL HAOUATI Rachid	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
121	BENALI Abdeslam	P.E.S	Psychiatrie
122	MLIHA TOUATI Mohammed	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
123	MARGAD Omar	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
124	KADDOURI Said	P.E.S	Médecine interne
125	ZEMRAOUI Nadir	P.E.S	Néphrologie
126	EL KHADER Ahmed	P.E.S	Chirurgie générale
127	LAKOUICHMI Mohammed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
128	DAROUASSI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
129	BENJELLOUN HARZIMI Amine	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
130	FAKHRI Anass	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
131	SALAMA Tarik	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
132	CHRAA Mohamed	P.E.S	Physiologie

133	ZARROUKI Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
134	AIT BATAHAR Salma	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
135	ADARMOUCH Latifa	P.E.S	Médecine communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
136	BELBACHIR Anass	P.E.S	Anatomie pathologique
137	HAZMIRI Fatima Ezzahra	P.E.S	Histologie-embryologie cytogénétique
138	EL KAMOUNI Youssef	P.E.S	Microbiologie-virologie

139	SERGHINI Issam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
140	EL MEZOUARI El Mostafa	P.E.S	Parasitologie mycologie
141	ABIR Badreddine	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
142	GHAZI Mirieme	P.E.S	Rhumatologie
143	ZIDANE Moulay Abdelfettah	P.E.S	Chirurgie thoracique
144	LAHKIM Mohammed	P.E.S	Chirurgie générale
145	MOUHSINE Abdelilah	P.E.S	Radiologie
146	TOURABI Khalid	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
147	BELHADJ Ayoub	P.E.S	Anesthésie-réanimation
148	BOUZERDA Abdelmajid	P.E.S	Cardiologie
149	ARABI Hafid	P.E.S	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
150	ARSALANE Adil	P.E.S	Chirurgie thoracique
151	ABDELFETTAH Youness	P.E.S	Rééducation et réhabilitation fonctionnelle
152	REBAHI Houssam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
153	BENNAOUI Fatiha	P.E.S	Pédiatrie
154	ZOUIZRA Zahira	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
155	SEDDIKI Rachid	Pr Ag	Anesthésie-réanimation

156	SEBBANI Majda	Pr Ag	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
157	ABDOU Abdessamad	Pr Ag	Chirurgie Cardio-vasculaire
158	HAMMOUNE Nabil	Pr Ag	Radiologie
159	ESSADI Ismail	Pr Ag	Oncologie médicale
160	MESSAOUDI Redouane	Pr Ag	Ophthalmologie
161	ALJALIL Abdelfattah	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
162	LAFFINTI Mahmoud Amine	Pr Ag	Psychiatrie
163	RHARRASSI Issam	Pr Ag	Anatomie-pathologique
164	ASSERRAJI Mohammed	Pr Ag	Néphrologie
165	JANAH Hicham	Pr Ag	Pneumo-phtisiologie
166	NASSIM SABAH Taoufik	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
167	ELBAZ Meriem	Pr Ag	Pédiatrie
168	BELGHMAIDI Sarah	Pr Ag	Ophthalmologie

169	FENANE Hicham	Pr Ag	Chirurgie thoracique
170	GEBRATI Lhoucine	MC Hab	Chimie
171	FDIL Naima	MC Hab	Chimie de coordination bio-organique
172	LOQMAN Souad	MC Hab	Microbiologie et toxicologie environnementale
173	BAALLAL Hassan	Pr Ag	Neurochirurgie
174	BELFQUIH Hatim	Pr Ag	Neurochirurgie
175	AKKA Rachid	Pr Ag	Gastro-entérologie
176	BABA Hicham	Pr Ag	Chirurgie générale
177	MAOUJOUR Omar	Pr Ag	Néphrologie
178	SIRBOU Rachid	Pr Ag	Médecine d'urgence et de catastrophe
179	EL FILALI Oualid	Pr Ag	Chirurgie Vasculaire périphérique

180	EL- AKHIRI Mohammed	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
181	HAJJI Fouad	Pr Ag	Urologie
182	OUMERZOUK Jawad	Pr Ag	Neurologie
183	JALLAL Hamid	Pr Ag	Cardiologie
184	ZBITOU Mohamed Anas	Pr Ag	Cardiologie
185	RAISSI Abderrahim	Pr Ag	Hématologie clinique
186	BELLASRI Salah	Pr Ag	Radiologie
187	DAMI Abdallah	Pr Ag	Médecine Légale
188	AZIZ Zakaria	Pr Ag	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
189	ELOUARDI Youssef	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
190	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Pr Ag	Hématologie clinique
191	EL FAKIRI Karima	Pr Ag	Pédiatrie
192	NASSIH Houda	Pr Ag	Pédiatrie
193	LAHMINI Widad	Pr Ag	Pédiatrie
194	BENANTAR Lamia	Pr Ag	Neurochirurgie
195	EL FADLI Mohammed	Pr Ag	Oncologie médicale
196	AIT ERRAMI Adil	Pr Ag	Gastro-entérologie
197	CHETTATI Mariam	Pr Ag	Néphrologie
198	SAYAGH Sanae	Pr Ag	Hématologie
199	BOUTAKIOUTE Badr	Pr Ag	Radiologie

200	CHAHBI Zakaria	Pr Ag	Maladies infectieuses
201	ACHKOUN Abdessalam	Pr Ag	Anatomie
202	DARFAOUI Mouna	Pr Ag	Radiothérapie
203	EL-QADIRY Rabiya	Pr Ag	Pédiatrie

204	ELJAMILI Mohammed	Pr Ag	Cardiologie
205	HAMRI Asma	Pr Ag	Chirurgie Générale
206	EL HAKKOUNI Awatif	Pr Ag	Parasitologie mycologie
207	ELATIQUI Oumkeltoum	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
208	BENZALIM Meriam	Pr Ag	Radiologie
209	ABOULMAKARIM Siham	Pr Ag	Biochimie
210	LAMRANI HANCHI Asmae	Pr Ag	Microbiologie-virologie
211	HAIHOUI Farouk	Pr Ag	Neurochirurgie
212	EL KHASSOUI Amine	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
213	MEFTAH Azzelarab	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
214	DOUIREK Fouzia	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
215	BELARBI Marouane	Pr Ass	Néphrologie
216	AMINE Abdellah	Pr Ass	Cardiologie
217	CHETOUI Abdelkhalek	Pr Ass	Cardiologie
218	WARDA Karima	MC	Microbiologie
219	EL AMIRI My Ahmed	MC	Chimie de Coordination bio-organique
220	ROUKHSI Redouane	Pr Ass	Radiologie
221	EL GAMRANI Younes	Pr Ass	Gastro-entérologie
222	ARROB Adil	Pr Ass	Chirurgie réparatrice et plastique
223	SALLAHI Hicham	Pr Ass	Traumatologie-orthopédie
224	SBAAI Mohammed	Pr Ass	Parasitologie-mycologie
225	FASSI FIIHRI Mohamed jawad	Pr Ass	Chirurgie générale
226	BENCHAFAI Ilias	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
227	EL JADI Hamza	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
228	SLIOUI Badr	Pr Ass	Radiologie

229	AZAMI Mohamed Amine	Pr Ass	Anatomie pathologique
230	YAHYAOUI Hicham	Pr Ass	Hématologie

231	ABALLA Najoua	Pr Ass	Chirurgie pédiatrique
232	MOUGUI Ahmed	Pr Ass	Rhumatologie
233	SAHRAOUI Houssam Eddine	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
234	AABBASSI Bouchra	Pr Ass	Pédopsychiatrie
235	SBAI Asma	MC	Informatique
236	HAZIME Raja	Pr Ass	Immunologie
237	CHEGGOUR Mouna	MC	Biochimie
238	RHEZALI Manal	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
239	ZOUITA Btissam	Pr Ass	Radiologie
240	MOULINE Souhail	Pr Ass	Microbiologie-virologie
241	AZIZI Mounia	Pr Ass	Néphrologie
242	BENYASS Youssef	Pr Ass	Traumato-orthopédie
243	BOUHAMIDI Ahmed	Pr Ass	Dermatologie
244	YANISSE Siham	Pr Ass	Pharmacie galénique
245	DOULHOUSNE Hassan	Pr Ass	Radiologie
246	KHALLIKANE Said	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
247	BENAMEUR Yassir	Pr Ass	Médecine nucléaire
248	ZIRAOUI Oualid	Pr Ass	Chimie thérapeutique
249	IDALENE Malika	Pr Ass	Maladies infectieuses
250	LACHHAB Zineb	Pr Ass	Pharmacognosie
251	ABOUDOURIB Maryem	Pr Ass	Dermatologie
252	AHBALA Tariq	Pr Ass	Chirurgie générale

253	LALAOUI Abdessamad	Pr Ass	Pédiatrie
254	ESSAFTI Meryem	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
255	RACHIDI Hind	Pr Ass	Anatomie pathologique
256	FIKRI Oussama	Pr Ass	Pneumo-phtisiologie
257	EL HAMDAOUI Omar	Pr Ass	Toxicologie
258	EL HAJJAMI Ayoub	Pr Ass	Radiologie
259	BOUMEDIANE El Mehdi	Pr Ass	Traumato-orthopédie
260	RAFI Sana	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
261	JEBRANE Ilham	Pr Ass	Pharmacologie

262	LAKHDAR Youssef	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
263	LGHABI Majida	Pr Ass	Médecine du Travail
264	AIT LHAJ El Houssaine	Pr Ass	Ophthalmologie
265	RAMRAOUI Mohammed-Es-said	Pr Ass	Chirurgie générale
266	EL MOUHAFID Faisal	Pr Ass	Chirurgie générale
267	AHMANNA Hussein-choukri	Pr Ass	Radiologie
268	AIT M'BAREK Yassine	Pr Ass	Neurochirurgie
269	ELMASRIOUI Joumana	Pr Ass	Physiologie
270	FOURA Salma	Pr Ass	Chirurgie pédiatrique
271	LASRI Najat	Pr Ass	Hématologie clinique
272	BOUKTIB Youssef	Pr Ass	Radiologie
273	MOUROUTH Hanane	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
274	BOUZID Fatima zahrae	Pr Ass	Génétique
275	MRHAR Soumia	Pr Ass	Pédiatrie
276	QUIDDI Wafa	Pr Ass	Hématologie

277	BEN HOUMICH Taoufik	Pr Ass	Microbiologie-virologie
278	FETOUI Imane	Pr Ass	Pédiatrie
279	FATH EL KHIR Yassine	Pr Ass	Traumato-orthopédie
280	NASSIRI Mohamed	Pr Ass	Traumato-orthopédie
281	AIT-DRISS Wiam	Pr Ass	Maladies infectieuses
282	AIT YAHYA Abdelkarim	Pr Ass	Cardiologie
283	DIANI Abdelwahed	Pr Ass	Radiologie
284	AIT BELAID Wafae	Pr Ass	Chirurgie générale
285	ZTATI Mohamed	Pr Ass	Cardiologie
286	HAMOUCHE Nabil	Pr Ass	Néphrologie
287	ELMARDOULI Mouhcine	Pr Ass	Chirurgie Cardio-vasculaire
288	BENNIS Lamiae	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
289	BENDAOUZ Layla	Pr Ass	Dermatologie
290	HABBAB Adil	Pr Ass	Chirurgie générale
291	CHATAR Achraf	Pr Ass	Urologie
292	OUMGHAR Nezha	Pr Ass	Biophysique

293	HOUMAIID Hanane	Pr Ass	Gynécologie-obstétrique
294	YOUSFI Jaouad	Pr Ass	Gériatrie
295	NACIR Oussama	Pr Ass	Gastro-entérologie
296	BABACHEIKH Safia	Pr Ass	Gynécologie-obstétrique
297	ABDOURAFIQ Hasna	Pr Ass	Anatomie
298	TAMOUR Hicham	Pr Ass	Anatomie
299	IRAQI HOUSSAINI Kawtar	Pr Ass	Gynécologie-obstétrique
300	EL FAHIRI Fatima Zahrae	Pr Ass	Psychiatrie

301	BOUKIND Samira	Pr Ass	Anatomie
302	LOUKHNATI Mehdi	Pr Ass	Hématologie clinique
303	ZAHROU Farid	Pr Ass	Neurochirurgie
304	MAAROUFI Fathillah Elkarim	Pr Ass	Chirurgie générale
305	EL MOUSSAOUI Soufiane	Pr Ass	Pédiatrie
306	BARKICHE Samir	Pr Ass	Radiothérapie
307	ABI EL AALA Khalid	Pr Ass	Pédiatrie
308	AFANI Leila	Pr Ass	Oncologie médicale
309	EL MOULOUA Ahmed	Pr Ass	Chirurgie pédiatrique
310	LAGRINE Mariam	Pr Ass	Pédiatrie
311	OULGHOUL Omar	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
312	AMOCH Abdelaziz	Pr Ass	Urologie
313	ZAHLAN Safaa	Pr Ass	Neurologie
314	EL MAHFOUDI Aziz	Pr Ass	Gynécologie-obstétrique
315	CHEHBOUNI Mohamed	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
316	LAIRANI Fatima ezzahra	Pr Ass	Gastro-entérologie
317	SAADI Khadija	Pr Ass	Pédiatrie
318	DAFIR Kenza	Pr Ass	Génétique
319	CHERKAOUI RHAZOUANI Oussama	Pr Ass	Neurologie
320	ABAINOU Lahoussaine	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
321	BENCHANNA Rachid	Pr Ass	Pneumo-phtisiologie
322	TITOU Hicham	Pr Ass	Dermatologie
323	EL GHOUL Naoufal	Pr Ass	Traumato-orthopédie
324	BAHI Mohammed	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
325	RAITEB Mohammed	Pr Ass	Maladies infectieuses

326	DREF Maria	Pr Ass	Anatomie pathologique
327	ENNACIRI Zainab	Pr Ass	Psychiatrie
328	BOUSSAIDANE Mohammed	Pr Ass	Traumato-orthopédie
329	JENDOUI Omar	Pr Ass	Urologie
330	MANSOURI Maria	Pr Ass	Génétique
331	ERRIFAIY Hayate	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
332	BOUKOUB Naila	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
333	OUACHAOU Jamal	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
334	EL FARGANI Rania	Pr Ass	Maladies infectieuses
335	IJIM Mohamed	Pr Ass	Pneumo-phtisiologie
336	AKANOUR Adil	Pr Ass	Psychiatrie
337	ELHANAFI Fatima Ezzohra	Pr Ass	Pédiatrie
338	MERBOUH Manal	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
339	BOUROUMANE Mohamed Rida	Pr Ass	Anatomie
340	IJDDA Sara	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
341	GHARBI Khalid	Pr Ass	Gastro-entérologie
342	ATBIB Yassine	Pr Ass	Pharmacie clinique
343	EL GUAZZAR Ahmed (Militaire)	Pr Ass	Chirurgie générale
344	MOURAFIQ Omar	Pr Ass	Traumato-orthopédie
345	HENDY Iliass	Pr Ass	Cardiologie
346	HATTAB Mohamed Salah Koussay	Pr Ass	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale

LISTE ARRETEE LE 04/10/2024



DÉDICACES



« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries »

Marcel Proust.

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 ووزنة عرشك
ومداد كلماتك اللهم لك الحمد ولك الشكر حتى ترضى ولك الحمد ولك الشكر عند
الرضى ولك الحمد ولك الشكر دائماً وأبداً على نعمتك

A ma grand-mère **FATIMA BAALI**, mon pilier :

Tes prières et ton soutien inébranlable m'ont accompagné depuis mes premiers jours, formant la fondation sur laquelle j'ai construit ma vie. Je ne serais pas ici aujourd'hui sans tes encouragements constants et ta bénédiction, qui ont éclairé mon chemin à chaque étape. Ta foi en moi a toujours été une source de force, me rappelant que je pouvais surmonter tous les obstacles.

Tu m'as appris à garder la tête haute, à rester confiante même dans les moments difficiles, et à avoir foi en Dieu. Chaque réussite que je célèbre aujourd'hui est, en grande partie, le reflet de ton influence et de ta détermination à me voir réussir.

Mi-LHAJA Merci d'être toujours là, de croire en moi, et de me montrer, jour après jour, la beauté de la vie et de l'amour.

C'est donc avec une profonde gratitude et un cœur rempli d'affection que je te dédie ce travail.

A la mémoire de ma sœur **SAPHAA** :

Depuis toujours, tu as été ma guide et mon inspiration. Dès l'âge de 6 ans, tu m'as orientée vers le domaine médical, un choix qui a façonné ma vie. Grâce à la bénédiction de Dieu, j'ai pu réaliser ce rêve, sachant que tu étais toujours à mes côtés.

En première année, je me suis retrouvée dans le service qui t'a accueilli dans tes derniers instants, comme si tu me disais : "Je suis désormais ton ange gardien." Ta présence m'a réconfortée et m'a encouragée à devenir, à mon tour, une protectrice pour des âmes comme la tienne.

À la fin de mon cursus, je ressens encore ta force à mes côtés, me rappelant que tu es fière de moi et que tu veilles sur moi depuis les cieux. Tu es et resteras toujours une part essentielle de ma vie et de mon travail. Je sais que tu es fière de mes accomplissements, et je me sens en sécurité, sachant que tu es là, veillant sur moi à chaque étape de mon parcours.

A la mémoire de ma tante **AICHAA** :

J'aurai tant aimé que tu sois présente aujourd'hui. Je te dédie ce travail en témoignage de mes sentiments les plus sincères. Puisse ton âme repose en paix.

Que Dieu, le tout puissant, te couvre de sa sainte miséricorde et t'accueille dans son éternelle Paradis.

A ma Maman : FATIMA EZZAHRA YICHEN :

Plus qu'une mère, tu as toujours été ma sœur et ma meilleure amie. Notre lien est bien plus profond que celui d'une relation traditionnelle, et je chéris chaque moment partagé avec toi. Que tu sois près de moi ou à distance, ta présence reste inébranlable. Tu as toujours été là pour m'encourager à poursuivre mes rêves, me poussant à aller de l'avant, même dans les moments les plus difficiles.

Lorsque je manque de confiance, tu sais comment me relever, me rappeler ma valeur et me guider pour retrouver ma force intérieure. Ton amour inconditionnel et ton soutien constant ont été des éléments essentiels de mon parcours. C'est grâce à toi, à ta sagesse et à ta bienveillance, que je me tiens ici aujourd'hui, prête à franchir de nouvelles étapes.

Dire merci ne suffira jamais à exprimer la profondeur de ma gratitude pour tout ce que tu représentes dans ma vie. Je prie pour que Dieu, dans Sa bonté infinie, t'accorde santé, bonheur et une longue vie remplie d'épanouissement. Puisses-tu récolter un jour les fruits de tes efforts et voir les résultats de ta sagesse dans la réussite de ceux que tu aimes. C'est avec un immense amour et une reconnaissance infinie que je te dédie ce travail.

A mon père : HASSAN YICHEN

Tout au long de ma vie, tu m'as élevé avec des valeurs fondamentales d'honneur, de droiture et de dignité, des principes qui ont façonné mon caractère et ma vision du monde. Ta sagesse et ton intégrité ont toujours été une source d'inspiration pour moi. En te présentant cette thèse, j'espère sincèrement qu'elle saura t'apporter une immense joie, symbolisant l'accomplissement de tes espoirs et de tes rêves pour moi. Chaque mot, chaque page, est un hommage à la confiance que tu m'as toujours témoignée, et je fais de mon mieux pour être à la hauteur de cette confiance.

Je ne peux qu'imaginer les sacrifices incommensurables que tu as consentis pour m'offrir la meilleure éducation et garantir mon bien-être. Rien, en effet, ne pourra jamais compenser tout ce que tu as fait pour moi, mais sache que ta générosité et ton dévouement sont gravés dans mon cœur. Je te suis profondément reconnaissant pour tout ce que tu as sacrifié, parfois dans l'ombre, pour me donner les moyens de réussir.

Je prie pour que Dieu, dans Sa bonté infinie, t'accorde santé, bonheur et une longue vie remplie d'épanouissement. Puisses-tu récolter un jour les fruits de tes efforts et voir les résultats de ta sagesse dans la réussite de ceux que tu aimes. Merci d'être l'exceptionnel père que tu es.

A mon oncle **ABDELAZIZ VICHEN** et son époux ma tante **HANANE VICHEN**:

C'est avec une immense gratitude que je vous dédie cette thèse. Votre soutien constant et votre présence à mes côtés ont été une source précieuse d'encouragement tout au long de ce parcours. Vous avez toujours cru en moi et partagé ma passion, et cela a fait toute la différence. Je suis profondément reconnaissante de vous avoir à mes côtés.

A mes sœurs **INTISSAR** et **AMIRA** et à notre benjamin **SOULAIMANE**:

Je vous dédie cette thèse avec une immense gratitude. Votre présence constante dans ma vie a été une source inestimable de réconfort et de joie. Chacun d'entre vous a apporté une couleur unique à mon parcours, et vos encouragements m'ont toujours encouragée à donner le meilleur de moi-même.

Nous avons partagé tant de souvenirs, des rires aux moments de complicité, qui ont rendu chaque étape de cette aventure encore plus significative. Votre amour et votre soutien m'ont permis de surmonter les défis et de poursuivre mes rêves avec confiance. C'est avec vous que j'ai appris la valeur de la solidarité et de l'unité, et je suis honorée de pouvoir partager ce moment avec vous.

A mes grands-parents :

Je vous dédie cette thèse avec tout mon amour et ma gratitude. Votre sagesse, votre bienveillance ont toujours été des piliers dans ma vie. Grâce à vous, j'ai appris l'importance des valeurs familiales, du travail acharné et de la persévérance. Les histoires que vous m'avez racontées et les leçons que vous m'avez transmises ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Votre présence chaleureuse et vos encouragements m'ont accompagnée tout au long de ce parcours, me donnant la force d'avancer. C'est un honneur de pouvoir partager ce moment avec vous, qui avez tant contribué à mon épanouissement.

A ma tante **MERIEME VICHEN**, mes oncles **ABDOU**, **ISMAIL** et **MOHAMED VICHEN**, ainsi que **ZAYNEB HACHAD**:

Je vous dédie cette thèse avec toute ma gratitude. Chacun d'entre vous a joué un rôle précieux dans ma vie, m'offrant des conseils et des encouragements qui ont façonné ma détermination. Votre présence constante et votre chaleur familiale m'ont permis de me sentir entourée et soutenue, rendant cette aventure encore plus significative. Je suis honorée de vous avoir dans ma vie et de pouvoir partager ce moment avec vous.

A la famille **YICHEN** au carré et surtout à mes cousins **MARWA, REDA, AIMRANE, GHITA, ALI, RAYANE, NOUR, YASMINE, INES, JANA** et **RANIA** :

Je vous dédie cette thèse avec beaucoup d'affection. Votre présence dans ma vie a été une source de joie et de complicité, et j'ai toujours apprécié nos moments partagés. Chacun d'entre vous a apporté une touche unique à mes souvenirs, et je suis reconnaissante de pouvoir compter sur vous. C'est avec vous que j'ai appris à célébrer les réussites et à surmonter les défis.

A mes voisins Famille **LAARBI** :

Je vous dédie cette thèse avec toute ma gratitude. Votre accueil chaleureux et votre bienveillance m'ont permis de ne jamais me sentir seule tout au long de mon parcours. Merci d'avoir toujours été là pour moi.

À mes chères amies, mes **Power Rangers**, mes **super-filles**, mes **idoles** :

Nos tempéraments si différents, nos chemins variés et nos villes éloignées ont pourtant créé une complicité unique. Avec vous, j'ai découvert la même joie, la même admiration et un amour profond qui nous lie.

***ZAHIRI IHSANE**, tu es l'incarnation de la détermination et du courage. Ta capacité à travailler sans relâche est une véritable source d'inspiration pour moi. Chaque moment passé à tes côtés m'a permis d'apprécier davantage la vie et à découvrir ma propre force intérieure. Ton soutien et ton amitié m'ont façonnée, et je ne serais pas la personne que je suis sans toi. Je t'admire et espère à devenir aussi forte que toi un jour.*

***WARI HAJAR**, ta bonté et ta pureté d'âme sont rares. J'ai découvert en toi une amie avec un cœur authentique, et être à tes côtés m'a fait réaliser que la vie a vraiment du sens. Avec toi, chaque moment devient précieux, et je suis au-delà reconnaissante de t'avoir dans ma vie. Ta capacité à me comprendre, même dans mes moments les plus dramatiques, me reconforte et me fait sourire.*

***FIHRI IMANE**, Depuis toutes ces années, nous avons tissé un lien profond, capable de transcender les mots. Nous avons partagé des moments de doute, des larmes versées dans les ruelles, et des éclats de joie qui ont résonné dans le ciel. Chaque expérience, qu'elle soit difficile ou joyeuse, nous a rapprochés et a enrichi notre complicité. Nous avons exploré le monde ensemble, tendant la main à ceux qui en avaient besoin tout en découvrant qui nous étions vraiment. Ta présence à mes côtés, tant dans mes moments les plus sombres que dans mes plus grandes victoires, a été un soutien inestimable. Merci, d'être toujours là.*

ET-TALLAB CHAIMAE, ta sagesse est inégalée. Chaque fois que je me trouve face à des choix difficiles, je me tourne vers toi pour tes précieux conseils. Ta capacité à comprendre les situations avec clarté et profondeur me guide toujours. Même lorsque je prétends savoir, je sais que ta perspective m'apporte une vérité que je ne peux ignorer.

SOUILLMI HIBA, À notre amitié qui a pris son temps pour éclore... C'est au fil des courses contre la montre, des longues marches dans les couloirs de l'hôpital et des milliers de mots écrits pour nos patients que nos chemins se sont croisés. Je suis profondément reconnaissante pour ces moments intenses, car ils m'ont permis de découvrir une âme douce et bienveillante comme la tienne. Que notre amitié continue à grandir et à durer longtemps.

LAAZIRI HIBA, tu es ma bouffée d'air frais, ma source de joie. Nous nous sommes rencontrées dans un moment difficile, mais depuis le premier jour, tu as illuminé ma vie comme le printemps. Ta passion, ton énergie et ton soutien me rappellent chaque jour la beauté de l'existence. Tu es bien plus qu'une amie : tu es ma cheerleader, mon coach et ma sœur.

SELAKE ZINEB, à ma véritable âme sœur, qui est loin des yeux mais toujours proche du cœur. Nos longues conversations et nos appels vidéo sont des refuges pour moi. Tu me rappelles constamment ma valeur et m'encourages à persévérer, à croire en mes rêves et à garder la foi. Ta phrase, "rbbi zmro ykheyebek nti moulat l9lb lbyed," résonne en moi et me motive à avancer.

BOUHOUT WIAME, à ma lumière jaune, le plus beau cadeau que la vie m'ait offert. Tout ce que je suis aujourd'hui, je le dois en grande partie à notre amitié. Près de 18 ans d'amour, de rires et de complicité, et j'espère que nous aurons encore de nombreuses années à partager ensemble. Ta présence illumine ma vie et me rappelle que l'amitié est un trésor.

À vous toutes, mes super-filles, vous avez transformé ma vie et m'avez appris à aimer, à rêver et à grandir. J'ai découvert la beauté de la vie et de l'amitié grâce à vous. Je suis infiniment reconnaissante de vous avoir à mes côtés et de pouvoir partager ce moment si précieux avec vous.

À une certaine personne perdue de vue qui, un jour, m'a encouragé à me ressaisir et à reprendre ce travail en me disant : "Non, ce n'est pas acceptable ce que tu es en train de faire. Il est temps de te concentrer et de ne pas avancer petit à petit, comme tu disais que c'était ta conception. Je crois sincèrement que tu peux réaliser un excellent travail". Je te dédie ces mots ici, comme je te l'ai promis autrefois. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi et pour la confiance que tu m'as témoignée.

À mes amis du parcours :

CHAIMAA, WALID, SOUKAYNA, YASSIR, MANAL, IBTISSAM, YAHIA, MERYEM, RACHID, HIBA, YASSER, AYOUB, SALMA, TALBIX, SAPHAA
... Votre amitié a été des éléments essentiels tout au long de cette aventure.
Merci d'avoir été à mes côtés, de m'avoir soutenue et d'avoir rendu ce parcours si mémorable. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours.

Au groupe 12 :

Je dédie cette thèse à vous tous, qui avez été des partenaires inestimables tout au long de ce parcours. Votre soutien et votre amitié ont été essentiels durant ces années d'études. Chaque moment partagé et chaque défi surmonté ensemble ont profondément enrichi cette expérience. Je vous remercie pour la belle dynamique que nous avons créée ensemble.

YOUR PRESENCE IS THE GREATEST GIFT

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
" ذَلِكَ فَضْلُ اللَّهِ يُؤْتِيهِ مَنْ يَشَاءُ ۗ وَاللَّهُ ذُو الْفَضْلِ الْعَظِيمِ "
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ



REMERCIEMENTS



À notre maître et président de thèse : Pr. RAJI ABDELAZIZ
Professeur et chef de service d'Oto-rhino laryngologie au CHU Mohammed VI de Marrakech

Je vous prie de bien vouloir, cher Maître, accepter l'expression de ma profonde reconnaissance pour l'immense honneur que vous me faites en présidant ma thèse. C'est avec un profond respect et une grande admiration que je me tourne vers vous, consciente de la valeur inestimable de votre engagement et de votre soutien. Malgré vos nombreuses responsabilités et obligations, vous m'avez toujours accueilli avec une disponibilité et une bienveillance qui m'ont profondément touché. Je vous remercie infiniment, cher Maître, pour le temps précieux que vous avez bien voulu accorder à ce travail. Votre bonté, votre grande modestie, et surtout votre infinie compréhension témoignent des qualités humaines et professionnelles d'une rare excellence, qui ont toujours suscité mon admiration. Je vous prie, cher Maître, d'accepter à nouveau l'expression de ma plus profonde gratitude et de ma reconnaissance sincère pour tout ce que vous avez fait pour moi. Soyez assuré de mon respect le plus profond et de mes sentiments les plus dévoués.

À notre maître et rapporteur de thèse : Pr. SAID AIT BENALI
Professeur et chef de service de Neurochirurgie au CHU Mohammed VI de Marrakech

Vous m'avez accordé un immense honneur et un grand privilège en acceptant de diriger mon travail. Il m'est impossible de dire en quelques mots ce que je vous dois. Votre compétence, votre dynamisme, votre rigueur et vos qualités professionnelles et humaines me servent d'exemple, et ont suscité en moi une grande admiration et un profond respect. Vous m'avez toujours réservé le meilleur accueil malgré vos obligations professionnelles. Je vous remercie infiniment, cher Maître, pour avoir consacré à ce travail une grande partie de votre temps précieux et de m'avoir guidé avec rigueur et bienveillance. A vos côtés, j'ai appris à considérer de nouvelles perspectives ambitieuses de vie professionnelle. La simplicité et la grande compétence dont vous m'avez fait témoignage m'ont rendu fière d'être encadrée par vous Professeur. Je suis très fière d'avoir appris auprès de vous et j'espère avoir été à la hauteur de votre attente. Veuillez accepter, cher Maître, dans ce travail l'assurance de mon estime et de mon profond respect.

À notre maître et juge de thèse : Pr. FAROUK HAJHOUSHI

Professeur de Neurochirurgie au CHU Mohammed VI de Marrakech

Je vous remercie pour la spontanéité et la simplicité avec lesquelles vous avez accepté de juger ce travail. Votre disponibilité, vos conseils avisés, ainsi que votre bienveillance tout au long de ce processus ont été d'une aide inestimable. Votre regard critique et vos recommandations pertinentes ont grandement contribué à l'amélioration de mon travail. Je suis profondément reconnaissante de la générosité avec laquelle vous avez partagé votre expertise, et de la patience dont vous avez fait preuve tout au long de ce travail. Votre gentillesse et votre approche bienveillante ont rendu cette expérience particulièrement enrichissante, et je suis persuadée que vos conseils continueront de m'accompagner dans mes projets futurs. Je vous remercie encore une fois pour votre précieuse contribution, et je vous prie d'accepter, Maître, l'expression de mon profond respect et de ma sincère reconnaissance.



LISTE DES ABRÉVIATIONS



LISTE DES ABRÉVIATIONS

AIC	: Anévrisme intracranien
AINR	: Anévrisme intracranien non rompu
AIR	: Anévrisme intracranien rompu
ACM	: l'artère cérébrale moyenne
ARM	: l'angiographie par résonance magnétique
ASN	: angiographie par soustraction numérique
AVC	: Accident vasculaire cérébral
CAO	: conception assistée par ordinateur
CBCT	: ConeBeam CT
CTA	: Coronary Computed Tomography ou angioscanner
CT	: Computed Tomography ou scanner
DBS	: Deep Brain Stimulation ou stimulation cérébrale profonde
DICOM	: imagerie numérique et communications en médecine
DL	: Deep Learning ou apprentissage profond
DNN	: Deep Neural Network ou réseau de neurones profonds
HIC	: Hémorragie intracranienne
HH	: High-High
HL	: High-Low
HSA	: hémorragie sous-arachnoïdienne
HSD	: hématome sous-dural
IRM	: Imagerie par résonance magnétique
LL	: Low-Low
LH	: Low-High
LCR	: liquide céphalo-rachidien
MARSS	: Mini invasive Assisted Robotic Spine Surgery
MAV	: malformations artério veineuses
ME	: Moelle épinière
ML	: Machine Learning ou apprentissage automatique
NB	: Naïf Bayes
PCA	: Principal component analysis ou analyse en composante principale
RA	: réalité augmentée
ResNet	: Residual network ou réseau de neurones résiduels
RRS	: Rupture Resemblance Score ou Score de ressemblance de rupture
ROI	: régions d'intérêt
ROSA	: Robotic Surgical Assistant
RL	: régression logistique
RV	: virtual reality ou réalité virtuelle
SEEG	: stéroélectroencéphalographie
SVM	: Support Vector Machine ou machine à vecteurs de support

T1CE : IRM pondérée en T1 avec injection de produit de contraste
TCC : traumatisme craniocérébral
TEP : tomographie par émission de positrons
TRE : target registration error ou erreur d'enregistrement de la cible



Liste des figures et tableaux



- Figure 1** : 1956 Conférence de Dartmouth, les pères fondateurs de l'IA.
- Figure 2** : Les premiers réseaux neuronaux artificiels visaient à reproduire les neurones du cerveau humain. [7]
- Figure 3** : Diagramme sur l'historique et l'évolution de IA au cours des années. [11]
- Figure 4** : Les 3V du Big Data.
- Figure 5** : Types de données utilisées dans le domaine de la santé.
- Figure 6** : L'algorithme SVM basé sur l'hyperplan. [14]
- Figure 7** : Schéma légendaire comparatif entre Forêt Aléatoire et l'arbre décisionnel.
- Figure 8** : "Clustering" en apprentissage non supervisé.
- Figure 9** : Apprentissage supervisé et apprentissage non-supervisé. [16]
- Figure 10** : Réseau de neurones profond.
- Figure 11** : Un réseau neuronal à convolution utilisé pour l'analyse d'images.
- Figure 12** : Le robot Puma 200. [18]
- Figure 13** : Le robot neuromate de Renishaw[®]. [19]
- Figure 14** : Divers systèmes robotiques stéréotaxiques et leurs spécifications techniques. [20]
- Figure 15** : Le SurgiScope[®].
- Figure 16** : ROSA ONE BRAIN[®].
- Figure 17** : Système iSYS1[®].
- Figure 18** : TDMs axiaux sans contraste montrant un HSD mince de l'hémisphère frontotemporal droit et une HSA traumatique des lobes frontal et temporal gauches, accompagnées des résultats de l'analyse IA sous forme de cartes à code couleur.
- Figure 19** : TDMs axiaux montrant faux positifs dû à la présence des noyaux gris centraux calcifiés et une calcification paraventriculaire du lobe pariétal gauche, avec artefact métallique d'une valve de dérivation.
- Figure 20** : Lecture augmentée, sans superposition de segmentation du modèle sur CTA en vue axiale, coronale et sagittale. [38]
- Figure 21** : (a) Coupe axiale d'angioscanner cérébral et (b) image de reconstruction tridimensionnelle avec rendu volumique. [40]
- Figure 22** : Flux de travail pour le calcul du RRS. [41]
- Figure 23** : Schéma du processus d'IA dans la détection des anévrismes et la prise de décision clinique. [42]
- Figure 24** : Sections coronales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche. [49]
- Figure 25** : Sections sagittales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche. [49]
- Figure 26** : Sections axiales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche. [49]
- Figure 27** : IRM en plan axial, pondérées en T2, et de résolution 256×256 pixels. [52]
- Figure 28** : La segmentation des images réalisée à l'aide de la méthode Fuzzy C-means. [52]
- Figure 29** : Extraction produit des sous-bandes (LL, LH, HL, HH) représentant les composantes de l'image. [52]
- Figure 30** : Mécanisme de détection des tumeurs à partir des CNNs. [53]

- Figure 31** : Résultats de classification à partir des CNN : (A) Images sans méningiome et (B) image cérébrale de méningiome. [55]
- Figure 32** : Résultats de la segmentation : (A) Source de l'image cérébrale de méningiome et (B) image de la tumeur segmentée analysée par un algorithme de segmentation morphologique. [55]
- Figure 33** : Un modèle SCNN combinant des CNN d'apprentissage profond avec des modèles de survie histologiques. [63]
- Figure 34** : Processus de reconstruction des images 3D–RV et réalisation de la scène RV finale dans 3D Slicer. [69]
- Figure 35** : Exemple représentatif d'un stagiaire en chirurgie interagissant avec le module de réalité virtuelle. [73]
- Figure 36** : Exemple de simulation en réalité virtuelle d'une laminotomie lombaire à l'aide d'un rongeur Kerrison (à gauche), et de la réalisation de la décompression et de l'ablation du ligamentum flavum, exposant la dure-mère irrégulière comprimée (à droite). [73]
- Figure 37** : Images IRM de patients atteints de gliome de grade IV. [75]
- Figure 38** : Images TEP de patients atteints de gliome. De gauche à droite, il s'agissait des images de 1 h, 8 h, 12 h et 24 h d'injection de traceur, respectivement. [75]
- Figure 39** : Modèle de IA permettant la fusion TEP + IRM de patients atteints de gliome. De gauche à droite, il s'agissait des images de fusion et des images à 8 h et 24 h après l'injection du traceur. Les flèches indiquent les lésions. [75]
- Figure 40** : Une visualisation de la façon dont le logiciel identifie les vertèbres par un processus en 3 étapes. [76]
- Figure 41** : Visualisation de l'identification automatique du pédicule et de la suggestion de pose de vis dans les vues axiales (A) et sagittales (B) et visualisation de la section vertébrale segmentée incluant la suggestion de vis (C). [76]
- Figure 42** : Flux de travail séquentiel pour obtenir une précision absolue du positionnement d'un patient sur la table de radiothérapie. [77]
- Figure 43** : Images préopératoires et peropératoires:(A) Lésion vasculaire suspecte au niveau pariétal droit avec vestige hémorragique sur tomодensitométrie (CT) (flèche bleue). (B) L'angiographie par résonance magnétique (ARM) reconstructive préopératoire a révélé la lésion vasculaire enchevêtrée (flèche rouge). (C) Un phénomène d'absence de flux a été observé sur l'image pondérée en T2 (flèche verte). (D) Angiographie par soustraction numérique (ASN) peropératoire pour confirmation de la localisation de la lésion. [79]
- Figure 44** : Microchirurgie sous assistance de la technique RA. (A) Champ opératoire sans projection d'hologramme RA. (B) Le nidus AVM et les artères nourricières ont été étiquetés avec une couleur différente (bleu : nidus ; rouge : artère d'alimentation de l'artère cérébrale moyenne ; jaune : artère d'alimentation de l'artère cérébrale postérieure) ; La flèche rouge indique également l'artère nourricière de l'artère cérébrale moyenne. (C) Écrêtage et coagulation de l'artère nourricière. (D) L'oblitération d'une autre artère nourricière à partir de l'artère cérébrale postérieure ; La flèche verte indique le clip pour l'élimination de l'artère d'alimentation. [79]

- Figure 45** Insertion du fil-guide à l'aide d'un système robotique pour l'insertion préplanifiée de la vis pédiculaire.[84]
- Figure 46** : Pose percutanée de la vis pédiculaire avec le patient en position de décubitus latéral réalisée à l'aide de la représentation tridimensionnelle de la colonne vertébrale du patient dans le système de navigation basée sur la tomodensitométrie [84]
- Figure 47** : (A) IRM axiale pré- et (B) postopératoire montrant une résection tumorale totale macroscopique. Incision thoracique postopératoire (C) antérieure et (D) postérieure après utilisation du robot da Vinci pour enlever la tumeur thoracique apicale. [86]
- Figure 48** : Patient en position transatlantique.
- Figure 49** : Phase nasale.
- Figure 50** : Exposition de l'ostium sphénoïdal droit.
- Figure 51** : Coagulation bipolaire de la muqueuse médiale à l'ostium sphénoïdal.
- Figure 52** : Dissection sous-muqueuse sur la ligne médiane exposant le rostre et la muqueuse nasale controlatérale.
- Figure 53** : A. phase sellaïre après sphénoïdectomie. B. face exocrânienne de la base du crâne après sphénoïdectomie.
- Figure 54** : Phase sellaïre. A : ostéotomie emportant le plancher sellaïre. B : ouverture de la selle. C : exposition de la dure-mère sellaïre. D : résection de l'adénome
- Figure 55** : Descente du diaphragme sellaïre indiquant une résection tumorale complète et dure-mère sellaïre ouverte.
- Figure 56** : Fin d'exérèse d'un macroadénome hypophysaire.
- Figure 57** : (A et B) Reconstruction durale par mise en place d'un substitut dural résorbable en extradural et remise en place du volet osseux avant l'instillation de la colle biologique.
- Figure 58** : Ciblage par le modèle DNN des régions tumorales supérieures et suprasellaïres pour prédire les fuites de LCR. [109]
- Figure 59** : Cadre stéréotaxique appliqué sur la tête du patient. [111]
- Figure 60** : Système de neuronavigation S7 Medtronic®.
- Figure 61** : La boucle Perception/Décision/Action [111]
- Figure 62** : Principe de triangulation des systèmes de repérage.
- Figure 63** : Synoptique d'une configuration de neuronavigation.
- Figure 64** : Flux de travail de la neuronavigation traditionnelle. [114]
- Figure 65** : Coupes axiale, sagittale et coronale d'IRM ont été réalisées montrant une volumineuse lésion sellaïre et supra sellaïre en rapport avec un macro adénome hypophysaire avec envahissement du sinus caverneux et compression du chiasma optique.
- Figure 66** : Un logiciel de fusion d'images présentant les caractéristiques de la TDM et de l'IRM.
- Figure 67** : Différentes étapes de recalage.
- Figure 68** : Fixation du bandeau.
- Figure 69** : Orientation de la caméra.
- Figure 70** : Enregistrement de la sonde.

- Figure 71** : Identification et mémorisation des repères.
- Figure 72** : Le repérage par neuronavigation du plancher du sinus sphénoïde.
- Figure 73** : Scénario d'utilisation du système AI dans la segmentation, l'édition et le calcul de l'intensité et les propriétés géométriques des gliomes cérébraux de haut grade. [120]

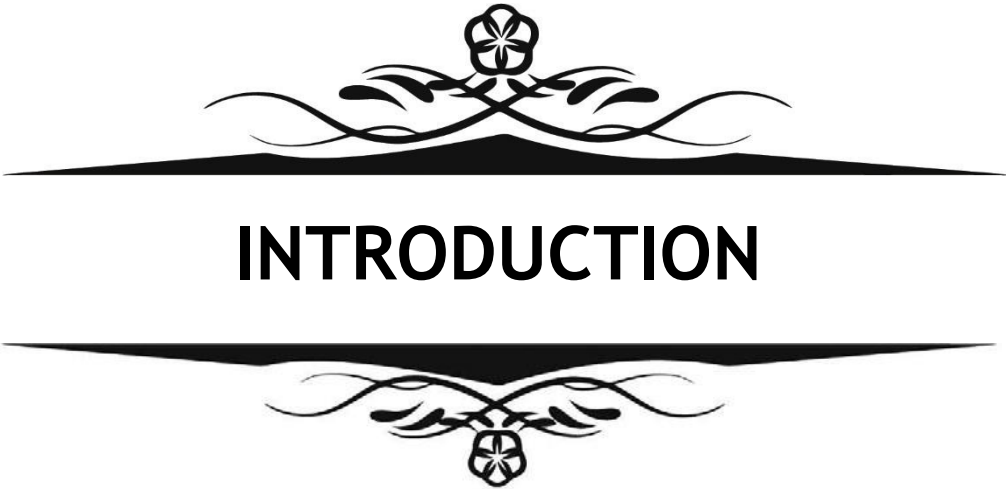


PLAN



INTRODUCTION	1
MATERELS ET METHODES	4
RESULTATS	6
I. Fondements de l'Intelligence Artificielle.....	7
1. Historique et évolution de l'IA	7
a) Les Fondements Conceptuels (1940s – 1950s) :	7
b) Les premières réalisations (1950–1960) :	8
c) Age d'Or et le premier Hiver de l'IA (1950–1970) :	9
d) L'Ere de résurgence (1980–1990) :	10
e) IA symbolique VS IA basée sur les données (1990–2000) :	11
f) L'Ere du Deep Learning:	12
2. Les méthodes de l'intelligence artificielle	14
a) Big Data :	14
b) L'apprentissage automatique	16
• L'apprentissage automatique supervisé :	17
• L'apprentissage automatique non supervisé :	21
c) L'apprentissage profond	23
3. Evolution de l'IA dans le domaine de la neurochirurgie	26
II. Les applications de l'IA en Neurochirurgie.....	32
1. Utilisation de l'IA pour l'imagerie médicale	32
a) Imagerie cérébrale :	32
i. IA et l'hémorragie intracrânienne (HIC)	32
ii. IA et Anévrismes cérébraux :	36
iii. IA et AVC :	41
iv. IA et tumeurs :	45
b) Imagerie du rachis :	50
2. Autres aspects de l'application de l'IA :	50
a) Analyse personnalisée :	51
b) Prédiction des résultats et Anticipation des complications :	53

c) Planification itérative :	55
d) Formation et apprentissage :	56
e) Navigation chirurgicale	60
3.Chirurgie Robotique	68
a) Exploitation du rachis	68
b) Exploitation du crane	72
III. Ethique et réglementation	74
IV. Perspectives futures[95]	78
DISCUSSION	80
I. Expérience du service	81
II. Endoscopie : Bénéfices Actuels et Perspectives d ' IA :	82
a. Positionnement du malade :	82
b. Déroulement de l'acte opératoire :	84
c. Complications de la chirurgie endoscopique endonasale:	92
d. Les avantages et les limites de l'abord endoscopique :	93
e. Apport de l'IA à l'endoscopie:	94
III. Neuronavigation : Utilisation Présente et Innovations IA à Venir :	95
a. Principe de la neuronavigation :	97
b. Le matériel de la neuronavigation :	98
c. Procédure de la neuronavigation :	100
d. Les avantages et les limites de la neuronavigation : [113,118,119]	112
e. Apport de l'IA à la neuronavigation :	113
CONCLUSION	118
RÉSUMÉ	120
BIBLIOGRAPHIE	126



INTRODUCTION



La neurochirurgie, en tant que spécialité médicale vitale, se consacre au traitement des affections complexes du cerveau, de la moelle épinière, leur vascularisation et leurs enveloppes. La neurochirurgie a toujours eu une longueur d'avance, en adoptant de manière précoce des méthodes et des outils novateurs.

Cependant, malgré son expertise et ses avancées, la neurochirurgie demeure confrontée à des défis inhérents aux interventions chirurgicales complexes. La délicatesse du tissu cérébral, la proximité des structures vitales, la complexité spatiale, l'abandon réseau vasculaire et la dualité entre anatomie et fonction engendrent des risques considérables lors des opérations. La précision millimétrique nécessaire pour éviter des dommages irréversibles exige des compétences et une maîtrise exceptionnelle de la part des chirurgiens. Les données complexes et hétérogènes, combinées à la variabilité anatomique d'un patient à l'autre, rendent la prise de décision préopératoire et per opératoire ardue. Les contraintes temporelles et les incertitudes inhérentes à ces procédures soulignent l'importance d'intégrer des technologies avancées pour maximiser la précision et les résultats.

Dans ce contexte, l'application de l'intelligence artificielle (IA) se révèle prometteuse, offrant un potentiel considérable pour améliorer la sécurité, la précision et l'efficacité des interventions neurochirurgicales grâce à des outils avancés d'assistance pour les chirurgiens.

Néanmoins, cette convergence de la technologie et de la médecine suscite des questionnements essentiels d'ordre éthique et pratique, notamment en ce qui concerne la garantie de fiabilité des systèmes d'IA utilisés en neurochirurgie et les implications sur la responsabilité médicale lorsque des décisions critiques reposent sur des algorithmes.

Cette étude a pour objectif de contribuer à la réalisation d'une revue scientifique des différents travaux des chercheurs spécialisés en intelligence artificielle (IA) dans le domaine de la neurochirurgie au niveau international. Nous chercherons à analyser leur influence, leurs avancées et les thématiques qu'ils ont abordées.

En outre, cette revue mettra en lumière les fondements et les avancées récentes de l'IA en neurochirurgie, tout en identifiant les axes prioritaires pour la recherche future visant à optimiser les interventions chirurgicales et les soins prodigués aux patients présentant des affections neurologiques. Ainsi à explorer les défis et les opportunités liés à l'intégration de l'IA dans la neurochirurgie, en particulier à son application dans la neuronavigation et l'endoscopie de la base du crâne et les perspectives futures.



MATERELS ET METHODES



I. Caractéristiques de l'étude :

La présente étude se veut être une rétrospective, à visée pédagogique, de l'application de l'intelligence artificielle dans le domaine de la neurochirurgie. Elle a pour objectif ultime de suivre l'évolution de l'IA, tracer son introduction dans le monde réel et son apport dans le domaine médical, plus spécifiquement son application à la neurochirurgie.

Tout au long de cette étude nous nous efforcerons de mettre en valeur les différentes applications de l'IA en neurochirurgie, d'étudier les contraintes qu'implique cette nouvelle technologie, ainsi que ses perspectives de développement futur.

II. Matériels et Méthodes :

Nous avons réalisé une méta-analyse et revue de la littérature qui traite l'étude de l'intelligence artificielle et la neurochirurgie : état des lieux et perspectives de développement.

Notre recherche d'articles est basée essentiellement sur l'utilisation des moteurs de recherches suivants : Pub Med, science direct et Google Scholar avec les mots clés suivants : IA, neurochirurgie, applications, neuronavigation, évolution, suivi, endoscopie, perspectives futures, réglementations.

Nous avons répertorié plus de 300 articles, nous avons sélectionné les plus pertinents et plus récents et qui répondent à une méthodologie analytique et statistique académique. Nous avons finalement retenu 132 articles constituant le socle de notre bibliographie et de nos références.

Pour illustrer ce travail, nous avons inclus un cas issu de notre service, qui montre l'utilisation de la neuronavigation. Ce cas permet de mieux expliquer les techniques actuelles, avant d'aborder, par la suite, les apports potentiels de l'intelligence artificielle à la neuronavigation et à l'endoscopie de la base du crâne.



RESULTATS



I. Fondements de l'Intelligence Artificielle

1. Historique et évolution de l'IA

L'Intelligence Artificielle est souvent référée comme un domaine de l'informatique qui se concentre sur le développement de systèmes et d'algorithmes capables de réaliser des tâches nécessitant des processus mentaux humains, tels que l'apprentissage, la perception, la résolution de problèmes et la compréhension du langage naturel.

Elle représente une des avancées technologiques les plus révolutionnaires du XXI^e siècle, transformant de manière significative notre société, notre économie et même notre manière de vivre. Avant de plonger dans les profondeurs de son histoire et de son évolution, il est essentiel de comprendre les origines de cette discipline fascinante.

L'IA puise ses racines dans l'ambition humaine d'émuler l'intelligence et la réflexion humaine à travers des machines. À travers les décennies, elle a connu des périodes d'optimisme débridé, suivies de déceptions, mais elle est toujours parvenue à surmonter les obstacles grâce à la persévérance des chercheurs et aux avancées technologiques.

a) Les Fondements Conceptuels (1940s - 1950s) :

Les conférences de Macy, organisées entre 1946 et 1953, ont joué un rôle fondamental dans l'émergence de l'intelligence artificielle. Ces rencontres interdisciplinaires ont réuni des experts de divers domaines tels que la psychologie, la biologie, les mathématiques et la philosophie.[1]

Au cœur de ces discussions se trouvait la cybernétique, un concept qui envisageait la modélisation des systèmes complexes et des comportements en s'inspirant des mécanismes biologiques et mécaniques. Norbert Wiener, souvent considéré comme le père de la cybernétique, a introduit des principes fondamentaux tels que la rétroaction et la communication, soulignant l'importance de ces concepts dans la compréhension des systèmes et du comportement intelligent. Ses travaux ont jeté les bases théoriques pour l'IA, en insistant sur la manière dont les systèmes peuvent être conçus pour imiter et simuler des comportements intel-

ligents, marquant ainsi le début de l'exploration systématique des machines intelligentes et de leur capacité à résoudre des problèmes complexes.[2]

En combinant les idées émergentes de la cybernétique avec la vision novatrice de Wiener, les conférences de Macy ont stimulé les réflexions et les recherches ultérieures qui ont façonné le champ en plein essor de l'IA.

Alan Turing, un mathématicien britannique à son tour s'intéresse au sujet et publie en 1950, un article explorant la relation entre les ordinateurs et l'intelligence, introduisant le célèbre "test de Turing" visant à évaluer si un ordinateur peut simuler un comportement humain au point de le confondre avec un humain dans une conversation.[3]

Malheureusement, les travaux de Turing ont été freinés par deux obstacles majeurs. D'abord, les ordinateurs devaient évoluer car avant 1949, ils ne pouvaient pas stocker les commandes, ils pouvaient seulement les exécuter, ce qui était essentiel pour l'intelligence. Ensuite, les coûts élevés de l'informatique dans les années 1950, il fallait démontrer la faisabilité du concept et bénéficier du soutien de personnalités influentes.

b) Les premières réalisations (1950-1960) :

Dans les années 1950 et 1960, la Conférence de Dartmouth a été le point de départ de l'intelligence artificielle en tant que domaine d'étude formel. La conférence, organisée en été 1956 par John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester et Claude Shannon, a réuni des chercheurs interdisciplinaires pour discuter de la possibilité de créer une intelligence similaire à celle humaine à travers des machines.[4]



FIGURE 1: 1956 CONFÉRENCE DE DARTMOUTH, LES PÈRES FONDATEURS DE L'IA.

Les premières réalisations de l'IA pendant cette période comprenaient des programmes tels que le "Logic Theorist" développé par Allen Newell et Herbert Simon, qui pouvait résoudre des problèmes de logique symbolique, et le "General Problem Solver" qui cherchait des solutions à divers problèmes.

La conférence a jeté les bases conceptuelles de l'IA en introduisant des idées sur la modélisation des processus cognitifs, la résolution de problèmes et le raisonnement automatique. Malgré des débuts modestes, elle a marqué le début d'un domaine en constante évolution et a ouvert la voie à des décennies de recherches et d'avancements dans le domaine de l'intelligence artificielle.

c) Age d'Or et le premier Hiver de l'IA (1950-1970) :

Malgré les défis initiaux, l'âge d'or de l'intelligence artificielle dans les années 1950 et 1960 a été une période cruciale de développement et d'enthousiasme pour le domaine.

La Conférence de Dartmouth en 1956 est souvent citée comme le point de départ officiel. C'était un moment où l'on croyait fermement que l'IA, basée sur des concepts tels que la

logique symbolique, la modélisation symbolique, et les algorithmes de recherche, pourrait résoudre des problèmes complexes et reproduire l'intelligence humaine.[5]

Cependant, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, l'IA a traversé ce qui est souvent appelé le premier "hiver de l'IA". Les attentes élevées n'étaient pas soutenues par les progrès techniques limités de l'époque. Les chercheurs ont réalisé que la tâche de reproduire l'intelligence humaine était bien plus complexe que prévu initialement. De plus, les ressources informatiques et financières nécessaires étaient bien supérieures à ce qui était disponible à cette époque. En conséquence, le financement pour la recherche en IA a considérablement diminué, entraînant un ralentissement des progrès et un désintérêt marqué pour le domaine.[6]

d) L'Ere de résurgence (1980-1990) :

L'époque de la résurgence de l'intelligence artificielle dans les années 1980-1990 a été caractérisée par une revitalisation significative des recherches et des avancées technologiques dans le domaine de l'IA, après une période de ralentissement appelée le "premier hiver de l'IA". Plusieurs facteurs ont contribué à cette résurgence.

Tout d'abord, des progrès substantiels dans les technologies informatiques, notamment l'augmentation de la puissance de calcul et des capacités de stockage, ont rendu possible le traitement de volumes de données beaucoup plus importants. Cela a permis de développer et d'expérimenter des modèles d'IA plus complexes et sophistiqués.[7]

Ensuite, de nouvelles méthodologies d'apprentissage automatique, notamment l'apprentissage profond, ont commencé à être explorées de manière intensive. Le Deep Learning (DL), impliquant des réseaux de neurones artificiels avec de nombreuses couches, a montré une efficacité remarquable dans la résolution de problèmes complexes, en particulier dans le domaine de la vision par ordinateur et du traitement du langage naturel. Des algorithmes comme le réseau de neurones artificiels, la propagation arrière (back propagation), et des

concepts comme les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) ont ouvert la voie à des applications révolutionnaires [7] .

e) **IA symbolique VS IA basée sur les données (1990-2000) :**

Les années 1980–1990 a été fortement marqué par un débat majeur : l'opposition entre l'IA symbolique et l'IA basée sur les données.

L'IA symbolique, héritière des travaux pionniers, mettait en avant la manipulation symbolique et la représentation explicite des connaissances. Elle se concentrait sur des règles logiques, des algorithmes et des structures de données sophistiquées pour modéliser l'intelligence humaine.

En revanche, l'IA basée sur les données, incarnée par le Machine Learning (ML) et le Deep Learning (DL), se concentrait sur l'extraction de modèles et de connaissances à partir des données, sans nécessiter une programmation explicite des règles.

Ces deux approches ont connu des progrès considérables.

L'IA symbolique avait des avantages en termes d'interprétabilité et de transparence des décisions, mais elle était souvent limitée par la difficulté de formaliser de vastes connaissances.

L'IA basée sur les données a brillé grâce à sa capacité à traiter des volumes massifs de données et à découvrir des modèles complexes, bien que l'opacité de ces modèles puisse être un inconvénient.[8]

Ces décennies ont vu l'évolution et la fusion de ces deux paradigmes, marquant le début d'une approche intégrée combinant les forces des deux mondes pour une IA plus robuste et performante.

Certains des articles influents de cette période, tels que celui de Yann LeCun, Yoshua Bengio et Geoffrey Hinton en 2015, ont contribué à populariser le concept de Deep Learning et à mettre en avant son potentiel révolutionnaire dans le domaine de l'IA.[9]

Ces avancées ont jeté les bases de nombreuses applications modernes de l'IA, telles que l'émergence de nouvelles méthodologies d'apprentissage automatique et l'application de ces avancées à des problèmes réels. L'introduction de l'apprentissage profond, l'augmentation de la puissance de calcul et l'amélioration des algorithmes ont joué un rôle majeur dans cette période de croissance exponentielle de l'IA. Cela a conduit à des succès remarquables dans des domaines tels que la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel.

Dans l'ensemble, cette période a été marquée par des découvertes et des avancées majeures qui ont contribué à redéfinir le champ de l'intelligence artificielle et à ouvrir la voie à l'évolution rapide que nous observons aujourd'hui.

f) **L'Ere du Deep Learning :**

L'ère du Deep Learning, qui a commencé à se manifester de manière significative dans les années 2010, a été marquée par des progrès extraordinaires dans le domaine de l'intelligence. Ce fut une période de révolution, principalement grâce à l'utilisation extensive des réseaux de neurones profonds. Ces réseaux, inspirés du fonctionnement du cerveau humain, sont caractérisés par de nombreuses couches de neurones interconnectés, ce qui leur permet d'apprendre des représentations complexes et hiérarchiques des données.[10]

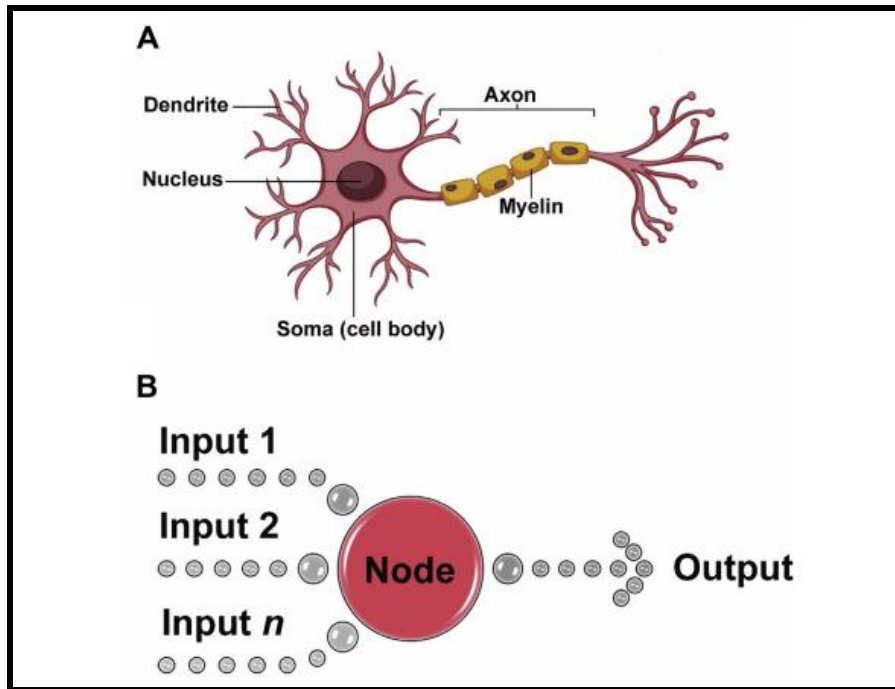


Figure 2: Les premiers réseaux neuronaux artificiels visaient à reproduire les neurones du cerveau humain.[7]

Les avancées dans l'ère du Deep Learning ont été soutenues par plusieurs facteurs clés :

Tout d'abord, l'accès à d'énormes ensembles de données, souvent appelés Big Data, a permis de nourrir ces réseaux en quantités massives d'informations.

Ensuite, la puissance de calcul, en particulier celle fournie par les GPU (unités de traitement graphique), a considérablement accéléré l'entraînement des modèles.

Enfin, les progrès dans les algorithmes d'optimisation et dans la théorie des réseaux de neurones ont également joué un rôle crucial.[7]

Ces développements ont conduit à des percées dans de nombreux domaines de l'IA, notamment la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel, la robotique et les jeux.

Les réseaux de neurones profonds ont été capables d'accomplir des tâches telles que la reconnaissance d'images avec une précision, la traduction automatique de langues, la génération de contenu ... (11)

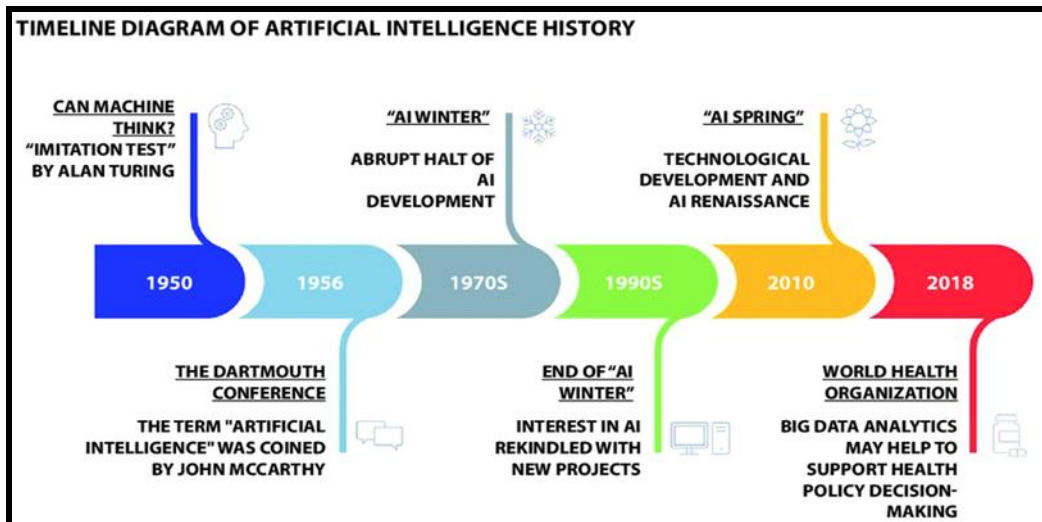


Figure 3: Diagramme sur l'historique et l'évolution de IA au cours des années. [11]

2. Les méthodes de l'intelligence artificielle

a) Big Data :

Les big data représentent des collections de données d'une ampleur et d'une complexité qui dépassent largement celles des ensembles de données classiques. Ces ensembles de données sont si vastes que les logiciels traditionnels de traitement de données sont incapables de les manipuler de manière efficace.

Le concept de Big Data repose sur la règle des 3 Vs, une notion fondamentale illustrée par la Figure 4.

Les 3 V du Big Data sont :

- ❖ **Volume** : Il s'agit de la quantité massive de données qui doivent être traitées. Les big data se caractérisent par un volume de données tel qu'il défie les capacités de stockage et de traitement des systèmes conventionnels.
- ❖ **Variété** : Les données proviennent de sources diverses et peuvent être structurées, semi-structurées ou non structurées. Cette variété rend leur gestion complexe, nécessitant des approches innovantes pour l'intégration et l'analyse.
- ❖ **Vélocité** : Ce terme fait référence à la rapidité avec laquelle les données sont générées et doivent être traitées. Pour être utiles, ces données doivent être analysées en

temps quasi réel, ce qui pose un défi supplémentaire en termes de gestion et d'infrastructure.

En combinant ces trois aspects, les big data permettent d'extraire des informations précieuses et de nouvelles perspectives, mais nécessitent également des technologies avancées et des méthodes spécifiques pour être exploitées efficacement.

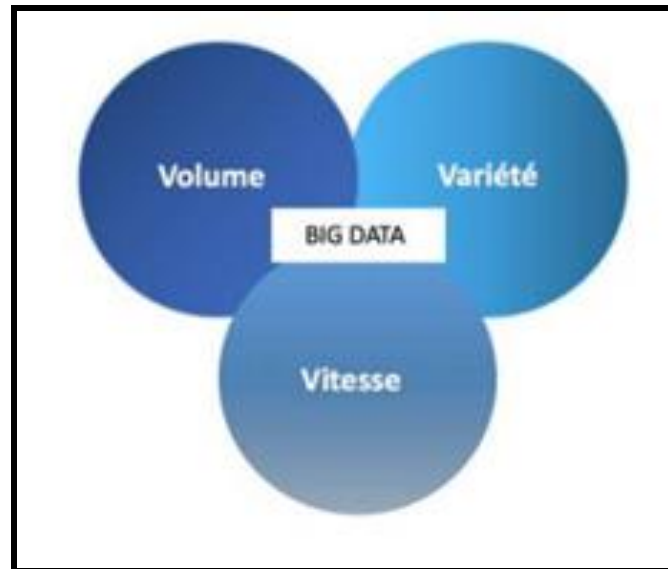


Figure 4 : Les 3V du Big Data.

Dans le domaine médical, de nombreuses données sont utilisées (figure 5) :

- **Clinique** : constitué d'un interrogatoire et d'un examen clinique réalisé par le médecin.
- **Paraclinique** : composé d'exams biologiques provenant du prélèvement des liquides biologiques (Sang, urines et liquide céphalorachidien...), d'imagerie permettant de mettre en image différents organes, et d'autres examens complémentaires selon la pathologie.

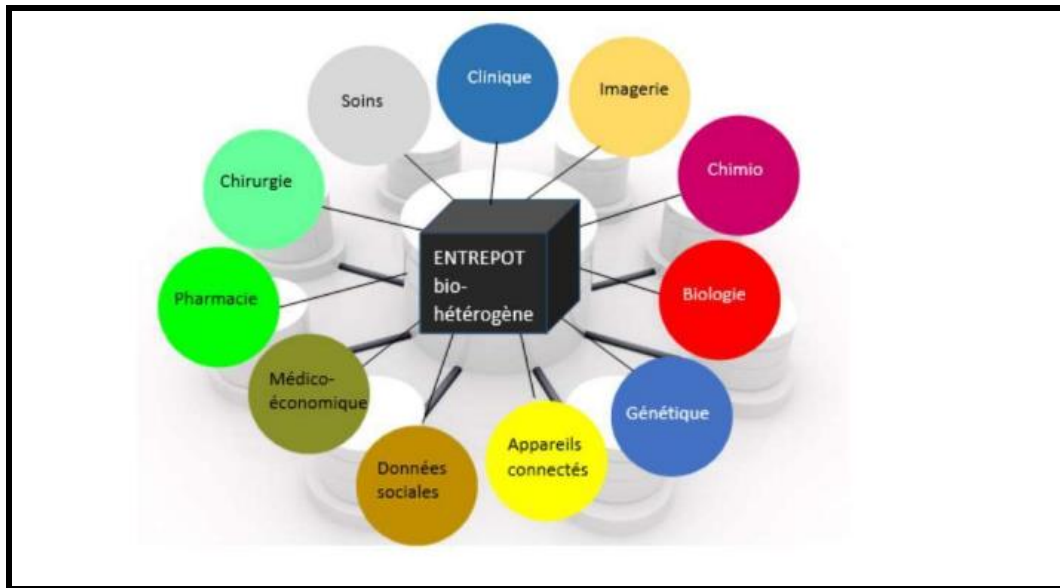


Figure 5: Types de données utilisées dans le domaine de la santé.

b) L'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique, ou Machine Learning (ML), est une sous-discipline de l'intelligence artificielle qui se concentre sur le développement d'algorithmes capables d'apprendre automatiquement à partir de données, d'expériences passées ou d'interactions avec l'environnement. Ce processus permet aux algorithmes de reconnaître des motifs complexes dans les données, de prendre des décisions, de faire des prévisions ou d'accomplir des tâches spécifiques sans intervention humaine directe.

L'un des avantages majeurs de cette méthode d'apprentissage réside dans la capacité de l'algorithme à s'adapter et à améliorer ses performances au fil du temps, en fonction des nouvelles données reçues, sans nécessiter de reprogrammation préalable.

Le processus d'apprentissage automatique se déroule en plusieurs étapes essentielles :

1. La collecte de données : Pour que le Machine Learning soit efficace, une grande quantité de données est nécessaire. Ces données peuvent être recueillies à partir de diverses sources, telles que des capteurs, des bases de données ou des réseaux sociaux. La diversité et la richesse des données jouent un rôle crucial dans la performance de l'algorithme.

2. La préparation des données : Une fois les données collectées, elles doivent être préparées avant d'être utilisées pour l'apprentissage. Ce processus de préparation peut inclure l'élimination des données manquantes, la normalisation des données ou la conversion de données textuelles en données numériques. Cette étape est essentielle pour garantir que les données sont cohérentes et utilisables par l'algorithme.

3. L'apprentissage : Avec les données préparées, l'étape suivante consiste à entraîner le modèle d'apprentissage automatique.

4. La validation : Après l'entraînement, le modèle doit être validé pour s'assurer qu'il fonctionne correctement et qu'il peut générer des prédictions précises. Cette étape implique de tester le modèle sur un ensemble de données distinct de celui utilisé pour l'apprentissage, afin de vérifier sa capacité à généraliser les résultats.

5. La prédiction : Une fois le modèle validé, il peut être utilisé pour effectuer des prédictions à partir de nouvelles données, non incluses dans la phase d'apprentissage. Cette capacité de prédiction permet d'appliquer le modèle à des situations réelles et variées, en tirant parti des connaissances acquises pendant l'apprentissage.

Ces algorithmes peuvent être classés en apprentissage *supervisé* et *non supervisé* : [12] (Figure 9)

- L'apprentissage automatique supervisé :

Cette méthode d'apprentissage est caractérisée par l'utilisation d'une base de données préalablement étiquetées par un expert.

L'objectif est de prédire cette étiquette sur une base de données nouvelle. Pour cela, l'algorithme passe par deux phases :

La phase d'apprentissage où le système cherche à apprendre des règles implicites pour déterminer un modèle en se basant sur des données d'entraînement étiquetées généralement par l'Homme.

La seconde phase dite de test consiste à prédire l'étiquette d'une nouvelle donnée. En effet, grâce aux règles implicites apprises préalablement, le système arrive à généraliser le modèle sur des données inconnues.

Les techniques d'apprentissage automatique supervisé les plus courantes sont la régression linéaire et logistique, les machines à vecteurs de support (SVM), Bayes naïf, les arbres de décision et les méthodes de forêt aléatoire.

❖ **Les algorithmes SVM :**

Les SVMs sont des algorithmes de classification puissants. Ils fonctionnent en traçant un hyperplan qui sépare les différentes classes de données dans un espace de caractéristiques.

Leur principe repose sur maximisation la marge entre les points de données appartenant à des classes différentes.

Ce principe est crucial, car une plus grande marge réduit le risque d'erreur de classification sur des données non vues.[13]

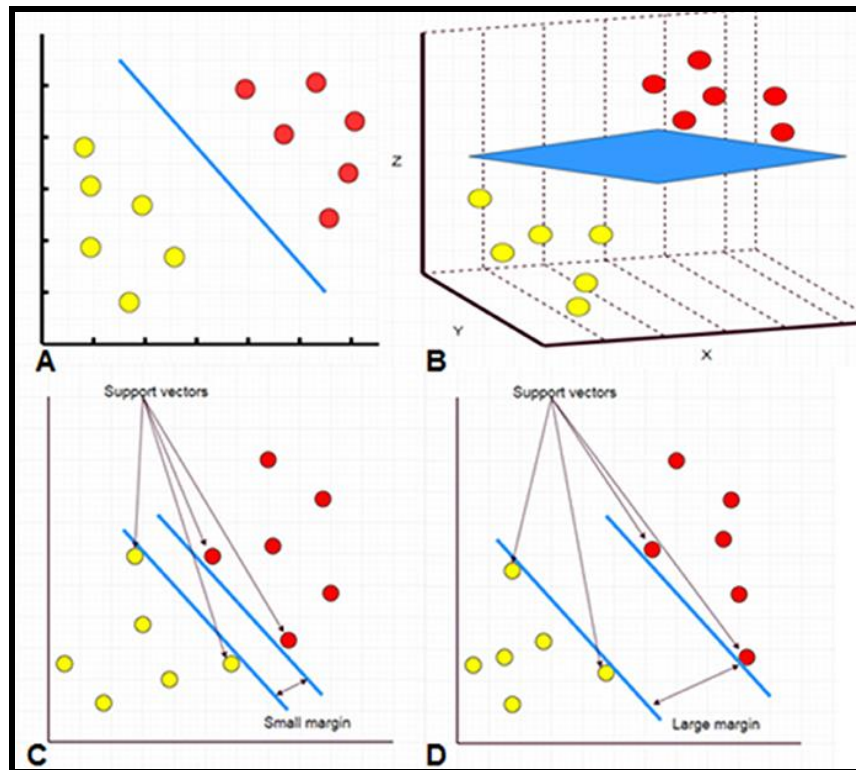


Figure 6: l'algorithme SVM basé sur l'hyperplan. [14]

❖ Forêt Aléatoire (Random Forest) :

Le classificateur Random Forest s'appuie sur les arbres de décision, qui en forment la structure fondamentale.

Ces modèles se présentent sous forme d'une arborescence, où chaque nœud représente une décision fondée sur une caractéristique des données. L'arbre débute par une racine, qui correspond à la caractéristique la plus déterminante, et se divise en branches représentant les valeurs possibles de cette caractéristique. Enfin, les feuilles de l'arbre désignent les résultats de la classification.

Ces arbres de décision sont générés grâce à un algorithme qui identifie la caractéristique la plus pertinente pour diviser les données en sous-ensembles homogènes.

L'efficacité des arbres de décision repose sur leur simplicité et leur capacité d'interprétation. Leur structure visuelle facilite la compréhension des décisions prises. Toutefois, ces modèles sont souvent sujets au surapprentissage des données d'entraînement, ce qui

peut entraîner des performances insatisfaisantes lors de l'évaluation sur des données nouvelles.

La forêt aléatoire permet de surmonter ce problème. Comme son nom l'indique, elle se compose de plusieurs arbres de décision travaillant en synergie. Chaque arbre émet une prédiction, et la classe qui obtient le plus de votes est retenue comme prédiction finale de la forêt. Le succès de cette méthode repose sur le fait que les arbres ne sont pas corrélés. Ainsi, même si certains arbres font des erreurs, d'autres fourniront des prédictions correctes, ce qui améliore la performance globale du modèle.

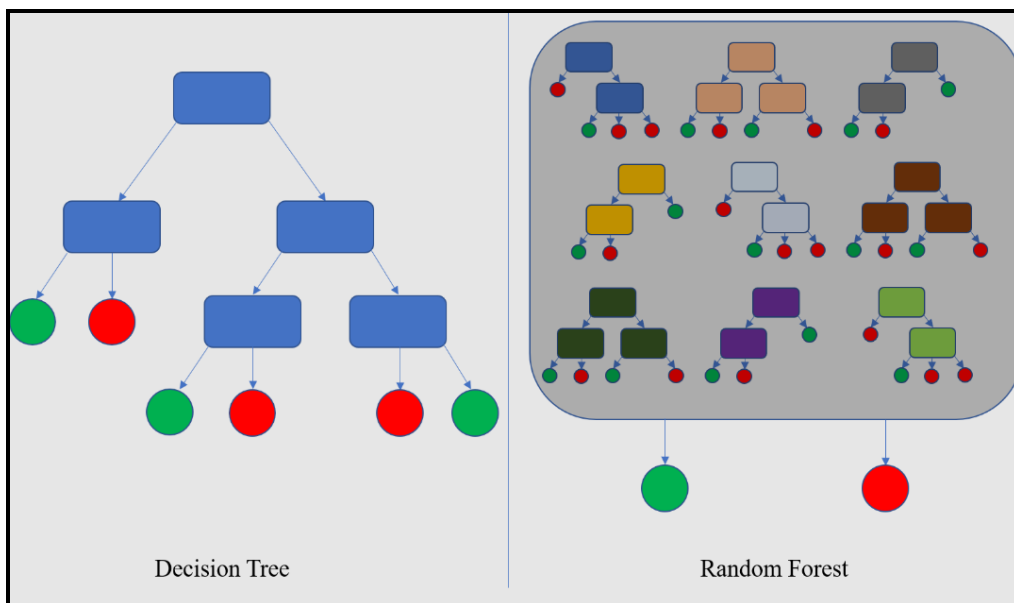


Figure 7:schéma légendaire comparatif entre Forêt Aléatoire et l'arbre décisionnel.

❖ Le Naïf Bayes (NB) :[15]

Le classificateur Naïve Bayes est un outil d'apprentissage automatique qui repose sur le théorème de Bayes. Ce qui le rend intéressant, c'est qu'il fait l'hypothèse que chaque caractéristique, ou symptôme, est indépendante des autres.

Le modèle peut prédire par exemple la présence du diabète en analysant et en établissant des corrélations entre différentes caractéristiques telles que la glycémie, l'âge et l'indice de masse corporelle.

Cela illustre l'efficacité du modèle pour le diagnostic médical en traitant des informations complexes et en fournissant des prédictions claires.

- L'apprentissage automatique non supervisé :

On parle d'apprentissage non supervisé quand la base de données d'entraînement ne contient pas d'étiquète.

L'algorithme doit donc reconnaître de lui-même des caractéristiques communes aux données collectées en entrée. L'objectif est d'identifier automatiquement des groupes ou "clusters" d'observations partageant des profils communs. Chaque élément du groupe doit avoir des caractéristiques proches de celles des éléments du même groupe mais des caractéristiques relativement éloignées de celles des autres groupes.

Les méthodes d'apprentissage automatique non supervisé les plus courantes comprennent les K-moyennes, le décalage moyen, la propagation d'affinité, le clustering hiérarchique, la modélisation de mélange gaussien et les cartes auto-organisatrices.

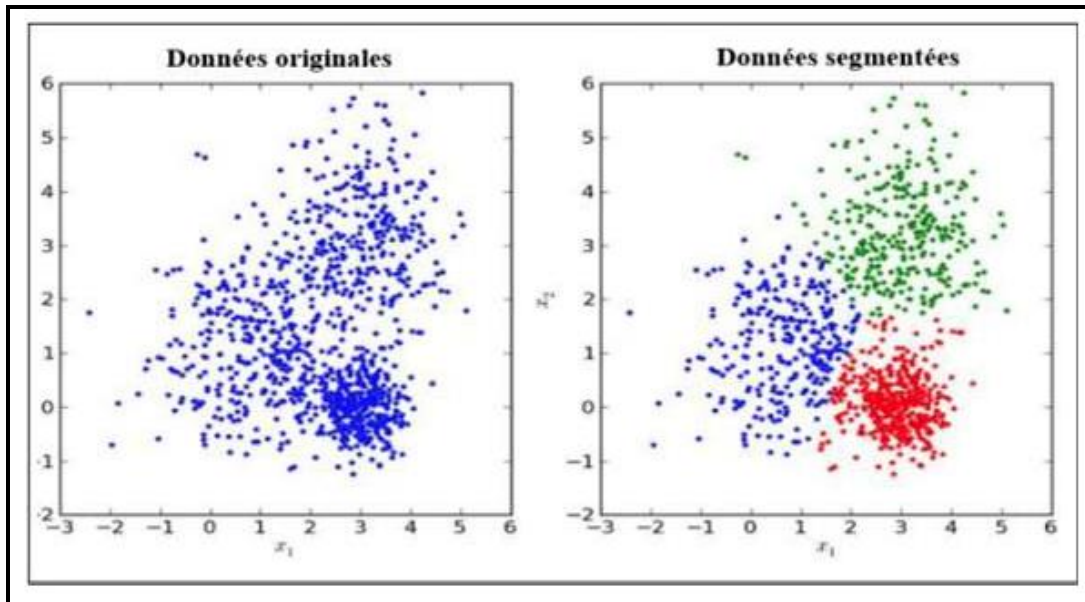


Figure 8: "Clustering" en apprentissage non supervisé.

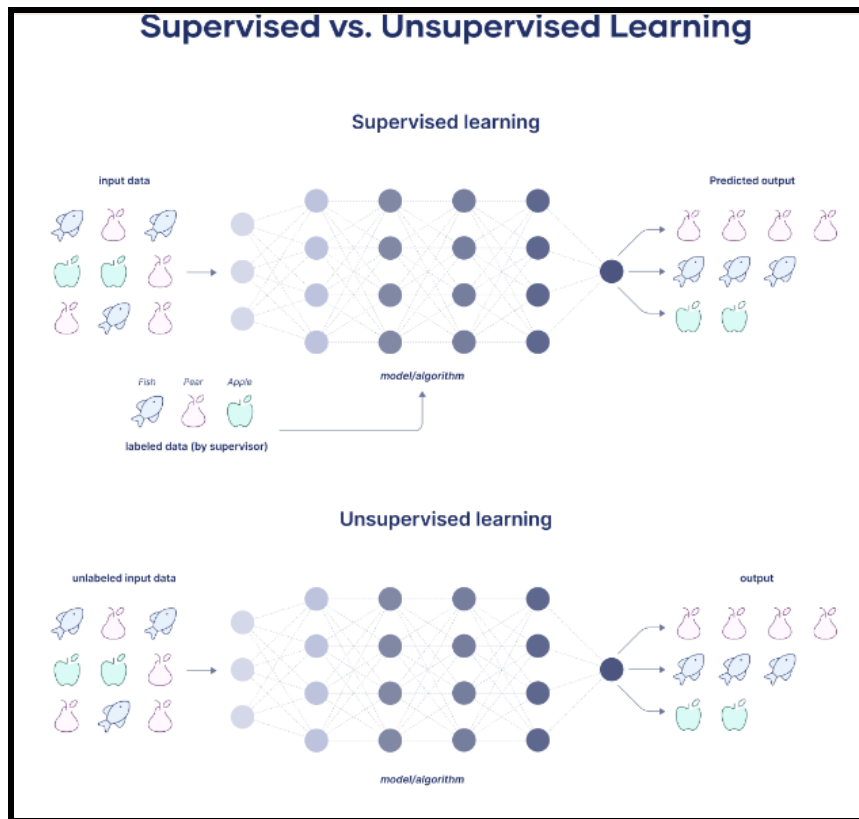


Figure 9: Apprentissage supervisé et apprentissage non-supervisé. [16]

c) L'apprentissage profond

L'apprentissage profond, ou Deep Learning, est une branche spécialisée de l'apprentissage automatique (Machine Learning) qui permet aux ordinateurs de reconnaître des motifs complexes à partir de vastes ensembles de données.

Cette technique repose sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels, qui sont des modèles mathématiques inspirés du fonctionnement du cerveau humain.

Le terme "profond" dans l'apprentissage profond se réfère à la structure des réseaux neuronaux artificiels, qui sont constitués de multiples couches : des couches d'entrée, des couches de sortie et plusieurs couches cachées. Chaque couche contient des unités (ou neurones) qui transforment les données d'entrée en informations utilisables par la couche suivante pour une tâche prédictive spécifique. Grâce à cette architecture en couches, l'algorithme est capable d'apprendre en traitant lui-même les données, améliorant ainsi sa capacité à reconnaître des motifs complexes (figure 10).

Le Deep Learning est particulièrement performant dans des domaines comme la reconnaissance d'images, ce qui en fait un outil essentiel en services utilisant imagerie médicale.

L'avantage principal du Deep Learning réside dans sa capacité à apprendre à partir de grandes quantités de données sans nécessiter de programmation explicite pour chaque tâche. En étant entraînés sur des ensembles de données massifs, les modèles de Deep Learning peuvent fournir des résultats précis et fiables. Cependant, cette technique nécessite des ressources importantes en termes de données et de puissance de calcul pour l'entraînement des modèles.

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont à la base du Deep Learning.

Inspirés des neurones biologiques, ils sont constitués de couches de neurones interconnectés qui peuvent apprendre des motifs à partir de données d'entrée :

Les réseaux de neurones artificiels sont composés de nombreuses unités de calcul appelées "neurones" qui reçoivent des données en entrée (similaires aux dendrites dans les neurones biologiques), effectuent des calculs et transmettent une sortie (similaire aux axones) au neurone suivant.

Les neurones d'entrée reçoivent les données, tandis que les neurones des couches cachées effectuent les calculs nécessaires pour analyser les relations complexes dans les données. Les neurones de la couche cachée transmettent ensuite les données à une couche de sortie qui fournit la version finale de l'analyse pour interprétation.

Les ANNs sont dits peu profonds lorsqu'ils n'ont qu'une seule couche cachée entre l'entrée et la sortie, et profonds (DNN) lorsqu'ils ont plusieurs couches cachées.

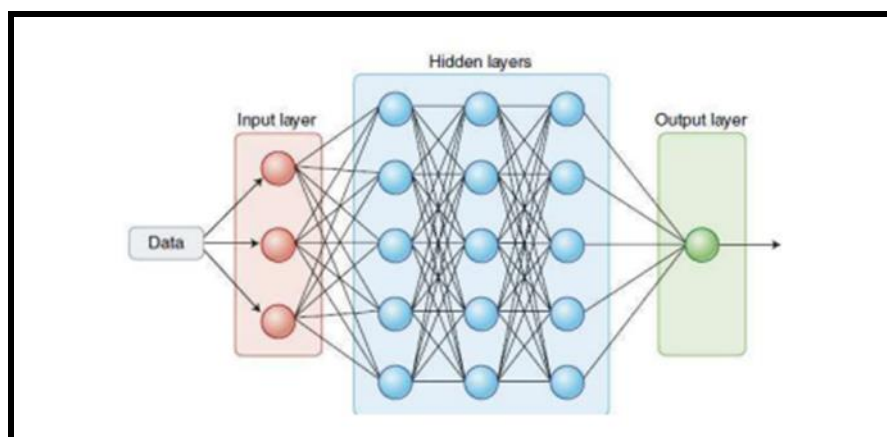


Figure 10: Réseau de neurones profond DNN

Les différents modèles de réseaux de neurones varient selon leur architecture, leur fonctionnement, leur objectif et leur utilisation. Voici quelques-uns des modèles les plus utilisés dans la reconnaissance d'images :

- **Réseau de neurones convolutifs (CNNs) :**

Les réseaux de neurones convolutifs sont spécialement conçus pour traiter des données telles que les images.

Ils utilisent une technique appelée "convolution" pour appliquer une série de filtres à une image, détectant des caractéristiques spécifiques comme des bords, des contours et des

textures. Ces filtres sont appliqués de manière répétée, modifiant leur taille et leur orientation pour détecter des caractéristiques de plus en plus complexes. Les données sont ensuite transmises à travers des couches de neurones interconnectés pour extraire les informations les plus pertinentes.

Les CNN sont particulièrement utiles pour analyser l'imagerie médicale, où ils peuvent reconnaître des motifs spécifiques dans les images, comme des formes, des couleurs et des textures.[13]

En neurochirurgie, les CNNs peuvent être utiles pour reconnaître les tumeurs, l'œdème ainsi que les hémorragies à partir de l'imagerie cérébrale.

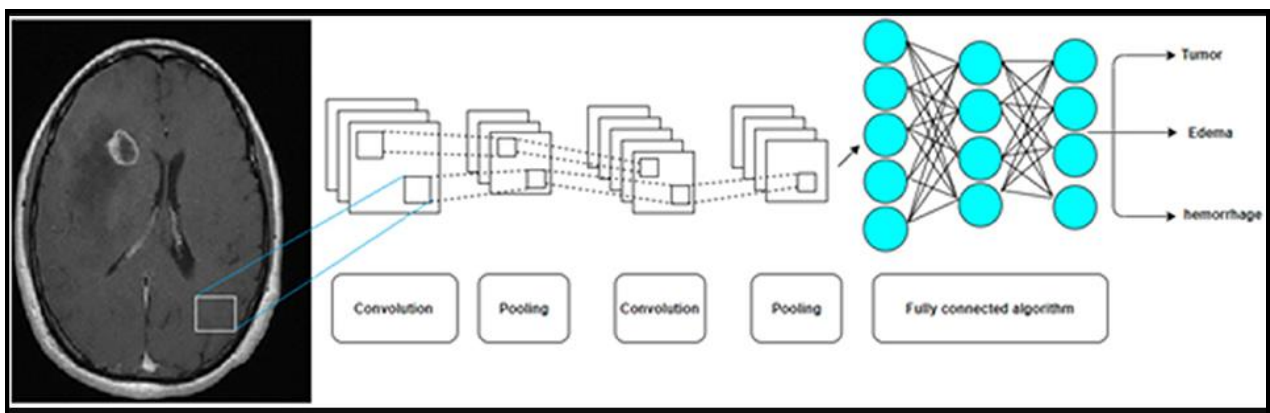


Figure 11: Un réseau neuronal à convolution utilisé pour l'analyse d'images.

- **Réseau de neurones résiduels (ResNet)**

Les réseaux de neurones résiduels (ResNet) sont un type de modèle de réseau de neurones profond capable d'apprendre des représentations plus précises en utilisant des connexions résiduelles entre les différentes couches du réseau.

Ces connexions permettent aux données de contourner une ou plusieurs couches, facilitant l'apprentissage et préservant l'information. Les connexions résiduelles ajoutent l'entrée de la couche précédente à la sortie de la couche actuelle, permettant de transmettre directement l'information de l'entrée à la sortie. Cela aide à résoudre les problèmes de convergence et d'apprentissage rencontrés dans les réseaux de neurones traditionnels profonds.

Grâce à ces connexions, ResNet peut atteindre une précision de classification supérieure tout en étant plus facile à entraîner et à optimiser.

- **Réseau de neurones pour la segmentation d'images :**

Les réseaux de neurones de segmentation d'images sont des modèles de Deep Learning utilisés pour segmenter une image en différentes régions. Le processus se divise en deux étapes : la localisation des objets et la classification des objets.

Dans la première étape, le modèle détecte les objets en utilisant une carte de caractéristiques obtenue à partir de l'image d'entrée par une série de couches de convolution et de mise en commun.

Dans la deuxième étape, le modèle attribue une classe à chaque objet détecté en utilisant des couches de classification pour déterminer la classe de chaque pixel de l'image. Les pixels sont regroupés en régions en fonction de leur classe pour former une carte de segmentation.

Ce modèle est entraîné avec des données étiquetées, où chaque pixel de l'image d'entraînement a une étiquette associée.

Grâce à ce processus structuré, le Machine Learning permet de créer des systèmes capables d'améliorer continuellement leurs performances, d'analyser des volumes massifs de données et de fournir des perspectives précieuses pour la prise de décision et la résolution de problèmes complexes.

3. Evolution de l'IA dans le domaine de la neurochirurgie

En 1988, Kwoh et d'autres chercheurs ont développé un robot nommé **Unimation Puma 200** connecté à un scanner CT et associé à un guide de sonde pour réaliser des biopsies de tumeurs cérébrales guidées par CT. L'opération consiste à ce que le robot peut être dirigé vers une position où le guide de sonde pointe vers la cible une fois la cible est repérée dans l'image CT. Cette approche permet une amélioration de la précision grâce à un étalonnage précis du robot au lieu d'un cadre réglé manuellement. [17]



Figure 12: le robot Puma 200. [18]

Le premier robot neurochirurgical commercial, **Neuromate** [®] (Figure 13) (Renishaw, Wooton-under-Edge, Royaume-Uni), a assisté des biopsies et d'autres applications, par exemple, la stéroélectroencéphalographie (SEEG), la stimulation cérébrale profonde (DBS) et la résection tumorale.[19]



Figure 13: Le robot neuromate de Renishaw [®] [19]

En 2017, 10 robots distincts avaient été développés pour être utilisés dans la stéréotaxie neurochirurgicale.[20]

System	Developer	Production status	Design	Registration	Degrees freedom
PUMA	Unimation ⁶	Discontinued (1991) ⁶	Industrial serial robotic arm	Frame-based CT	6
Minerva	University of Lausanne ¹⁰	Discontinued (1998) ¹⁰	CT-mounted serial arm	Frame-based CT	5
Neuromate ⁸	Renishaw ⁹	Active	Mobile serial robotic arm	Frame/frameless CT/MRI	5
Zeiss MKM	Carl Zeiss ¹⁷	Discontinued (2003) ^a	Serial surgical microscope	Frame/frameless CT/MRI	6
NeuroMaster	Beihang University Robotics Inst. ²⁹	Inactive (2003) ¹⁸	Serial robotic arm	Frameless CT/MRI	5
SurgiScope	ISIS Robotics ³⁰	Active	Ceiling-mounted parallel manipulator	Frameless MRI	7
PathFinder	Prosurjics Ltd ³⁴	Discontinued (2009) ^b	Mobile serial robotic arm	Frameless CT	6
ROSA TM	Zimmer Biomet ³⁶	Active	Serial robotic arm	Frame/frameless CT/MRI	6
Renaissance	Mazor Robotics ⁴⁴	Active	Skull-mounted parallel robot	Frameless CT/MRI	6
ISYS ¹⁹	Medizintechnik GmbH ⁴⁵	Active	Skull-mounted parallel robot	Frameless CT/MRI	4

Figure 14: divers systèmes robotiques stéréotaxiques et leurs spécifications techniques. [20]

Le SurgiScope[®] (ISIS SAS) a été l'un des premiers systèmes à offrir un ciblage sans cadre utilisant des fiduciaires et un enregistrement IRM préopératoire. C'est un microscope chirurgical modulaire monté au plafond, intégrant des capacités robotiques. Il est conçu sur un rail au plafond, avec trois liens parallèles opposés pour le contrôle des instruments.

Grâce à sa conception, il permet d'assurer des ventriculostomies réussies dès le premier coup, poser des implants d'électrodes SEEG et réaliser des biopsies stéréotaxiques avec un taux de diagnostic élevé 96 %.[21-24]



Figure 15:le SurgiScope ®

Le robot ROSA® constitue une avancée significative dans le domaine de la neurochirurgie, en particulier pour la réalisation d'interventions délicates. Il améliore la précision de la planification et de l'exécution des procédures, notamment dans la chirurgie de l'épilepsie, où il identifie avec précision les zones cérébrales à l'origine des crises. Cette méthode se révèle moins longue, moins douloureuse et moins risquée pour les patients par rapport à l'implantation d'électrodes sous-durales.[25]

De plus, ROSA® est également utilisé en neurochirurgie fonctionnelle pour des traitements comme la stimulation cérébrale profonde et facilite les interventions endoscopiques intracrâniennes grâce à une visualisation optimisée. [26,27]



Figure 16: ROSA ONE BRAIN®

L'iSYS1®, développé par Medizintechnik GmbH à Kitzbühel, en Autriche, a d'abord été conçu pour manipuler des aiguilles en radiologie interventionnelle. Par la suite, il a été adapté pour devenir un planificateur de trajectoire stéréotaxique.[28,29]

Un essai préclinique a été réalisé pour comparer la précision et la durée de positionnement de l'aiguille entre une technique robotique et une technique manuelle lors de 162 biopsies sur des cadavres, suivi de 25 biopsies tumorales en milieu clinique. Les résultats ont révélé que le guidage robotique permettait d'atteindre une erreur cible moyenne de 0,6 mm, tandis que la technique manuelle affichait 1,2 mm ($p < 0,001$). De plus, les durées moyennes étaient de 2,6 minutes pour le robot contre 3,7 minutes pour le manuel. En milieu clinique, le robot iSYS1 a été utilisé avec succès dans presque tous les cas, affichant une erreur médiane de 1,3 mm à l'entrée et un temps de configuration de 11,8 minutes. Ces résultats suggèrent que le robot iSYS1® pourrait améliorer la précision et réduire le temps de positionnement, tout en étant relativement facile à utiliser dans des environnements cliniques.[29]

L'iSYS1® présente plusieurs atouts, comme son coût abordable, sa portabilité, sa rapidité et sa facilité d'utilisation. Toutefois, il a également des limitations, notamment la nécessité d'un repositionnement manuel pour les insertions d'électrodes en dehors de son espace de travail limité, ce qui peut poser des problèmes dans des situations nécessitant un placement éloigné ou controlatéral.



Figure 17: Système iSYS1®

Depuis lors, L'IA n'a pas cessé de s'impliquer dans les différentes applications de la neurochirurgie.

Actuellement, l'IA peut être utilisée pour améliorer les diagnostics, la planification chirurgicale, la prise de décision, la surveillance postopératoire et d'autres aspects de la pratique neurochirurgicale tout en améliorant la précision diagnostique et la personnalisation des traitements ainsi que l'optimisation des résultats chirurgicaux.[30]

Les perspectives d'utilisation de l'IA dans l'avenir font appel à l'utilisation de la robotique, de la réalité virtuelle, de la réalité augmentée et de la télémédecine pour améliorer les procédures chirurgicales et la formation des chirurgiens. [30]

II. Les applications de l'IA en Neurochirurgie

1. Utilisation de l'IA pour l'imagerie médicale

a) Imagerie cérébrale :

L'incorporation de l'intelligence artificielle pour l'analyse des images cérébrales, notamment les IRMs et les TDMs, a entraîné une avancée majeure dans le domaine de la neurochirurgie. L'IA offre la capacité de traiter de vastes ensembles de données, d'identifier des motifs subtils et d'apprendre des caractéristiques complexes des images médicales, ce qui lui permet de jouer un rôle crucial dans diverses tâches d'analyse et d'interprétation.

i. IA et l'hémorragie intracrânienne (HIC)

Le Deep Learning utilise des algorithmes sous forme de différentes architectures de réseaux neuronaux convolutifs et les réseaux neuronaux récurrents, permettant ainsi d'analyser efficacement les images radiologiques.

Ceci a amélioré considérablement la vitesse et la précision du diagnostic des hémorragies intracrâniennes à partir d'image de CT.[31]

L'hémorragie intracrânienne est une urgence grave, avec un taux élevé de mortalité et un risque de handicap permanent. Elle résulte de la rupture d'un vaisseau sanguin, provoquant une augmentation de la pression intracrânienne. Un traitement précoce est crucial, car la moitié des décès surviennent dans les 24 premières heures, et seulement 20 % des survivants se rétablissent complètement.[32]

Le scanner cérébral est fréquemment utilisé comme outil de diagnostic non invasif pour la détection des hémorragies intracrâniennes. Cependant, il est important de noter que le risque d'erreur de diagnostic augmente considérablement après de longues heures d'interprétation des images. [33,34]

Pour remédier à ce problème et assister les radiologues durant les périodes de charge de travail intense et de fatigue, plusieurs modèles d'IA ont été développés pour améliorer la détection des HIC.

Dans une étude réalisée par Altuv et al. [35], un algorithme pré-entraîné appelé ResNet-18 a été adapté pour la détection des HIC. Cet algorithme a été ajusté à l'aide d'une base de données comprenant 200 images scanographiques, dont 100 représentaient des cas d'HIC et 100 des images normales. Les résultats obtenus avec ce modèle ont été remarquablement satisfaisants, surtout compte tenu de la petite taille de l'échantillon et du temps relativement court nécessaire à l'entraînement, qui était de 165 secondes. Lors de la phase de test, l'algorithme a analysé 40 clichés en 1,17 seconde, obtenant des performances impressionnantes : une exactitude de 95,93 %, une sensibilité de 95,65 %, une spécificité de 96,20 %, une précision de 96,40 %.

Une autre étude menée par Kundisch, Almut, et al [36] illustre l'impact significatif de l'intégration des algorithmes d'intelligence artificielle dans la détection des hémorragies intracrâniennes sur les tomodensitogrammes cérébraux dans un cadre clinique. Selon cette recherche, l'utilisation du logiciel de détection des HIC développé par AIDOC a conduit à une augmentation de 12,2 % dans le taux de détection des HIC par rapport aux rapports radiologiques initiaux, soulignant ainsi l'amélioration substantielle des performances diagnostiques grâce à l'IA.

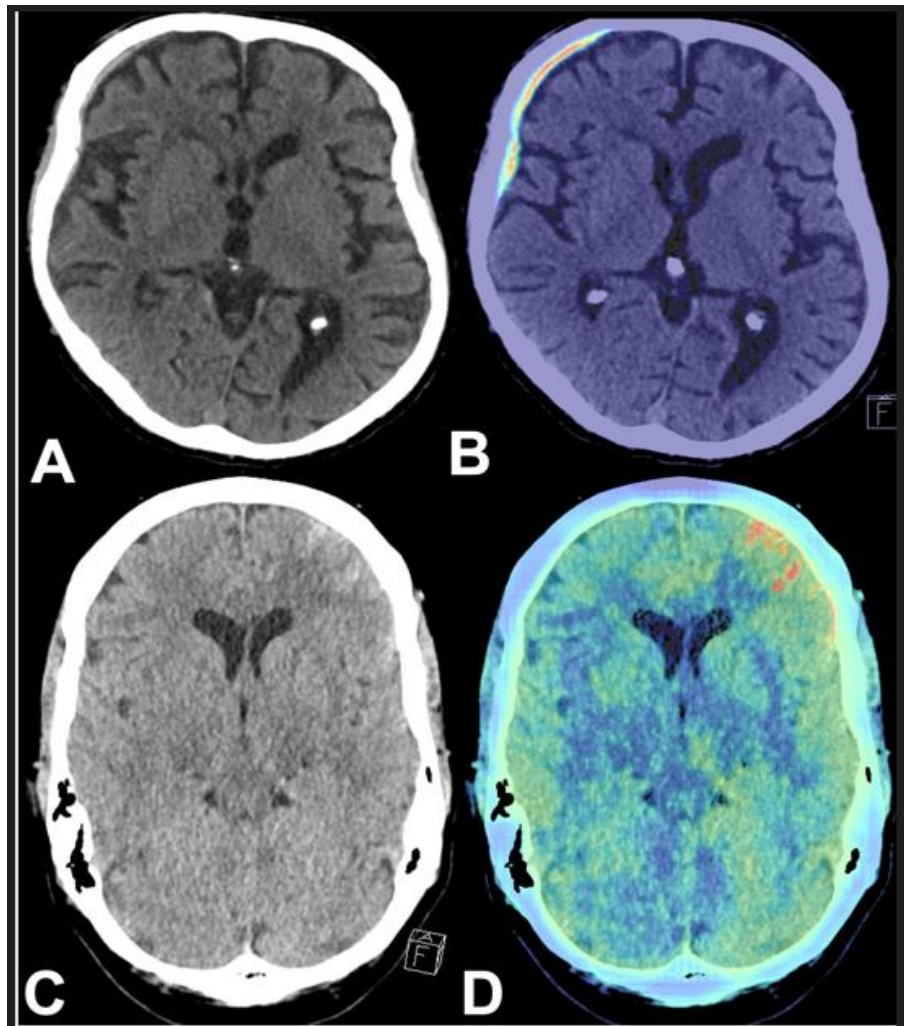


Figure 18:TDM axiale sans contraste montrant un HSD mince de l'hémisphère frontotemporal droit et une HSA traumatique des lobes frontal et temporal gauches, accompagnée des résultats de l'analyse IA sous forme de cartes à code couleur.

Cependant, l'étude a également mis en évidence certains défis associés à l'IA, tels qu'un taux de faux positifs de 1,9 % et des erreurs de détection spécifiques, notamment des HIC manquées dans l'espace sous-arachnoïdien et sous la base du crâne.[36]

Les erreurs de détection étaient également influencées par des artefacts d'image et des anomalies telles que des calcifications et des tumeurs.

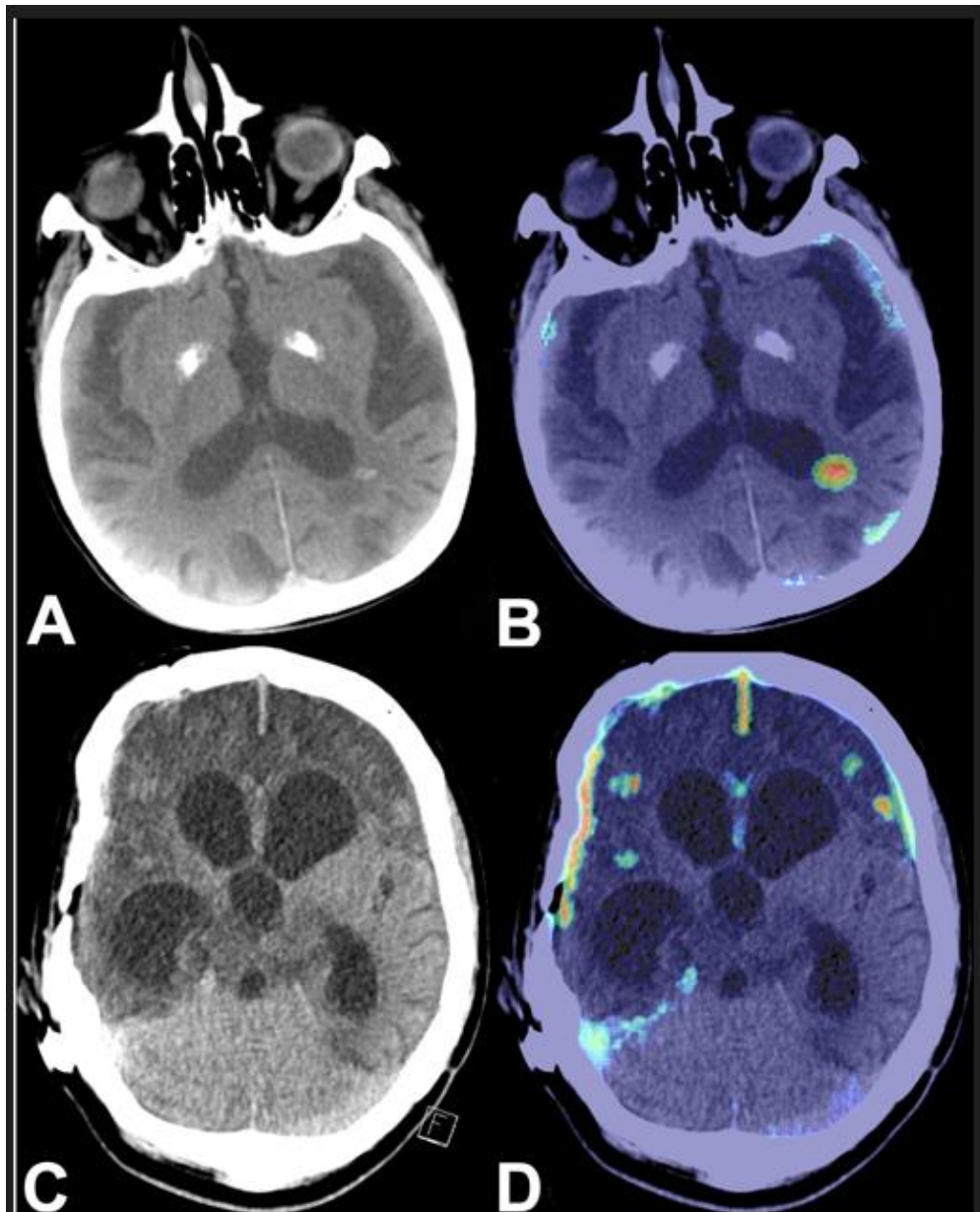


Figure 19 : TDMs axiaux montrant faux positifs dûs à la présence des noyaux gris centraux calcifiés et une calcification paraventriculaire du lobe pariétal gauche, avec artéfact métallique d'une valve de dérivation..

Ces résultats suggèrent que bien que l'IA puisse améliorer la précision diagnostique, une collaboration étroite entre l'expertise humaine et les outils d'IA reste cruciale pour optimiser les performances cliniques et réduire les erreurs de détection. La compréhension des

limites et des avantages de ces technologies est essentielle pour leur intégration efficace dans les pratiques cliniques quotidiennes.

ii. IA et Anévrismes cérébraux :

Un anévrisme cérébral est une dilatation anormale d'un vaisseau sanguin dans le cerveau, qui peut entraîner une rupture potentiellement fatale si elle n'est pas diagnostiquée et traitée à temps. Cette condition, aussi appelée anévrisme intracrânien, représente une pathologie vasculaire sérieuse dont la prévalence varie entre 3.2 % de la population générale, selon diverses études épidémiologiques.[37]

La détection précoce est donc cruciale pour réduire le taux de morbidité et de mortalité associé.

Dans ce contexte, l'émergence des technologies d'intelligence artificielle a introduit de nouvelles méthodes prometteuses pour améliorer le diagnostic des anévrismes cérébraux.

A cet égard, l'étude de Park Allison et al., publiée en juin 2019 dans " JAMA Network Open", explore le rôle de l'IA dans cette tâche diagnostique. L'article se concentre sur l'évaluation du modèle HeadXNet, un réseau de neurones convolutionnels développé spécifiquement pour la détection des anévrismes cérébraux à partir d'images d'angioscanners (CTA) cérébraux .[38]

Ce modèle HeadXNet, un modèle de segmentation basé sur l'apprentissage profond, a été entraîné sur un large ensemble de données d'angioscanners cérébraux, comprenant des images d'anévrismes et d'images normales. L'étude randomisée a impliqué 8 cliniciens qui ont évalué un ensemble de 115 examens d'angioscanners avec et sans l'aide du modèle.

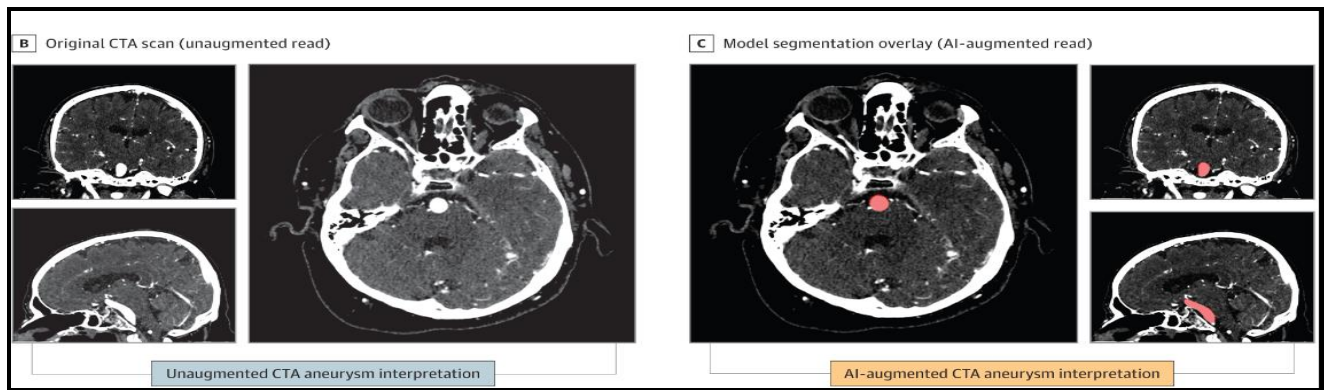


Figure 20: Lecture augmentée, sans superposition de segmentation du modèle sur CTA en vue axiale, coronale et sagittale. [38]

Les résultats montrent une augmentation et une amélioration significative en termes d'identification avec une grande précision les anévrismes cérébraux. En effet, le modèle a montré des performances comparables à celles des radiologues expérimentés, avec une exactitude diagnostique de 98 %, une sensibilité de 95 % et une spécificité de 98 % .[38]

Par ailleurs, d'autres études, comme celles de Yang et al. (2021) et de Dai et al. (2020), des algorithmes basés sur l'apprentissage profond ont été notamment développés pour améliorer la détection des anévrismes cérébraux sur les images d'angioscanners. [39,40]

Dai et al. ont mis au point un modèle de réseau de neurones convolutifs pour la détection automatisée des anévrismes, surpassant les techniques manuelles et semi-automatiques traditionnelles. Leur étude, utilisant une large base de données CT pour l'entraînement et la validation, a confirmé l'efficacité de l'apprentissage profond pour réduire le temps de diagnostic à environ 25secondes par cas et augmenter la précision clinique.

Ces résultats soulignent la capacité de l'IA à traiter efficacement des volumes importants de données d'imagerie et peut aider à fournir un diagnostic rapide et fiable.

De même, Yang et al. ont utilisé un algorithme de Deep Learning, analysant des données rétrospectives de deux bases hospitalières et obtenant une sensibilité de 97,5 %, surpassant ainsi les méthodes traditionnelles et détectant même des anévrismes initialement manqués.



Figure 21: (a) Coupe axiale d'angioscanner cérébral et (b) image de reconstruction tridimensionnelle avec rendu volumique.[40]

Malgré des faux positifs observés dus aux structures osseuses, les veines et les plaques calcifiées, l'algorithme a réussi à localiser efficacement les anévrismes cérébraux.

Cependant, le modèle créé ne fournit pas d'informations précises sur la forme des anévrismes, un facteur essentiel pour prédire le risque de rupture. Néanmoins, cette approche a démontré une amélioration significative de la performance des radiologues et a mis en lumière le potentiel de l'IA pour transformer la détection des anévrismes cérébraux.

Dans cette perspective, l'intégration de l'IA dans la pratique clinique pourrait transformer la détection des anévrismes cérébraux en offrant un soutien précieux aux radiologues, notamment dans des environnements de haute charge de travail où la fatigue peut affecter la précision des diagnostics. En automatisant l'analyse des images, l'IA aide non seulement à accélérer le processus de détection mais également à réduire les erreurs humaines potentielles.

Parallèlement, la prise en charge des anévrismes intracrâniens repose sur une évaluation précise des risques de rupture afin de déterminer la meilleure approche thérapeutique. Les anévrismes peuvent être classés en fonction de divers critères morphologiques et hémodynamiques pour guider les décisions cliniques.

Dans ce contexte, l'étude de Bairagi et al. apporte une contribution significative en introduisant le Rupture Resemblance Score (RRS), un modèle basé sur les données qui évalue la similitude des anévrismes intracrâniens non rompus (AINR) avec les anévrismes rompus (AIR).

Ainsi cette étude a collecté rétrospectivement des cas difficiles d'AINR identifiés lors de conférences multidisciplinaires neurovasculaires, utilisant des reconstructions en 3D et des simulations de dynamique des fluides pour calculer le RRS (figure 22). Les résultats montrent que le RRS est capable de distinguer les AINR qui présentent des caractéristiques morphologiques et hémodynamiques similaires aux AIR, permettant ainsi une stratification plus fine des risques. L'étude démontre que, même si le RRS ne prédit pas directement la rupture, il offre une aide précieuse dans la gestion des cas où les recommandations basées sur les scores traditionnels ne sont pas définitives.

En conclusion, en fournissant une évaluation supplémentaire de la similitude des AINR avec les AIR, le RRS constitue un outil complémentaire utile pour orienter les décisions de traitement, notamment dans le cadre des petits AINR ou des cas complexes.[41]

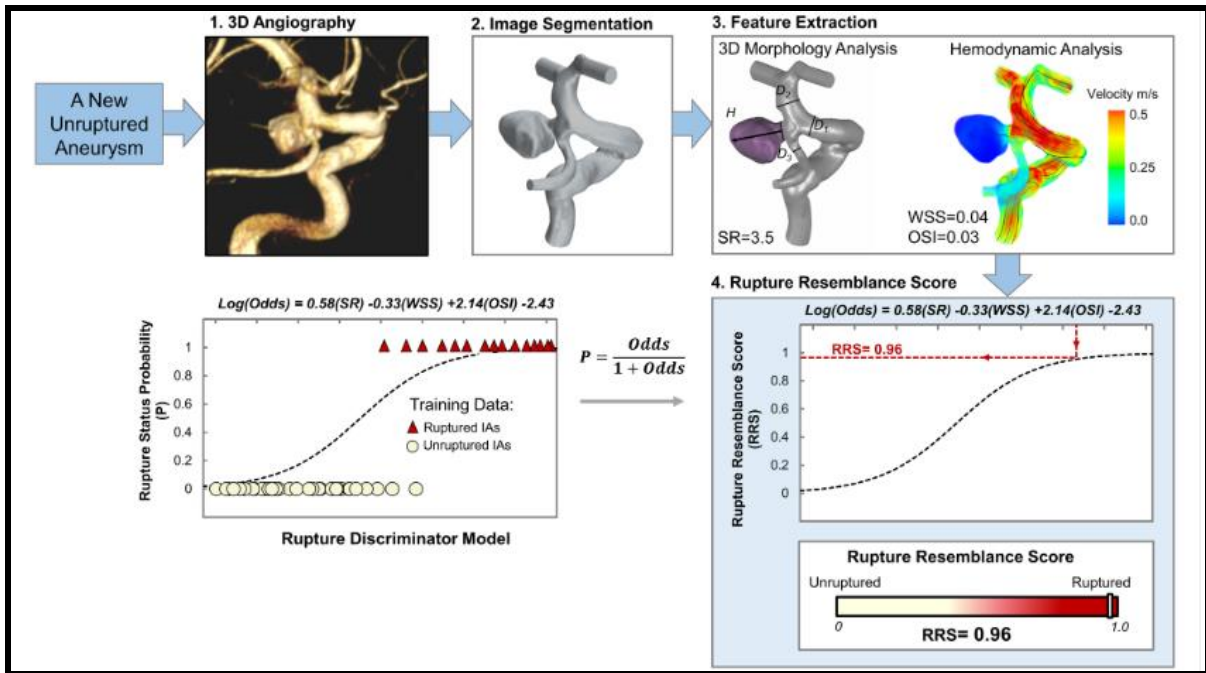


Figure 22: Flux de travail pour le calcul du RRS [41]

L'intégration de l'IA dans la pratique clinique représente un tournant majeur pour la détection et la gestion des anévrismes cérébraux. En automatisant l'analyse des images et en fournissant des outils comme le RRS, ces technologies offrent un soutien significatif aux neurochirurgiens et améliorent la précision des diagnostics, tout en réduisant les erreurs humaines potentielles. (Figure 23)

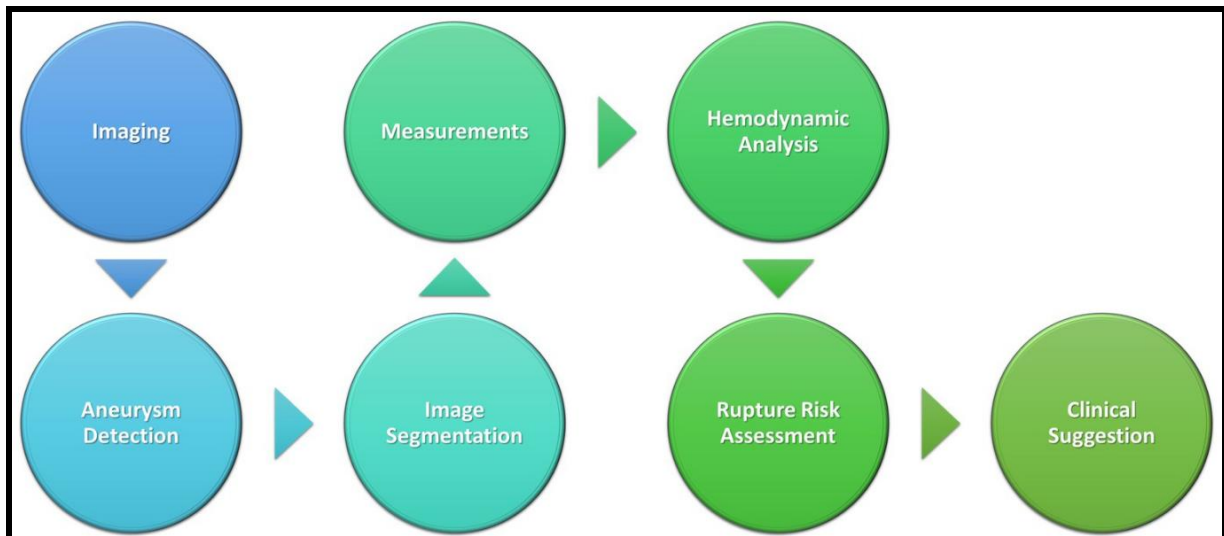


Figure 23: Schéma du processus d'IA dans la détection des anévrismes et la prise de décision clinique. [42]

iii. IA et AVC :

L'infarctus cérébral, généralement connu sous le nom d'AVC, est un problème de santé mondiale et une priorité de santé publique. C'est une cause importante de handicap et de décès à l'échelle mondiale.

Par conséquent, un accès adéquat à une imagerie précise et rapide est crucial pour diagnostiquer l'AVC ischémique.

En effet, bien que la tomodensitométrie sans contraste soit souvent l'examen initial pour les cas suspects d'AVC, sa faible sensibilité pour détecter un AVC ischémique précoce limite principalement son utilisation à l'exclusion des hémorragies intracérébrales. Comparée à la TDM, qui a une sensibilité de 26 %, l'imagerie par résonance magnétique en diffusion (IRM-DWI) est la modalité la plus efficace pour la détection précoce de l'AVC ischémique, avec une sensibilité d'au moins 83 % dans la plupart des études .[43]

Cependant, les contraintes d'accessibilité et de disponibilité de l'IRM peuvent retarder un diagnostic vital. De plus, la réalisation d'une IRM prend généralement plus de 30 minutes, avec des délais supplémentaires dus à la disponibilité limitée des scanners pour d'autres urgences, au transport du patient et à l'attente de l'interprétation par un radiologue.[44]

Bien que l'IRM soit sensible pour l'AVC ischémique, les études montrent des résultats mitigés sur les effets à long terme pour les patients ayant reçu une IRM initiale, probablement en raison des retards d'imagerie et d'interprétation.[45]

Face à ces défis, des avancées significatives ont été réalisées dans l'utilisation des programmes d'intelligence artificielle pour identifier rapidement et précisément les anomalies dans bon nombre de ces études d'imagerie et, par conséquent, pour aider à la prise de décision clinique et réduire les délais de diagnostic de l'AVC ischémique dans les hôpitaux.[46-48]

De plus, les techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle, utilisées pour la segmentation des lésions cérébrales, ont été efficaces dans l'identification et la caractérisation précise des lésions post-AVC, à partir d'images par résonance magnétique.

En particulier, une étude récente a développé un modèle de segmentation automatique des lésions cérébrales chroniques en utilisant des images par résonance magnétique pondérées en T1 et une architecture de réseau neuronal profond, le 3D-UNet. Ce modèle se distingue par sa capacité à traiter des volumes d'images et à fournir des résultats précis pour la segmentation des lésions cérébrales.

Contrairement aux modèles de segmentation pour les AVC aigus, qui bénéficient de grandes bases de données d'imagerie, les modèles pour les lésions chroniques sont moins développés en raison de la rareté des ensembles de données volumineux. L'étude utilise le jeu de données ATLAS v2.0, qui comprend 655 images T1, et met en avant les avantages du 3D-UNet pour la segmentation volumétrique. Les résultats montrent une performance élevée du modèle, avec une similarité élevée entre les volumes de segmentation automatique et manuelle (figures 24,25,26,27), ce qui suggère que ce modèle pourrait améliorer la prise de décision clinique et faciliter l'étude des relations structure-fonction dans les AVC chroniques.

En somme, cette avancée est cruciale pour surmonter les limitations des méthodes manuelles et pour soutenir une meilleure compréhension des lésions chroniques dans la neurologie vasculaire.[49]

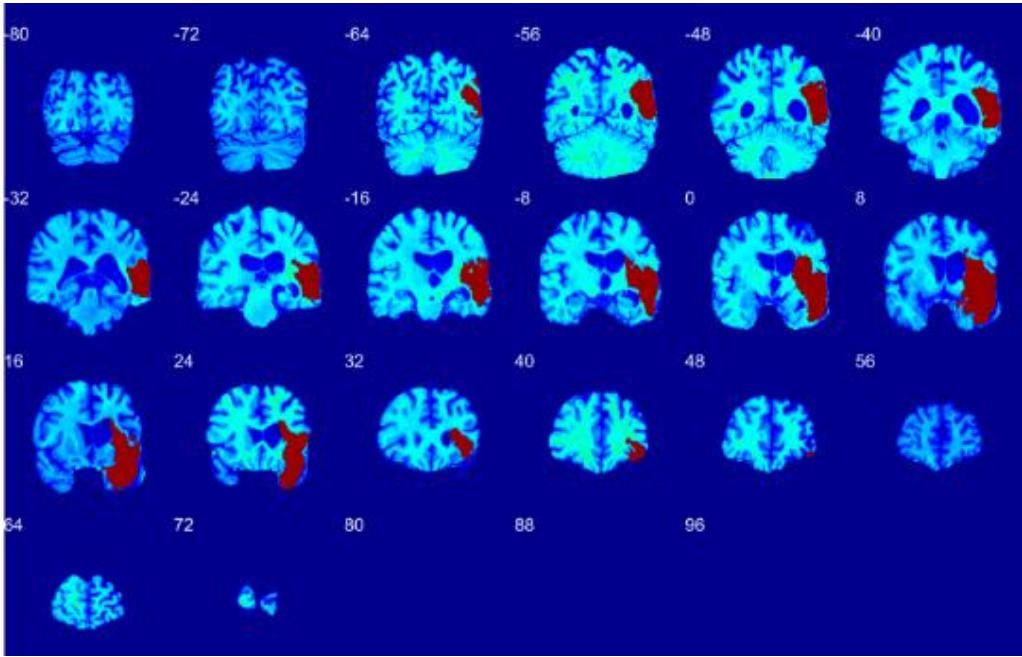


Figure 24: Sections coronales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche. [49]

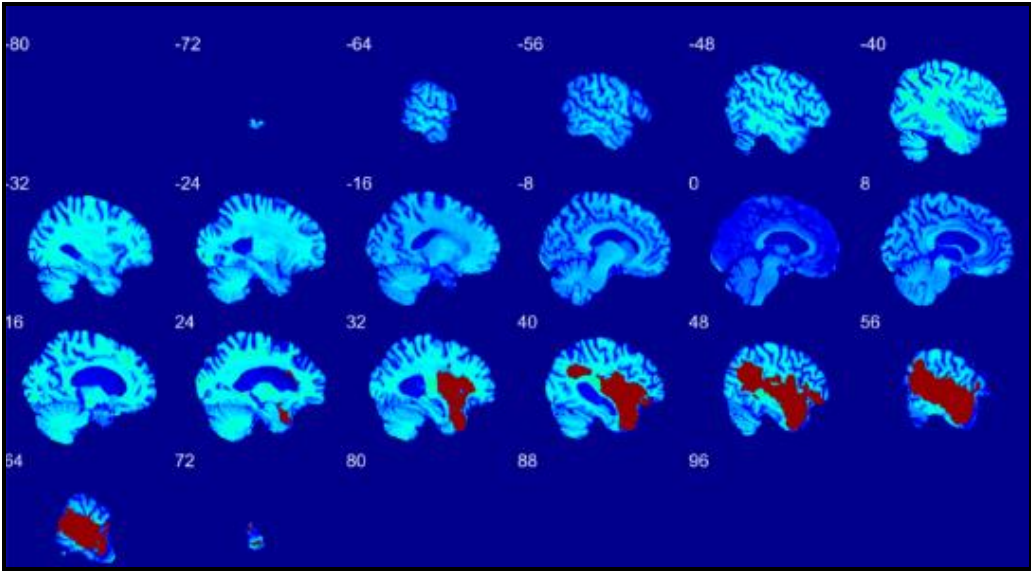


Figure 25: Sections sagittales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche.[49]

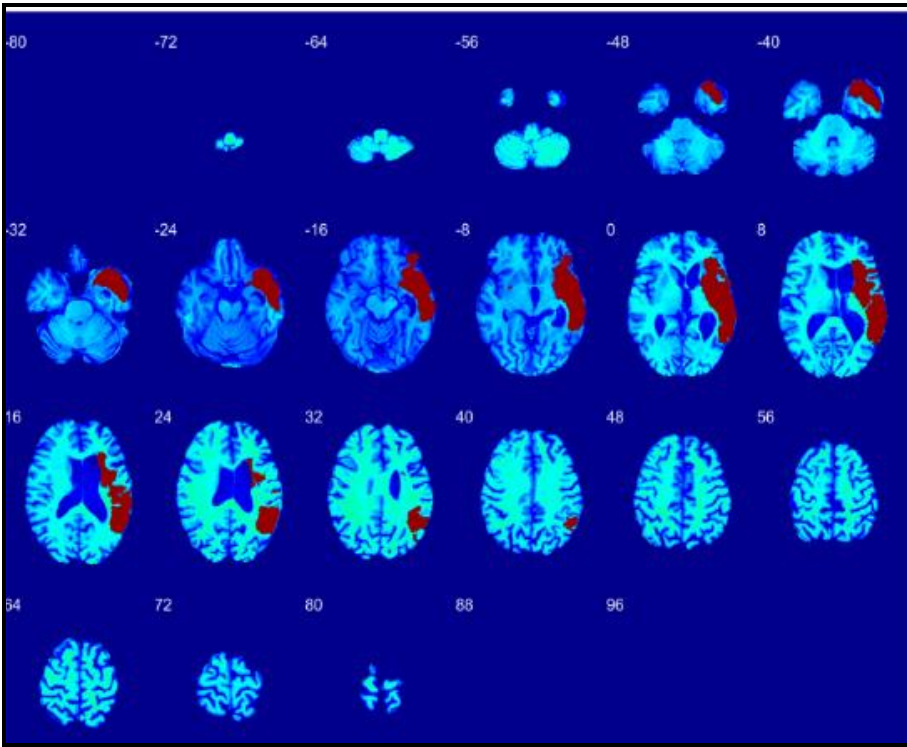


Figure 26: Sections axiales montrant la segmentation automatique d'un AVC de l'ACM gauche[49]

Ainsi, l'intégration de l'intelligence artificielle dans le diagnostic et le traitement des AVC représente une avancée majeure dans le domaine de la santé. En facilitant une détection plus rapide et précise des anomalies, l'IA peut significativement réduire les délais de diagnostic et améliorer la prise en charge des patients. Ces technologies promettent de transformer les pratiques cliniques, en permettant une meilleure compréhension des lésions cérébrales et en optimisant les résultats à long terme.

iv. IA et tumeurs :

Aujourd'hui, le cancer est la deuxième cause de mortalité la plus élevée dans le monde.

Les images médicales jouent un rôle clé dans le diagnostic, la planification thérapeutique et le suivi des cancers. Les protocoles de traitement incluent souvent l'évaluation des volumes et des emplacements des tumeurs. En particulier, pour la planification de la radiothérapie, les cliniciens doivent délimiter manuellement les volumes cibles, une tâche à la fois difficile et chronophage. Les images par résonance magnétique sont particulièrement adaptées à l'imagerie des cancers du cerveau. Différentes séquences IRM (T2, T2-FLAIR, T1, T1 avec gadolinium) mettent en évidence divers sous-composants de la tumeur, tels que l'œdème, la nécrose ou le noyau rehaussé par contraste.[50]

Ces dernières années, les méthodes d'apprentissage automatique ont montré des performances impressionnantes dans une grande variété de tâches de reconnaissance d'images. La plupart des méthodes de segmentation de pointe récentes sont basées sur des CNNs qui ont l'avantage considérable d'apprendre automatiquement les caractéristiques d'image pertinentes. Cette capacité est cruciale pour la segmentation des tumeurs. [51]

Une étude récente propose une méthodologie novatrice basée sur l'architecture d'apprentissage profond pour la classification des tumeurs cérébrales à partir d'IRM. Cette approche utilise une technique avancée pour l'extraction des caractéristiques, associée à une analyse en composantes principales(PCA) pour réduire la dimensionnalité des données. Le

nelles à différentes échelles et orientations. Cette extraction produit des sous-bandes (LL, LH, HL, HH) représentant les composantes de l'image. Une décomposition en trois niveaux de cette technique est utilisée pour extraire 1024 caractéristiques par IRM, qui sont ensuite réduites par PCA pour diminuer la complexité du traitement.

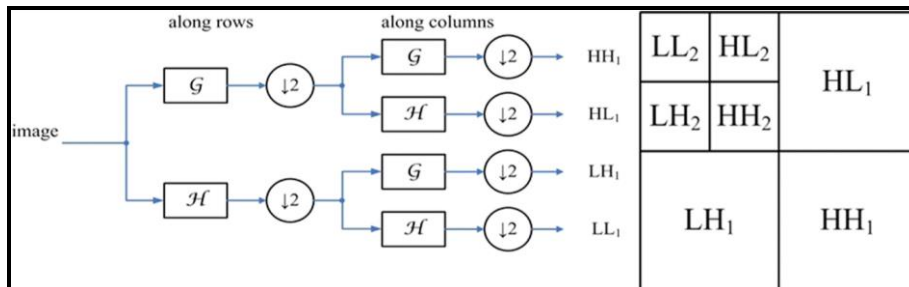


Figure 29: extraction produit des sous-bandes (LL, LH, HL, HH) représentant les composantes de l'image.[52]

La classification des tumeurs est effectuée avec un DNN, entraîné et validé à l'aide de la technique de validation croisée à 7 plis. La performance de cette méthode a été comparée à celle d'autres algorithmes de classification. Les résultats montrent que le classificateur DNN offre une précision supérieure à celle des autres méthodes testées, atteignant un taux de classification de 96,97%, un rappel de 0,97, une précision de 0,97, une F-mesure de 0,97 et une AUC de 0,984.[52]

De nombreuses études ont également démontré le rôle de CNN et de Deep Learning de façon générale dans la détection des tumeurs en s'aidant de l'imagerie IRM. Par exemple, une étude s'est fondée sur le principe des CNNs pour prouver que l'AI peut détecter les tumeurs cérébrales avec une spécificité de 98.67%. Le principe de fonctionnement utilisé est expliqué dans le schéma ci-dessous :[53]

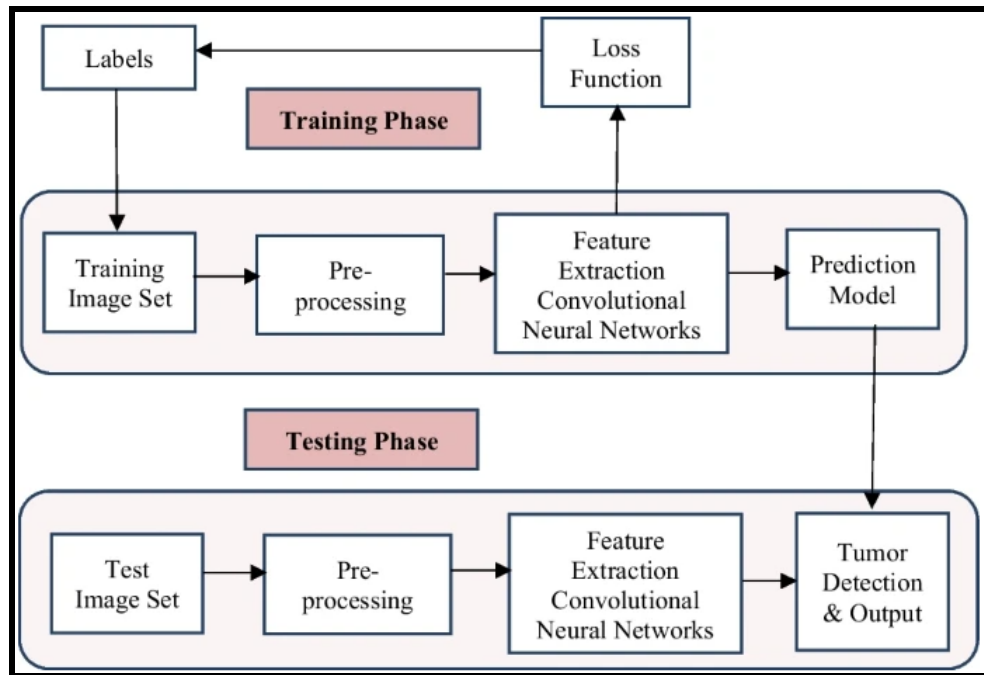


Figure 30: mécanisme de détection des tumeurs à partir des CNNs.[53]

L'étude de John Nisha Anita et Sujatha Kumaran intitulée "A Deep Learning Architecture for Meningioma Brain Tumor Detection and Segmentation", publiée dans le Journal of Cancer Prevention en 2022 s'est distinguée par l'utilisation d'une architecture de réseau neuronal convolutif pour la détection et la segmentation des méningiomes à partir d'images IRM cérébrales.[54]

Les auteurs ont innové en décomposant les images sources à l'aide de la transformée en ondelettes discrètes, permettant ainsi une fusion arithmétique des images pour améliorer la résolution des pixels. Cette étape est suivie par l'application d'un réseau CNN modifié, qui permet de classifier les images en saines ou malignes avec une grande précision. (figure 31)

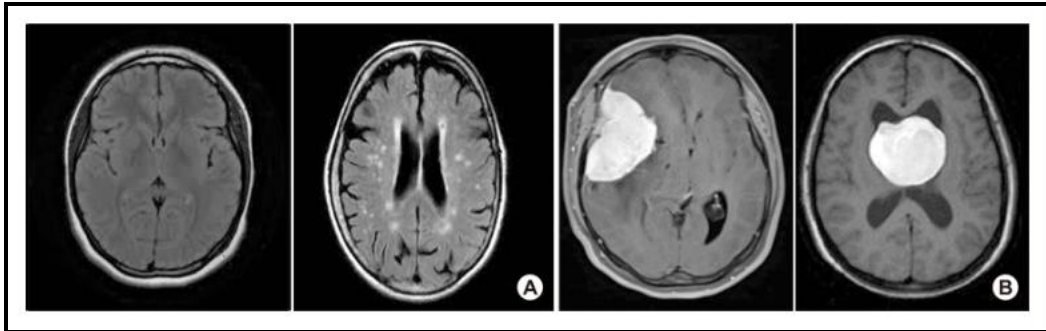


Figure 31: Résultats de classification à partir des CNN : (A) Images sans méningiome et (B) image cérébrale de méningiome.[55]

L'étape de segmentation utilise ensuite l'analyse des composants connexes pour identifier précisément les régions tumorales. (Figure32)

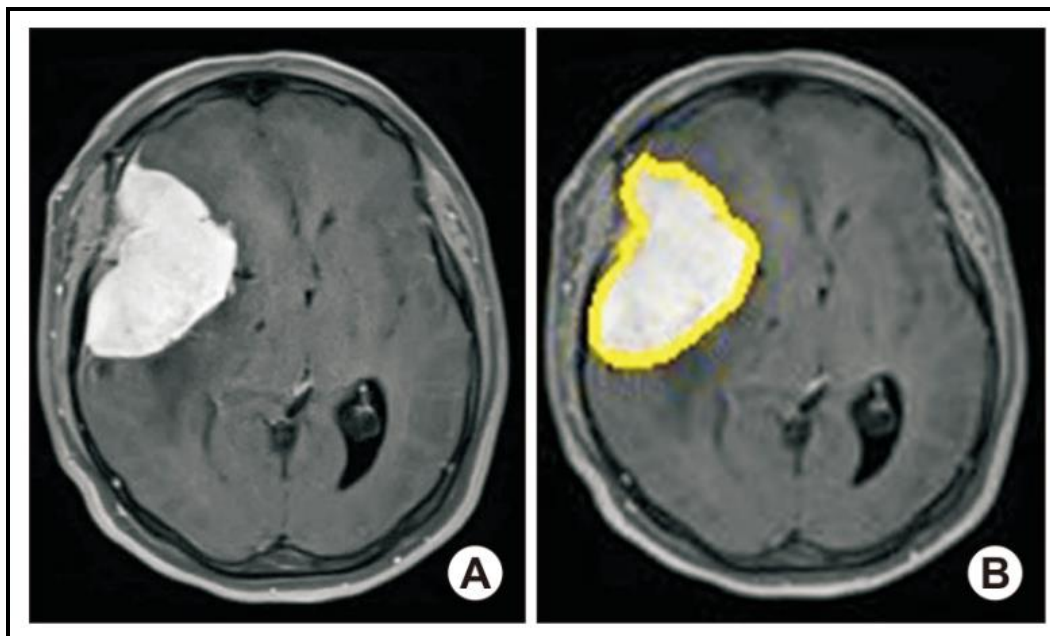


Figure 32: Résultats de la segmentation : (A) Source de l'image cérébrale de méningiome et (B) image du tumeur segmentée analysée par un algorithme de segmentation morphologique.[55]

Les résultats expérimentaux de cette étude sont particulièrement impressionnants, démontrant une sensibilité de 94,8%, une spécificité de 96,3% et une précision globale de 95,5% pour la segmentation des méningiomes. Ces performances surpassent les méthodes conventionnelles, soulignant l'impact potentiel des techniques d'apprentissage profond dans l'amélioration des diagnostics et de la gestion des tumeurs cérébrales.[54]

b) Imagerie du rachis :

De nombreuses études ont prouvé que les CNNs, peuvent être utilisés, soit indépendamment soit combinés à d'autres techniques telles que la propagation de contour actif régularisée en niveaux de gris, pour segmenter de manière précise les structures de la colonne vertébrale ainsi celle de la moelle épinière à partir d'images médicales notamment des scanners ou des IRM.[56,57]

En utilisant cette approche, l'IA améliore la fiabilité et la précision de la segmentation automatisée de la moelle épinière et celle du rachis, ouvrant ainsi des perspectives pour des avancées significatives dans le domaine de l'imagerie médicale et de la médecine personnalisée.

Ces avancées dans le domaine d'imagerie médicale ont permis de classer différents types de lésions du rachis en fonction de leurs caractéristiques visuelles.

Les métastases osseuses lytiques par exemple, peuvent désormais être analysées et classifiées avec précision à partir de scanners.

Un système de CAO assisté par intelligence artificielle pourrait rapidement identifier l'os vertébral à partir d'images CT complètes et détecter les métastases osseuses rachidiennes lytiques avec un temps de calcul de 0,44 s par image. [58]

Cette technologie est également applicable aux fractures de compression ostéoporotiques qui peuvent désormais être classées à partir d'un modèle issu des bases du Deep Learning combinés à des données de radiographies de la colonne vertébrale.[59]

Cette approche automatisée offre un moyen prometteur d'améliorer le diagnostic et la caractérisation des différentes pathologies du rachis et de la moelle épinière, ce qui peut être crucial pour la prise de décisions thérapeutiques appropriées.

2. Autres aspects de l'application de l'IA :

L'IA peut améliorer la planification et la navigation chirurgicale en perfectionnant d'abord les applications non cliniques, telles que l'optimisation des flux de travail, la factura-

tion et la gestion des cabinets. Il est envisageable que des sites web et des chatbots automatisés accueillent les patients et collectent leurs antécédents médicaux. Des applications d'IA vérifient ces données en les confrontant aux dossiers médicaux, tandis que des systèmes experts assistent les diagnostics.

Les technologies avancées en neuroimagerie garantissent précision et exactitude, tandis que les systèmes robotiques et de neuronavigation soutiennent les chirurgies mini-invasives. La combinaison de la neuronavigation, de la vision artificielle et de la fusion d'images facilite la résection des lésions et la radiothérapie ciblée.

Les dispositifs de sécurité en anesthésie et les appareils intelligents minimisent les risques d'erreurs médicales. Les respirateurs intelligents optimisent la ventilation postopératoire, tandis que les systèmes de délivrance de médicaments basés sur l'apprentissage machine assurent un contrôle strict de la glycémie et de la pression artérielle. Enfin, des instruments de surveillance connectés aux dossiers médicaux, des systèmes d'alerte intelligents, une interopérabilité complète des instruments, ainsi que des technologies d'IA soutiennent les protocoles de traitement personnalisés et les essais cliniques.[60]

À côté de ces avancées, plusieurs autres aspects de l'application de l'IA méritent d'être examinés. Voici quelques points clés qui illustrent comment l'intelligence artificielle transforme le domaine médical :

a) **Analyse personnalisée :**

Les modèles de Machine Learning peuvent être entraînés sur de grandes quantités de données pour identifier des modèles et des caractéristiques subtiles liées aux tumeurs tels que le glioblastome, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées par les cliniciens pour un traitement personnalisé et optimal.[14]

Dans cette optique, Ertosun et al. soutiennent également cette affirmation. Dans leur étude, les chercheurs ont développé deux CNNs distincts pour définir le grade des gliomes. L'un d'entre eux a classé les cas comme glioblastome multiforme (grade IV) ou gliome de

grade inférieur (grade II et III), avec une précision de 96 %, et l'autre a distingué les gliomes de grade II et du grade III avec une précision de 71 %.[61]

Il convient de souligner que l'histologie et les biomarqueurs génomiques constituent des outils essentiels pour le diagnostic et le pronostic du cancer.

En plus de détecter et d'identifier les tumeurs grâce aux CNN, l'IA peut également tirer parti de ces outils pronostiques pour prédire l'évolution de la maladie, ce qui permet d'orienter les décisions thérapeutiques selon les besoins spécifiques des patients.

Pour illustrer concrètement cet impact de l'intelligence artificielle, prenons le cas des gliomes diffus. Leur pronostic repose largement sur la classification génomique et l'évaluation histologique manuelle. Ces gliomes sont d'abord regroupés en trois sous-types moléculaires, en fonction des mutations des gènes IDH1 et IDH2, ainsi que de la codéletion des chromosomes 1p et 19q. Ensuite, le grade est déterminé pour chaque sous-type sur la base de caractéristiques histologiques. [62]

Pour les sous-types à lignée astrocytaire, la classification dépend du statut de mutation IDH, tandis que la combinaison de la codéletion 1p/19q et de la mutation IDH permet d'identifier un oligodendrogliome. Cependant, il est crucial de noter que l'évaluation histologique n'est pas toujours un indicateur fiable du sous-type moléculaire. Les critères de classification varient, allant de l'apparence des noyaux cellulaires à des éléments plus complexes comme la nécrose ou la présence de vaisseaux sanguins anormaux.

Une étude a démontré que les CNNs peuvent être appliqués pour extraire des caractéristiques morphologiques significatives des images histologiques. (Figure33)[63]

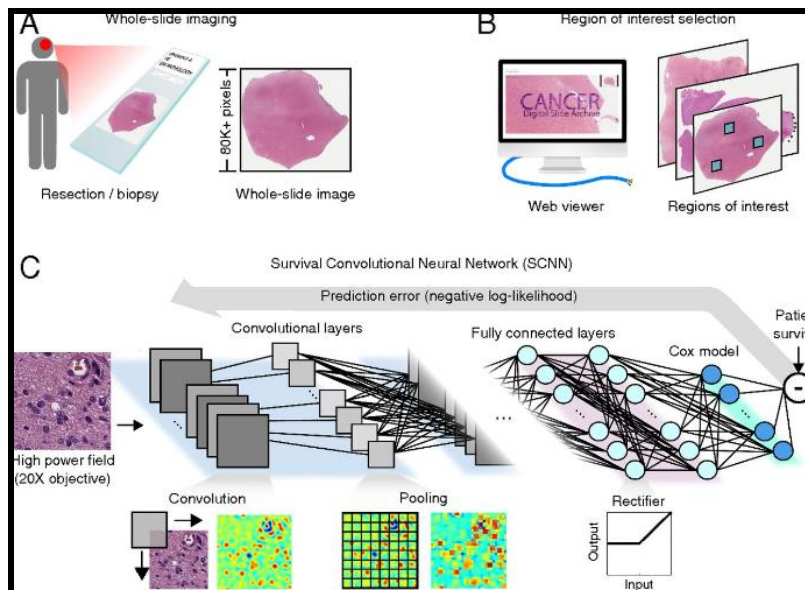


Figure 33: Un modèle SCNN combinant des CNN d'apprentissage profond avec des modèles de survie histologiques.[63]

En intégrant ces données avec des informations génomiques, ce modèle a permis de prédire les résultats cliniques du cancer avec une précision qui dépasse celle des méthodes traditionnelles.[63]

Cette approche multidisciplinaire non seulement améliore la compréhension des relations entre l'apparence histologique des tumeurs et leur profil génomique, mais elle ouvre également de nouvelles perspectives pour la personnalisation des traitements en oncologie. En identifiant des sous-groupes de patients avec des pronostics distincts, les praticiens peuvent potentiellement orienter les décisions thérapeutiques de manière plus ciblée et efficace.

b) Prédiction des résultats et Anticipation des complications :

Les modèles de simulation basés sur l'IA peuvent simuler différentes approches chirurgicales et prévoir les résultats potentiels de chaque option. [64]

Cette approche utilise des données historiques des patients pour anticiper et gérer les résultats potentiels. En exploitant les informations disponibles dans les dossiers médicaux, telles que les données démographiques, les antécédents médicaux et les conditions préexis-

tantes, la modélisation prédictive via l'IA permet une évaluation des risques plus personnalisée que les méthodes traditionnelles.

Les algorithmes d'apprentissage automatique analysent en profondeur ces données complexes pour révéler des modèles et des relations souvent négligés par les analyses conventionnelles. Ce caractère proactif permet aux professionnels de la santé d'anticiper les complications potentielles, d'ajuster les stratégies de traitement et, en fin de compte, d'améliorer la sécurité des patients. Ainsi, la modélisation prédictive en phase préopératoire se distingue comme un exemple d'innovation promettant non seulement de prédire les défis à venir, mais aussi de façonner une approche des soins plus optimisée et individualisée.[65]

Une étude récente a démontré l'efficacité des modèles d'apprentissage automatique dans la prédiction de la mortalité chez les patients présentant des lésions cérébrales traumatiques modérées et sévères isolées. L'objectif de cette recherche était de développer un modèle ML capable de prédire la mortalité chez ces patients en se basant sur des données démographiques, des caractéristiques de blessures, et des données de laboratoire. L'étude a inclus 1734 patients adultes hospitalisés entre janvier 2009 et décembre 2015, avec des scores AIS (Abbreviated Injury Scale) ≥ 3 pour les traumatismes crâniens. Les patients ont été répartis en ensembles d'entraînement et de test, comprenant respectivement 1564 patients en survie et 170 en non-survie, ainsi que 293 en survie et 32 en non-survie pour les ensembles de test. Les modèles prédictifs utilisés incluaient la régression logistique (LR), les machines à vecteurs de support, les arbres de décision, le naïf Bayes (NB), et les réseaux neuronaux artificiels. Les performances des modèles ont été évaluées en termes d'exactitude, de sensibilité, de spécificité, et d'aire sous la courbe (AUC) des courbes caractéristiques de l'opérateur du récepteur. Les résultats ont montré que tous les modèles ML, à l'exception du NB, avaient une précision supérieure à 90 % dans l'ensemble d'entraînement, avec l'ANN atteignant la sensibilité la plus élevée (80,59 %) et l'AUC la plus élevée (0,968). Dans l'ensemble de test, l'ANN a maintenu la sensibilité la plus élevée (84,38 %), suivie par le SVM et la LR.

Cette étude illustre comment les techniques de ML, notamment les réseaux neuronaux artificiels, peuvent offrir des prédictions robustes et précises de la mortalité, soulignant leur potentiel dans la gestion des soins aux patients atteints de TCC sévères.[66]

Cela suggère que les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être des outils utiles pour aider les cliniciens à prendre des décisions éclairées en matière de traitement et à personnaliser la prise en charge des patients.

c) **Planification itérative :**

Les modèles de simulation ont permis aux chirurgiens d'explorer les différentes options, de tester virtuellement les résultats et d'affiner leur plan de travail avant de passer à la salle d'opération.

Un exemple clé est le traitement des anévrismes cérébraux, souvent réalisé par voie chirurgicale via le "clipping", une technique qui consiste à placer un clip sur l'anévrisme pour arrêter le flux sanguin.

De nombreuses études ont prouvé que la réalité virtuelle stéréoscopique permet aux chirurgiens de visualiser en trois dimensions des modèles anatomiques du cerveau et des anévrismes, à partir d'une base de données de clipping d'anévrismes issue de l'angiographie cérébrale, ce qui peut améliorer la précision grâce à la possibilité de voir l'exposition et le degré d'oblitération d'un anévrisme avec les différents angles d'approche, facilitant ainsi une meilleure préparation de l'intervention.[67-69]

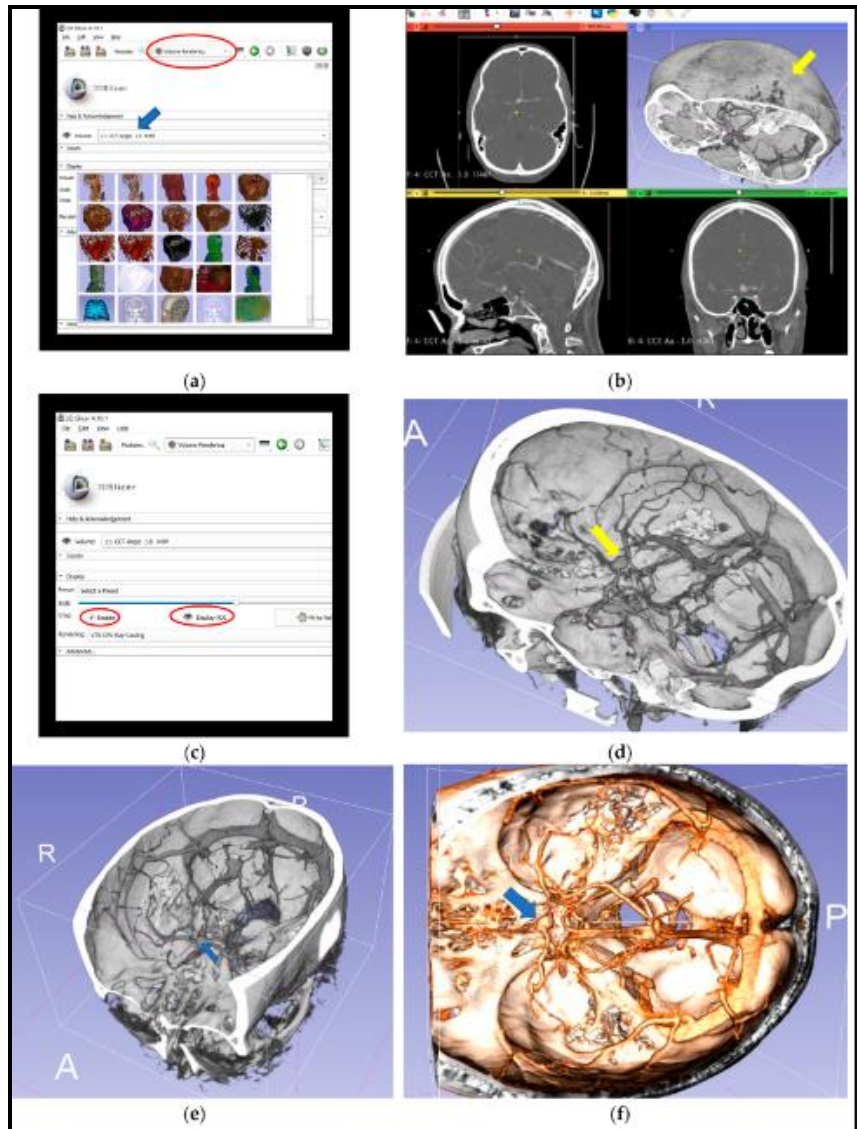


Figure 34: Processus de reconstruction des images 3D-RV et réalisation de la scène RV finale dans 3D Slicer.[69]

d) Formation et apprentissage :

Etant donné que la neurochirurgie est l'une des spécialités qui nécessite une grande habileté avec les instruments chirurgicaux dans des corridors restreints, entourés de structures vitales.

Comprendre les relations anatomiques complexes est crucial et demande une pratique approfondie. Les limitations des images 2D et des images 3D non interactives soulignent le

besoin de systèmes éducatifs en neurochirurgie qui offrent une expérience pratique interactive en 3D. La capacité à visualiser et manipuler des structures en 3D est importante pour la confiance et la performance.

Ainsi vient le rôle des modèles de simulation basés sur l'IA qui peuvent servir à la formation et à l'apprentissage des chirurgiens sans risquer la sécurité des patients, tout en offrant des retours d'information instantanés sur leurs performances.

Ces modalités comprennent la stéréomicroscopie numérique, la planification chirurgicale, la réalité augmentée (RA) et la réalité virtuelle (RV). La RA, en superposant des informations générées par ordinateur à la vue réelle, et les écrans holographiques comme HoloLens, facilitent la localisation des tumeurs et l'enseignement. L'intégration de ces technologies avec la simulation tactile améliore la courbe d'apprentissage, la compréhension conceptuelle de l'anatomie complexe et les compétences visuo-spaciales des neurochirurgiens en formation.[70]

Une étude a montré qu'un système de tutorat basé sur l'IA en distanciel obtient de meilleurs résultats que les experts humains pour la formation des étudiants en médecine. Les étudiants formés par l'IA ont acquis des techniques chirurgicales 2,6 fois plus rapidement que ceux formés par des instructeurs humains à distance.[71]

Les modèles de l'IA peuvent également intervenir dans l'évaluation de la formation et non seulement l'apprentissage. Des chercheurs de neurochirurgie ont développé un système d'IA capable d'évaluer la qualité d'exécution des gestes chirurgicaux avec un taux d'exactitude de 90%. Ce système peut prédire le niveau de savoir-faire des chirurgiens à partir de seulement 6 critères de performance : l'activation, la force appliquée, la position de la pointe et l'angle de chaque instrument ; le volume de la tumeur et des tissus sains environnants retirés ; la perte de sang ; et si un instrument donné était en contact avec la tumeur, un vaisseau sanguin ou un tissu sain.[72]

Les simulations peuvent être adaptées pour diverses interventions, y compris la neuroanatomie, la manipulation d'instruments. Dans une étude, des stagiaires en orthopédie et en neurochirurgie ont interagi avec des modèles 3D de sténose du rachis lombaire, effectuant des décompressions chirurgicales virtuelles. Les résultats ont trouvé le module de réalité virtuelle était utile pour comprendre la pathologie de la sténose du rachis et les techniques de décompression, ainsi que pour la planification préopératoire avec des modèles spécifiques aux patients.[73]



Figure 35: Exemple représentatif d'un stagiaire en chirurgie interagissant avec le module de réalité virtuelle.[73]



Figure 36: Exemple de simulation en réalité virtuelle d'une laminotomie lombaire à l'aide d'un rongeur Kerrison (à gauche), et de la réalisation de la décompression et de l'ablation du ligamentum flavum, exposant la dure-mère irrégulière comprimée (à droite).[73]

Ces avancés de l'IA permettent d'améliorer la formation et l'apprentissage des neurochirurgiens. Et éventuellement d'améliorer la dextérité, de la planification chirurgicale et de la prise de décision tout en évoquant la possibilité d'individualiser la formation en fonction des besoins de chaque apprenant.

e) Navigation chirurgicale

Un système de navigation chirurgicale basé sur l'IA est une avancée technologique majeure, combinant des données anatomiques en temps réel pour aider les neurochirurgiens à effectuer des opérations de manière plus précise et sécurisée. Voici les principaux aspects de cette technologie :

- 1. Acquisition des images :** les technologies d'imagerie médicale avancées telles que les scanners et les IRM, permettent de créer des modèles 3D précis de la structure cérébrale du patient. Ces modèles sont superposés en temps réel lors l'opération, offrant aux chirurgiens une visualisation précise de la position de la tumeur par rapport aux structures cérébrales environnantes. Cette approche améliore la planification des incisions, réduit les dommages aux tissus sains et optimise les résultats pour les patients atteints de tumeurs cérébrales, comme les gliomes.[74]

Par exemple, l'utilisation d'algorithmes de l'IA pour l'analyse d'images de tomographie par émission de positrons (TEP) et d'IRM a démontré une précision accrue dans le ciblage des zones à biopsier et dans la planification des procédures chirurgicales.[75]

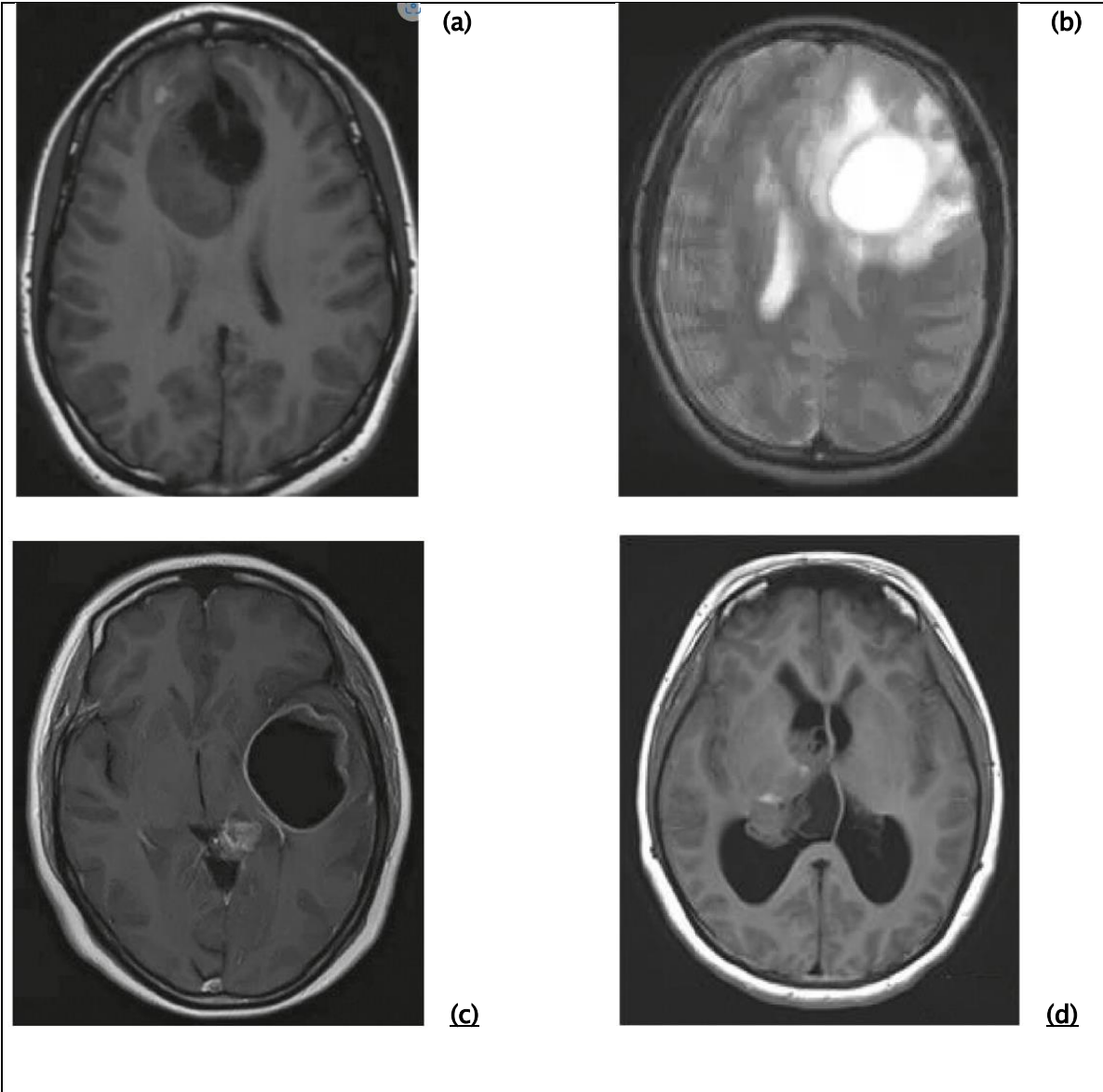


Figure 37: Images IRM de patients atteints de gliome de grade IV.[75]

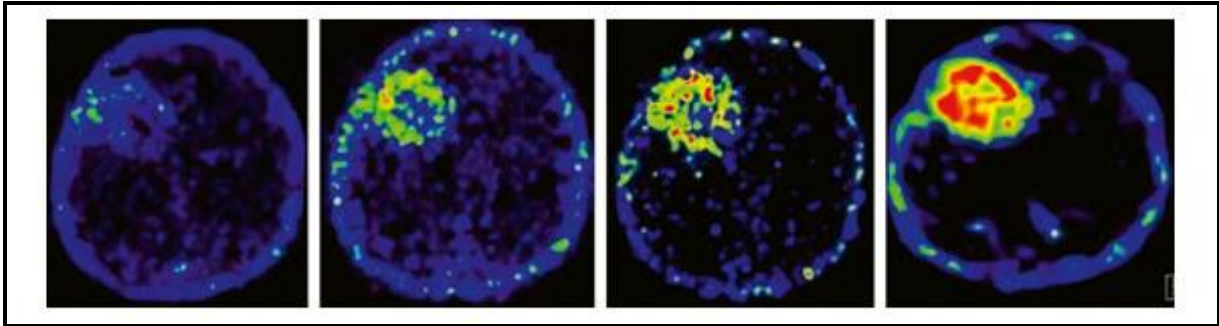


Figure 38: Images TEP de patients atteints de gliome. De gauche à droite, il s'agissait des images de 1 h, 8 h, 12 h et 24 h d'injection de traceur, respectivement.[75]

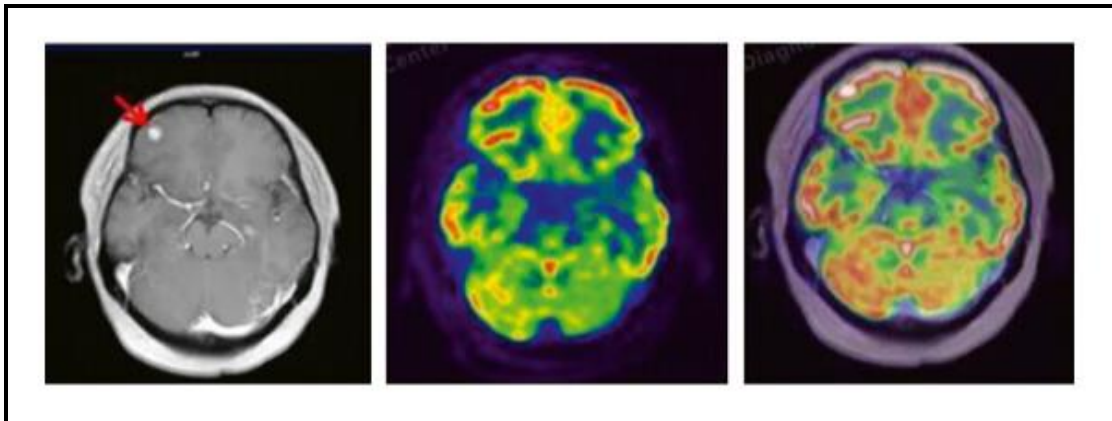


Figure 39: modèle de IA permettant la fusion TEP + IRM de patients atteints de gliome. De gauche à droite, il s'agissait des images de fusion et des images à 8 h et 24 h après l'injection du traceur. Les flèches indiquent les lésions.[75]

Le modèle en 3D créé à partir des images médicales, de la structure anatomique concernée du patient, est fidèle à l'anatomie réelle du patient et contient des informations détaillées sur les tissus, les vaisseaux sanguins et la lésion. Améliorant ainsi la précision et la sécurité des procédures chirurgicales.

Après avoir examiné l'impact de la modélisation 3D sur les interventions chirurgicales cérébrales, il est également essentiel de se pencher à son application dans les affections du rachis et de la ME.

Une étude récente a démontré le potentiel d'un système automatisé de segmentation de la colonne vertébrale, basé sur des images CT à faisceau conique (ConeBeamCT), pour

optimiser la planification chirurgicale. Ce système utilise l'apprentissage automatique pour segmenter automatiquement les structures vertébrales et identifier les pédicules, avec une précision globale de 86,1 %, et jusqu'à 95,4 % dans des conditions idéales.



Figure 40: Une visualisation de la façon dont le logiciel identifie les vertèbres par un processus en 3 étapes [76]

En réduisant le temps nécessaire pour ces processus à environ 11 secondes pour cinq vertèbres, cette technologie non seulement accélère le flux de travail chirurgical mais améliore également la sécurité du patient en guidant plus précisément la pose des vis pédiculaires.[76]

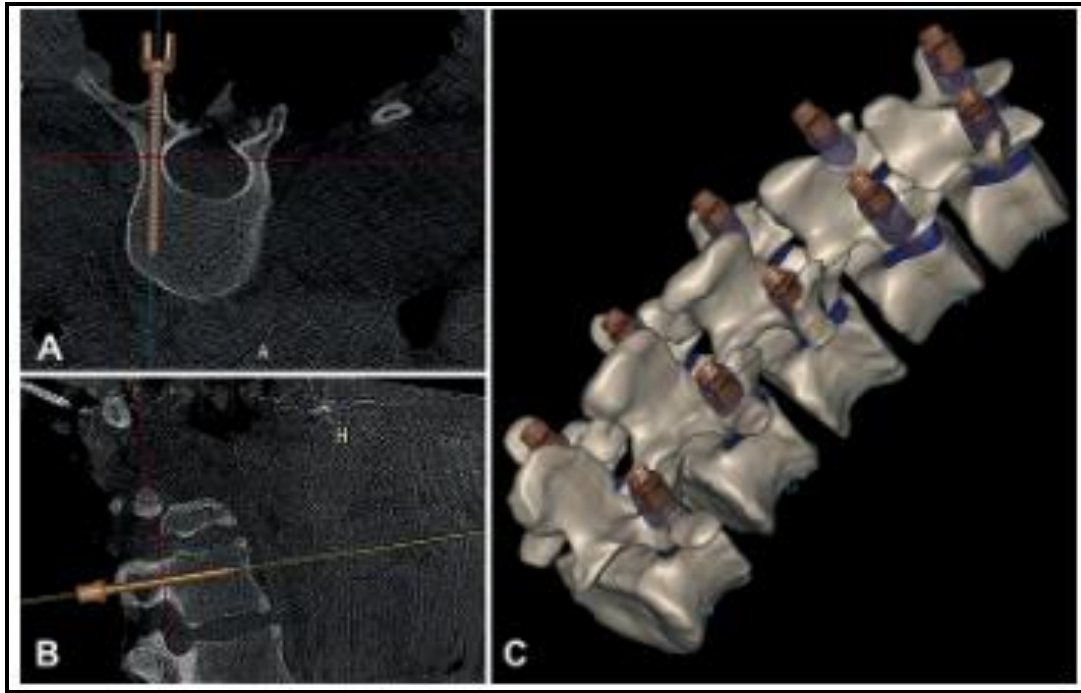


Figure 41 : visualisation de l'identification automatique du pédicule et de la suggestion de pose de vis dans les vues axiales (A) et sagittales (B) et visualisation de la section vertébrale segmentée incluant la suggestion de vis (C) [76]

Ainsi, l'application de l'IA à l'imagerie médicale peut transformer la planification chirurgicale en rendant les procédures plus précises, plus rapides, et potentiellement plus sûres.

2. Calibrage du patient : ce terme désigne souvent la position et à l'orientation réelles du patient sur la table d'opération. Des systèmes robotiques utilisant des repères anatomiques issus d'images médicales, comme les scanners, améliorent la précision du positionnement, réduisent les erreurs et optimisent la délivrance de la dose de radiation pendant les traitements en oncologie. Cette technique contribue également à la sécurité du patient en améliorant l'efficacité des traitements de radiothérapie tout en minimisant les effets secondaires sur les tissus sains environnants.[77]

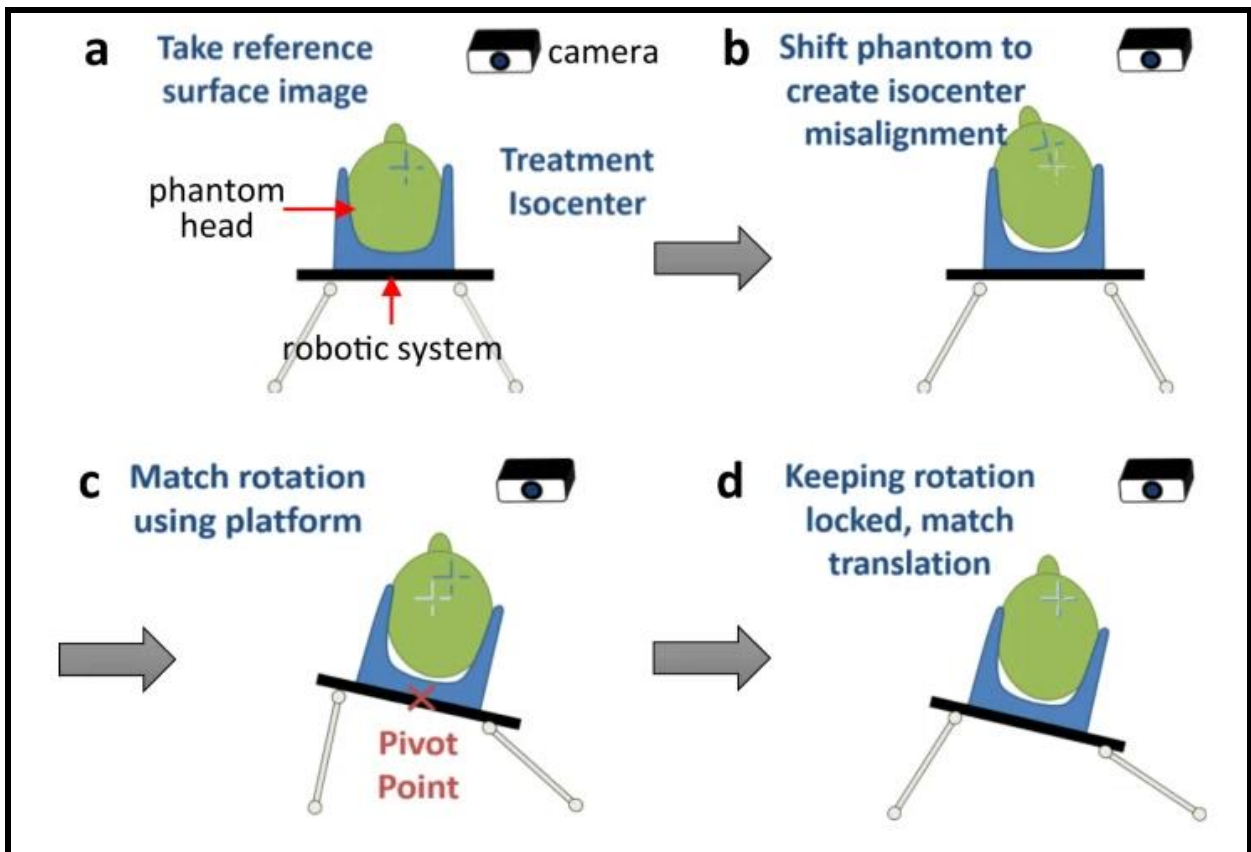


Figure 42: Flux de travail séquentiel pour obtenir une précision absolue du positionnement d'un patient sur la table de radiothérapie.[77]

3. **Suivi en temps réel :** Pendant l'opération, des capteurs de suivi radiologiques sont utilisés pour suivre les mouvements de l'instrument chirurgical et de la tête du patient. Ces données sont intégrées au modèle en 3D, permettant au système de localiser précisément les instruments par rapport à l'anatomie du patient. Cette technologie est appliquée dans diverses pathologies, tant crâniennes que rachidiennes, et démontre comment la navigation assistée par IA et la robotique peuvent améliorer la précision des interventions et la qualité de vie des patients.[78,79]

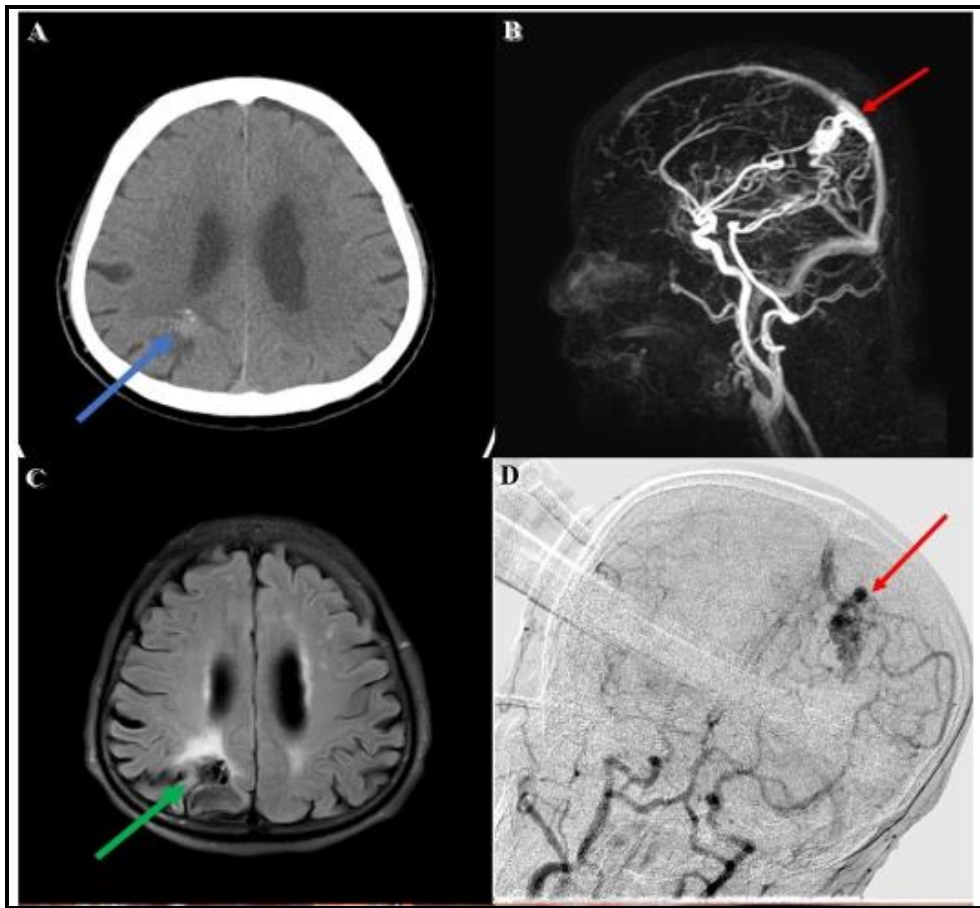


Figure 43: Images préopératoires et peropératoires:(A) Lésion vasculaire suspecte au niveau pariétal droit avec vestige hémorragique sur tomodensitométrie (flèche bleue). (B) L'angiographie par résonance magnétique (ARM) reconstructive préopératoire a révélé la lésion vasculaire enchevêtrée (flèche rouge). (C) Un phénomène d'absence de flux a été observé sur l'image pondérée en T2 (flèche verte). (D) Angiographie par soustraction numérique (ASN) peropératoire pour confirmation de la localisation de la lésion.[79]

4. Réalité augmentée (RA) : La RA permet d'afficher des images directement dans le champ de vision du chirurgien, offrant des informations utiles pendant l'opération.

Une étude récente a montré l'efficacité de l'RA dans la résection microchirurgicale des MAV, en intégrant des hologrammes colorés projetés sur le champ opératoire. Cela permet aux chirurgiens d'identifier et de traiter les artères et les lésions de manière plus sécurisée, en réduisant les distractions liées aux systèmes de navigation traditionnels. [79]

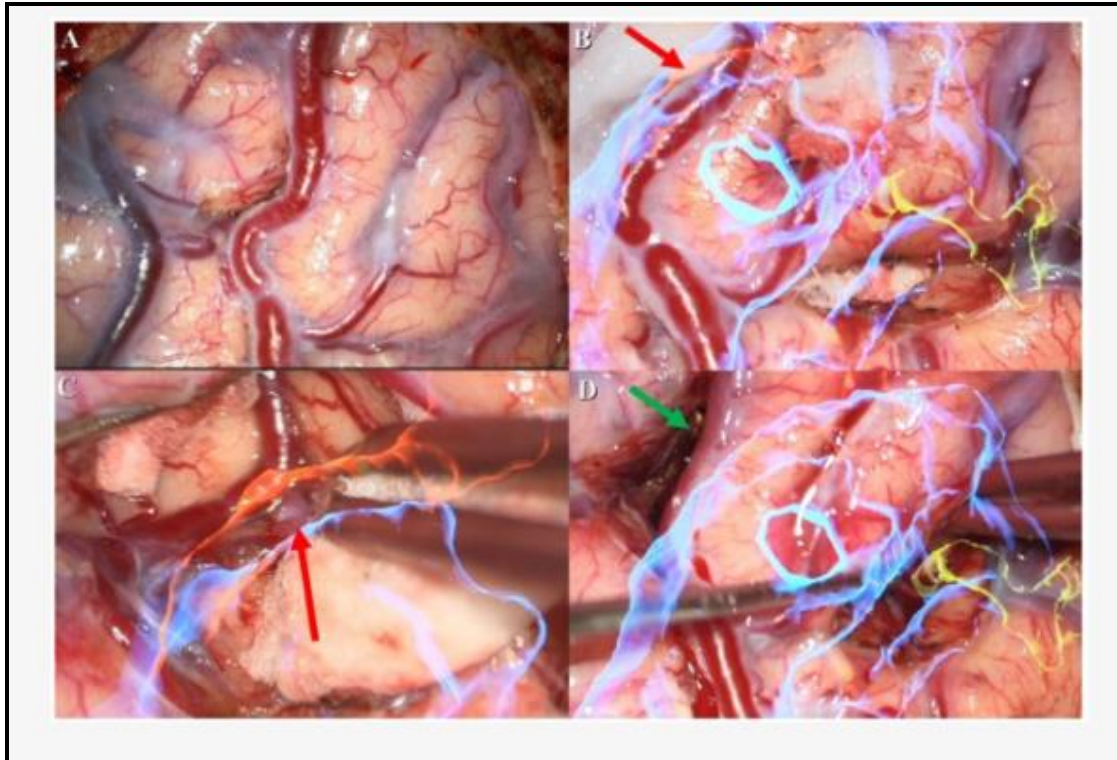


Figure 44: Microchirurgie sous assistance de la technique RA. (A) Champ opératoire sans projection d'hologramme RA. (B) Le nidus AVM et les artères nourricières ont été étiquetés avec une couleur différente (bleu : nidus ; rouge : artère d'alimentation de l'artère cérébrale moyenne ; jaune : artère d'alimentation de l'artère cérébrale postérieure) ; La flèche rouge indique également l'artère nourricière de l'artère cérébrale moyenne. (C) Écrêtage et coagulation de l'artère nourricière. (D) L'oblitération d'une autre artère nourricière à partir de l'artère cérébrale postérieure ; La flèche verte indique le clip pour l'élimination de l'artère d'alimentation.[79]

La RA améliore la sécurité et la précision des interventions, notamment en chirurgie endoscopique de la base du crâne, en fournissant des alertes en temps réel pour éviter les structures critiques [80]

5. Prise de décision assistée : les techniques du Deep Learning peuvent aider les neurochirurgiens dans la prise de décisions cliniques, telles que la prédiction des résultats chirurgicaux, la classification des tumeurs cérébrales et la détection précoce des complications postopératoires.[81]

En utilisant diverses technologies d'imagerie, comme la fluorescence et l'imagerie par résonance magnétique intra-opératoire, l'IA permet d'améliorer l'extension de la résection tumorale, offrant aux chirurgiens une meilleure visualisation des limites de la tumeur et une identification précise des tissus tumoraux.[82]

En guise de conclusion, la combinaison de la précision des données anatomiques en 3D avec la puissance de l'intelligence artificielle permet aux systèmes de navigation chirurgicale basés sur l'IA d'offrir aux neurochirurgiens une confiance et une précision accrues lors d'interventions délicates. Cela réduit les risques de complications, améliore les résultats et ouvre la voie à des procédures plus complexes et innovantes.

3. Chirurgie Robotique

Il existe diverses applications des robots chirurgicaux dans les procédures neurochirurgicales, notamment que la planification précise des interventions, la navigation assistée par robot et la réalisation de gestes chirurgicaux complexes avec une précision accrue. Cela permet une réduction des risques et ouvre la voie à des procédures moins invasives.[19,83]

Les robots chirurgicaux dotés d'intelligence artificielle (IA) ont le potentiel de transformer la pratique de la neurochirurgie en permettant l'exécution de tâches complexes avec une précision accrue grâce à de nombreuses innovations spécifiques aux technologies robotiques, telles que :

a) Exploitation du rachis

Une revue a discuté les avancées et les applications de la chirurgie assistée par robot et de la navigation guidée par l'image dans le traitement des déformations de la colonne vertébrale. Les systèmes de navigation informatisée et de robotique ont été développés pour améliorer la précision et la cohérence de la pose des vis pédiculaires, tout en réduisant le risque de mauvais positionnement.[84]



Figure 45: Insertion du fil-guide à l'aide d'un système robotique pour l'insertion préplanifiée de la vis pédiculaire[84]



Figure 46: Pose percutanée de la vis pédiculaire avec le patient en position de décubitus latéral réalisée à l'aide de la représentation tridimensionnelle de la colonne vertébrale du patient dans le système de navigation basée sur la tomodensitométrie. [84]

L'utilisation de la navigation guidée par l'image et de la robotique dans la chirurgie de la colonne vertébrale a amélioré la planification et l'exécution des interventions chirurgicales complexes, non seulement pour guider la pose de vis et d'autres implants dans la colonne thoraco-lombaire, mais aussi dans les interventions cervicales et pelviennes ainsi que dans la résection de tumeurs vertébrales.

Une étude qui a été réalisée pour évaluer les 40 premiers cas traités avec la technologie de la chirurgie assistée par robot avec navigation Stealth pour la pose de vis pédiculaires

dans les déformations de la colonne vertébrale pédiatrique, a montré que la chirurgie assistée par robot en combinaison avec la navigation peut s'avérer être une approche sûre et précise pour la fixation de vis pédiculaires chez les patients pédiatriques présentant des déformations de la colonne vertébrale.[85]

Cela souligne la nécessité d'intégrer ces technologies robotiques dans la pratique chirurgicale de la colonne vertébrale et en neurochirurgie au sens large.

Une étude a également mis en avant les avantages de l'approche MARSS (Mini invasive Assisted Robotic Spine Surgery), qui intègre des technologies robotiques avancées avec des méthodes de chirurgie minimalement invasive lors de la préparation des vertèbres et de la fixation des implants. Elle met en accent les avantages potentiels de l'approche MARSS, tels que des incisions plus petites, une récupération plus rapide, une réduction des saignements et des complications postopératoires.[86]

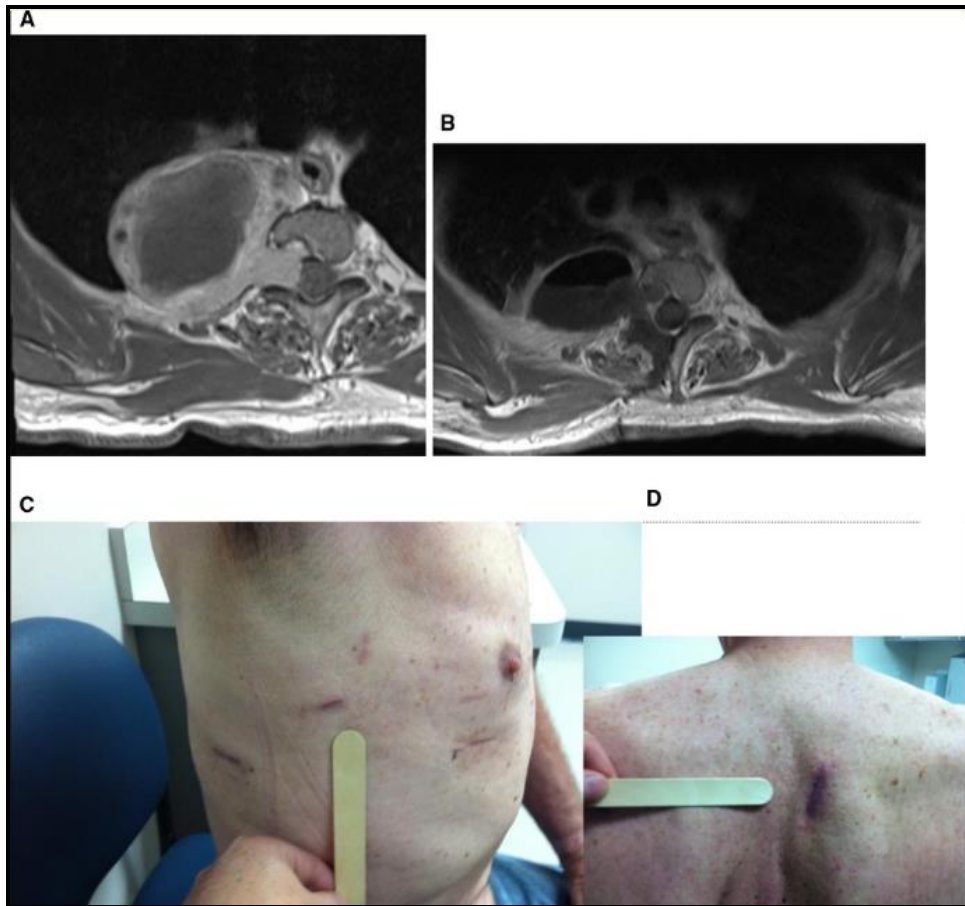


Figure 47: (A) IRM axiale pré- et (B) postopératoire montrant une résection tumorale totale macroscopique. Incision thoracique postopératoire (C) antérieure et (D) postérieure après utilisation du robot da Vinci pour enlever la tumeur thoracique apicale.[86]

Tout ceci et d'autres, pour affirmer la nécessité d'intégrer ces technologies robotiques dans la pratique chirurgicale de la colonne vertébrale spécifiquement, et en neurochirurgie globalement.

b) Exploitation du crane

Les robots chirurgicaux peuvent également être utilisés pour effectuer des microchirurgies de précision dans des zones délicates du cerveau. Grâce à leur capacité à minimiser les tremblements et à offrir une vision en 3D avec zoom, ils permettent aux chirurgiens de manipuler les instruments avec une extrême précision, réduisant ainsi le risque de lésions aux tissus cérébraux environnants. [87]

Les robots dotés d'IA peuvent être programmés pour effectuer des biopsies ciblées de tumeurs cérébrales ou d'autres lésions. Grâce à l'analyse en temps réel des données anatomiques, l'IA peut guider le robot pour s'assurer que l'échantillon est prélevé avec précision et éviter les zones critiques. L'application de la stéréotaxie robotique dans la biopsie cérébrale, ainsi que dans la stimulation cérébrale profonde et la chirurgie des tumeurs cérébrales, permet une réduction du temps opératoire, une diminution de la taille des incisions, un positionnement précis des électrodes et, par conséquent, une précision accrue et une réduction du risque de complications grâce à l'utilisation de systèmes robotiques. [20]

Cette stabilité et précision offertes par les systèmes robotiques dans les procédures où des mouvements subtils sont nécessaires sont essentielles pour minimiser les dommages aux structures cérébrales sensibles. [88]

Les robots peuvent également être utilisés pour assister les chirurgiens lors de procédures endoscopiques complexes, permettant un accès à des zones difficilement accessibles. L'IA peut aider à la navigation en temps réel, en indiquant la meilleure trajectoire et en alertant en cas de risque de lésions des structures sensibles. Par exemple, l'utilisation de la robotique dans la microchirurgie assistée par endoscopie transcrânienne pour les interventions cérébrales minimales invasives, également appelées "keyhole surgeries", a permis d'améliorer la précision et la stabilité de la manipulation d'instruments dans des espaces restreints du cerveau. Cependant, il est important de renouveler ces plateformes robotiques pour qu'elles deviennent plus adaptées aux besoins spécifiques de la microchirurgie endoscopique transcrânienne. [89]

Enfin, les robots dotés d'IA peuvent être utilisés pour délivrer une radiothérapie ciblée avec une grande précision. L'IA peut calculer la dose optimale et adapter en temps réel la distribution de la dose en fonction des changements anatomiques pendant la procédure. Les technologies émergentes dans la radiothérapie corporelle stéréotaxique ont le potentiel d'améliorer considérablement les traitements anticancéreux. Grâce à l'imagerie avancée pour

localiser précisément les tumeurs en temps réel, à la planification de traitement basée sur l'IA et à des techniques de délivrance de radiation améliorées, il est désormais possible d'obtenir une précision accrue et une meilleure préservation des tissus sains. [90]

III. Ethique et réglementation

L'intégration croissante de l'intelligence artificielle en neurochirurgie soulève des considérations cruciales en matière de réglementation et d'éthique médicale.

Alors que les avancées technologiques ouvrent de nouvelles perspectives pour le diagnostic, la planification chirurgicale et les interventions neurochirurgicales, il devient impératif d'examiner de près les implications réglementaires et éthiques qui accompagnent cette transformation.

Nombreux articles ont abordé les défis complexes et les dilemmes éthiques inhérents à l'utilisation de l'IA dans un domaine aussi délicat, mettant en lumière la nécessité de lignes directrices rigoureuses pour garantir la sécurité des patients, la fiabilité des résultats et le respect des principes éthiques fondamentaux.[91–93]

Voici quelques considérations éthiques clés liées à l'utilisation de l'IA en neurochirurgie :

- **Erreurs dues aux données** : Les systèmes d'IA apprennent à partir de grandes quantités de données historiques, et si ces données sont biaisées ou erronées, cela peut entraîner des décisions incorrectes de la part de l'IA. Les cliniciens doivent être conscients des limitations potentielles des données utilisées pour entraîner les modèles d'IA.
- **Transparence et applicabilité** : Les décisions prises par les systèmes d'IA sont souvent perçues comme "boîtes noires", ce qui signifie que les médecins peuvent avoir du mal à comprendre comment l'IA a abouti à une certaine décision. Il est essentiel de développer des modèles d'IA explicables et transparents pour que les cliniciens puissent comprendre les raisons derrière les recommandations de l'IA.[94]
- **Responsabilité** : Lorsque l'IA est utilisée pour prendre des décisions médicales, il peut être difficile de déterminer qui est responsable en cas d'erreur. Les décisions prises

par les systèmes d'IA sont souvent basées sur des algorithmes complexes, rendant difficile l'attribution directe de responsabilité en cas de résultat indésirable.

- **Surveillance et supervision humaine** : Bien que l'IA puisse offrir des avantages en termes d'efficacité et de précision, une surveillance et une supervision humaine continues sont essentielles pour garantir la sécurité des patients. Les cliniciens doivent utiliser l'IA comme outil d'aide à la décision plutôt que de déléguer entièrement les décisions médicales à la technologie.
- **Autonomie du patient** : Lorsque des décisions sont prises en se basant sur les recommandations de l'IA, il est important de respecter l'autonomie du patient en fournissant des informations claires sur les options disponibles et en permettant au patient de participer activement aux décisions médicales.
- **Formation et compétence** : Les professionnels de la santé doivent être correctement formés pour utiliser et interpréter les informations fournies par les systèmes d'IA. Une utilisation inadéquate ou une mauvaise interprétation des résultats de l'IA peut entraîner des erreurs médicales.

D'où la nécessité de mettre en place des protocoles de gouvernance, de formation et de supervision appropriés pour garantir une utilisation responsable et éthique de l'IA, tout en maintenant la sécurité et les droits des patients au premier plan.

Dans cet esprit, l'intelligence artificielle suscite aujourd'hui de vifs débats à l'échelle mondiale, à la fois pour ses promesses de progrès et les inquiétudes qu'elle soulève face à son développement rapide, de nombreux pays et organisations mettent en place des cadres pour encadrer son usage.

Par exemple, l'Union Européenne a récemment adopté l'"**AI Act**", une loi pionnière qui fixe les règles communes pour l'IA. Cette législation s'appuie sur une approche basée sur le niveau de risque : les systèmes d'IA les plus critiques sont soumis à des règles strictes, tandis

que les espaces d'innovation, appelés "bacs à sable réglementaires", sont mis en place pour encourager les expérimentations dans un cadre sécurisé.[95,96]

Dans le même temps, la Chine et les États-Unis s'efforcent chacun de trouver des moyens adaptés pour encadrer l'essor de l'intelligence artificielle.

En Chine, le gouvernement a récemment proposé de nouvelles lois pour réguler l'IA générative, en mettant l'accent sur la sécurité des données et la protection des droits d'auteur. Ces mesures visent à encourager un développement responsable de l'IA, tout en veillant à ce que les utilisateurs soient protégés et que leurs données soient en sécurité.[97,98]

Aux États-Unis, la situation est plus décentralisée, chaque État développant ses propres lois sur l'IA. Des initiatives telles que le « **Safe and Secure Innovation for Frontier Artificial Intelligence Systems Act** » ont été proposées pour établir des normes de sécurité et de transparence pour les technologies d'IA.[99,100]

Au Maroc, la transformation numérique repose sur des lois comme **la loi 09-08** sur la protection des données personnelles et **la loi 05-20** relative à la cybersécurité. Ces textes offrent déjà une base juridique pour protéger les données et sécuriser les systèmes d'information, mais avec l'émergence de l'intelligence artificielle (IA), des ajustements s'avèrent nécessaires, notamment dans des domaines sensibles comme la santé. La loi 09-08, adoptée en 2009, impose des règles strictes aux entreprises concernant la collecte et l'utilisation des données personnelles, mais elle ne couvre pas entièrement les enjeux liés à l'IA. Par exemple, une étude souligne que, bien que cette loi vise à protéger les droits des citoyens, elle doit évoluer pour mieux répondre aux risques accumulés que font peser les algorithmes d'IA en matière de respect de la vie privée.[101]

La loi 05-20 sur la cybersécurité au Maroc vise à renforcer la protection des systèmes d'information et à les rendre plus résilients face aux menaces. Elle oblige aussi bien les organismes publics que privés à adopter des mesures de sécurité pour prévenir les cyberattaques, ce qui devient crucial à une époque où l'intelligence artificielle joue un rôle de plus en plus

important dans les processus de décision. Cette loi permet de mieux encadrer l'intégration de l'IA, en veillant à ce que ces technologies soient utilisées en toute sécurité, sans perturber les données.[102]

Le ministre de la Justice, Abdellatif Ouahbi, a récemment déclaré que le gouvernement est en train de préparer un cadre juridique spécifique pour encadrer l'intelligence artificielle et protéger les droits des citoyens face à ces technologies émergentes. L'objectif est d'anticiper les défis que pourraient poser l'IA avant qu'ils ne se transforment en problèmes majeurs, tout en s'inspirant des meilleures pratiques adoptées à l'international.[103]

Ainsi, bien que le Maroc dispose d'un arsenal légal pour encadrer la transformation numérique, il est impératif de mettre à jour ces lois pour garantir une protection adéquate face aux défis émergents liés à l'intelligence artificielle.

IV. Perspectives futures

Dans un avenir proche, l'évolution de l'intelligence artificielle (IA) continuera à avoir un impact significatif sur le domaine de la neurochirurgie, en façonnant de nouvelles normes et possibilités. Voici quelques projections sur la manière dont l'IA pourrait évoluer et influencer la neurochirurgie :[104]

- **Diagnostic et prévision précoces** : L'IA deviendra plus performante dans la détection précoce des anomalies cérébrales et des maladies neurologiques à partir d'images médicales. Des algorithmes avancés pourraient permettre de diagnostiquer des conditions complexes avec une précision accrue, facilitant une intervention rapide et précoce.
- **Personnalisation des traitements** : L'IA pourrait permettre la création de plans de traitement personnalisés en utilisant des données spécifiques à chaque patient, comme l'histoire médicale, la génétique et les images cérébrales. Cela pourrait mener à des interventions plus précises et adaptées à chaque cas.
- **Guidage intra opératoire amélioré** : L'IA continuera à jouer un rôle central dans la navigation chirurgicale, fournissant des informations en temps réel aux chirurgiens pendant l'opération. Les systèmes de réalité augmentée pourraient être utilisés pour afficher des données vitales directement dans le champ de vision du chirurgien.
- **Chirurgie robotique** : Les robots chirurgicaux dotés d'IA deviendront plus sophistiqués et pourront réaliser des tâches de plus en plus complexes avec une précision accrue. Ils pourraient être intégrés dans les opérations neurochirurgicales pour assister les chirurgiens dans les tâches délicates.
- **Analyse de données massives** : L'IA pourrait être utilisée pour analyser de vastes quantités de données médicales, ce qui pourrait contribuer à une meilleure compréhension des maladies cérébrales, à l'identification de nouvelles tendances et à la découverte de thérapies innovantes.

- **Formation et éducation** : Les simulations basées sur l'IA pourraient être utilisées pour former les neurochirurgiens, offrant des environnements virtuels réalistes pour pratiquer des procédures avant de les réaliser sur des patients.
- **Collaboration homme-machine** : L'IA pourrait être intégrée dans le flux de travail chirurgical, permettant une collaboration étroite entre les chirurgiens et les systèmes d'IA pour prendre des décisions éclairées et optimiser les résultats.
- **Réduction des risques** : Grâce à une analyse approfondie des données et à des algorithmes de prédiction, l'IA pourrait aider à identifier les risques potentiels pendant et après une chirurgie, contribuant ainsi à réduire les complications et à améliorer les résultats.
- **Évolution de la réglementation et de l'éthique** : L'adoption croissante de l'IA en neurochirurgie nécessitera des réglementations et des protocoles éthiques appropriés pour garantir la sécurité des patients et la responsabilité en cas d'erreurs ou de dysfonctionnements.

En somme, l'IA continuera à façonner la neurochirurgie en rendant les interventions plus précises, personnalisées et efficaces, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour la recherche, la formation et la collaboration entre les chirurgiens et les systèmes intelligents.



DISCUSSION



I. Expérience du service

L'introduction de l'intelligence dans le domaine médical, en particulier dans le contexte des examens d'imagerie cérébrale et des interventions chirurgicales, est encore dans ses balbutiements. Néanmoins, il est évident que les technologies d'IA ont le potentiel de transformer de manière significative la manière dont les soins sont administrés, et ce, dès les premières étapes de leur intégration.

Actuellement, le service de Neurochirurgie bénéficie quotidiennement de plusieurs examens d'imagerie cérébrale, tels que les IRM et les TDM. Ces outils sont essentiels pour le diagnostic, la planification du traitement, et le suivi des patients souffrant de diverses pathologies neurochirurgicales. Ils fournissent des images détaillées du cerveau et de la Moelle, permettant aux médecins de détecter des anomalies, de suivre l'évolution des maladies et de planifier des interventions avec une précision accrue.

Cependant, l'utilisation de l'IA dans le domaine de l'imagerie cérébrale est encore limitée. Les algorithmes d'IA ont montré un potentiel prometteur pour améliorer la détection et la segmentation des lésions cérébrales, ainsi que pour aider à la classification des maladies.

Pourtant, leur intégration dans la pratique clinique quotidienne reste un défi en raison de leurs couts, et la nécessité de valider leur efficacité, de garantir leur sécurité, et d'assurer leur acceptabilité par les professionnels de la santé.

En ce qui concerne le champ chirurgical, des avancées intéressantes peuvent être réalisées en intégrant l'IA dans les domaines tels que l'endoscopie et la neuronavigation.

L'endoscopie, qui permet aux chirurgiens de visualiser les structures internes du cerveau par le biais de petits instruments insérés à travers des incisions minimales, pourra bénéficier d'une assistance croissante de la part des technologies d'IA. Les systèmes d'IA peuvent fournir une aide précieuse en offrant une visualisation améliorée et en facilitant la détection des structures et des anomalies pendant les procédures.

De même, la neuronavigation, qui utilise des techniques d'imagerie pour guider les interventions chirurgicales cérébrales, est un domaine où l'IA commencera à faire son entrée. Les systèmes de neuronavigation assistés par IA peuvent améliorer la précision de la localisation des cibles chirurgicales et permettre une planification plus fine des interventions, réduisant ainsi le risque d'erreurs et améliorant les résultats pour les patients.

Pour dire, bien que l'IA ne soit pas encore pleinement intégrée dans nos pratiques médicales quotidiennes, mais ses premiers dés peuvent être lancés. Le potentiel de l'IA pour améliorer la précision des diagnostics, affiner les interventions chirurgicales et optimiser les résultats pour les patients est indéniable. Le chemin reste long, mais les progrès réalisés jusqu'à présent indiquent un avenir où l'IA jouera un rôle central dans la médecine moderne.

II. Endoscopie : Bénéfices Actuels et Perspectives d ' IA

Les études anatomiques approfondies, les innovations dans les techniques d'exposition et de reconstruction, ainsi que les progrès continus en imagerie, en systèmes de navigation et en instrumentation contribuent de manière significative à l'avancement de cette chirurgie.

Les interventions utilisant un système de neuronavigation font partie des procédures médico-chirurgicales assistées par ordinateur (GMCAO).

Bien que la morbidité de la chirurgie endonasale soit faible, des complications graves peuvent survenir en raison de la proximité des cavités sinusiennes avec le nerf optique, l'artère carotide, la dure-mère et le cerveau. Par conséquent, en plus du guidage endoscopique, il est utile de fournir aux chirurgiens un système de repérage basé sur l'imagerie médicale.

a. Positionnement du malade :

Le positionnement du patient est une étape cruciale de la préparation préopératoire pour optimiser les conditions chirurgicales et contrôler les saignements.

Le patient doit être positionné sur la table d'intervention en décubitus dorsal, avec une inclinaison de table en proclive de 15° à 30° dans le but de réduire le saignement. La tête légèrement fléchie vers l'opérateur pour une meilleure ergonomie, tout en préservant les artères carotides.

Un packing en fond de gorge peut être utilisé pour prévenir l'inondation bronchopulmonaire, bien que son utilité reste débattue en raison des risques d'œdème lingual et d'ulcérations buccopharyngées. L'absence de packing n'augmente pas le risque d'ingestion de sang ou de vomissements postopératoires. [105]

Le champ opératoire doit laisser les yeux visibles pour surveiller d'éventuels hématomas orbitaires.



Figure 48 : Patient en position transatlantique

b. Déroulement de l'acte opératoire :

L'abord endoscopique endonasal de la selle turcique pour le traitement des adénomes hypophysaires comporte quatre temps opératoires : [106–108]

❖ **Phase nasale :**

Lorsque l'endoscope rigide court à 0° est introduit dans la narine droite, parallèlement au plancher nasal, il permet d'identifier clairement les cornets inférieur et moyen.

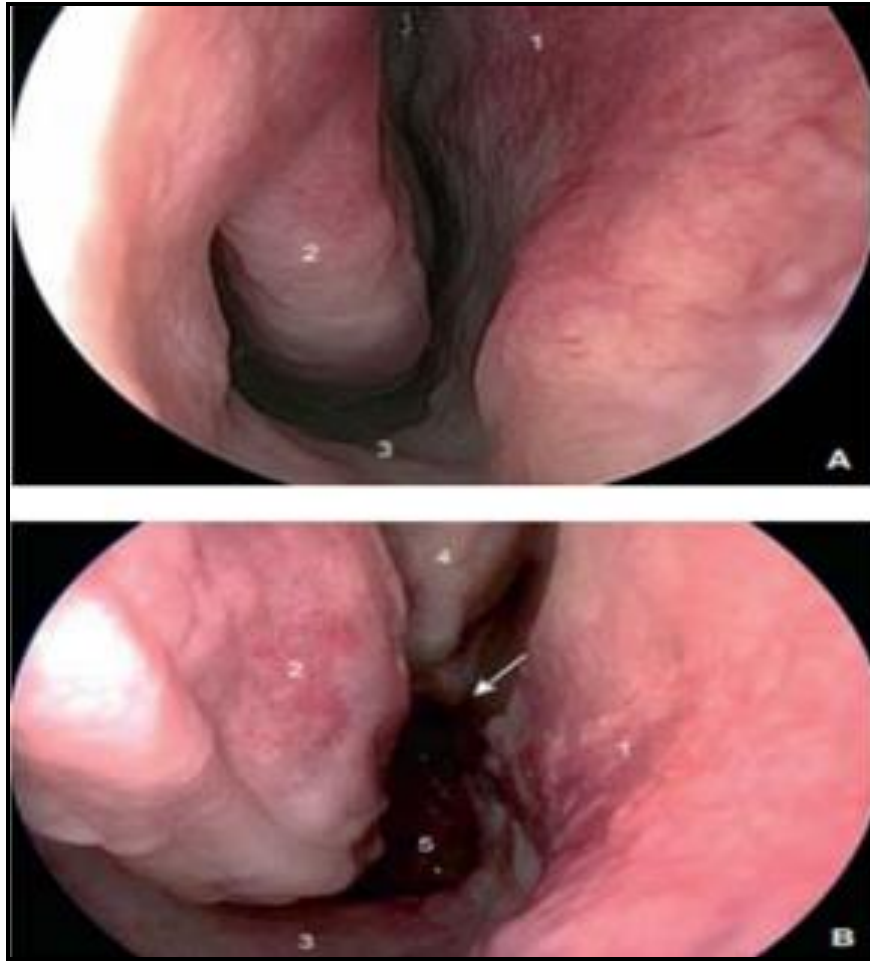


Figure 49: Phase nasale.

Pour visualiser les structures, le cornet moyen est déplacé latéralement à l'aide d'une spatule mousse, en veillant à la placer à la partie postérieure du cornet afin de réduire le risque de fracture. Une fois le cornet moyen écarté, le cornet supérieur devient visible. Celui-ci, également rétracté, permet de découvrir le méat sphénoïdal, situé environ 1 cm au-dessus de l'arc choanal, en face du récessus sphénoéthmoïdal.

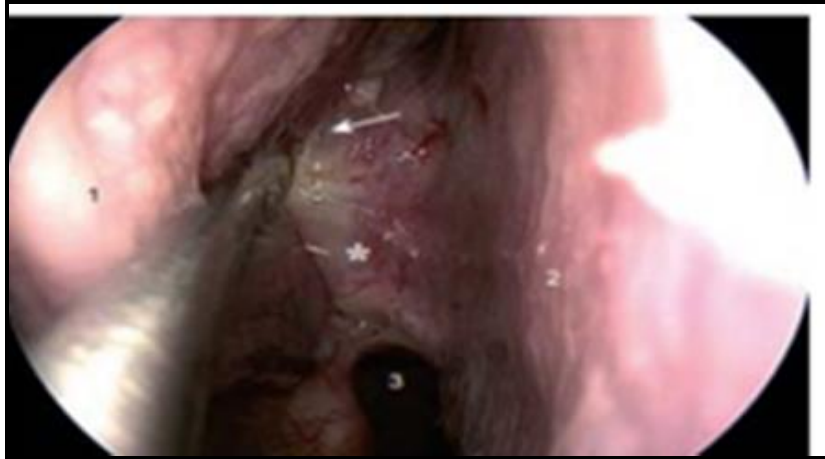


Figure 50: exposition de l'ostium sphénoïdal droit

Dans certains cas, l'ostium sphénoïdal peut être difficile à localiser, étant parfois caché par la queue du cornet supérieur ou un cornet suprême supplémentaire. Dans ce cas, l'ouverture muqueuse doit être effectuée avec précaution, en utilisant l'arc choanal et le septum nasal comme repères anatomiques. Il est essentiel d'exécuter cette étape rapidement et avec délicatesse pour limiter l'hémorragie, qui pourrait gêner la visualisation. Cette phase étant souvent douloureuse, une analgésie morphinique intraveineuse est nécessaire pour assurer le confort du patient.

❖ **Phase sphénoïdale :**

Cette étape est effectuée à l'aide d'un endoscope court de 18 cm, de 0°, et de 4 mm de diamètre, manipulé à la main. La sphénoïdotomie antérieure débute par la coagulation de la muqueuse située juste à l'intérieur de l'ostium sphénoïdal, sur une longueur d'environ 1 cm.



Figure 51: coagulation bipolaire de la muqueuse médiale à l'ostium sphénoïdal

Une incision muqueuse plus basse, près du bord inférieur du méat sphénoïdal, pourrait endommager l'artère nasale postérieure. Dans ces situations, la coagulation bipolaire est préférable à la coagulation monopolaire. En effet, elle réduit le risque de rétraction artérielle et, par conséquent, d'épistaxis postopératoire, tout en étant moins agressive pour la muqueuse nasale.

La dissection sous-muqueuse sur la ligne médiane permet de retrouver rapidement le rostre sphénoïdal.

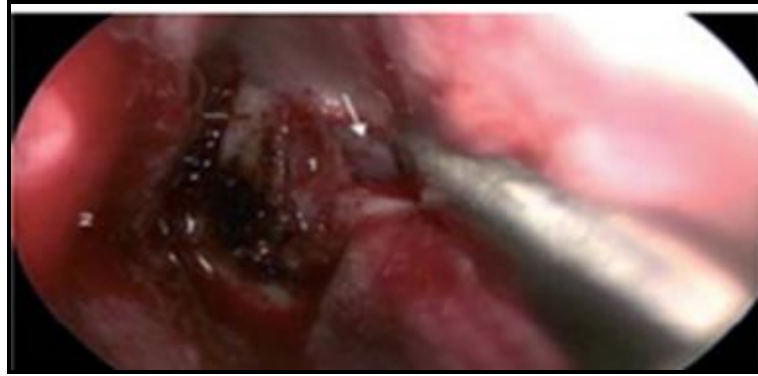


Figure 52: Dissection sous-muqueuse sur la ligne médiane exposant le rostre et la muqueuse nasale controlatérale

Ce dernier est disséqué en sous-muqueux à l'aide d'une spatule mousse jusqu'à atteindre le ressaut du cartilage septal, indiquant le passage vers le méat sphénoïdal opposé. L'élimination du rostre et de la paroi antérieure du sinus sphénoïdal est réalisée avec des rongeurs de Kerrison ou par fraisage. Ensuite, la déviation des septas sphénoïdaux permet de révéler la face exocrânienne de la base du crâne. L'ablation de la muqueuse sphénoïdale n'est effectuée qu'en cas d'épaississement notable.

❖ **Phase sellaire :**

Un endoscope rigide de 30 cm (0°, 4 mm) est monté sur un bras mécanique, permettant à l'opérateur d'utiliser simultanément deux instruments pour une intervention précise. Le tube endoscopique est positionné en hauteur pour faciliter l'accès aux zones ciblées.

En cas de défilé nasosphénoïdal étroit ou de macroadénomes géants, l'utilisation des deux narines peut être nécessaire pour améliorer la visualisation.

Une fois les structures cardinales identifiées, l'ouverture du plancher sellaire peut être réalisée à l'aide de rongeurs, de fraisage ou par craniotomie. Cette étape est essentielle pour exposer les structures sous-jacentes tout en préservant les tissus environnants.

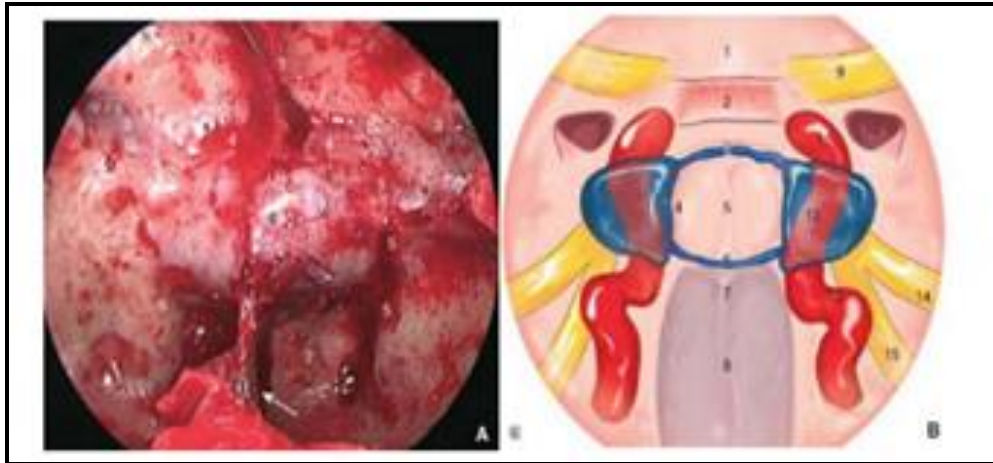


Figure 53: A. phase sellaire après sphénoïdotomie. B. face exocrânienne de la base du crane après sphénoïdotomie

L'ouverture du plancher se poursuit jusqu'au tubercule sellaire en avant, le sinus coronaire postérieur en arrière et les parois internes des loges caverneuses en dehors.

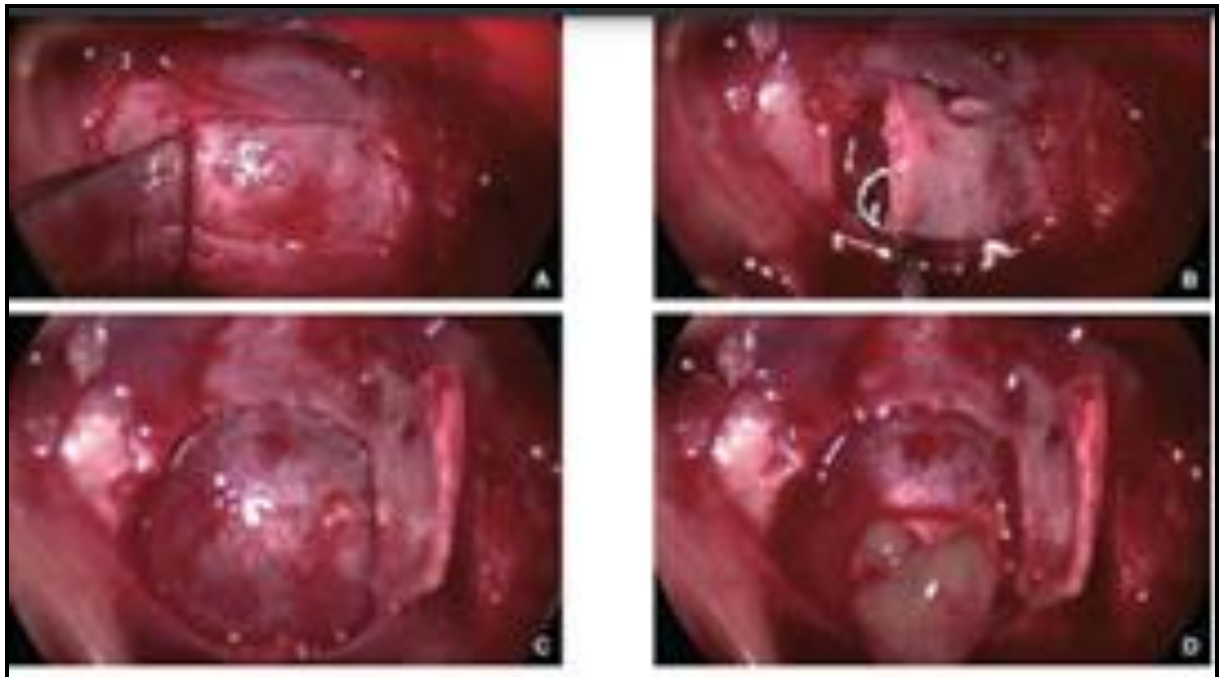


Figure 54: Phase sellaire. A: ostéotomie emportant le plancher sellaire. B : ouverture de la selle. C : exposition de la dure-mère sellaire. D : résection de l'adénome

La phase intradurale de la procédure suit les principes de la microchirurgie transphénoïdale classique, débutant par la résection adénomateuse à l'aide de curettes annulaires. L'exploration et l'élimination des tissus adénomateux commencent par la partie inférieure,

puis se poursuivent latéralement vers les loges caverneuses, permettant une désintégration contrôlée de la tumeur tout en préservant les structures adjacentes. Après traitement des zones latérales, l'intervention se concentre sur le dôme sellaire pour retirer les restes de la tumeur. Une attention particulière est portée à l'intégrité de l'antéhypophyse et de la posthypophyse, essentielles pour le succès de l'intervention. Cette approche garantit une résection efficace tout en minimisant les risques pour les tissus sains.

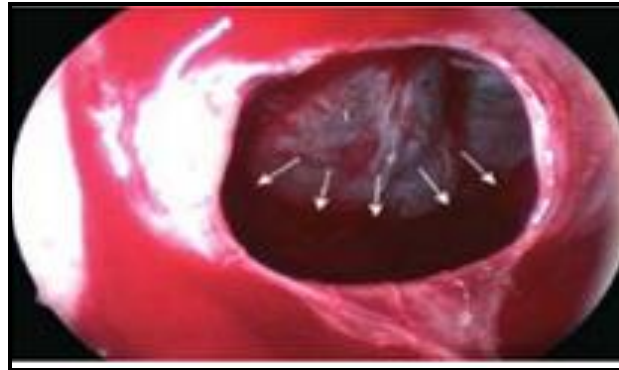


FIGURE 55 : DESCENTE DU DIAPHRAGME SELLAIRE INDIQUANT UNE RÉSECTION TUMORALE COMPLÈTE ET DURE-MÈRE SELLAIRE OUVERTE...

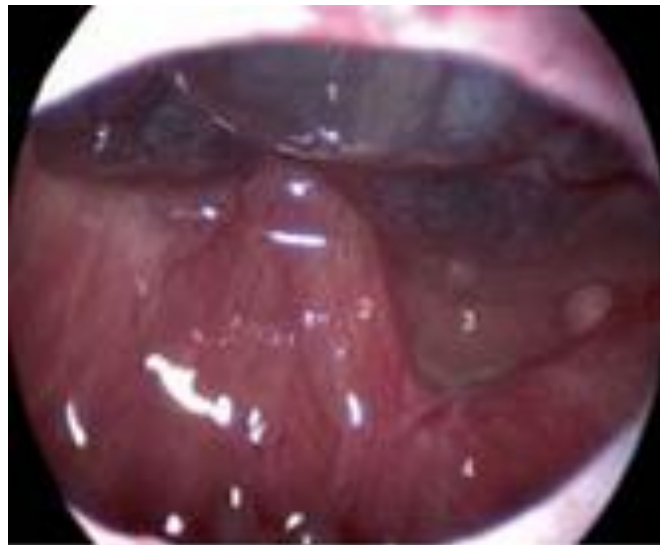


Figure 56: Fin d'exérèse d'un macroadénome hypophysaire

La résection tumorale est améliorée par un endoscope à 30° et des canules coudées, réduisant les saignements. La procédure se termine lorsque le diaphragme sellaire descend, indiquant l'élimination complète de la tumeur. Un lavage avec du sérum physiologique est effectué, suivi d'une vérification de l'hémostase. L'utilisation de Surgicel® est évitée pour réduire les artefacts IRM. Une manœuvre de Valsalva vérifie l'intégrité de la barrière arachnoïdienne. En cas de brèche, un packing avec de la graisse et de la colle biologique est réalisé pour prévenir les fuites de liquide cébrospinal.

❖ **Reconstruction sellaire** :

Cette étape est essentielle pour le succès de la chirurgie. Une plaque souple résorbable, faite d'un copolymère de L-lactide, de caprolactone et d'acide polyglycolique (Seam Dura®), est insérée entre la dure-mère et le plancher sellaire pour isoler la selle du sinus sphénoïdal, favorisant ainsi la protection et la cicatrisation. Le volet osseux est remplacé avec précision et fixé avec une colle biologique. Si le volet est absent, une plastie osseuse en polyéthylène poreux est implantée pour restaurer la continuité anatomique. L'intervention se termine par le repositionnement du cornet moyen et le lavage des fosses nasales avec du sérum physiologique tiède, sans nécessiter de méchage nasal, ce qui facilite la récupération et réduit le risque de complications.

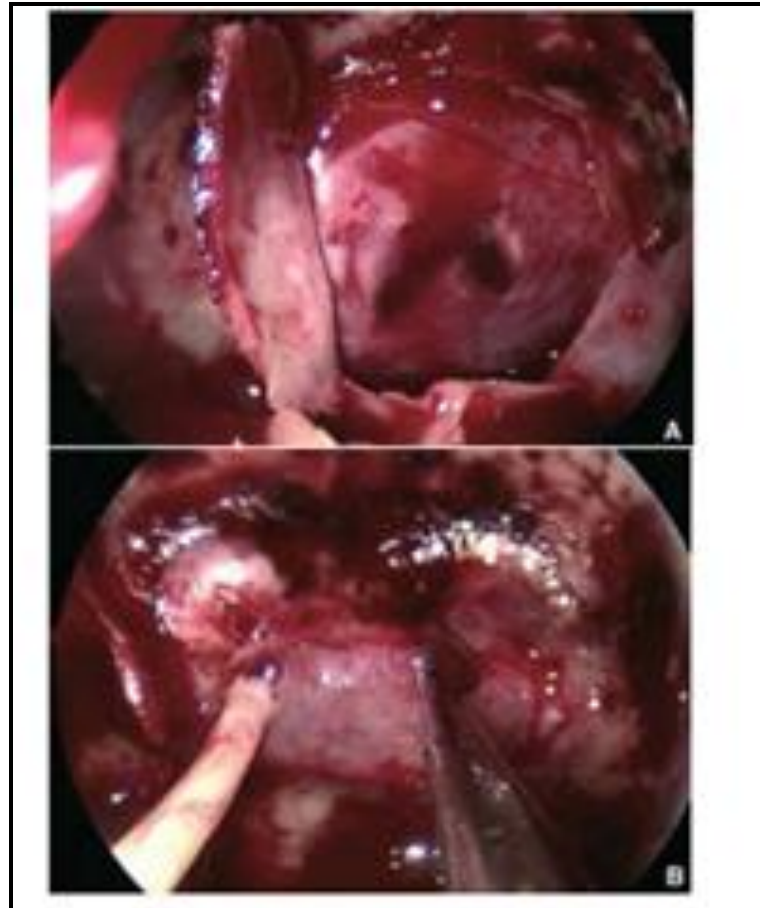


Figure 57: (A et B) Reconstruction durale par mise en place d'un substitut dural résorbable en extradural et remise en place du volet osseux avant l'instillation du colle biologique.

c. Complications de la chirurgie endoscopique endonasale:

La chirurgie endoscopique endonasale, bien qu'efficace pour traiter diverses affections rhinosinusiennes et cérébrales, comporte des risques de complications.

Selon Guichard, Franc et Herman, ces complications peuvent être classées en fonction de leur nature et de leur gravité. Parmi les complications les plus fréquentes, on retrouve les hémorragies, les sinusites. De plus, les complications orbitales, telles que les proptoses ou les déficits visuels, sont particulièrement préoccupantes et peuvent survenir en raison de l'inadvertance lors de l'accès à l'espace sinusien. Enfin, des dommages du LCR peuvent également se produire, entraînant des fistules et d'autres complications neurologiques. Ces risques sou-

lignent l'importance d'une approche chirurgicale minutieuse et d'une formation adéquate pour minimiser les complications potentielles lors de la chirurgie endoscopique endonasale.[109]

d. Les avantages et les limites de l'abord endoscopique

Certes, la chirurgie endoscopique transsphénoïdale endonasale présente de nombreux avantages.[106,110-112]

Elle offre un champ de vision plus large et de meilleure qualité que l'approche sous microscope, facilitant une zone de travail étendue. Cela permet un contrôle optimal de l'exérèse de l'adénome et une distinction claire entre tissu sain et tumoral, préservant ainsi les fonctions de la glande hypophysaire[106,110].

L'endoscope à 30° offre une vision latérale qui aide à mieux apprécier les invasions des parois internes du sinus caverneux. De plus, cette approche réduit la morbidité rhinologique, améliore le confort postopératoire, et diminue les durées d'hospitalisation et de rémission, rendant cette technique très prisée pour les interventions sur la base du crâne [106].

Mais, des limites demeurent. L'utilisation de cette approche nécessite des instruments coûteux, comme les endoscopes et les systèmes de navigation, avec des coûts élevés liés au renouvellement fréquent de certains dispositifs, notamment les dispositifs à usage unique. Malgré les avancées technologiques, comme les endoscopes 3D qui améliorent la perception de la profondeur, ces instruments restent onéreux[106,110-112]. Les risques chirurgicaux sont également présents, notamment des blessures à des structures critiques telles que l'artère carotide interne ou le nerf optique, ainsi que des défis liés à la reconstruction de la base du crâne après une fuite de LCR. De plus, certains patients, comme les enfants, peuvent avoir des cavités nasales trop étroites, nécessitant des endoscopes plus petits, limitant la visibilité [112]. Enfin, la formation sur ces techniques endoscopiques, impliquant souvent des simulations sur cadavres, ainsi que la courbe d'apprentissage, représentent des défis non négligeables pour les praticiens.[112]

e. Apport de l'IA à l'endoscopie :

L'intelligence artificielle joue un rôle croissant dans l'amélioration de la chirurgie endoscopique, offrant plusieurs avantages significatifs : [113-117]

Tout d'abord, l'IA améliore la précision chirurgicale grâce à des algorithmes de reconnaissance d'images (CNN) qui permettent une détection plus précise des pathologies et des structures anatomiques complexes, réduisant ainsi le risque d'erreurs humaines.

De plus, elle facilite l'aide à la décision médicale en prédisant les complications potentielles à partir de données préopératoires, ce qui permet d'adapter les protocoles en fonction des risques spécifiques à chaque patient.

Une étude récente a mis en évidence l'efficacité d'un modèle de réseau neuronal profond (DNN) pour prédire les fuites du LCR lors des interventions endoscopiques transsphénoïdales. En analysant 396 cas de patients atteints d'adénome hypophysaire, le modèle a été entraîné à partir d'images IRMs pondérés en T1 avec injection produit de contraste (T1CE) préopératoires.



Figure 58: Ciblage par le modèle DNN des régions tumorales supérieures et suprasellaires pour prédire les fuites de LCR. [118]

Les résultats ont révélé une précision de 97,29 % sur le jeu de test et une précision de 84,61 % lors des essais cliniques, basés sur des données des patients. Ces résultats montrent que les DNN pourraient devenir des outils prometteurs pour évaluer les risques de fuite de LCR avant la chirurgie, renforçant ainsi la sécurité et l'efficacité des interventions en neurochirurgie.[118]

L'efficacité opérationnelle est également augmentée par l'utilisation de dispositifs robotiques miniaturisés, permettant une manipulation précise des instruments tout en libérant les mains du chirurgien .

En outre, l'IA contribue à la formation des jeunes chirurgiens via des simulations réalistes et un retour d'information instantané sur leurs performances.

Enfin, les technologies avancées telles que les caméras ultra-haute définition améliorent considérablement la qualité visuelle pendant les interventions. Ces innovations témoignent du potentiel transformateur de l'IA dans le domaine de l'endoscopie, rendant les procédures plus sûres et efficaces.

III. Neuronavigation : Utilisation Présente et Innovations IA à Venir :

La neuronavigation a marqué un tournant dans la neurochirurgie en remplaçant le cadre de stéréotaxie traditionnel, offrant une méthode moins invasive et plus précise.[119]

Contrairement à la stéréotaxie, qui obligeait les patients à porter un cadre de manière prolongée, de l'imagerie préopératoire jusqu'à la fin de l'intervention, augmentant ainsi le risque d'infection [105], la neuronavigation a permis de surmonter ces limitations tout en améliorant la sécurité et le confort du patient.



Figure 59: Cadre stéréotaxique appliqué sur la tête du patient[120]

La neuronavigation associe en temps réel la vision macro ou microscopique du site opératoire à une représentation radiologique volumétrique, générée à partir des données d'imagerie du patient. [119]

Ce progrès technologique a révolutionné la chirurgie assistée par ordinateur.

En l'an 2000, environ 800 systèmes de navigation étaient en usage, mais les premiers modèles étaient complexes à utiliser et nécessitaient du personnel spécialisé. Les systèmes de seconde génération, plus intuitifs, ont simplifié leur utilisation. Aujourd'hui, les systèmes de troisième génération visent à intégrer complètement les données d'imagerie et d'information dans l'acte chirurgical, améliorant ainsi la précision et la sécurité des interventions. Des systèmes avancés comme ceux de Karl Storz®, StealthStation® de Medtronic®, et Brainlab® sont largement commercialisés.



Figure 60 : système de neuronavigation S7 Medtronic ®

a. **Principe de la neuronavigation :**

Les images préopératoires sont cruciales pour planifier la chirurgie, fournissant des détails sur l'anatomie et la pathologie. **Cette phase de perception** permet aux chirurgiens de définir la meilleure stratégie opératoire. La qualité de ces images influence directement **le processus de décision**. Le jour de l'intervention, les images peropératoires et les données spatiales en temps réel aident à repositionner le patient avec précision. Grâce à cette **phase de perception dynamique**, il est possible d'assurer une parfaite correspondance entre la réalité opératoire et les données préopératoires, garantissant ainsi une orientation précise et une meilleure gestion des instruments pendant **l'action** chirurgicale.[121]

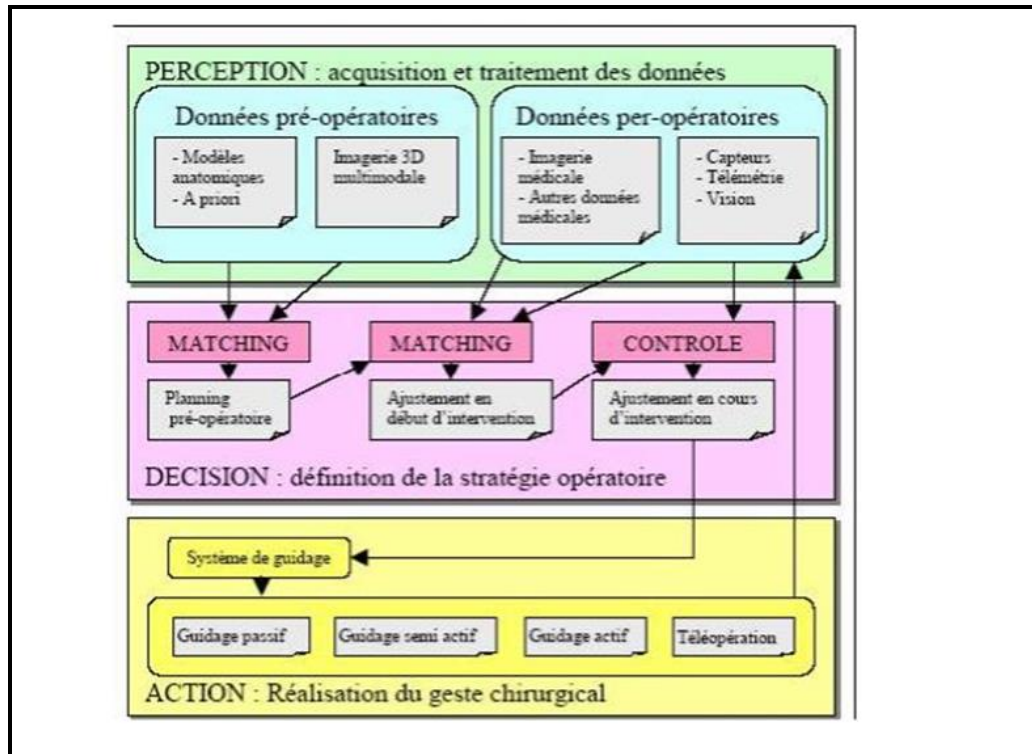


Figure 61: la boucle Perception/Décision/Action [120]

b. Le matériel de la neuronavigation :

Un système de neuronavigation est un ensemble d'outils permettant une chirurgie précise, composé de trois éléments clés : une station informatique de préplanning, une station opératoire et un système de localisation.[122]

Les stations, équipées de logiciels de traitement d'images, facilitent la planification sans nécessiter de transfert d'équipement, minimisant ainsi les erreurs. Le système de localisation le plus utilisé est optique actif, où des diodes infrarouges sur les instruments chirurgicales permettent une localisation précise par triangulation. Des systèmes passifs existent, mais posent des limites en termes de stérilisation.

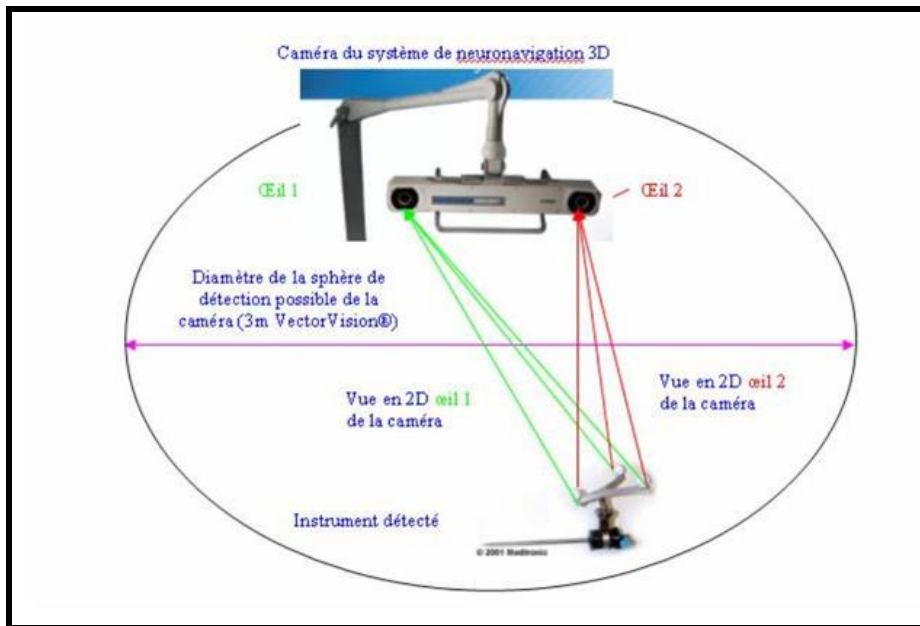


Figure 62: Principe de triangulation des systèmes de repérage.

Le système à pointeur permet de suivre la position des instruments en temps réel, essentiel pour la précision chirurgicale. Il peut être combiné avec un microscope, offrant au chirurgien des informations cruciales tout en maintenant son attention sur le champ opératoire. Les microscopes modernes fournissent également des données de profondeur pour éviter des erreurs. L'ajout d'un microscope robotisé, contrôlable depuis la station de travail, rend la navigation chirurgicale plus intuitive en permettant un repositionnement facile pour cibler des structures spécifiques. Ces innovations font de la neuronavigation un outil précieux pour des interventions chirurgicales plus sûres et efficaces.

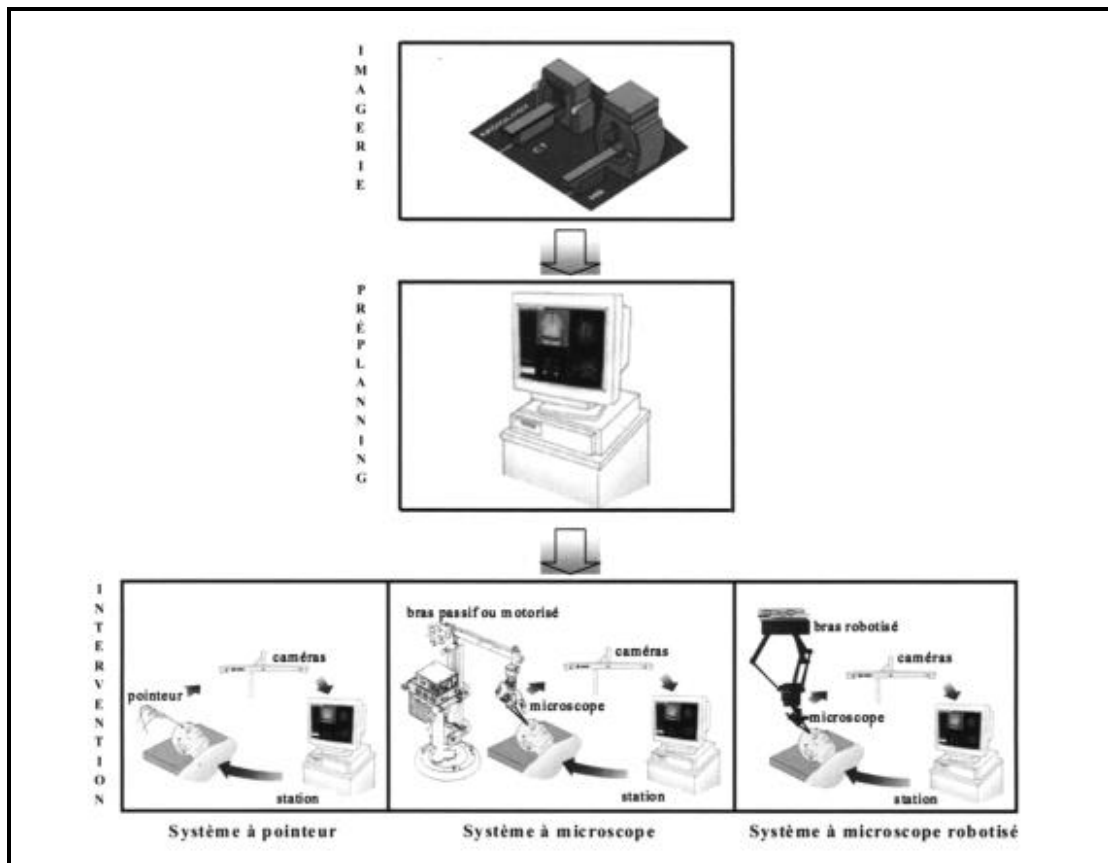


Figure 63: Synoptique d'une configuration de neuronavigation.

c. Procédure de la neuronavigation :

Une chirurgie guidée par un système de navigation se déroule généralement en quatre étapes successives : l'imagerie, la planification préopératoire, l'enregistrement et enfin l'acte chirurgical.

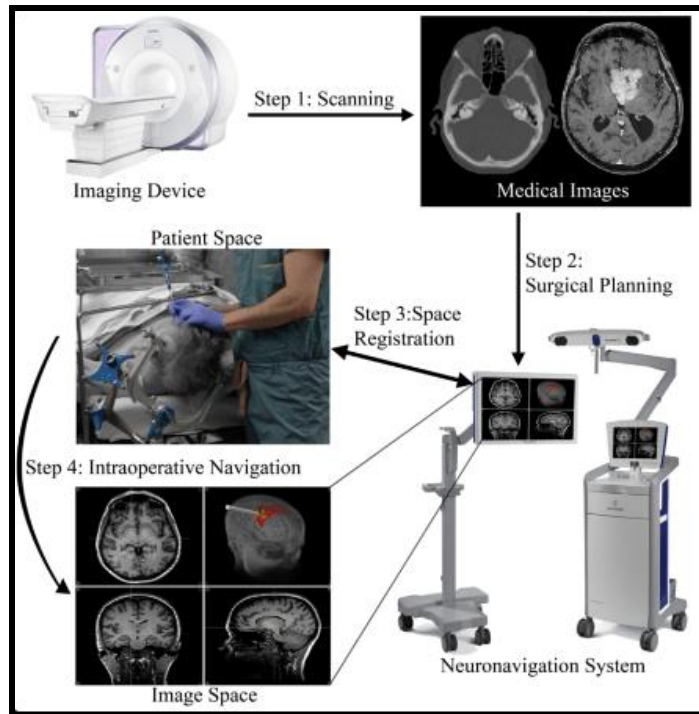
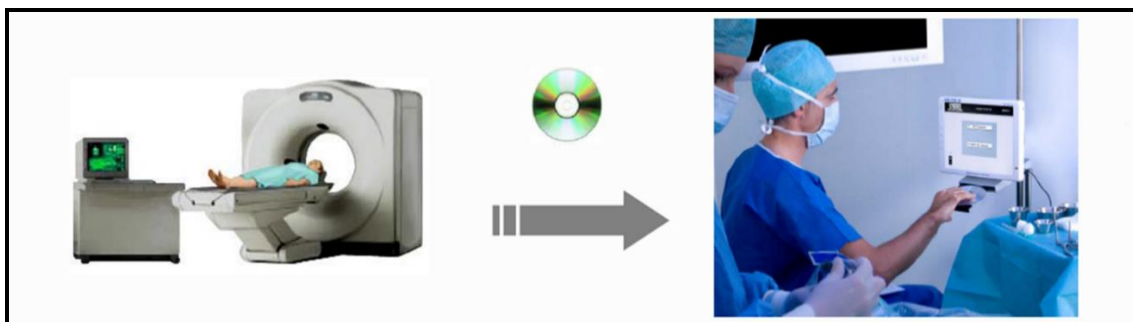


Figure 64 : Flux de travail de la neuronavigation traditionnelle.[123]

La première étape consiste à réaliser des images préopératoires du patient le plus souvent la veille de l'intervention.[124]

Généralement des tomodensitométries cérébrales à fenêtre osseuse, traitées dans un format adapté au système de navigation, ou des imageries par résonance magnétique, essentielles pour établir une carte tridimensionnelle des structures internes du patient et permettre une planification détaillée de l'intervention chirurgicale.



Pour garantir des images de qualité nécessaires à la navigation chirurgicale, les coupes du scanner doivent être réalisées avec une résolution millimétrique en utilisant une fenêtre osseuse. Le patient doit être positionné sur plan axial par rapport au plan d'occlusion, et un scanner hélicoïdal doit être utilisé pour générer des données axiales. Des paramètres techniques, comme une matrice de 512 x 512 pixels et un écart inter-tranches de 1 mm, sont cruciaux. L'analyse doit se concentrer sur des zones spécifiques telles que la lèvre supérieure, le nez, le front et les parties médianes des oreilles, en excluant les implants dentaires. Les images obtenues seront transférées dans le système de navigation via une clé USB ou un disque compact, prêtes pour l'intervention.

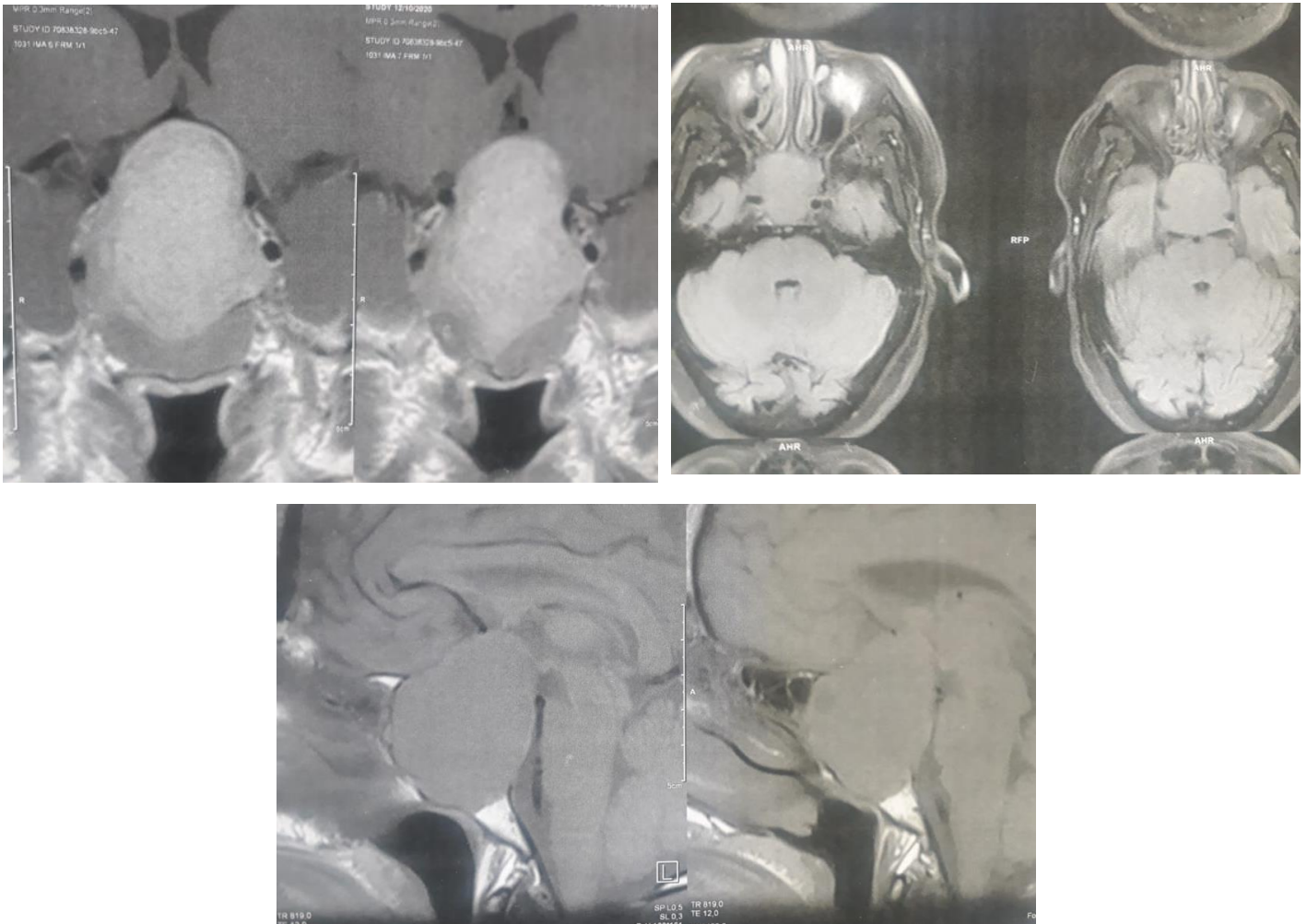


Figure 65: coupes axiale, sagittale et coronale d'IRM ont été réalisée montrant une volumineuse lésion sellaire et supra sellaire en rapport avec un macro adénome hypophysaire avec envahissement du sinus caverneux et compression du chiasma optique
La tomodensitométrie et l'IRM sont souvent complémentaires.

La tomodensitométrie permet de visualiser les détails osseux complexes, tandis que l'IRM démontre le mieux l'anatomie des tissus mous intracrâniens et extracrâniens.

Les plateformes IGS ont alors développé un logiciel de fusion d'images en effectuant un recalage image à image créant ainsi des images hybrides présentant les caractéristiques de la tomodensitométrie et de l'IRM.

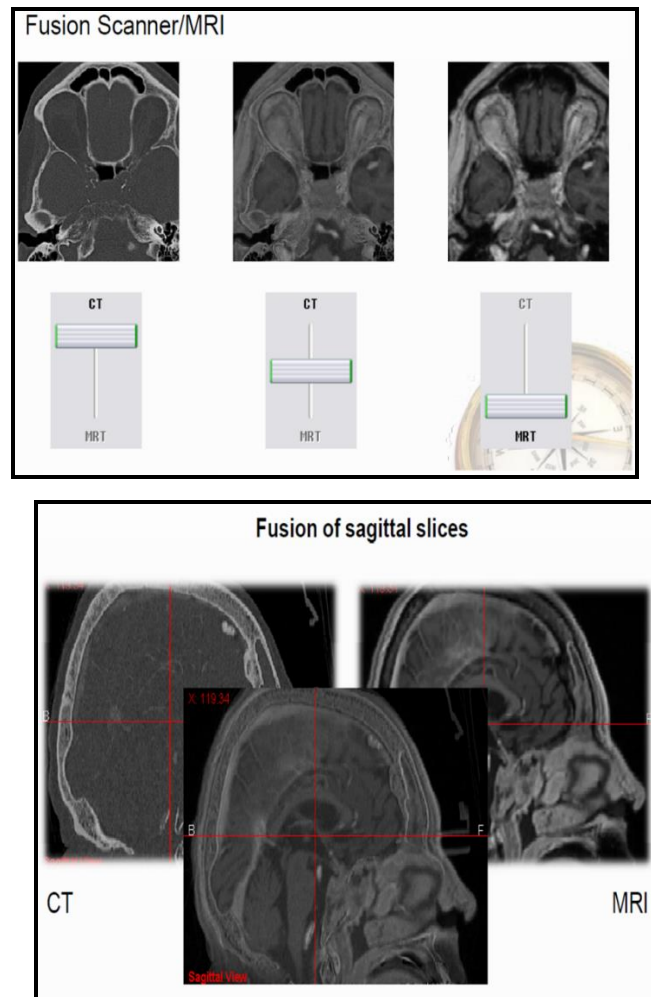


Figure 66: un logiciel de fusion d'images présentant les caractéristiques de la TDM et de l'IRM

Dans une étude récente, Micko et al. ont exploré l'utilisation de la fusion de la tomodensitométrie, de l'IRM et de l'ARM pour la navigation chirurgicale guidée par imagerie (IGS) lors des interventions hypophysaires. Sur les 200 cas analysés, le protocole avancé de fusion d'imagerie a amélioré la localisation préopératoire de l'anatomie sino-nasale, permis une meilleure visualisation de la vascularisation fine et facilité l'identification de l'hypophyse normale. De plus, ce protocole a réduit les complications cumulatives en comparaison avec le protocole IGS standard basé uniquement sur la tomodensitométrie.[125]

La planification préopératoire utilise les images pour déterminer les étapes et les trajets chirurgicaux, minimisant ainsi les risques de séquelles neurologiques pour le patient (111).

Elle permet de visualiser les structures rencontrées et d'évaluer la faisabilité des gestes, étant cruciale pour le bon déroulement de l'intervention, correspondant à une simulation de l'acte chirurgical (112).

Les systèmes modernes, qu'ils soient optiques ou électromagnétiques, offrent une imagerie en temps réel dans trois plans, souvent avec la possibilité d'ajouter une fenêtre d'image endoscopique sur un seul écran. Cette planification permet de marquer des points critiques sur les images de tomodensitométrie ou d'IRM, fournissant des avertissements visuels ou sonores pendant l'intervention pour éviter les dommages. Pour les étudiants et jeunes neurochirurgiens, ces systèmes sont précieux, permettant aux praticiens confirmés de démontrer leur technique et de partager leur démarche.

Toutes les données sont ensuite enregistrées et transférées à la station de travail dans le bloc opératoire.

L'enregistrement, ou recalage, consiste à faire correspondre les images virtuelles aux points réels sur le patient, utilisant des systèmes de repérage électromagnétique ou optique. Dans le système électromagnétique, un champ couvre la zone opératoire pour localiser les instruments, tandis que le système optique utilise des caméras infrarouges pour trianguler leur position grâce à des capteurs. Cette correspondance repose sur l'analyse mathématique des coordonnées géométriques des points anatomiques, nécessitant le traitement des images TDM pour créer un masque 3D de la surface faciale du patient. Les points de repère doivent être espacés d'au moins 4 cm et ne pas toucher des structures comme les yeux, en se basant sur des repères osseux sous-jacents à la peau.

Dans un cas de service, nous avons choisi le nasion, les canthus externes droit et gauche, ainsi que l'acanthion.

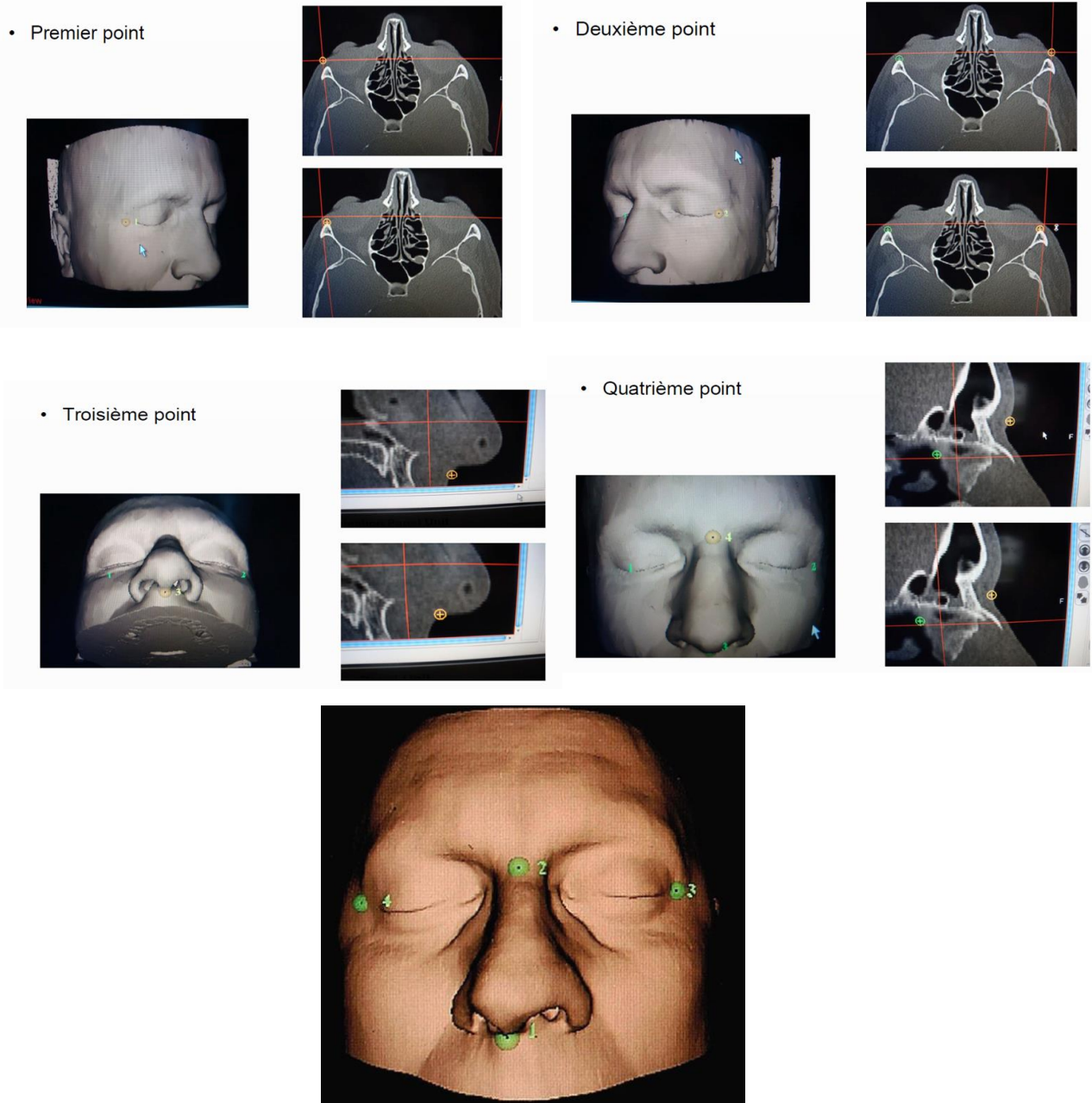


FIGURE 67 : DIFFÉRENTES ÉTAPES DE RECALAGE

Au début de l'intervention, le chirurgien marque les points réels correspondant aux points virtuels, un processus connu sous le nom de "recalage surfacique". Cela implique de fixer un bandeau sur la tête du patient, en orientant l'inscription "nose" vers le nez, puis d'attacher le localisateur par-dessus.



FIGURE 68 : FIXATION DU BANDEAU

Il est recommandé de positionner le système à la tête du patient, avec une distance de la caméra de navigation comprise entre 0,8 et 1,1 mètre. Une fois le patient capté par la caméra, un dialogue apparaît pour orienter la caméra. Il faut ajuster la caméra afin qu'elle pointe vers le localisateur fixé sur le patient, jusqu'à ce qu'un point rouge indique l'orientation correcte. Les cercles concentriques à droite montrent l'orientation de la caméra, qui doit être ajustée pour qu'ils se regroupent autour d'un point central. Si la caméra est bien orientée, le symbole du patient et les cercles deviennent verts.

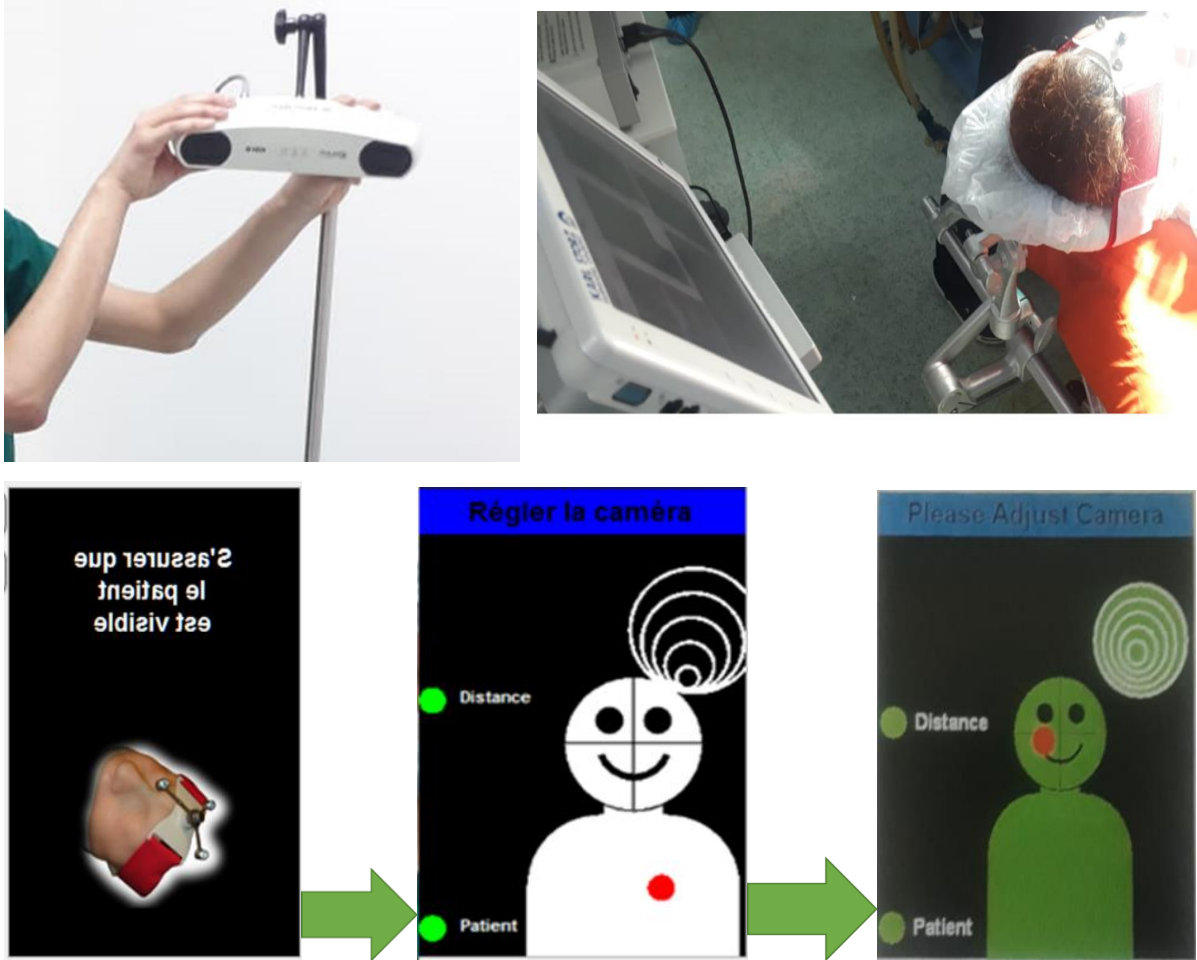


FIGURE 69 : ORIENTATION DE LA CAMÉRA

L'étape suivante implique l'enregistrement de la sonde de navigation. Pour cela, il faut déplacer la pointe de la sonde sur le point d'enregistrement du localisateur. Une pendule d'enregistrement rouge apparaît à l'écran, indiquant le début du processus. Cette pendule devient progressivement verte, signalant que l'enregistrement est en cours, et devient entièrement verte pour confirmer la réussite de l'enregistrement de la sonde.

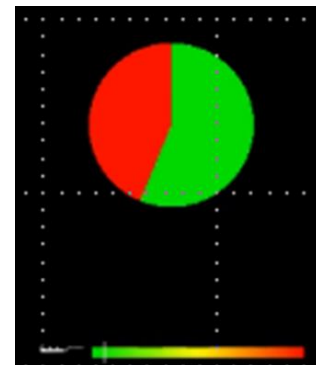
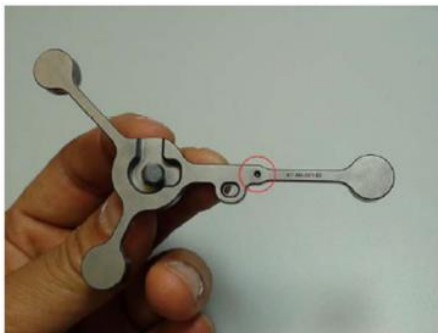
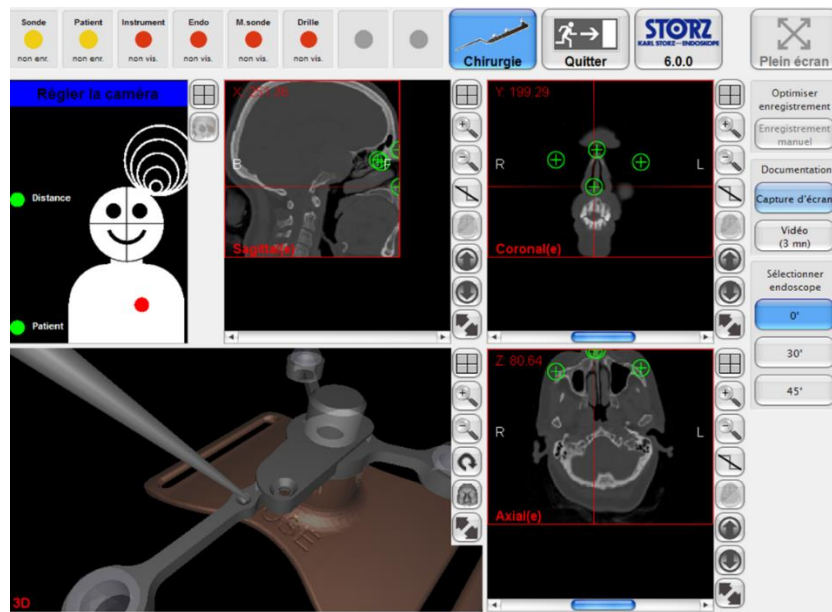
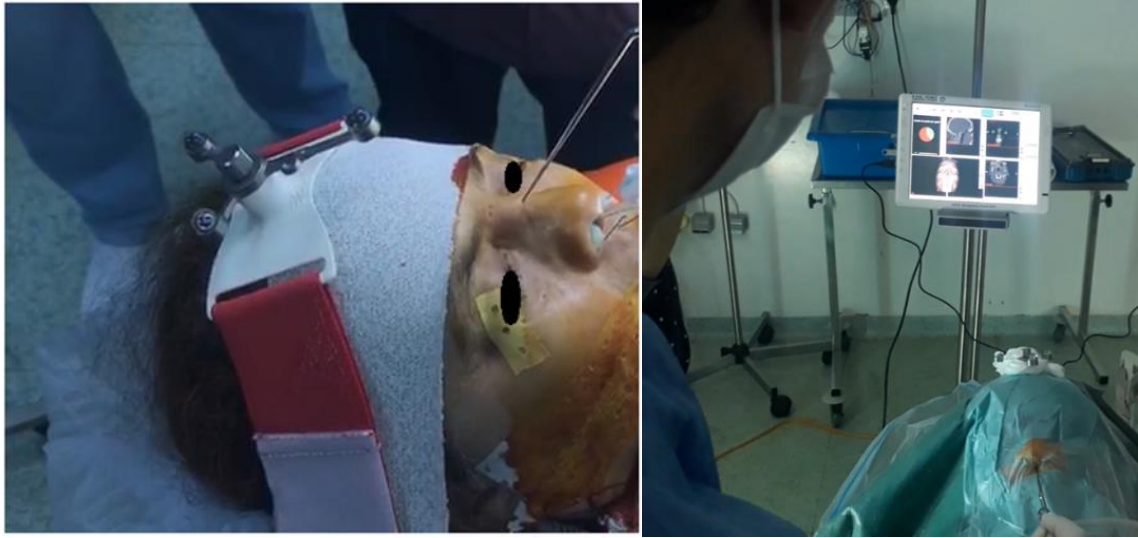


FIGURE 70 : ENREGISTREMENT DE LA SONDE

Une fois l'enregistrement de la sonde effectué, il faut toucher les points de repère anatomiques définis précédemment. Pendant cette identification, une pendule s'affiche à l'écran pour indiquer l'état d'avancement. À l'expiration du temps requis, le point de repère est mémorisé et un signal sonore confirme sa validation.

Après avoir identifié et mémorisé tous les points de repère anatomiques, la procédure de navigation peut commencer, garantissant que le système est correctement calibré par rapport à l'anatomie réelle du patient. Il est crucial de mesurer l'erreur d'enregistrement de la cible (TRE), qui représente la différence entre la position affichée de l'instrument et sa position

réelle. Surveiller le TRE tout au long de l'intervention est essentiel, car des problèmes techniques, comme le déplacement du capteur, peuvent l'augmenter, ce qui accroît le risque de complications. Pour une navigation chirurgicale efficace, le TRE doit être inférieur ou égal à 2 mm, les études indiquant des valeurs moyennes entre 1,5 et 2,3 mm . [126]



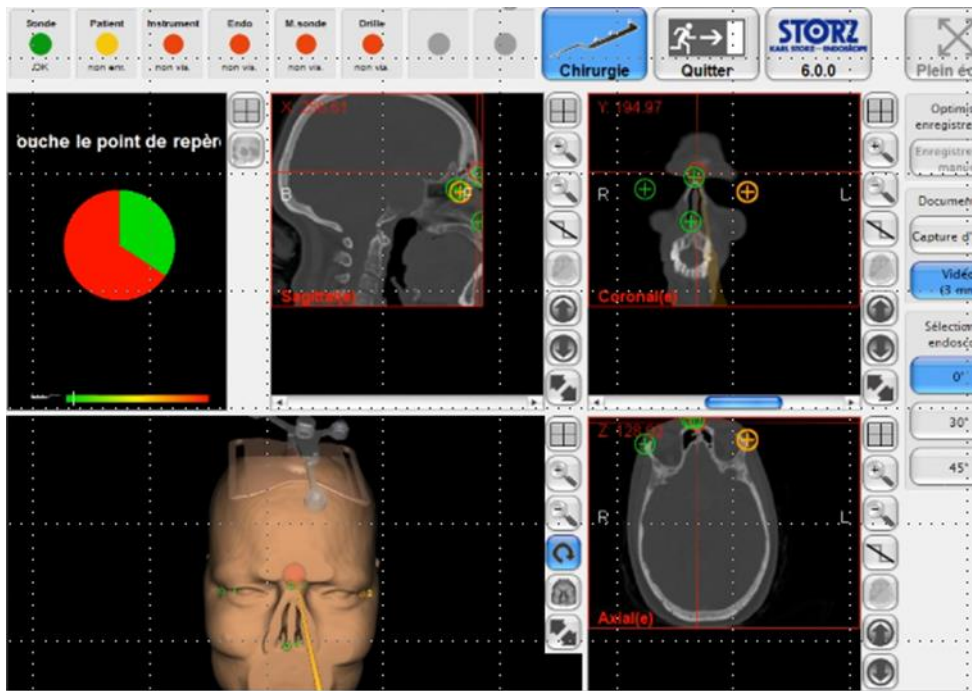


FIGURE 71 : IDENTIFICATION ET MÉMORISATION DES REPÈRES

L'erreur d'enregistrement de la cible de toute plateforme CGI spécifique dépend de 3 facteurs distincts : [122]

- **Marge d'erreur du système** : La capacité à déterminer la position de l'instrument présente généralement une marge d'erreur inférieure à 1,0 mm avec les technologies CGI les plus récentes, ce qui est essentiel pour des données de navigation fiables et minimiser les risques chirurgicaux.
- **Qualité des données d'imagerie** : La précision du système dépend également de la qualité des images utilisées pour l'enregistrement. Par exemple, pour une tomodensitométrie (TDM) haute résolution, l'épaisseur des coupes varie entre 0,5 et 0,625 mm, établissant un TRE minimal d'au moins 0,5 mm.
- **Processus d'enregistrement** : L'association des points du champ opératoire aux données d'imagerie peut introduire une erreur supplémentaire. Ce mappage est

crucial pour la correspondance des données et des images, mais peut également engendrer des imprécisions à considérer dans l'évaluation du TRE.

Enfin, l'acte chirurgical est guidé en temps réel par le système de navigation, permettant une précision accrue et une meilleure visualisation des structures anatomiques critiques

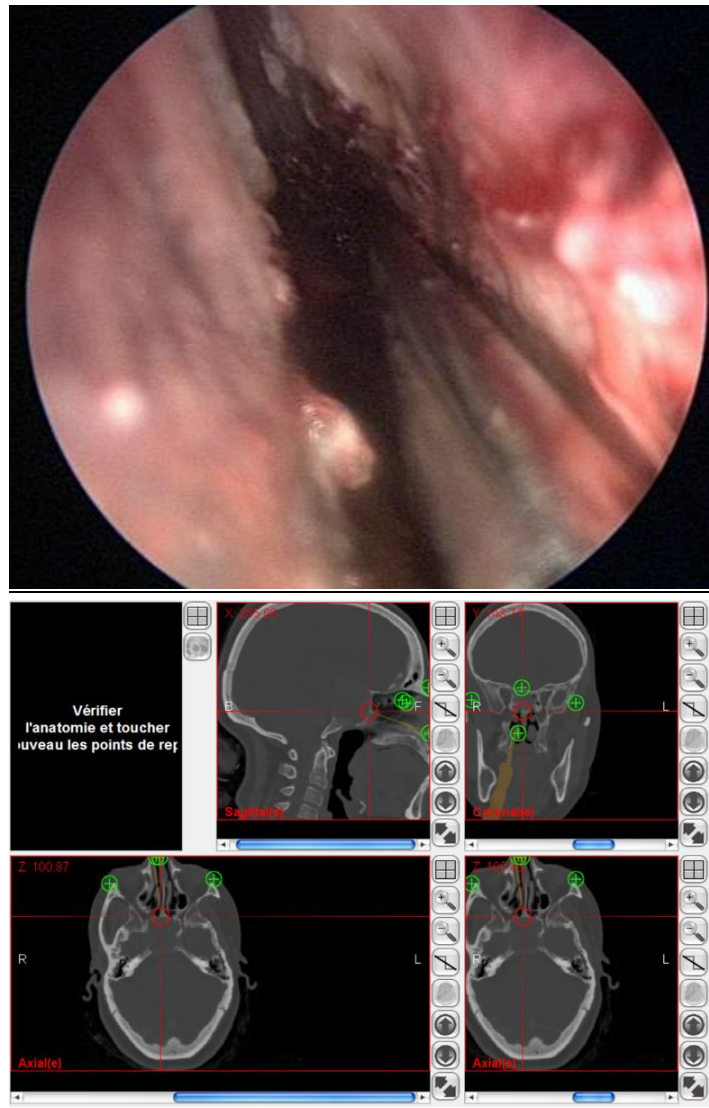


FIGURE 72 : LE REPÉRAGE PAR NEURONAVIGATION DU PLANCHER DU SINUS SPHÉNOÏDE

d. Les avantages et les limites de la neuronavigation : [122,127,128]

Certes, la neuronavigation, introduite dans les années 1990, apporte des avantages significatifs en neurochirurgie. Grâce à l'imagerie IRM ou TDM, elle permet une localisation mil-

limétrique des structures anatomiques, réduisant les risques de dommages aux tissus sains. En offrant une visualisation précise en temps réel, elle minimise les erreurs humaines et diminue les complications opératoires, telles que les saignements et infections, ce qui conduit à une réduction de la morbidité et de la mortalité. De plus, elle améliore la planification chirurgicale en permettant de visualiser la zone à traiter et de concevoir une stratégie personnalisée, optimisant ainsi les résultats pour les patients et réduisant le temps opératoire. En somme, la neuronavigation offre une précision accrue, une planification chirurgicale efficace, un guidage en temps réel, et facilite l'accès à des zones anatomiques difficiles, tout en réduisant les traumatismes chirurgicaux et les temps de récupération.

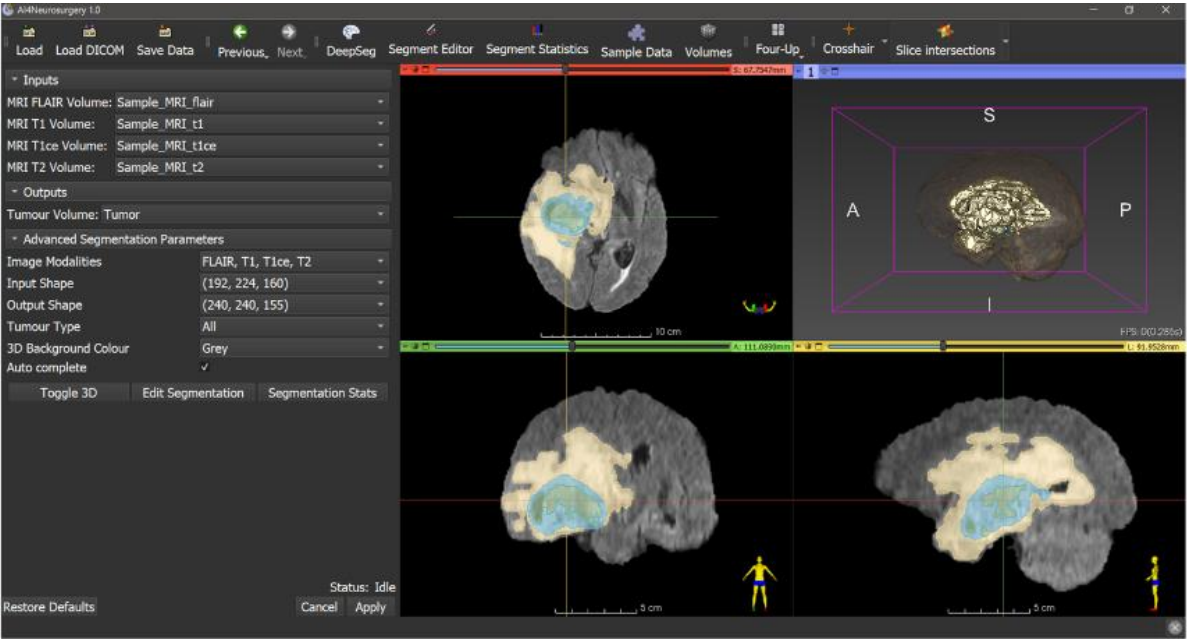
Mais, cette technologie présente des limites qu'il ne faut pas négliger. Elle dépend fortement de la qualité des images : des artefacts ou des images floues compromettent sa fiabilité, notamment dans les environnements à accès limité aux technologies d'imagerie avancées. De plus, les mouvements des structures cérébrales pendant l'intervention, causés par l'œdème ou la perte de liquide céphalo-rachidien, ne sont pas pris en compte par les images préopératoires, diminuant ainsi la précision de la navigation au fil de l'opération. Le coût élevé des systèmes de neuronavigation, ainsi que le besoin de formation spécialisée pour leur utilisation, limitent également leur accessibilité dans les centres de santé à faible revenu. Par ailleurs, des défaillances techniques ou des erreurs humaines peuvent survenir, soulignant l'importance de protocoles stricts et d'une maintenance rigoureuse pour garantir la sécurité de l'intervention.

e. Apport de l'IA à la neuronavigation :

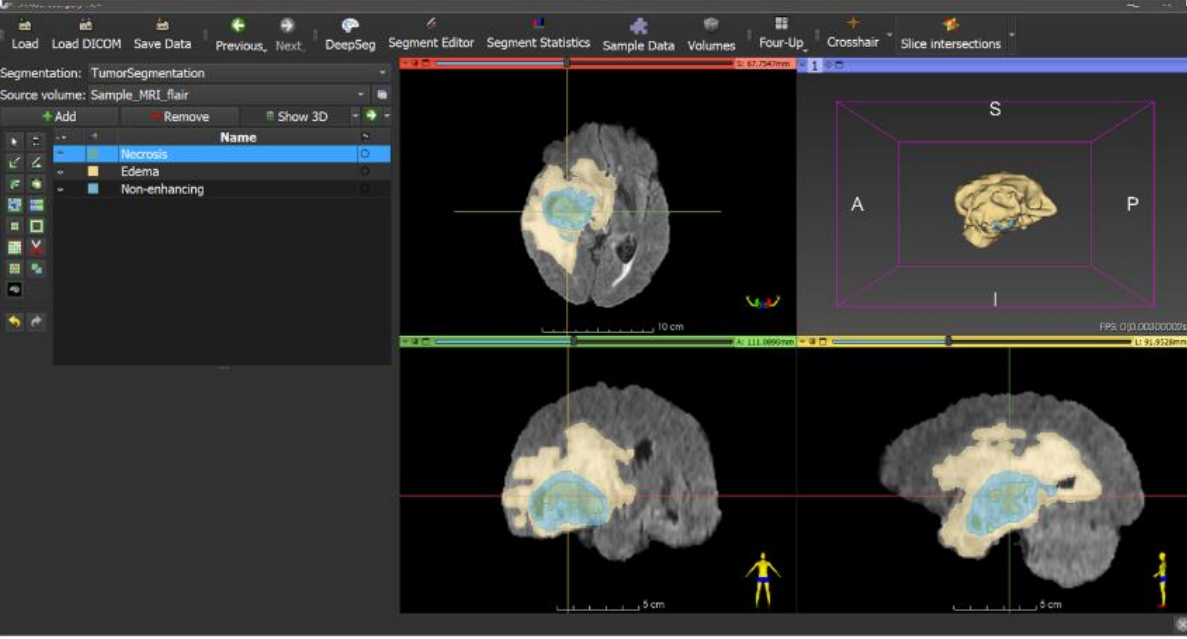
L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la neuronavigation offre des perspectives prometteuses pour améliorer la précision et la sécurité des interventions chirurgicales.

Des études récentes montrent que les systèmes d'IA peuvent analyser des données d'imagerie complexes, telles que les IRM cérébrales, pour identifier avec précision les tumeurs et localiser les structures anatomiques critiques.

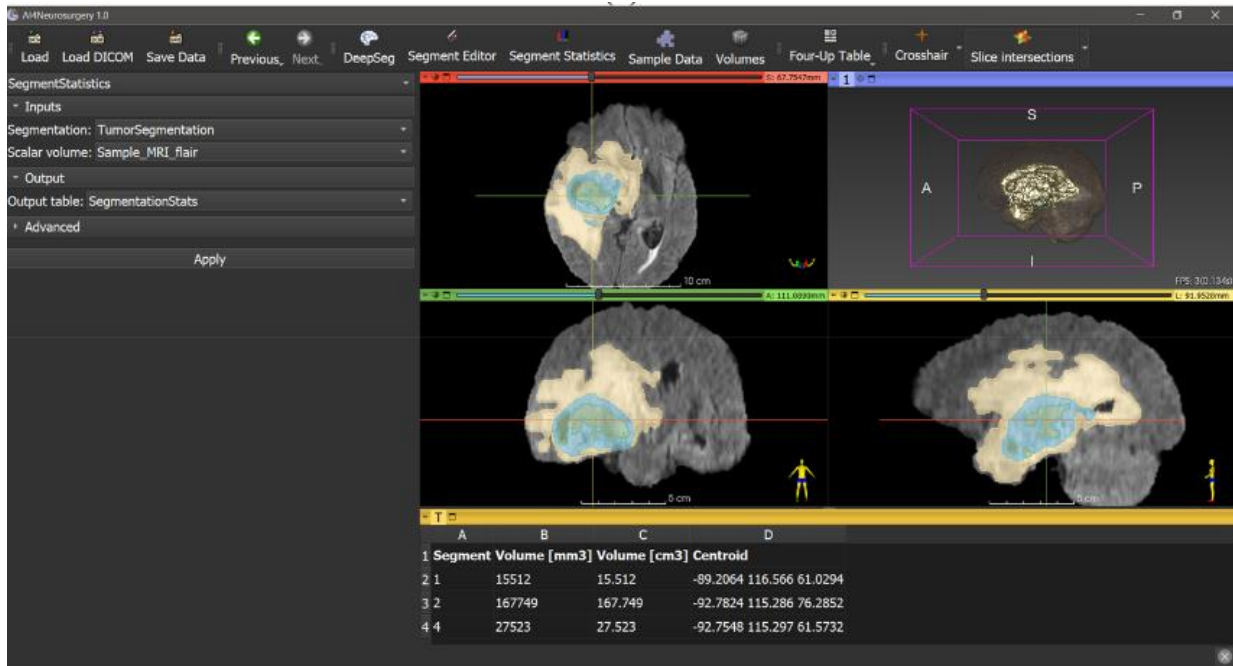
Par exemple, un système basé sur des modèles d'apprentissage profond, a démontré un coefficient de similarité de Dice moyen de 0,87 dans la segmentation automatique des tumeurs à partir des images IRM cérébrales, **ce qui souligne l'efficacité de l'IA dans la planification chirurgicale.**[129]



(a)



(b)



(c)

FIGURE 73 : SCÉNARIO D'UTILISATION DU SYSTÈME AI DANS LA SEGMENTATION, L'ÉDITION ET LE CALCUL DE L'INTENSITÉ ET LES PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES DES GLIOMES CÉRÉBRAUX DE HAUT GRADE. [129]

Pendant la phase peropératoire en neurochirurgie, l'intelligence artificielle offre des perspectives inédites pour optimiser les performances des chirurgiens et réduire les erreurs courantes.

En effet, l'IA facilite une navigation intraopératoire en temps réel, permettant de superposer les données d'imagerie préopératoire directement sur le champ opératoire. Cette technologie aide les neurochirurgiens à éviter d'endommager les tissus sains tout en accédant aux zones pathologiques, ce qui contribue à minimiser le risque de complications telles que les blessures ou les lésions nerveuses.[130]

La phase postopératoire bénéficie également des avancées des algorithmes d'apprentissage profond et de machine learning, qui sont utilisés pour prédire les résultats et personnaliser les plans de traitement en fonction des caractéristiques uniques de chaque patient.

Par exemple, Dans le cadre de l'épilepsie du lobe temporal, une forme d'épilepsie courante et souvent réfractaire aux traitements médicamenteux, l'IA s'est révélée plus perfor-

mante que les médecins pour localiser l'hémisphère cérébral affecté. En utilisant des données d'IRM fonctionnelle, l'IA a atteint un taux de succès de 95,8 % pour identifier le bon hémisphère, tandis que les médecins n'ont obtenu qu'un taux de 66,7 % [131]. Cette précision est cruciale, car une mauvaise localisation de la zone épileptogène peut compliquer la sélection des patients candidats à une chirurgie[132].

L'intégration de l'IA pourrait donc améliorer de manière significative les chances de réussite des interventions chirurgicales.



CONCLUSION



Cette thèse met en lumière l'intégration croissante de l'intelligence artificielle (IA) en neurochirurgie, révélant son potentiel à transformer radicalement les pratiques chirurgicales. À travers une analyse des fondements de l'IA et de ses évolutions historiques, nous avons constaté que des technologies comme la neuronavigation et l'endoscopie, bien qu'elles ne relèvent pas de l'IA, peuvent être considérablement améliorées par cette dernière.

La neuronavigation permet une localisation précise des structures cérébrales, facilitant ainsi des interventions moins invasives et plus sûres. De même, l'endoscopie endonasale offre un accès direct à des zones difficiles, minimisant le traumatisme tissulaire et favorisant une récupération rapide. Ensemble, ces approches, soutenues par l'IA, permettent une imagerie médicale améliorée et une planification chirurgicale efficace.

Les applications de l'IA, qu'il s'agisse de détecter des AVC, des anévrismes ou des tumeurs, illustrent son rôle essentiel dans la prise de décision clinique. De plus, l'IA permet une personnalisation des soins et une anticipation des complications, augmentant ainsi l'efficacité des traitements.

Cependant, cette avancée technologique s'accompagne de défis éthiques et de la nécessité d'une formation continue pour les praticiens afin d'assurer une utilisation optimale. En somme, l'avenir de la neurochirurgie semble prometteur, propulsé par la synergie entre l'IA, la neuronavigation et l'endoscopie, ce qui augure d'une amélioration continue de la qualité des soins apportés aux patients.



RÉSUMÉ



Résumé

Introduction : La neurochirurgie, qui traite des affections complexes du système nerveux, doit relever des défis liés à la délicatesse des interventions et aux différences anatomiques entre les patients. L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer la précision et la sécurité des opérations. Bien que des outils comme la neuronavigation et l'endoscopie ne soient pas en eux-mêmes des technologies d'IA, leur efficacité pourrait être considérablement optimisée grâce aux applications de l'IA. Cette étude se propose de passer en revue les recherches en IA dans le domaine de la neurochirurgie, en mettant en avant les avancées réalisées et les perspectives d'avenir.

Matériel et méthode : Cette étude rétrospective explore l'application de l'intelligence artificielle (IA) en neurochirurgie. Nous avons réalisé une méta-analyse et une revue de la littérature en utilisant des moteurs de recherche comme PubMed et Google Scholar, sélectionnant 132 articles pertinents. Ce travail est complété par des illustrations d'un cas du service illustrant l'utilisation de la neuronavigation et de l'endoscopie.

Résultats : Cette thèse explore l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) en neurochirurgie, en mettant en évidence son évolution historique, ses méthodes, et ses applications pratiques. Les résultats montrent une progression significative de l'IA, passant des fondements conceptuels aux technologies avancées comme le Deep Learning.

En neurochirurgie, l'IA améliore l'imagerie médicale, notamment pour détecter des pathologies comme les AVC et les tumeurs, ainsi que pour la planification chirurgicale et la navigation. Les applications de l'IA permettent une analyse personnalisée et la prédiction des complications, augmentant ainsi l'efficacité et la sécurité des interventions.

La neuronavigation et l'endoscopie jouent un rôle essentiel dans les pratiques neurochirurgicales modernes, et leur efficacité peut être renforcée par l'intégration de l'intelligence artificielle.

Ces technologies révolutionnent les pratiques chirurgicales en améliorant la précision des interventions et en réduisant les complications. La neuronavigation permet une localisation précise des structures cérébrales, facilitant des interventions moins invasives et plus sûres. Parallèlement, l'endoscopie endonasale offre un accès direct aux zones difficiles, minimisant le traumatisme tissulaire et favorisant une récupération rapide des patients.

Cependant, l'intégration de l'IA dans ces technologies, bien que prometteuse, soulève également des questions éthiques et exige une adaptation continue de la forme.

Conclusion : L'intégration de l'intelligence artificielle en neurochirurgie transforme profondément les pratiques chirurgicales en renforçant des outils comme la neuronavigation et l'endoscopie. Bien que ces technologies ne reposent pas directement sur l'IA, elles bénéficient de ses avancées pour améliorer la précision des interventions, réduire les complications et favoriser une récupération plus rapide des patients. L'IA ouvre aussi la voie à des approches ouvertes plus personnalisées, même si son utilisation pose des questions éthiques et nécessite une formation continue pour les praticiens. En somme, cette alliance entre IA et techniques chirurgicales avancées rend l'avenir de la neurochirurgie plus prometteur.

Abstract

Introduction: Neurosurgery, which treats complex disorders of the nervous system, faces challenges related to the delicacy of operations and anatomical differences between patients. The integration of artificial intelligence (AI) appears to be a promising solution for improving the precision and safety of operations. Although tools such as neuronavigation and endoscopy are not in themselves AI technologies, their effectiveness could be significantly optimized by AI applications. The aim of this study is to review AI research in the field of neurosurgery, highlighting the advances made and the prospects for the future.

Material and method: This retrospective study explores the application of artificial intelligence (AI) in neurosurgery. We carried out a meta-analysis and literature review using search engines such as PubMed and Google Scholar, selecting 132 relevant articles. This work is complemented by illustrations of a case from the department illustrating the use of neuronavigation and endoscopy.

Results: This thesis explores the integration of artificial intelligence (AI) in neurosurgery, highlighting its historical development, methods and practical applications. The results show a significant progression of AI from conceptual foundations to advanced technologies such as deep learning.

In neurosurgery, AI is improving medical imaging, particularly for detecting pathologies such as strokes and tumors, as well as for surgical planning and navigation. AI applications enable personalized analysis and prediction of complications, increasing the efficiency and safety of interventions.

Neuronavigation and endoscopy play an essential role in modern neurosurgical practices, and their effectiveness can be enhanced by the integration of artificial intelligence.

These technologies are revolutionizing surgical practices, improving the precision of interventions and reducing complications. Neuronavigation enables precise localization of brain structures, facilitating less invasive and safer interventions. At the same time, endonasal

endoscopy offers direct access to difficult areas, minimizing tissue trauma and promoting rapid patient recovery.

However, the integration of AI into these technologies, while promising, also raises ethical questions and requires ongoing adaptation of form.

Conclusion: The integration of artificial intelligence into neurosurgery is profoundly transforming surgical practices, reinforcing tools such as neuronavigation and endoscopy. Although these technologies do not rely directly on AI, they benefit from its advances to improve the precision of interventions, reduce complications and promote faster patient recovery. AI also paves the way for more personalized open approaches, even if its use raises ethical questions and requires ongoing training for practitioners. All in all, this alliance between AI and advanced surgical techniques makes the future of neurosurgery more promising.

ملخص

مقدمة: تواجه جراحة المخ والأعصاب، التي تعالج الاضطرابات المعقدة في الجهاز العصبي، تحديات تتعلق بدقة العمليات والاختلافات التشريحية بين المرضى. يبدو أن دمج الذكاء الاصطناعي (AI) هو حل واعد لتحسين دقة وسلامة العمليات الجراحية. على الرغم من أن أدوات مثل الملاحة العصبية والتنظير العصبي ليست في حد ذاتها من تقنيات الذكاء الاصطناعي، إلا أنه يمكن تحسين فعاليتها بشكل كبير من خلال تطبيقات الذكاء الاصطناعي. الهدف من هذه الدراسة هو استعراض أبحاث الذكاء الاصطناعي في مجال جراحة الأعصاب، وتسلط الضوء على التقدم المحرز وآفاق المستقبل.

المادة والطريقة: تستكشف هذه الدراسة بأثر رجعي تطبيق الذكاء الاصطناعي في جراحة الأعصاب. وقد أجرينا تحليلاً تلوياً ومراجعة للأدبيات باستخدام محركات البحث مثل PubMed و Google Scholar، واخترنا 132 مقالة ذات صلة. تم استكمال هذا العمل برسوم توضيحية لحالة من القسم توضح استخدام الملاحة العصبية والتنظير الداخلي.

النتائج: تستكشف هذه الأطروحة دمج الذكاء الاصطناعي (AI) في جراحة الأعصاب، مع تسلط الضوء على تطوره التاريخي وأساليبه وتطبيقاته العملية. تظهر النتائج تطوراً كبيراً للذكاء الاصطناعي من الأسس المفاهيمية إلى التقنيات المتقدمة مثل التعلم العميق.


في جراحة المخ والأعصاب، يعمل الذكاء الاصطناعي على تحسين التصوير الطبي، لا سيما للكشف عن الأمراض مثل السكتات الدماغية والأورام، وكذلك للتخطيط الجراحي والملاحة. تتيح تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليل الشخصي والتنبيه بالمضاعفات، مما يزيد من كفاءة وسلامة التدخلات الجراحية.

يلعب التنظير العصبي والتنظير الداخلي دوراً أساسياً في الممارسات الجراحية العصبية الحديثة، ويمكن تعزيز فعاليتها من خلال دمج الذكاء الاصطناعي.

تعمل هذه التقنيات على إحداث ثورة في الممارسات الجراحية، وتحسين دقة التدخلات الجراحية وتقليل المضاعفات. تتيح تقنية الملاحة العصبية تحديد الموقع الدقيق لهياكل الدماغ، مما يسهل التدخلات الأقل توغلاً والأكثر أماناً. في الوقت نفسه، يوفر التنظير الداخلي للأنسجة وصولاً مباشراً إلى المناطق الصعبة، مما يقلل من صدمة الأنسجة ويعزز التعافي السريع للمرضى.

ومع ذلك، فإن دمج الذكاء الاصطناعي في هذه التقنيات، رغم أنه واعد، إلا أنه يثير أيضاً أسئلة أخلاقية ويتطلب تكييفاً مستمراً للشكل.

الخلاصة: يُحدث دمج الذكاء الاصطناعي في جراحة الأعصاب تحولاً عميقاً في الممارسات الجراحية، مما يعزز أدوات مثل الملاحة العصبية والتنظير الداخلي. وعلى الرغم من أن هذه التقنيات لا تعتمد بشكل مباشر على الذكاء الاصطناعي، إلا أنها تستفيد من تقدمه لتحسين دقة التدخلات البينية، وتقليل المضاعفات وتعزيز تعافي المرضى بشكل أسرع. كما أن الذكاء الاصطناعي يمهد الطريق لمقاربات مفتوحة أكثر تخصيصاً، حتى لو كان استخدامه يثير تساؤلات أخلاقية ويتطلب تدريباً مستمراً للممارسين. وإجمالاً، فإن هذا التحالف بين الذكاء الاصطناعي والتقنيات الجراحية المتقدمة يجعل مستقبل جراحة الأعصاب واعدًا أكثر.



BIBLIOGRAPHIE



1. **Winkin Y.**
La Fondation Macy et l'interdisciplinarité. Actes Rech. En Sci. Soc. 1984;54:87-90.
2. **Rosenblueth A, Wiener N, Bigelow J.**
Behavior, Purpose and Teleology. Philos. Sci. 1943;10:18-24.
3. **Turing AM.**
Computing Machinery and Intelligence [Internet]. In: Epstein R, Roberts G, Beber G, éditeurs. Parsing the Turing Test. Dordrecht: Springer Netherlands; 2009 [cité 2023 oct 14]. page 23-65. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6710-5_3
4. **Moor J.**
The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty Years. AI Mag. 2006;27:87.
5. **Crevier D.**
AI: the tumultuous history of the search for artificial intelligence. New York, NY: Basic Books; 1993.
6. **Russell SJ, Norvig P, Davis E.**
Artificial intelligence: a modern approach. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2010.
7. **Muthukrishnan N, Maleki F, Ovens K, Reinhold C, Forghani B, Forghani R.**
Brief History of Artificial Intelligence. Neuroimaging Clin. N. Am. 2020;30:393-9.
8. **Dreyfus HL.**
What computers still can't do: a critique of artificial reason. Cambridge, Mass: MIT Press; 1992.
9. **LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning.**
Nature 2015;521:436-44.
10. **Schmidhuber J.**
Deep learning in neural networks: An overview. Neural Netw. 2015;61:85-117.
11. **Bellini V, Cascella M, Cutugno F, Russo M, Lanza R, Compagnone C, et al.**
Understanding basic principles of Artificial Intelligence: a practical guide for intensivists: Basic Principles of Artificial Intelligence. Acta Biomed. Atenei Parm. 2022;93:e2022297.
12. **McBee MP, Awan OA, Colucci AT, Ghobadi CW, Kadom N, Kansagra AP, et al.**
Deep Learning in Radiology. Acad. Radiol. 2018;25:1472-80.
13. **Lee EJ, Kim YH, Kim N, Kang DW.**
Deep into the Brain: Artificial Intelligence in Stroke Imaging. J. Stroke 2017;19:277-85.
14. **Sotoudeh H, Shafaat O, Bernstock JD, Brooks MD, Elsayed GA, Chen JA, et al.**
Artificial Intelligence in the Management of Glioma: Era of Personalized Medicine. Front. Oncol. 2019;9:768.
15. **Naive Bayes.**
Available from: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/naive-bayes>

16. Nikolopoulou K.

Supervised vs. Unsupervised Learning: Key Differences. [Internet]. 2023. Available from: <https://www.scribbr.com/ai-tools/supervised-vs-unsupervised-learning/>

17. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S.

A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1988;35:153-60.

18. ESUT-YAUWP Group, Veneziano D, Tafuri A, Rivas JG, Dourado A, Okhunov Z, et al.

Is remote live urologic surgery a reality? Evidences from a systematic review of the literature. *World J. Urol.* 2020;38:2367-76.

19. Khanna O, Beasley R, Franco D, DiMaio S.

The Path to Surgical Robotics in Neurosurgery. *Oper. Neurosurg.* 2021;20:514-20.

20. Fomenko A, Serletis D.

Robotic Stereotaxy in Cranial Neurosurgery: A Qualitative Systematic Review. *Neurosurgery* 2018;83:642-50.

21. Spire WJ, Jobst BC, Thadani VM, Williamson PD, Darcey TM, Roberts DW.

Robotic image-guided depth electrode implantation in the evaluation of medically intractable epilepsy: Technical note. *Neurosurg. Focus* 2008;25:E19.

22. Bekelis K, Radwan TA, Desai A, Roberts DW.

Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety: Clinical article. *J. Neurosurg.* 2012;116:1002-6.

23. Lollis SS, Roberts DW.

Robotic catheter ventriculostomy: feasibility, efficacy, and implications. *J. Neurosurg.* 2008;108:269-74.

24. Housley SB, Lim J, Starling RV, Siddiqui AH.

Minimally Invasive Resection of Intraventricular Pilocytic Astrocytoma Using the Aurora Surgiscope in an Adult Patient: Technical Note. *World Neurosurg.* 2022;168:227-31.

25. González-Martínez J, Bulacio J, Thompson S, Gale J, Smithason S, Najm I, et al.

Technique, Results, and Complications Related to Robot-Assisted Stereoelectroencephalography. *Neurosurgery* 2016;78:169-80.

26. Liu L, Mariani SG, De Schlichting E, Grand S, Lefranc M, Seigneuret E, et al.

Frameless ROSA® Robot-Assisted Lead Implantation for Deep Brain Stimulation: Technique and Accuracy. *Oper. Neurosurg.* 2020;19:57-64.

27. Pruitt R, Goldstein TA, Rodgers S.

Using the ROSA Robot for Lesion Resection: A Novel Adapter With Added Applications. *Oper. Neurosurg.* 2022;23:148-53.

28. Dorfer C, Minchev G, Czech T, Stefanits H, Feucht M, Patariaia E, et al.

A novel miniature robotic device for frameless implantation of depth electrodes in refractory epilepsy. *J. Neurosurg.* 2017;126:1622-8.

- 29. Minchev G, Kronreif G, Martínez–Moreno M, Dorfer C, Micko A, Mert A, et al.**
A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot. *J. Neurosurg.* 2017;126:985-96.
- 30. Mattei TA, Rodriguez AH, Sambhara D, Mendel E.**
Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery. *Neurosurg. Rev.* 2014;37:357-66.
- 31. Yeo M, Tahayori B, Kok HK, Maingard J, Kutaiba N, Russell J, et al.**
Review of deep learning algorithms for the automatic detection of intracranial hemorrhages on computed tomography head imaging. *J. NeuroInterventional Surg.* 2021;13:369-78.
- 32. Caceres JA, Goldstein JN.**
Intracranial Hemorrhage. *Emerg. Med. Clin. North Am.* 2012;30:771-94.
- 33. Erly WK, Berger WG, Krupinski E, Seeger JF, Guisto JA.**
Radiology resident evaluation of head CT scan orders in the emergency department. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2002;23:103-7.
- 34. Strub WM, Leach JL, Tomsick T, Vagal A.**
Overnight Preliminary Head CT Interpretations Provided by Residents: Locations of Misidentified Intracranial Hemorrhage. *Am. J. Neuroradiol.* 2007;28:1679-82.
- 35. Altuve M, Pérez A.**
Intracerebral hemorrhage detection on computed tomography images using a residual neural network. *Phys. Med.* 2022;99:113-9.
- 36. Kundisch A, Hönning A, Mutze S, Kreissl L, Spohn F, Lemcke J, et al.**
Deep learning algorithm in detecting intracranial hemorrhages on emergency computed tomographies. *PLOS ONE* 2021;16:e0260560.
- 37. Rinkel GJE, Djibuti M, Algra A, Van Gijn J.** Prevalence and Risk of Rupture of Intracranial Aneurysms: A Systematic Review. *Stroke* 1998;29:251-6.
- 38. Park A, Chute C, Rajpurkar P, Lou J, Ball RL, Shpanskaya K, et al.**
Deep Learning–Assisted Diagnosis of Cerebral Aneurysms Using the HeadXNet Model. *JAMA Netw. Open* 2019;2:e195600.
- 39. Dai X, Huang L, Qian Y, Xia S, Chong W, Liu J, et al.**
Deep learning for automated cerebral aneurysm detection on computed tomography images. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2020;15:715-23.
- 40. Yang J, Xie M, Hu C, Alwalid O, Xu Y, Liu J, et al.**
Deep Learning for Detecting Cerebral Aneurysms with CT Angiography. *Radiology* 2021;298:155-63.
- 41. Rajabzadeh–Oghaz H, Waqas M, Veeturi SS, Vakharia K, Tso MK, Snyder KV, et al.**
A data–driven model to identify high–risk aneurysms and guide management decisions: the Rupture Resemblance Score. *J. Neurosurg.* 2020;135:9-16.

- 42. Gilotra K, Swarna S, Mani R, Basem J, Dashti R.**
Role of artificial intelligence and machine learning in the diagnosis of cerebrovascular disease. *Front. Hum. Neurosci.* 2023;17:1254417.
- 43. Chalela JA, Kidwell CS, Nentwich LM, Luby M, Butman JA, Demchuk AM, et al.**
Magnetic resonance imaging and computed tomography in emergency assessment of patients with suspected acute stroke: a prospective comparison. *The Lancet* 2007;369:293-8.
- 44. Pühr-Westerheide D, Froelich MF, Solyanik O, Gresser E, Reidler P, Fabritius MP, et al.**
Cost-effectiveness of short-protocol emergency brain MRI after negative non-contrast CT for minor stroke detection. *Eur. Radiol.* 2022;32:1117-26.
- 45. Kleindorfer D, Khoury J, Alwell K, Moomaw CJ, Woo D, Flaherty ML, et al.**
The impact of Magnetic Resonance Imaging (MRI) on ischemic stroke detection and incidence: minimal impact within a population-based study. *BMC Neurol.* 2015;15:175.
- 46. Xue Y, Farhat FG, Boukrina O, Barrett AM, Binder JR, Roshan UW, et al.**
A multi-path 2.5 dimensional convolutional neural network system for segmenting stroke lesions in brain MRI images. *NeuroImage Clin.* 2020;25:102118.
- 47. Chen X, You S, Tezcan KC, Konukoglu E.**
Unsupervised lesion detection via image restoration with a normative prior. *Med. Image Anal.* 2020;64:101713.
- 48. Hui H, Zhang X, Li F, Mei X, Guo Y.**
A Partitioning-Stacking Prediction Fusion Network Based on an Improved Attention U-Net for Stroke Lesion Segmentation. *IEEE Access* 2020;8:47419-32.
- 49. Verma K, Kumar S, Paydarfar D.**
Automatic Segmentation and Quantitative Assessment of Stroke Lesions on MR Images. *Diagnostics* 2022;12:2055.
- 50. Bauer S, Wiest R, Nolte LP, Reyes M.**
A survey of MRI-based medical image analysis for brain tumor studies. *Phys. Med. Biol.* 2013;58:R97-129.
- 51. Shelhamer E, Long J, Darrell T.**
Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2017;39:640-51.
- 52. Mohsen H, El-Dahshan ESA, El-Horbaty ESM, Salem ABM.**
Classification using deep learning neural networks for brain tumors. *Future Comput. Inform. J.* 2018;3:68-71.
- 53. Bairagi VK, Gumaste PP, Rajput SH, Chethan K. S.**
Automatic brain tumor detection using CNN transfer learning approach. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2023;61:1821-36.
- 54. Anita JN, Kumaran S.**
A Deep Learning Architecture for Meningioma Brain Tumor Detection and Segmentation. *J. Cancer Prev.* 2022;27:192-8.

- 55. Cheng J.**
brain tumor dataset [Internet]. 2017 [cité 2024 août 2];879509079 Bytes. Available from: https://figshare.com/articles/dataset/brain_tumor_dataset/1512427/5
- 56. Zhang X, Li Y, Liu Y, Tang SX, Liu X, Punithakumar K, et al.**
Automatic spinal cord segmentation from axial-view MRI slices using CNN with grayscale regularized active contour propagation. *Comput. Biol. Med.* 2021;132:104345.
- 57. Lu H, Li M, Yu K, Zhang Y, Yu L.**
Lumbar spine segmentation method based on deep learning. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 2023;24:e13996.
- 58. Koike Y, Yui M, Nakamura S, Yoshida A, Takegawa H, Anetai Y, et al.**
Artificial intelligence-aided lytic spinal bone metastasis classification on CT scans. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* 2023;18:1867-74.
- 59. Dong Q, Luo G, Lane NE, Lui LY, Marshall LM, Kado DM, et al.**
Deep Learning Classification of Spinal Osteoporotic Compression Fractures on Radiographs using an Adaptation of the Genant Semiquantitative Criteria. *Acad. Radiol.* 2022;29:1819-32.
- 60. Dagi TF, Barker FG, Glass J.**
Machine Learning and Artificial Intelligence in Neurosurgery: Status, Prospects, and Challenges. *Neurosurgery* 2021;89:133-42.
- 61. Ertosun MG, Rubin DL.**
Automated Grading of Gliomas using Deep Learning in Digital Pathology Images: A modular approach with ensemble of convolutional neural networks. *AMIA Annu. Symp. Proc. AMIA Symp.* 2015;2015:1899-908.
- 62. The Cancer Genome Atlas Research Network.** Comprehensive, Integrative Genomic Analysis of Diffuse Lower-Grade Gliomas. *N. Engl. J. Med.* 2015;372:2481-98.
- 63. Mobadersany P, Yousefi S, Amgad M, Gutman DA, Barnholtz-Sloan JS, Velázquez Vega JE, et al.**
Predicting cancer outcomes from histology and genomics using convolutional networks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* [Internet] 2018 [cité 2024 sept 21];115. Available from: <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1717139115>
- 64. Elfanagely O, Toyoda Y, Othman S, Mellia JA, Basta M, Liu T, et al.**
Machine Learning and Surgical Outcomes Prediction: A Systematic Review. *J. Surg. Res.* 2021;264:346-61.
- 65. Yang CC.**
Explainable Artificial Intelligence for Predictive Modeling in Healthcare. *J. Healthc. Inform. Res.* 2022;6:228-39.
- 66. Rau CS, Kuo PJ, Chien PC, Huang CY, Hsieh HY, Hsieh CH.**
Mortality prediction in patients with isolated moderate and severe traumatic brain injury using machine learning models. *PLOS ONE* 2018;13:e0207192.
- 67. Wong GKC, Zhu CXL, Ahuja AT, Poon WS.**

CRANIOTOMY AND CLIPPING OF INTRACRANIAL ANEURYSM IN A STEREOSCOPIC VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT. *Neurosurgery* 2007;61:564-9.

- 68. Stifano V, Palumbo MC, Chidambaram S, Sturiale CL, Albanese A, Marchese E, et al.**
The use of mixed reality for the treatment planning of unruptured intracranial aneurysms. *J. Neurosurg. Sci.* [Internet] 2023 [cité 2023 oct 5];67. Available from: <https://www.minervamedica.it/index2.php?show=R38Y2023N04A0491>
- 69. Zawy Alsofy S, Sakellaropoulou I, Nakamura M, Ewelt C, Salma A, Lewitz M, et al.**
Impact of Virtual Reality in Arterial Anatomy Detection and Surgical Planning in Patients with Unruptured Anterior Communicating Artery Aneurysms. *Brain Sci.* 2020;10:963.
- 70. Bernardo A.**
Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training. *World Neurosurg.* 2017;106:1015-29.
- 71. Fazlollahi AM, Bakhaidar M, Alsayegh A, Yilmaz R, Winkler-Schwartz A, Mirchi N, et al.**
Effect of Artificial Intelligence Tutoring vs Expert Instruction on Learning Simulated Surgical Skills Among Medical Students: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Netw. Open* 2022;5:e2149008.
- 72. Winkler-Schwartz A, Yilmaz R, Mirchi N, Bissonnette V, Ledwos N, Siyar S, et al.**
Machine Learning Identification of Surgical and Operative Factors Associated With Surgical Expertise in Virtual Reality Simulation. *JAMA Netw. Open* 2019;2:e198363.
- 73. Chen T, Zhang Y, Ding C, Ting K, Yoon S, Sahak H, et al.**
Virtual reality as a learning tool in spinal anatomy and surgical techniques. *North Am. Spine Soc. J. NASSJ* 2021;6:100063.
- 74. Barone DG, Hart MG.**
Intra-operative imaging for neuro-oncology [Internet]. In: The Cochrane Collaboration, éditeur. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2012 [cité 2023 oct 5]. page CD009685. Available from: <https://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD009685>
- 75. Wei W, Ma L, Yang L, Lu R, Xi C.**
Artificial Intelligence Algorithm-Based Positron Emission Tomography (PET) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) in the Treatment of Glioma Biopsy. *Contrast Media Mol. Imaging* 2022;2022:1-9.
- 76. Burström G, Buerger C, Hoppenbrouwers J, Nachabe R, Lorenz C, Babic D, et al.**
Machine learning for automated 3-dimensional segmentation of the spine and suggested placement of pedicle screws based on intraoperative cone-beam computer tomography. *J. Neurosurg. Spine* 2019;31:147-54.
- 77. Ostyn M, Wang S, Kim YS, Kim S, Yeo WH.**
Radiotherapy-Compatible Robotic System for Multi-Landmark Positioning in Head and Neck Cancer Treatments. *Sci. Rep.* 2019;9:14358.
- 78. Zhang Q, Han XG, Xu YF, Fan MX, Zhao JW, Liu YJ, et al.**

Robotic navigation during spine surgery. *Expert Rev. Med. Devices* 2020;17:27-32.

79. Li CR, Shen CC, Yang MY, Tsuei YS, Lee CH.

Intraoperative Augmented Reality in Microsurgery for Intracranial Arteriovenous Malformation: A Case Report and Literature Review. *Brain Sci.* 2023;13:653.

80. Dixon BJ, Daly MJ, Chan H, Vescan A, Witterick IJ, Irish JC.

Augmented real-time navigation with critical structure proximity alerts for endoscopic skull base surgery. *The Laryngoscope* 2014;124:853-9.

81. Buchlak QD, Esmaili N, Leveque JC, Farrokhi F, Bennett C, Piccardi M, et al.

Machine learning applications to clinical decision support in neurosurgery: an artificial intelligence augmented systematic review. *Neurosurg. Rev.* 2020;43:1235-53.

82. Fountain DM, Bryant A, Barone DG, Waqar M, Hart MG, Bulbeck H, et al.

Intraoperative imaging technology to maximise extent of resection for glioma: a network meta-analysis. *Cochrane Database Syst. Rev.* [Internet] 2021 [cité 2023 oct 5];2021. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD013630.pub2>

83. Haidegger T, Benyó Z.

Surgical robotics in neurosurgery. *Orv. Hetil.* 2009;150:1701-11.

84. Sielatycki JA, Mitchell K, Leung E, Lehman RA.

State of the art review of new technologies in spine deformity surgery-robotics and navigation. *Spine Deform.* 2022;10:5-17.

85. Gonzalez D, Ghessese S, Cook D, Hedequist D.

Initial intraoperative experience with robotic-assisted pedicle screw placement with stealth navigation in pediatric spine deformity: an evaluation of the first 40 cases. *J. Robot. Surg.* 2021;15:687-93.

86. Pérez De La Torre RA, Ramanathan S, Williams AL, Perez-Cruet MJ.

Minimally-Invasive Assisted Robotic Spine Surgery (MARSS). *Front. Surg.* 2022;9:884247.

87. Comparetti MD, Vaccarella A, Dyagilev I, Shoham M, Ferrigno G, De Momi E.

Accurate multi-robot targeting for keyhole neurosurgery based on external sensor monitoring. *Proc. Inst. Mech. Eng. [H]* 2012;226:347-59.

88. Pillai A, Ratnathankom A, Ramachandran SN, Udayakumar S, Subhash P, Krishnadas A.

Expanding the Spectrum of Robotic Assistance in Cranial Neurosurgery. *Oper. Neurosurg.* 2019;17:164-73.

89. Marcus HJ, Seneci CA, Payne CJ, Nandi D, Darzi A, Yang GZ.

Robotics in Keyhole Transcranial Endoscope-Assisted Microsurgery: A Critical Review of Existing Systems and Proposed Specifications for New Robotic Platforms. *Oper. Neurosurg.* 2014;10:84-96.

90. Ma L, Wang L, Tseng CL, Sahgal A.

Emerging technologies in stereotactic body radiotherapy. *Chin. Clin. Oncol.* 2017;6:S12-S12.

91. Panesar SS, Kliot M, Parrish R, Fernandez-Miranda J, Cagle Y, Britz GW.

Promises and Perils of Artificial Intelligence in Neurosurgery. *Neurosurgery* 2020;87:33-44.

92. Are Current Tort Liability Doctrines Adequate for Addressing Injury Caused by AI? *AMA J. Ethics* 2019;21:E160–166.
93. **O’Sullivan S, Nevejans N, Allen C, Blyth A, Leonard S, Pagallo U, et al.**
Legal, regulatory, and ethical frameworks for development of standards in artificial intelligence (AI) and autonomous robotic surgery. *Int. J. Med. Robot.* 2019;15:e1968.
94. **Madumal P, Miller T, Sonenberg L, Vetere F.**
A Grounded Interaction Protocol for Explainable Artificial Intelligence [Internet]. 2019 [cité 2024 sept 22]; Available from: <https://arxiv.org/abs/1903.02409>
95. **SEMS.**
Cadre réglementaire de l’IA : Perspectives nationales et internationales [Internet]. [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://sems.ma/blog/cadre-reglementaire-ia>
96. Législation sur l’intelligence artificielle (IA): le Conseil donne son feu vert définitif aux premières règles mondiales en matière d’IA [Internet]. *Consilium* [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2024/05/21/artificial-intelligence-ai-act-council-gives-final-green-light-to-the-first-worldwide-rules-on-ai/>
97. La Chine publie un nouveau projet de réglementation pour l’IA générative [Internet]. [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://www.china-briefing.com/news/china-releases-new-draft-regulations-on-generative-ai/>
98. Four things to know about China’s new AI rules in 2024 [Internet]. *MIT Technol. Rev.* [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://www.technologyreview.com/2024/01/17/1086704/china-ai-regulation-changes-2024/>
99. US state-by-state AI legislation snapshot [Internet]. *BCLP – Bryan Cave Leighton Paisner – US State--State AI Legis. Snapshot* [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://www.bclplaw.com/en-US/events-insights-news/us-state-by-state-artificial-intelligence-legislation-snapshot.html>
100. Regional and International AI Regulations and Laws in 2024 [Internet]. *Keymakr2024* [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://keymakr.com/blog/regional-and-international-ai-regulations-and-laws-in-2024/>
101. **AKKOUR S.**
LA PROTECTION DES DONNÉES PERSONNELLES FACE À L’INTELLIGENCE ARTIFICIELLE. 2023 4:1-22.
102. note de presentation de la loi 05-20 sur la cybersécurité.pdf [Internet]. [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://www.dgssi.gov.ma/sites/default/files/legislative/brochure/2023-03/note%20de%20presentation%20de%20la%20loi%2005-20%20sur%20la%20cybersecurite.pdf>
103. Le Maroc envisage un cadre légal pour l’intelligence artificielle (Ouahbi) – *Médias24* numéro un de l’information économique marocaine [Internet]. [cité 2024 oct 24]; Available from: <https://medias24.com/2024/05/14/le-maroc-envisage-un-cadre-legal-pour-lintelligence-artificielle-ouahbi/>

104. **Noh SH, Cho PG, Kim KN, Kim SH, Shin DA.**
Artificial Intelligence for Neurosurgery : Current State and Future Directions. *J. Korean Neurosurg. Soc.* 2023;66:113-20.
105. **Ramachandran R, Singh PM, Batra M, Pahwa D.**
Anaesthesia for endoscopic endonasal surgery. *Trends Anaesth. Crit. Care* 2011;1:79-83.
106. **Berhouma M, Messerer M, Jouanneau E.**
Chirurgie endoscopique endonasale des tumeurs de la base du crane : historique, état de l'art et perspectives d'avenir. *Rev. Neurol. (Paris)* 2012;168:121-34.
107. **Dehdashti AR, Ganna A, Karabatsou K, Gentili F.**
PURE ENDOSCOPIC ENDONASAL APPROACH FOR PITUITARY ADENOMAS: EARLY SURGICAL RESULTS IN 200 PATIENTS AND COMPARISON WITH PREVIOUS MICROSURGICAL SERIES. *Neurosurgery* 2008;62:1006-17.
108. **Baussart B, Declerck A, Gaillard S.**
Mononostril endoscopic endonasal approach for pituitary surgery. *Acta Neurochir. (Wien)* 2021;163:655-9.
109. **Guichard JP, Franc J, Herman P.**
Complications de la chirurgie rhinosinusienne. *J. Radiol.* 2011;92:1029-40.
110. **F.Peillon.**
Adénomes à prolactine: aspects cliniques, diagnostic et traitement. . 27:12-9;
111. **Szekely B, Liu N, Dupuy M, Gaillard S, Fischler M.**
Anesthésie-réanimation en chirurgie de l'hypophyse. *EMC – Anesth.-Réanimation* 2007;4:1-11.
112. **Sautiere JB, Fournier L, Patron V, Hamon M.**
Revue iconographique sur l'imagerie du sphénoïde : auto-évaluation. *J. Imag. Diagn. Interv.* 2019;2:52-65.
113. **El-Sayed A, Salman S, Alrubaiy L.**
The adoption of artificial intelligence assisted endoscopy in the Middle East: challenges and future potential. *Transl. Gastroenterol. Hepatol.* 2023;8:42-42.
114. **Hann A, Meining A.**
Artificial Intelligence in Endoscopy. *Visc. Med.* 2021;37:471-5.
115. **Arif AA, Jiang SX, Byrne MF.**
Artificial intelligence in endoscopy: Overview, applications, and future directions. *Saudi J. Gastroenterol. Off. J. Saudi Gastroenterol. Assoc.* 2023;29:269-77.
116. **Chadebecq F, Lovat LB, Stoyanov D.**
Artificial intelligence and automation in endoscopy and surgery. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 2023;20:171-82.
117. **Ali H, Muzammil MA, Dahiya DS, Ali F, Yasin S, Hanif W, et al.**
Artificial intelligence in gastrointestinal endoscopy: a comprehensive review. *Ann. Gastroenterol.* 2024;37:133-41.

118. **Chang H, Zhao K, Qiu J, Ji XJ, Chen WG, Li BY, et al.**
Prediction of intraoperative cerebrospinal fluid leaks in endoscopic endonasal transsphenoidal pituitary surgery based on a deep neural network model trained with MRI images: a pilot study. *Front. Neurosci.* 2023;17:1203698.
119. **Bairy L, Vanderstichelen M, Jamart J, Collard E.**
Clonidine or remifentanyl for adequate surgical conditions in patients undergoing endoscopic sinus surgery: a randomized study. *PeerJ* 2017;5:e3370.
120. **Gael Batan, Saad Ben Dadi Magali Labord.**
La navigation en neurochirurgie, 2005–2006. [Internet]. [cité 2024 sept 8]; Available from: https://www.utc.fr/master-qualite/public/publications/qualite_et_biomedical/UTC/master_mts/2005_2006/projets/neuronavigation/neuronavigation.htm
121. **Maniglia AJ.**
Fatal and major complications secondary to nasal and sinus surgery. *The Laryngoscope* 1989;99:276-83.
122. **Di Donate P, Bergery A, Largillière S, Lemaire JJ.**
La neuronavigation : principe et intérêt. *ITBM–RBM* 2000;21:70-7.
123. **Gerard IJ, Kersten–Oertel M, Petrecca K, Sirhan D, Hall JA, Collins DL.**
Brain shift in neuronavigation of brain tumors: A review. *Med. Image Anal.* 2017;35:403-20.
124. **Hill DLG, Hawkes DJ, Crossman JE, Gleeson MJ, Cox TCS, Bracey EECML, et al.**
Registration of MR and CT images for skull base surgery using point–like anatomical features. *Br. J. Radiol.* 1991;64:1030-5.
125. **Micko A, Hosmann A, Wurzer A, Maschke S, Marik W, Knosp E, et al.**
An advanced protocol for intraoperative visualization of sinunasal structures: experiences from pituitary surgery. *J. Neurosurg.* 2020;133:240-8.
126. **Citardi MJ, Yao W, Luong A.**
Next–Generation Surgical Navigation Systems in Sinus and Skull Base Surgery. *Otolaryngol. Clin. North Am.* 2017;50:617-32.
127. **Roberts DW, Hartov A, Kennedy FE, Miga MI, Paulsen KD**
Intraoperative Brain Shift and Deformation: A Quantitative Analysis of Cortical Displacement in 28 Cases. *Neurosurgery* 1998;43:749-58.
128. **Grunert P, Müller–Forell W, Darabi K, Reisch R, Buser C, Hopf N, et al.**
Basic principles and clinical applications of neuronavigation and intraoperative computed tomography. *Comput. Aided Surg. Off. J. Int. Soc. Comput. Aided Surg.* 1998;3:166-73.
129. **Zeineldin RA, Junger D, Mathis–Ullrich F, Burgert O**
. Development of an AI–driven system for neurosurgery with a usability study: a step towards minimal invasive robotics. – *Autom.* 2023;71:537-46.
130. **Kazemzadeh K, Akhlaghdoust M, Zali A.**

Advances in artificial intelligence, robotics, augmented and virtual reality in neurosurgery. *Front. Surg.* 2023;10:1241923.

131. Chiang S, Levin HS, Haneef Z.

Computer-automated focus lateralization of temporal lobe epilepsy using fMRI. *J. Magn. Reson. Imaging* 2015;41:1689-94.

132. Berg AT, Vickrey BG, Langfitt JT, Sperling MR, Walczak TS, Shinnar S, et al.

The Multicenter Study of Epilepsy Surgery: Recruitment and Selection for Surgery. *Epilepsia* 2003;44:1425-33.

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
والألم والقلق.

وأن أحفظ للناس كرامتهم، وأستر عورتهم، و أكتم
سريهم.

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



الذكاء الاصطناعي وجراحة الدماغ والأعصاب.

الأطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم 2024/11/15

من طرف

السيدة إكرام يشن

المزداة في 22 دجنبر 1999 ب بني ملال

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية:

**الذكاء الاصطناعي-الجراحة الروبوتية-مسار التنظير الداخلي
-الملاحة العصبية**

اللجنة

الرئيس

ع. راجي

السيد

أستاذ في جراحة الأذن والأنف والحنجرة

المشرف

س. أيت بن علي

السيد

أستاذ في جراحة الدماغ والأعصاب

الحكام

ف. ههوجي

السيد

أستاذ في جراحة الدماغ والأعصاب

