



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

Année 2026

Thèse N° 026

Simulation en neurochirurgie : moyens, efficacité et défis.

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 08/01/2026

PAR

M. Othman LMEJJATI

Né Le 25 mars 1999 à Rabat

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS :

Simulation en santé – Neurochirurgie – Laboratoire de simulation

JURY

M. S. AIT BENALI

Professeur de Neurochirurgie

PRÉSIDENT

M. F. HAJHOUI

Professeur Agrégé de Neurochirurgie

RAPPORTEUR

M. M. AMINE

Professeur d'Epidémiologie et de Santé publique

M. H. GHANNANE

Professeur de Neurochirurgie

M. R. EL ADIB

Professeur d'Anesthésie-Réanimation

JUGES

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قُلْ لِّمَن نَّعْبُدُ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ



SERMENT DE GENÈVE

*Adopté par l'Assemblée générale de l'Association Médicale Mondiale
à Genève, Suisse, septembre 1948*

AU MOMENT D'ÊTRE ADMIS AU NOMBRE DES MEMBRES DE
LA PROFESSION MÉDICALE :

*Je prends l'engagement solennel de consacrer ma vie au
service de l'Humanité.*

*Je garderai à mes maîtres le respect et la reconnaissance
qui leur sont dus.*

J'exercerai mon art avec conscience et dignité.

*Je considérerai la santé de mon patient comme mon pre-
mier souci.*

Je respecterai le secret de celui qui se sera confié à moi.

*Je maintiendrai, dans toute la mesure de mes moyens,
l'honneur et les nobles traditions de la profession médicale.*

Mes collègues seront mes frères.

*Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de
nation, de race, de parti ou de classe sociale, viennent s'inter-
poser entre mon devoir et mon patient.*

*Je garderai le respect absolu de la vie humaine, dès la
conception.*

*Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de
mes connaissances médicales contre les lois de l'Humanité.*

Je fais ces promesses solennellement, librement, sur l'honneur.

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 ZIRAOU
Secrétaire Générale : Mr. Azzeddine EL HOUDAIGUI

LISTE NOMINATIVE DU PERSONNEL ENSEIGNANTS CHERCHEURS PERMANANT

N°	Nom et Prénom	Cadre	Spécialités
01	ZOUHAIR Said (Doyen)	P.E.S	Microbiologie
02	CHOULLI Mohamed Khaled	P.E.S	Neuro pharmacologie
03	BOUSKRAOUI Mohammed	P.E.S	Pédiatrie
04	KHATOURI Ali	P.E.S	Cardiologie
05	NIAMANE Radouane	P.E.S	Rhumatologie
06	AIT BENALI Said	P.E.S	Neurochirurgie
07	KRATI Khadija	P.E.S	Gastro-entérologie
08	SOUMMANI Abderraouf	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
09	RAJI Abdelaziz	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
10	SARF Ismail	P.E.S	Urologie
11	MOUTAOUAKIL Abdeljalil	P.E.S	Ophtalmologie
12	AMAL Said	P.E.S	Dermatologie
13	ESSAADOUNI Lamiaa	P.E.S	Médecine interne

14	MANSOURI Nadia	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
15	MOUTAJ Redouane	P.E.S	Parasitologie
16	AMMAR Haddou	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
17	CHAKOUR Mohammed	P.E.S	Hématologie biologique
18	EL FEZZAZI Redouane	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
19	YOUNOUS Said	P.E.S	Anesthésie-réanimation
20	BENELKHAIAT BENOMAR Ridouan	P.E.S	Chirurgie générale
21	ASMOUKI Hamid	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
22	BOUMZEBRA Drissi	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
23	CHELLAK Saliha	P.E.S	Biochimie-chimie
24	LOUZI Abdelouahed	P.E.S	Chirurgie-générale
25	AIT-SAB Imane	P.E.S	Pédiatrie
26	GHANNANE Houssine	P.E.S	Neurochirurgie
27	OULAD SAIAD Mohamed	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
28	DAHAMI Zakaria	P.E.S	Urologie
29	EL HATTAOUI Mustapha	P.E.S	Cardiologie
30	AMINE Mohamed	P.E.S	Epidémiologie clinique
31	EL ADIB Ahmed Rhassane	P.E.S	Anesthésie-réanimation
32	ELFIKRI Abdelghani	P.E.S	Radiologie
33	ARSALANE Lamiae	P.E.S	Microbiologie-virologie
34	KAMILI El Ouafi El Aouni	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
35	MAOULAININE Fadl mrabih rabou	P.E.S	Pédiatrie (Néonatalogie)
36	MATRANE Aboubakr	P.E.S	Médecine nucléaire
37	ADMOU Brahim	P.E.S	Immunologie
38	CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	P.E.S	Radiologie
39	MANOUDI Fatiha	P.E.S	Psychiatrie
40	BOURROUS Monir	P.E.S	Pédiatrie
41	TASSI Noura	P.E.S	Maladies infectieuses
42	NEJMI Hicham	P.E.S	Anesthésie-réanimation
43	LAOUAD Inass	P.E.S	Néphrologie
44	FOURAIJI Karima	P.E.S	Chirurgie
45	BOUKHIRA Abderrahman	P.E.S	Biochimie-chimie
46	KHALLOUKI Mohammed	P.E.S	Anesthésie-réanimation

47	BSISS Mohammed Aziz	P.E.S	Biophysique
48	EL OMRANI Abdelhamid	P.E.S	Radiothérapie
49	SORAA Nabila	P.E.S	Microbiologie-virologie
50	KHOUCHANI Mouna	P.E.S	Radiothérapie
51	JALAL Hicham	P.E.S	Radiologie
52	EL ANSARI Nawal	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
53	AMRO Lamyae	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
54	OUALI IDRISSE Mariem	P.E.S	Radiologie
55	ZAHLANE Mouna	P.E.S	Médecine interne
56	BENJILALI Laila	P.E.S	Médecine interne
57	NARJIS Youssef	P.E.S	Chirurgie générale
58	RABBANI Khalid	P.E.S	Chirurgie générale
59	SAMLANI Zouhour	P.E.S	Gastro-entérologie
60	LAGHMARI Mehdi	P.E.S	Neurochirurgie
61	ABOUSSAIR Nisrine	P.E.S	Génétique
62	BENCHAMKHA Yassine	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
63	CHAFIK Rachid	P.E.S	Traumato-orthopédie
64	ABKARI Imad	P.E.S	Traumato-orthopédie
65	EL BOUIHI Mohamed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
66	LAKMICHI Mohamed Amine	P.E.S	Urologie
67	AGHOUTANE El Mouhtadi	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
68	HOCAR Ouafa	P.E.S	Dermatologie
69	EL KARIMI Saloua	P.E.S	Cardiologie
70	EL BOUCHTI Imane	P.E.S	Rhumatologie
71	QAMOUSS Youssef	P.E.S	Anesthésie réanimation
72	ZYANI Mohammad	P.E.S	Médecine interne
73	QACIF Hassan	P.E.S	Médecine interne
74	BEN DRISS Laila	P.E.S	Cardiologie
75	MOUFID Kamal	P.E.S	Urologie
76	EL BARNI Rachid	P.E.S	Chirurgie générale
77	KRIET Mohamed	P.E.S	Ophtalmologie
78	BOUCHENTOUF Rachid	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
79	ABOUCHADI Abdeljalil	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale

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

113	BENALI Abdeslam	P.E.S	Psychiatrie
114	MLIHA TOUATI Mohammed	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
115	MARGAD Omar	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
116	KADDOURI Said	P.E.S	Médecine interne
117	ZEMRAOUI Nadir	P.E.S	Néphrologie
118	EL KHADER Ahmed	P.E.S	Chirurgie générale
119	DAROUASSI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
120	BENJELLOUN HARZIMI Amine	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
121	FAKHRI Anass	P.E.S	Histologie-embyologie cytogénétique
122	SALAMA Tarik	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
123	CHRAA Mohamed	P.E.S	Physiologie
124	ZARROUKI Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
125	AIT BATAHAR Salma	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
126	ADARMOUCH Latifa	P.E.S	Médecine communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
127	BELBACHIR Anass	P.E.S	Anatomie pathologique
128	HAZMIRI Fatima Ezzahra	P.E.S	Histologie-embyologie cytogénétique
129	EL KAMOUNI Youssef	P.E.S	Microbiologie-virologie
130	EL MEZOUARI El Mostafa	P.E.S	Parasitologie mycologie
131	SERGHINI Issam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
132	ABIR Badreddine	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
133	GHAZI Mirieme	P.E.S	Rhumatologie
134	ZIDANE Moulay Abdelfettah	P.E.S	Chirurgie thoracique
135	LAHKIM Mohammed	P.E.S	Chirurgie générale
136	MOUHSINE Abdelilah	P.E.S	Radiologie
137	TOURABI Khalid	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
138	ARABI Hafid	P.E.S	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
139	BELHADJ Ayoub	P.E.S	Anesthésie-réanimation
140	BOUZERDA Abdelmajid	P.E.S	Cardiologie
141	ABDELFETTAH Youness	P.E.S	Rééducation et réhabilitation fonctionnelle
142	REBAHI Houssam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
143	BENNAOUI Fatiha	P.E.S	Pédiatrie

144	ZOUIZRA Zahira	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
145	SEBBANI Majda	P.E.S	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
146	FENANE Hicham	Pr Ag	Chirurgie thoracique
147	ABDOU Abdessamad	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
148	HAMMOUNE Nabil	P.E.S	Radiologie
149	ESSADI Ismail	P.E.S	Oncologie médicale
150	ALJALIL Abdelfattah	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
151	LAFFINTI Mahmoud Amine	P.E.S	Psychiatrie
152	RHARRASSI Issam	P.E.S	Anatomie-pathologique
153	ASSERRAJI Mohammed	P.E.S	Néphrologie
154	JANAH Hicham	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
155	NASSIM SABAH Taoufik	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
156	ELBAZ Meriem	P.E.S	Pédiatrie
157	SEDDIKI Rachid	P.E.S	Anesthésie-réanimation
158	BELGHMAIDI Sarah	Pr Ag	Ophtalmologie
159	GEBRATI Lhoucine	MC Hab	Chimie
160	FDIL Naima	MC Hab	Chimie de coordination bio-organique
161	LOQMAN Souad	MC Hab	Microbiologie et Toxicologie
162	BAALLAL Hassan	Pr Ag	Neurochirurgie
163	BELFQUIH Hatim	Pr Ag	Neurochirurgie
164	AKKA Rachid	Pr Ag	Gastro-entérologie
165	BABA Hicham	Pr Ag	Chirurgie générale
166	MAOUJOUD Omar	Pr Ag	Néphrologie
167	SIRBOU Rachid	Pr Ag	Médecine d'urgence et de catastrophe
168	DAMI Abdallah	Pr Ag	Médecine Légale
169	AZIZ Zakaria	Pr Ag	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
170	ELOUARDI Youssef	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
171	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Pr Ag	Hématologie clinique
172	NASSIH Houda	Pr Ag	Pédiatrie
173	LAHMINI Widad	Pr Ag	Pédiatrie
174	BENANTAR Lamia	Pr Ag	Neurochirurgie
175	EL FADLI Mohammed	Pr Ag	Oncologie médicale

176	AIT ERRAMI Adil	Pr Ag	Gastro-entérologie
177	CHETTATI Mariam	Pr Ag	Néphrologie
178	BOUTAKIOUTE Badr	Pr Ag	Radiologie
179	SAYAGH Sanae	Pr Ag	Hématologie
180	EL FAKIRI Karima	Pr Ag	Pédiatrie
181	EL FILALI Oualid	Pr Ag	Chirurgie Vasculaire périphérique
182	EL- AKHIRI Mohammed	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
183	HAJJI Fouad	Pr Ag	Urologie
184	JALLAL Hamid	Pr Ag	Cardiologie
185	ZBITOU Mohamed Anas	Pr Ag	Cardiologie
186	RAISSI Abderrahim	Pr Ag	Hématologie clinique
187	EL HAKKOUNI Awatif	Pr Ag	Parasitologie mycologie
188	ACHKOUN Abdessalam	Pr Ag	Anatomie
189	DARFAOUI Mouna	Pr Ag	Radiothérapie
190	EL-QADIRY Rabiyy	Pr Ag	Pédiatrie
191	ELJAMILI Mohammed	Pr Ag	Cardiologie
192	HAMRI Asma	Pr Ag	Chirurgie Générale
193	ELATIQL Oumkeltoum	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
194	BENZALIM Meriam	Pr Ag	Radiologie
195	ABOULMAKARIM Siham	Pr Ag	Biochimie
196	LAMRANI HANCHI Asmae	Pr Ag	Microbiologie-virologie
197	HAJHOULI Farouk	Pr Ag	Neurochirurgie
198	EL KHASSOUI Amine	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
199	CHAHBI Zakaria	Pr Ag	Maladies infectieuses
200	MEFTAH Azzelarab	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
201	BELLASRI Salah	Pr Ag	Radiologie
202	ATMANI Noureddine	Pr Ag	Chirurgie Cardio-vasculaire
203	AABBASSI Bouchra	Pr Ag	Pédopsychiatrie
204	DOUIREK Fouzia	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
205	SAHRAOUI Houssam Eddine	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
206	RHEZALI Manal	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
207	ABALLA Najoua	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
208	MOUGUI Ahmed	Pr Ag	Rhumatologie

209	ZOUITA Btissam	Pr Ag	Radiologie
210	HAZIME Raja	Pr Ag	Immunologie
211	SALLAHI Hicham	Pr Ag	Traumatologie-orthopédie
212	BENCHAFAI Ilias	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
213	EL JADI Hamza	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
214	AZAMI Mohamed Amine	Pr Ag	Anatomie pathologique
215	FASSI Fihri Mohamed jawad	Pr Ag	Chirurgie générale
216	CHETOUI Abdelkhalek	Pr Ag	Cardiologie
217	ROUKHSI Redouane	Pr Ag	Radiologie
218	ARROB Adil	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
219	MOULINE Souhail	Pr Ag	Microbiologie-virologie
220	AZIZI Mounia	Pr Ag	Néphrologie
221	BOUHAMIDI Ahmed	Pr Ag	Dermatologie
222	YANISSE Siham	Pr Ag	Pharmacie galénique
223	KHALLIKANE Said	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
224	ZIRAOUI Oualid	Pr Ag	Chimie thérapeutique
225	IDALENE Malika	Pr Ag	Maladies infectieuses
226	LACHHAB Zineb	Pr Ag	Pharmacognosie
227	ABOUDOURIB Maryem	Pr Ag	Dermatologie
228	AHBALA Tariq	Pr Ag	Chirurgie générale
229	EL AOUMAME Amal	Pr Ag	Orthodontie et orthopédie dento-faciale
230	WARDA Karima	MCHab	Microbiologie
231	SBAI Asma	MCHab	Informatique
232	ABISSY Meriem	MC	Microbiologie
233	SLIOUI Badr	MC	Radiologie
234	CHEGGOUR Mouna	MC	Biochimie
235	BELARBI Marouane	MC	Néphrologie
236	EL AMIRI My Ahmed	MC	Chimie de Coordination bio-organique
237	LALAOUI Abdessamad	MC	Pédiatrie
238	ESSAFTI Meryem	MC	Anesthésie-réanimation
239	RACHIDI Hind	MC	Anatomie pathologique
240	FIKRI Oussama	MC	Pneumo-phtisiologie
241	EL HAMDIOUI Omar	MC	Toxicologie

242	EL HAJJAMI Ayoub	MC	Radiologie
243	BOUMEDIANE El Mehdi	MC	Traumato-orthopédie
244	RAFI Sana	MC	Endocrinologie et maladies métaboliques
245	JEBRANE Ilham	MC	Pharmacologie
246	LAKHDAR Youssef	MC	Oto-rhino-laryngologie
247	LGHABI Majida	MC	Médecine du Travail
248	AIT LHAJ El Houssaine	MC	Ophtalmologie
249	RAMRAOUI Mohammed-Es-said	MC	Chirurgie générale
250	EL MOUHAFID Faisal	MC	Chirurgie générale
251	AHMANNNA Hussein-choukri	MC	Radiologie
252	AIT M'BAREK Yassine	MC	Neurochirurgie
253	ELMASRIOUI Joumana	MC	Physiologie
254	FOURA Salma	MC	Chirurgie pédiatrique
255	LASRI Najat	MC	Hématologie clinique
256	BOUKTIB Youssef	MC	Radiologie
257	MOUROUTH Hanane	MC	Anesthésie-réanimation
258	BOUZID Fatima zahrae	MC	Génétique
259	MRHAR Soumia	MC	Pédiatrie
260	QUIDDI Wafa	MC	Hématologie
261	BEN HOUMICH Taoufik	MC	Microbiologie-virologie
262	FETOUI Imane	MC	Pédiatrie
263	FATH EL KHIR Yassine	MC	Traumato-orthopédie
264	NASSIRI Mohamed	MC	Traumato-orthopédie
265	AIT-DRISS Wiam	MC	Maladies infectieuses
266	AIT YAHYA Abdelkarim	MC	Cardiologie
267	DIANI Abdelwahed	MC	Radiologie
268	AIT BELAID Wafae	MC	Chirurgie générale
269	ZTATI Mohamed	MC	Cardiologie
270	HAMOUCHE Nabil	MC	Néphrologie
271	ELMARDOULI Mouhcine	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
272	BENNIS Lamiae	MC	Anesthésie-réanimation
273	BENDAOUZ Layla	MC	Dermatologie
274	HABBAB Adil	MC	Chirurgie générale

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

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

341	SAADOUNE Mohamed	MC	Radiothérapie
342	TLEMCANI Younes	MC	Ophtalmologie
343	SOLEH Abdelwahed	MC	Traumato-orthopédie
344	OUALHADJ Hamza	MC	Immunologie
345	BERGHALOUT Mohamed	MC	Psychiatrie
346	EL BARAKA Soumaya	MC	Chimie analytique-bromatologie
347	KARROUMI Saadia	MC	Psychiatrie
348	EL-OUAKHOUMI Amal	MC	Médecine interne
349	AJMANI Fatima	MC	Médecine légale
350	ZOUITEN Othmane	MC	Oncologie médicale
351	MENJEL Imane	MC	Pédiatrie
352	BOUCHKARA Wafae	MC	Gynécologie-obstétrique
353	ASSEM Oualid	MC	Pédiatrie
354	ELHANAFI Asma	MC	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
355	ABDELKHALKI Mohamed Hicham	MC	Gynécologie-obstétrique
356	ELKASSEH Mostapha	MC	Traumato-orthopédie
357	EL OUAZZANI Meryem	MC	Anatomie pathologique
358	HABBAB Mohamed	MC	Traumato-orthopédie
359	KHAMLIJ Aimad Ahmed	MC	Anesthésie-réanimation
360	EL KHADRAOUI Halima	MC	Histologie-embryologie-cyto-génétique
361	ELKHETTAB Fatimazahra	MC	Anesthésie-réanimation
362	SIDAYNE Mohammed	MC	Anesthésie-réanimation
363	ZAKARIA Yasmina	MC	Neurologie
364	BOUKAIDI Yassine	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
365	NABIL Mehdi	MC	Anesthésie-réanimation
366	KAAKOUA Mohamed	MC	Oncologie médicale
367	FIQHI Mohammed Kamal	MC	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
368	BEN ELHEND Salah	MC	Radiologie
369	KHERRAB Anass	MC	Rhumatologie
370	AWATI El Mehdi	MC	Hématologie
371	HAOUANE Mohamed Amine	MC	Anatomie pathologique
372	BOUABBADI Salah eddine	MC	Ophtalmologie

373	MOUNIR Reda	MC	Chirurgie Cardio-vasculaire
374	AHCHOUGH Siham	MC	Hématologie clinique
375	AZRIOUIL Ouhb	MC	Traumato-orthopédie
376	CHALOUAH Badr	MC	Traumato-orthopédie
377	EL BEJAJ latimad	MC	Anatomie pathologique
378	BABA Zineb	MC	Rhumatologie
379	OUSSAYEH Imane	MC	Anesthésie-réanimation
380	KASSAL Ghizlane	MC	Pédiatrie Néonatalogie
381	RACHID Chayneze	MC	Pneumo-phtisiologie
382	BALILI Khaoula	MC	Neurologie
383	IGARRAMEN Tariq	MC	Biophysique
384	EL MAGHTOUM Hicham	MC	Anesthésie-réanimation
385	KAOUANI Douaa	MC	Pédiatrie
386	ESSOLI Samira	MC	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
387	HABCHANE Amal	MC	Pharmacologie
388	CHARIK Mohamed Amine	MC	Cardiologie
389	MEZDID Chaymae	MC	Anatomie
390	ROUHI Salma	MC	Hématologie
391	EL OUARRADI Assia	MC	Microbiologie-virologie
392	JOULAL Hajar	MC	Médecine interne

Liste arrêtée le 25/11/2025



*« 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 ...



**Avant toute chose, je remercie Allah,
Le Tout-Puissant et l'Infiniment Miséricordieux,
Qui m'a donné la force, la patience et la persévérance pour accomplir ce
travail.**

**Par Sa volonté, Il m'a éclairé, inspiré et guidé tout au long de mon
parcours.**

À Lui revient tout le mérite de ce que je suis devenu aujourd'hui.

**Je Lui adresse mes plus profondes louanges et ma sincère
reconnaissance pour Sa bonté et Sa miséricorde infinie.**

Qu'Il nous guide toujours vers le droit chemin.

**اللهم لك الحمد حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، عدد خلقك ورضا نفسك وزنة عرشك ومداد كلماتك،
اللهم لك الحمد ولك الشكر حتى ترضى، ولك الحمد إذا رضيت، ولك الحمد بعد الرضا،
حمداً دائماً وأبداً على نعمك .**

À la mémoire de mes très chers grands-parents :
M. Lmejjati Brik, Mme Ben Hmad Fatima et M. Lamrhari Sidi Bouchta,
Qui ont toujours occupé une place précieuse dans mon esprit et dans mon
cœur,
Je vous dédie aujourd'hui ce travail avec une profonde émotion.
Que Dieu, Le Très Miséricordieux, vous accueille en Son éternel paradis
Et vous accorde Sa sainte miséricorde.

À mes très chers parents, Lamrhari Lalla Ouidad et Lmejjati Mohamed

À qui je dois tout,
Aucune dédicace ne saurait exprimer l'intensité de mon amour,
Ni la profondeur de ma gratitude et de ma reconnaissance
Pour les sacrifices innombrables et les épreuves que vous avez endurés
Pour mon éducation et mon bien-être.

Vous n'avez jamais cessé de vous battre pour moi,
Et vos prières ont été un soutien précieux tout au long de mon parcours.

Ce modeste travail, qui est avant tout le vôtre,
N'est que l'aboutissement de vos efforts inlassables
Et de vos immenses sacrifices.

Sans vous, je n'aurais jamais pu arriver là où je suis aujourd'hui.
J'espère de tout cœur rester toujours digne de votre confiance et de votre
fierté.

Puisse Allah, Le Tout-Puissant, vous préserver de tout mal,
Vous accorder santé, bonheur et une longue vie pleine de sérénité.

Que Dieu vous bénisse.
Je vous aime profondément.

À ma soeur Zainab Lmejjati,

À ma meilleure amie,

À qui je dois tant, dans ce que je suis comme dans ce que j'accomplis

Tu as toujours été là, dans les moments de doute comme dans les instants
de joie.

Sans toi, je ne serais pas arrivée jusque-là.

Merci pour tout. Je t'aime infiniment.

À mon frère Youssef Lmejjati,

Je ne pourrai jamais te remercier à la hauteur de tout ce que tu as fait pour
moi, et de tout ce que tu continues de faire chaque jour. Ta présence à mes
côtés a été bien plus qu'un simple soutien : elle a été une véritable source
de force, de motivation et d'inspiration.

Tu n'es pas seulement une personne qui m'a aidé à avancer, tu es celui qui
a contribué à façonner la meilleure version de moi-même. Grâce à toi, j'ai
appris à croire en mes capacités et à persévérer, même dans les moments
les plus difficiles.

Je t'aime profondément.

À ma grand-mère Touria Mouqtaside,

Pilier discret mais profondément essentiel de ma vie, tu as été une présence constante, douce et rassurante à chaque étape de mon parcours.

Ta tendresse infinie et ta sagesse ont guidé chacun de mes pas, même dans les moments où je doutais de moi-même.

Merci pour ton amour inconditionnel, pour ta bienveillance silencieuse, et pour la confiance que tu m'as accordée bien avant que je ne sois capable de croire en moi. Ta douceur, ton courage et ta force tranquille ont été pour moi une source d'inspiration inestimable.

Tes prières, sincères et précieuses, m'ont accompagné tout au long de ce chemin et continuent de m'éclairer chaque jour.

Aux familles Lmejjati, Lamrhari et Mouqtaside,

À la famille de ma mère, source de chaleur et de bienveillance, qui a bercé mon enfance et nourri mes ambitions. Merci pour vos paroles réconfortantes et votre confiance indéfectible.

À la famille de mon père, pour les valeurs de rigueur, d'humilité et de persévérance que vous m'avez transmises, ainsi que pour votre soutien constant.

Merci à vous tous pour votre présence et votre affection, qui ont été un véritable moteur dans l'accomplissement de ce travail.

A moi

More Life.

More time with family and friends. More Life.

I've still got vibrations to send. More Life.

They say that we could live forever

At night I pray it's true

I've done so much in my short time and still there's more to do

But if someone should come collecting

Sooner than we're all expecting

At least the life you lived was one for you.

À mes très chères amies Dr Sabir Mona et Dr Amraine Kenza,

À mes amies les plus proches, celles qui ont su accueillir mes doutes, célébrer mes joies et comprendre mes silences sans jamais avoir besoin de mots. Vous rencontrer a été aussi inattendu que précieux, un véritable cadeau du destin. Je remercie Dieu d'avoir croisé nos chemins au service de Psychiatrie, un lieu que je n'aurais jamais imaginé marquer aussi profondément mon parcours. Le CPU restera à jamais significatif grâce à vous.

À toi, Mona, notre hibou

Ta présence a été une source constante d'apaisement et de lucidité. Dans les moments d'incertitude, tu savais trouver les mots justes, et dans les périodes les plus exigeantes, ta sérénité m'a permis de garder le cap. Ton écoute, ta douceur et ta capacité à comprendre au-delà des mots ont été pour moi d'un réconfort inestimable. Tu as cette force discrète qui rassure et élève, et je te serai toujours reconnaissante pour cela.

À toi, Kenza, notre zèbre

Tu as été une véritable énergie, une lumière dans les moments les plus intenses de ce parcours. Ta bienveillance, ton enthousiasme et ta présence rayonnante ont transformé les instants les plus difficiles en souvenirs empreints de chaleur. Dans mes moments d'épuisement, tu étais ma force, et dans mes joies, mon plus grand écho. Ta générosité et ta sincérité ont marqué mon chemin d'une empreinte indélébile.

Votre soutien indéfectible, votre compassion et votre présence à chaque étape de ce parcours ont laissé une trace bien plus profonde que les mots ne peuvent l'exprimer. Vous êtes gravées dans mon cœur et vous y resterez pour toujours, comme un rappel que les plus belles rencontres naissent souvent là où on s'y attend le moins.

مرحبا ببيبيك.

To my very dear friend Karakhi Badr

To one of the greatest gifts life has ever given me. To the man, the myth, the legend. The one who somehow managed to be both my biggest critic and my biggest supporter at the exact same time—and always when I needed it most.

You have been far more than just a friend throughout this journey. You were my anchor in moments of doubt, my voice of reason when things felt uncertain, and my constant reminder to stay grounded and keep going. You corrected me without ever bringing me down, pushed me when I needed it, and supported me with a loyalty and sincerity that I will never take for granted.

Your presence made even the hardest moments lighter. Your honesty kept me on track, your humor kept me sane, and your unwavering support gave me the strength to move forward, even when I felt like I couldn't. I truly would not be here without you.

This achievement carries a part of you in it.

This one is for you.

We could bear bears, we could beat the dancers... but we will never beat the Dreglord. (We eventually did, two days before this)

À mes très chers amis Benzattat Aymane et Laaouissi Yassine,

To my buddies from the very start, the ones who have been there through it all. From the very first steps of this journey to where we stand today, we have shared every high and every low, every doubt and every small victory. And somehow, no matter what came our way, we always found a way to push through—together.

You've been more than just friends; you've been constants, pillars, and brothers in every sense of the word. Through chaos, stress, laughter, and unforgettable moments, you made this journey lighter, louder, and infinitely more meaningful.

And honestly, if the Essaouira ride with Gnawa music blasting didn't kill us, I don't know what will. That memory alone says everything about us

Thank you for everything. For the memories, the support, and the bond that time will never break.

À ma très chère amie Dr Erroussafi Kenza,

We've known each other for so long that our memories feel like an inseparable part of who we are. Over the years, time and distance have come and gone, but the bond we've built has only grown stronger, deeper, and more meaningful.

With time, I've come to appreciate you even more—not just for who you are, but for everything we've shared and everything we've silently understood without needing to explain. Through different phases of life, you've remained a steady presence, a familiar comfort, and a constant reminder of what true friendship means.

No matter where life takes us, I know this bond will always remain a steady part of my journey.

You know the drill... a bit too well, I guess.

À ma très chère amie Dr Khouiammi Hiba,

For all the years I've known you, and for all the chaos I may have brought along the way, thank you for always staying true to yourself and for standing by me through every high and low.

Thank you for bearing with me with so much patience, for keeping me in check when needed, and for always managing to support me in ways that made a real difference. Your presence has been a grounding force, and your encouragement often came exactly when I needed it most.

Thank you for the laughter, for the self-confidence boosts, and for making even the most exhausting moments feel lighter just by being there. I truly couldn't have gone through this journey without your humor and your energy.

And of course... thank you for introducing me to the best series I have ever watched.

Papel Higiénico.

À mon très cher ami, Dr Ouajahat Filali Salmane,

À mon ami, visage familier du foyer des internes et du CPU, devenu au fil du temps bien plus qu'une simple présence du quotidien. Tu as été un soutien précieux durant mes moments les plus difficiles, aussi bien sur le plan professionnel que personnel, toujours présent avec discrétion mais avec une efficacité et une sincérité rares.

Dans les périodes de doute et de fatigue, tu savais apporter ce qu'il fallait : un mot, un conseil, ou simplement ta présence rassurante. Tu fais partie de ces personnes sur qui l'on peut compter sans hésiter, et cela a fait toute la différence dans ce parcours.

Tu es, sans aucun doute, l'exemple même de l'esprit indomptable : persévérant, solide, et toujours debout face aux défis. Ta force tranquille et ta détermination forcent le respect et inspirent tous ceux qui ont la chance de te connaître.

واش نتا هوا الطبيب

À mon très cher ami, Dr Alaoui Anas,

To a remarkable man, and a true friend from the very beginning of this journey until its very end. You have been there through every step, every challenge, and every exhausting shift, turning what could have been overwhelming into something we faced together.

We could run away from intensive care, we could escape heavy workloads and endless shifts, we could choose the easier path at so many moments. But somehow, we never did. And instead, we stood through it all—together—learning, enduring, and growing in the process.

This year spent side by side has taught me more than any textbook ever could about what true brotherhood and friendship really mean. Loyalty, resilience, shared exhaustion, shared laughter in the middle of chaos... it all shaped something I will never forget.

Oh my God, man.

À ma très chère amie Dr Baggar Hind,

À l'interne de toutes les années de mon internat, celle qui a traversé ce parcours avec une constance et une gentillesse remarquables. Ta bienveillance et ton dévouement sont incomparables, et laissent une empreinte profonde dans le cœur de tous ceux qui ont eu la chance de travailler à tes côtés.

Je ne garde que de précieux souvenirs de nos gardes interminables et innombrables, de ces nuits longues qui semblaient sans fin mais que ta présence rendait toujours plus supportables. Je me considère chanceuse de t'avoir connue et d'avoir partagé autant de moments, parfois difficiles, souvent mémorables, toujours sincères.

Tu es le symbole même de la résilience et de la bonté humaine. Tu mérites mieux—en réalité, tu mérites tout ce que la vie peut offrir de plus beau et de plus doux.

You might be weak on the ankles, but you've got a strong heart.

À ma très chère amie Dr Chgora Salma

À une personne dont la gentillesse semble naturelle et infinie, et dont la générosité du cœur ne passe jamais inaperçue. Tu fais partie de ces rares âmes qui donnent sans attendre en retour, toujours prête à aider, à écouter et à tendre la main avec une bienveillance sincère.

Ta douceur et ta présence rappellent la grâce silencieuse des chats : calmes, apaisants, et réconfortants sans effort. Comme eux, tu apportes de la sérénité aux lieux que tu traverses et de la chaleur aux personnes qui ont la chance de te connaître.

Merci d'être cette personne si gentille, si serviable et profondément bienveillante. Le monde est plus doux avec toi en son sein.

À mon ami Ghouati Hicham,

To one of the rare constants in an environment we often jokingly call “hell,” but which would have been far more unbearable without your presence. Among long days, heavy workloads, and endless pressure, you remained one of the few genuinely good souls—steady, reliable, and always unexpectedly uplifting.

You have this quiet way of making difficult moments lighter, whether through your humor, your attitude, or simply your presence. In a place where exhaustion often wins, you managed to stay grounded and human, and that in itself is something rare.

I’m grateful for the support, the shared struggles, and all those small moments that made the hardest days easier to survive.

And honestly... you’d be even better if you stopped listening to Justin Bieber.

À Mme Amani Amina,

À ma deuxième mère, et la maman de tous les internes. Le visage chaleureux et toujours souriant du foyer des internes, dont la présence a toujours su transformer ce lieu en un véritable espace de réconfort et d’humanité.

Je n’aurais jamais pu imaginer ce foyer sans toi. Tu es cette constante discrète mais essentielle qui adoucit les journées les plus difficiles, qui apaise les fatigues accumulées et qui rend les moments de stress plus supportables par ta seule présence.

Je ne te dois que du respect et une profonde reconnaissance pour tout ce que tu fais, visible ou invisible, jour après jour. Ta gentillesse, ta patience et ta générosité de cœur laissent une empreinte durable chez tous les internes.

Merci pour tout.

À ma chère amie et marraine Dr M'Hamdi Hala,

To one of the most beautiful surprises of CPU. I could not be more grateful and honored to have been supervised by you. Your guidance, your thoughtful remarks, and your constant support have profoundly shaped not only the intern I am today, but also the doctor I am becoming.

You were always welcoming, deeply understanding, and remarkably patient. You listened without judgment, even during my longest rants, and turned stressful moments into something lighter and more bearable. And of course, I will never forget the countless cups of tea we shared—simple moments that somehow became some of the most comforting memories of this journey.

I am forever grateful to you. You will always have a friend in me for as long as I stand.

And if 2025 was method acting... then we truly deserve an award, because we played our roles exceptionally well.

À ma chère amie et marraine Dr Alaoui El Hassani Zineb

To the kindest of all residents, and one of the most supportive and caring people I have had the chance to meet. Your presence throughout this journey has been a quiet but powerful form of reassurance, always steady, always sincere.

To be so humble, so available, and so genuinely encouraging is something truly exceptional—and you were, without a doubt, exceptional. You showed me that reaching the end of residency does not mean becoming distant or indifferent, but rather remaining present, grounded, and human despite everything.

Your support, your guidance, and your kindness have left a lasting impact on me, and I carry my deepest and eternal gratitude for everything you have given throughout this journey.

And honestly... the way you write your patient interviews, you could easily give Christopher Nolan a run for his money in scriptwriting.

À ma chère amie et maître Dr Bellaftouh Salma,

A la meilleure des anciennes, and undoubtedly one of the smartest and most competent doctors I have had the privilege to learn from. You have left a lasting mark on me, and I find myself inspired by you on a daily basis, both in the way you practice and in the way you carry yourself.

You have always been generous with your advice, taking the time to teach, to guide, and to share your knowledge with patience and kindness. You had the humility to forgive my mistakes, and the wisdom to correct them gently, in a way that helped me grow rather than feel diminished.

You are a powerful example of someone who has faced a lot, yet managed to remain kind, grounded, and strong. Through it all, you've kept your integrity and your heart intact—and that is perhaps your greatest strength.

You have a truly good heart, and I am deeply grateful to have learned from you.

And to the people who stole our pills... I hope they're happy.

À mon cher ami et maître, Dr Hamdi Youness,

To a great man, whose presence and leadership transformed the Emergency ICU into a place not only of intense work, but also of growth, learning, and professional fulfillment. Achieving this is no small task, and it reflects the depth of your commitment and vision.

You will forever be more than a mentor to me—you are a friend, and in many ways, a second father. The countless shifts we shared will remain deeply engraved in my memory, marked by both the most challenging and the most memorable moments of this journey. Together, we have set many “records,” some admirable, others simply unforgettable, but all part of a shared experience that shaped us.

The Anesthesia and ICU department, as well as all the residents of intensive care—including myself—will always remain grateful for your guidance, your leadership, and your impact.

البقاء للأقوى.

À ma chère amie Dr El Baz Souhaila,

To one hell of a woman. The perfect balance between assertiveness and gentleness. Your opinions are... unique, to say the least, and our heated debates always left me with a different perspective, even when I didn't want to admit it at first.

Every time I brought tea, it was never just for me—it was always meant to be shared with you.

À ma chère amie Dr Fettach Siham,

To my favorite colleague and now a true friend. You are dependable, genuine, and consistently present in the most meaningful way. What always surprises me is how deeply you care, and how much effort you invest in your relationships and the people around you. I truly appreciate you.

Wach konti tensani?

À ma chère amie Dr Hayat Jaaidane,

To the kindest soul of CPU. I sincerely hope you never change.

À mes chères Professeures Pr. Maha Belabdi et Pr. Attouche Nadia,

Vous avez chacune contribué, avec finesse, exigence et humanité, à ma construction personnelle et professionnelle. Vous faites partie de ces premiers Professeurs qui ont su, paradoxalement, me faire douter de mon choix de spécialité—mais de cette manière qui fait grandir, réfléchir et évoluer.

Je vous remercie d'avoir rendu mon passage d'internat l'un des plus marquants de toute ma carrière. Vous êtes des figures d'excellence, alliant succès et humilité avec une admirable constance. Vos éclairages, votre bienveillance, vos enseignements et la confiance que vous m'avez accordée ont été des repères essentiels tout au long de ce parcours.

Vous m'avez aidée à grandir autant que ce travail lui-même.

À mes chers Professeurs Pr. Mohamed Mouhaoui et Pr. Mohamad Anas Fehdi,

Vous m'avez accueillie lors de mon premier passage d'internat au service de Réanimation des urgences. Je vous remercie sincèrement pour votre exigence bienveillante, votre disponibilité et votre engagement constant dans la formation des internes.

Vous m'avez montré qu'il est possible d'être rigoureux, juste et humain, quelles que soient les conditions ou la charge de travail. Votre expertise, votre sérieux et votre passion ont profondément façonné ma vision de la médecine et ma manière de l'exercer.

Merci de m'avoir guidée avec autant de justesse.

À ma promotion d'internes 2023 et à l'Association des Internes du CHU Ibn Rochd de Casablanca (AMIC),

À ma promotion, avec qui j'ai partagé les gardes interminables, les moments de doute, les réussites, les épreuves et surtout les éclats de rire. Nous avons grandi ensemble dans un environnement exigeant, parfois difficile, mais profondément formateur. Merci d'avoir rendu ces années inoubliables et toujours portées par une solidarité précieuse.

À l'AMIC, qui a été bien plus qu'une structure : une famille professionnelle et un refuge dans les moments les plus exigeants. L'esprit d'entraide, l'engagement et la bienveillance qui l'animent ont accompagné mon parcours et l'ont rendu plus humain. Merci pour vos efforts constants afin d'améliorer nos conditions d'exercice.

Interne un jour, interne pour toujours.

À tous ceux dont l'oubli de la plume n'est pas celui du cœur,
et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



REMERCIEMENTS



Mon Maître et Rapporteur de thèse :

Professeur Farouk Hajhouji

*Professeur agrégé de Neurochirurgie à l'hôpital Arrazi au
CHU Mohamed VI Marrakech*

*Nous sommes très touchés par l'honneur que vous nous avez
fait en nous confiant ce travail et nous espérons être à la
hauteur. Nous avons toujours trouvé auprès de vous un accueil
très chaleureux.*

*Vous avez sacrifié beaucoup de votre temps pour mener à bout
ce travail, nous sommes très reconnaissants des grands efforts
que vous avez fournis en dirigeant ce travail.*

*Nous avons eu l'occasion d'apprécier vos qualités humaines,
professionnelles et vos qualités d'enseignants qui ont toujours
suscité notre admiration.*

*Veillez trouver dans ce travail le témoignage de notre fidèle
attachement, de notre profonde gratitude et notre haute
estime.*

Notre Maître et Président de thèse :

Professeur Mohamed Ait Ben Ali

*Professeur de l'enseignement supérieur et chef de service de
Neurochirurgie à l'hôpital Arrazi au CHU Mohamed VI
Marrakech*

*Nous vous remercions de l'honneur que vous nous avez fait en
acceptant de présider notre jury. Nous garderons de vous
l'image d'un maître dévoué et serviable, et d'un homme dont la
présence rassure et la parole apaise.*

*Vos connaissances scientifiques et qualités humaines ainsi que
votre modestie nous ont profondément marqué.*

*Veillez trouver ici le témoignage de notre profond respect et
nos remerciements les plus sincères*

A Notre maître et juge de thèse :

Professeur Mohamed Amine

*Professeur de l'enseignement supérieur d'épidémiologie et de
santé publique et Vice Doyen de la Recherche et la Coopération
à la faculté de médecine et de pharmacie de Marrakech*

*C'est pour nous un très grand honneur que vous acceptiez de
siéger parmi notre honorable jury.*

*Vos compétences professionnelles et vos qualités humaines
seront pour nous un exemple dans l'exercice de la profession.*

*Qu'il soit permis de présenter à travers ce travail, le
témoignage de mon grand respect et de ma profonde
considération.*

A Notre maître et juge de thèse

Professeur Rhassane El Adib

*Professeur de l'enseignement supérieur d'anesthésie-
réanimation*

*Nous vous remercions sincèrement pour l'aide précieuse et
incomparable que vous nous avez prodigué.*

*Votre compétence, votre rigueur ont toujours suscité notre
admiration. Veuillez trouver ici, le témoignage de notre haute
considération et de notre sincère respect.*

A Notre maître et juge de thèse

Professeur Ghannane Houssine

Professeur de l'enseignement supérieur de neurochirurgie

C'est un privilège pour nous de vous savoir membre de notre jury, et nous vous remercions sincèrement d'avoir accepté cette responsabilité. Votre parcours, votre expertise et vos valeurs humaines sont pour nous une source d'inspiration et un repère dans l'apprentissage et l'exercice de notre métier.

Par ce travail, nous souhaitons vous adresser l'expression de notre vive gratitude, ainsi que de notre respect le plus profond et de notre haute considération.



Liste des figures

Figure 1 : Schéma du continuum entre réalité et monde virtuel.....	3
Figure 2 : Modalités et typologie de l'entraînement par simulation.....	4
Figure 3 : Pyramide de Miller (2009).	9
Figure 4 : Stades d'acquisition des compétences selon Fitts et Posner (1967).	10
Figure 5: Les quatres niveaux d'évaluation selon Kirkpatrick (1959).	11
Figure 6 : Outil NASA-TLX pour l'auto-estimation de la charge de travail.	12
Figure 7 : Outil de debriefing PEARLS (2017).....	14
Figure 8: Outil de debriefing PEARLS (2017).....	14
Figure 9: Echelle OSATS pour quantifier l'amélioration en terme de compétences techniques.....	15
Figure 10: Score NOTSS pour l'évaluation des compétences et exquies non techniques (2012).	16
Figure 11 : Echelle NOTECHS pour l'évaluation des compétences non techniques globales d'une équipe (1997).	17
Figure 12 : Échelle MERSQI pour l'estimation de la qualité d'une étude scientifique (2007).	19
Figure 13 : Tableau GRADE pour la mesure de la certitude globale d'une preuve scientifique (2000)	20
Figure 14 : Nombre d'articles par an citants les concepts de la simulation et/ou la réalité virtuelle en neurochirurgie.....	29
Figure 15: Panorama général des contributions scientifiques entre les concepts de neurochirurgie et de simulation médicale	30
Figure 16 : Représentation graphique des associations de termes avec l'historique des cooccurrences pour les concepts de simulation médicale, réalité virtuelle et neurochirurgie et ses sous-spécialités jusqu'en 2024.....	30
Figure 17 : modèle de simulation physique: crâne incluant le système ventriculaire utilisé pour mise en place d'une ventriculostomie frontale.....	92
Figure 18 : Modèle de simulation physique de pose d'une DVE: incision (a),	92
Figure 19 : Cathéter ventriculaire ImmersiveTouch mal positionné: hors du système ventriculaire indiqué en rouge sur l'image (a), cathéter mal positionné sous différents angles (b), coupe virtuelle du cerveau en coupes axiale (c) et coronale (d) montrant: la position du cathéter hors de la corne frontale.....	94

Figure 20: Ventriculostomie occipitale ImmersiveTouch: planification incluant le positionnement de la tête (a), l'identification des repères cutanés (b), le trou de trépanation (c), la mise en place du cathéter ventriculaire (d), la coupe virtuelle du cerveau dans le plan sagittal (e) et les plans axiaux (f) identifiant l'emplacement du cathéter dans le système ventriculaire.	95
Figure 21 : Modules de ventriculostomie ImmersiveTouch dans l'anatomie ventriculaire normale (a) hydrocéphalie (b) ventricule déplacé (c) et ventricules très petits (d).....	98
Figure 22 : Images ou schémas de différents types de pompes. Dans le sens horaire, en partant du haut à gauche : une pompe centrifuge, une pompe péristaltique et trois pompes à flux pulsé disponibles dans le commerce : la SuperPump de ViVitro Labs, le Replicator de Vascular Simulations et la CompuFlow de Shelley Medical Imaging Technologies.	102
Figure 23: Images de répliques en silicone souple (de gauche à droite) d'un polygone de Willis, d'une occlusion de l'artère cérébrale moyenne avec injection d'un thrombus synthétique par un « port de caillot », et d'une malformation artério-veineuse.	104
Figure 24 : (À gauche) Image d'un fantôme crânien contenant des répliques vasculaires en suspension dans un gel. Le gel (~35 UH) et le crâne (800–1000 UH) présentent tous deux une atténuation physiologique aux rayons X. (À droite) Angiographie native d'une réplique vasculaire de la carotide commune droite à l'intérieur du crâne.:.....	105
Figure 25 : Après avoir testé plusieurs clips et orientations, le meilleur clip et la meilleure position ont été testés sur un modèle 3D	109
Figure 26 : (a) Modèle d'anévrisme de l'apex basilaire généré par ARM, (b) Modèle d'anévrisme de l'artère cérébrale moyenne généré par ARM, (c) anévrisme imprimé en 3D implanté sur un cadavre	110
Figure 27 : Les résidents répètent l'application du clip sous le microscope sur un modèle 3D.	110
Figure 28 : (a) Abord de la tumeur pétroclivale par la fosse crânienne moyenne, (b) abord rétrosigmoïde de la tumeur, (c) vue de la tumeur à travers le foramen magnum, (d) vue agrandie de la tumeur pétroclivale	112
Figure 29 : (a) Enregistrement du modèle imprimé en 3D, (b) forage du sinus sphénoïdal par endoscopie, (c) identification des différentes structures anatomiques par endoscopie, (d) exercices de navigation endoscopique par les résidents et internes ..	113
Figure 30 : (a) Mise en place des vis de masse latérale dans le modèle imprimé en 3D, (b) vue latérale et (c) vue postérieure du modèle imprimé en 3D après instrumentation cervico-thoracique	114

Figure 31: Pratique de la microchirurgie vasculaire sur un modèle de placenta pendant la formation en pontage à l'Institut neurologique Barrow	118
Figure 32 : Modèle d'aile de dinde pour la pratique de la microchirurgie vasculaire. (a) Vue d'ensemble de l'artère disséquée. (b) Anastomose termino-latérale réalisée.	119
Figure 33 : Modèle de placenta humain pour la pratique de la microchirurgie. Le placenta est nettoyé et connecté à un flux sous pression. La microdissection est pratiquée à l'aide d'un dispositif d'aspiration et d'un dispositif bipolaire.....	120
Figure 34 : Un segment disséqué d'une artère placentaire humaine	120
Figure 35 : (à gauche) Anastomose termino-latérale complète des artères placentaires. Des écarteurs auto-rétracteurs sont utilisés pour créer un couloir de travail à travers la deuxième placenta. (à droite) Exercice de technique d'enroulement de clip utilisant une artère placentaire.	121
Figure 36 : Un rat anesthésié est placé sur une table spéciale. La peau à proximité des incisions est rasée. Des projections des vaisseaux couramment utilisés en microchirurgie sont présentées.	121
Figure 37 : Pratique microvasculaire sur l'artère carotide droite du rat. (a) L'artère carotide commune et sa bifurcation sont disséquées. (b) Deux anastomoses termino-latérales sont créées, formant une boucle, à l'aide d'un greffon artériel prélevé sur l'artère carotide controlatérale.....	122
Figure 38 : Tête de cadavre fixée et injectée de silicone utilisée pour la dissection microchirurgicale.....	122
Figure 39 : Clippage d'anévrisme : (a) anévrisme de l'artère cérébrale moyenne droite, (b) position du clip, (c, d) vérification de l'absence d'anévrisme résiduel sous le clip.	128
Figure 40 : Prise en charge de la rupture: (a) anévrisme de l'artère cérébrale moyenne droite (flèche bleue), (b, c) jet de saignement provenant du dôme de l'anévrisme (flèches vertes) et contrôle de l'hémostase par aspiration, (d) clip temporaire au point de saignement	129
Figure 41 : Des médecins en formation s'exercent au clippage d'anévrismes et à la prise en charge des ruptures sous supervision ; le champ opératoire est visible sur les écrans suspendus.....	130
Figure 42: Thrombectomie : (a, b) thrombose obstruant un segment de la branche M2 de l'artère cérébrale moyenne (flèches jaunes), (c, d) évacuation des caillots, (e) rétablissement du flux sanguin dans ce segment de l'artère (flèches blanches).....	132

Figure 43 : Les internes apprennent les repères anatomiques et la chirurgie de la colonne cervicale.....	136
Figure 44 : Fusion vertébrale thoracique et lombaire. Exercices pratiques des résidents et internes. Sous supervision, les vis thoraciques et lombaires sont mises en place sous contrôle fluoroscopique.....	137
Figure 45 : Procédure d'implantation des électrodes et du générateur de SCS.....	146
Figure 46 : Interaction à double cycle	148
Figure 47 : Plusieurs modalités d'imagerie sont nécessaires pour obtenir un tableau complet de l'état d'un patient.	154
Figure 48 : (a, b) L'environnement de réalité virtuelle Dextroscope	157
Figure 49 : Interface de planification chirurgicale. (a) Positionnement des points cible et d'entrée pour définir une trajectoire dans l'image 3D. (b) Alignement de la vue le long de la trajectoire. (c) Zoom le long de la trajectoire, simulant une vue microscopique.(d) Atteinte du point cible de la trajectoire.....	158
Figure 50 : Cas de MAV. Volumineuse MAV pariéto-occipitale droite. Images fusionnées d'angio-IRM (rouge) et de phlébographie par résonance magnétique (bleu). (a) Vue supéro-postéro-latérale droite montrant les artères méningées moyennes bilatérales et l'artère occipitale droite comme vaisseaux nourriciers superficiels. Les vaisseaux artérialisés et dilatés du nidus se drainent principalement dans le sinus sagittal. (b) Vue antérieure. L'artère cérébrale postérieure droite, dilatée et sinueuse, apparaît comme le vaisseau nourricier profond ; la portion antérieure du drainage veineux est clairement visible.....	160
Figure 51 : Le système DEX-Ray montrant l'écran stéréoscopique et le tiroir contenant la sonde de la caméra (a) et (b), la sonde de la caméra étant tenue à la main.....	161
Figure 52 : (a) Reconstruction virtuelle de la tête à partir d'une tomodensitométrie (TDM) tridimensionnelle.(b) Le résident peut mesurer la distance par rapport aux repères externes pour l'aider à choisir l'emplacement correct du trou de trépanation. (c, d) Module de forage osseux simulant la réalisation du trou de trépanation. (e) À la fin de l'essai de positionnement du cathéter, le logiciel calcule la précision de la position et attribue un score. Si le résultat est concluant, le cathéter devient vert. (f, g) Vérification directe de la position finale du cathéter dans la tête virtuelle : (f) projection axiale, (g) projection coronale	168

Figure 53 : (a) Modèle lombaire avec rétraction des tissus mous et exposition des repères osseux. (b, c) Le stylet haptique simule les instruments chirurgicaux : le localisateur de pédicule (b) et la sonde pédiculaire (c). (d) Positionnement des vis et guidage par imagerie sagittale simulée pouvant aider les débutants à sélectionner la trajectoire correcte tout au long de la procédure.(e) À la fin de la tâche, le stagiaire peut vérifier la précision de sa procédure en observant directement la trajectoire de la vis sur la colonne vertébrale virtuelle.....	169
Figure 54: Mannequin de simulation SimMan 3G.....	180
Figure 55 : Simulation haute fidélité de la réactivité pupillaire	187
Figure 56 : Tracé d'électroencéphalographie.....	187
Figure 57: Conception architecturale d'un laboratoire de simulation en Neurochirurgie.	213

Liste des tableaux

Tableau I: Le questionnaire administré après la fin de la formation.....	130
Tableau II : Scénarios standards de Neuroanesthésie.	183
Tableau III : : Checklist des objectifs d'un scénario de simulation au sujet de l'état de mal épileptique	189
Tableau IV: Scénarii possibles pour simulation en neuroréanimation.....	191
Tableau V: Estimation en Euro du matériel optimal pour un laboratoire de neurochirurgie.....	210



ABBREVIATIONS

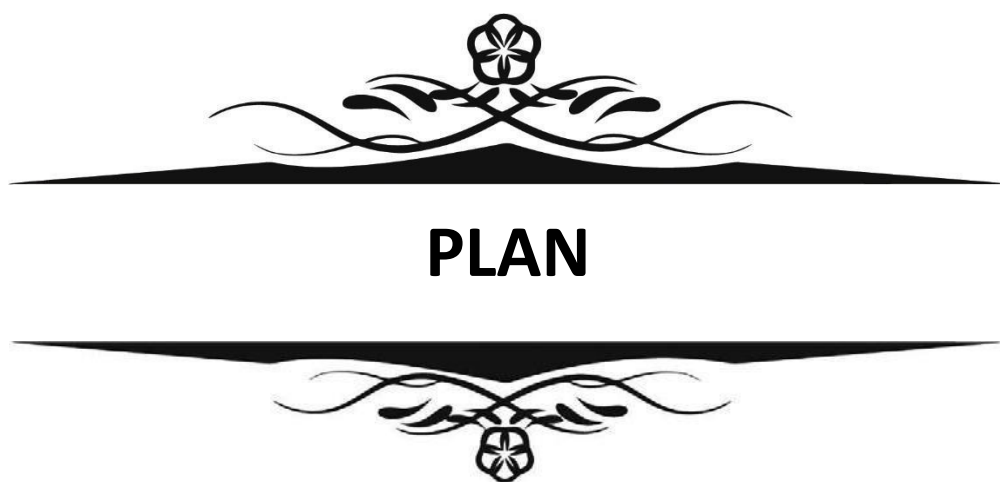


Liste des abréviations et acronymes

Sigle / Acronyme	Définition
3D	: Impression tridimensionnelle
AANS	: American Association of Neurological Surgeons
ANCOVA	: Analysis of Covariance
ANOVA (RM)	: Analysis of Variance (Repeated Measures)
API	: Analyse des performances instrumentée
AR	: Réalité augmentée
Atlas.ti	: Logiciel d'analyse qualitative
CAPEX	: Capital Expenditure – Dépenses d'investissement
EMFC	: Éducation médicale fondée sur les compétences
CFIR	: Consolidated Framework for Implementation Research – Cadre consolidé pour la recherche en implémentation
IC	: Intervalle de confiance
CNS	: Congress of Neurological Surgeons
CRM	: Crisis Resource Management – Gestion des ressources en situation de crise
CSV	: Comma-Separated Values – Format de données tabulaires
DM	: Différence des moyennes
EANS	: European Association of Neurosurgical Societies
ECR	: Essai contrôlé randomisé
Zotero	: Gestionnaire de références bibliographiques
VCE	: Ventriculocisternostomie endoscopique (3 ^e ventriculostomie)
DVE	: Drainage ventriculaire externe

GRADE	:	Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation – Certitude des preuves / recommandations
HAL	:	Hyper Articles en Ligne
CCI	:	Coefficient de corrélation intraclasse
IQR	:	Intervalle interquartile
I²	:	Indice d’hétérogénéité entre études
PRFI	:	Pays à revenu faible et intermédiaire
MLM	:	Modèle linéaire mixte
MERSQI	:	Medical Education Research Study Quality Instrument
MMERSQI	:	Modified MERSQI
MR	:	Mixed Reality – Réalité mixte
NASA-TLX	:	NASA Task Load Index – Indice de charge de travail perçue
NOTECHS	:	Non-TECHnical Skills – Échelle d’équipe des compétences non techniques
NOTSS	:	Non-Technical Skills for Surgeons – Compétences non techniques du chirurgien
OBJ	:	Format de fichier 3D (Object)
OPEX	:	Operational Expenditure – Dépenses d’exploitation
OR	:	Odds Ratio
ORa / βa	:	Odds Ratio ajusté / Coefficient β ajusté
OSATS	:	Objective Structured Assessment of Technical Skill(s)
OSF	:	Open Science Framework – Plateforme de science ouverte
Ottawa GRS	:	Ottawa Global Rating Scale
PBP	:	Proficiency-Based Progression – Progression à seuils de maîtrise
PEARLS	:	Promoting Excellence And Reflective Learning in Simulation
PICO	:	Population, Intervention, Comparator, Outcomes

PRISMA	:	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PROSPERO	:	Registre international des protocoles de revues systématiques
REDCap	:	Research Electronic Data Capture – Plateforme de collecte / gestion de données
REML	:	Restricted (Residual) Maximum Likelihood – Estimation de vraisemblance restreinte (τ^2)
RE-AIM	:	Reach, Effectiveness, Adoption, Implementation, Maintenance
RoB 2	:	Risk of Bias 2 – Outil de risque de biais pour ECR
ROBINS-I	:	Risk Of Bias In Non-randomized Studies – of Interventions
SLA	:	Service Level Agreement – Accord de niveau de service
DMS	:	Différence moyenne standardisée
SoF	:	Summary of Findings – Tableau de synthèse des résultats (GRADE)
SOP	:	Standard Operating Procedure – Procédure opératoire standard
STL	:	Format de fichier 3D (stéréolithographie)
TCO	:	Total Cost of Ownership – Coût total de possession
TIDieR	:	Template for Intervention Description and Replication – Canevas de description des interventions
Trim-and-fill	:	Méthode d'ajustement du biais de publication
VR	:	Virtual Reality – Réalité virtuelle
WFNS	:	World Federation of Neurosurgical Societies



INTRODUCTION	1
I. Cadre conceptuel et théorique	9
1. Fondements de la compétence et de l'apprentissage	9
1.1. La pyramide de Miller du savoir au savoir faire	9
1.2. Stades d'acquisition de compétences (Fitts et Posner)	10
1.3. Éducation médicale fondée sur les compétences (EMFC) et mastery learning	10
2. Évaluer l'effet formatif et le transfert	10
2.1. Le modèle de Kirkpatrick	10
2.2. Validité des mesures et logique de preuve	11
2.3. Mesurer la charge de travail et la charge cognitive.....	12
3. Fidélité, conception des simulateurs et débriefing	13
4. Mesure des performances : outils techniques et non techniques	15
4.1. Compétences techniques	15
4.2. Compétences non techniques (individuelles et d'équipe)	16
5. Implémentation en PRFI : cadres et indicateurs.....	18
5.1. CFIR : comprendre le contexte et agir sur les déterminants.....	18
5.2. Proctor et al. : résultats d'implémentation à mesurer	18
5.3. RE-AIM : impact populationnel et pérennité	18
5.4. Décrire l'intervention : TIDieR.....	18
5.5. Volets numériques : télésimulation/telementorat.....	18
6. Considérations méthodologiques et analytiques	19
6.1. Qualité des études et risque de biais	19
6.2. Effet, puissance et précision	20
7. Application au champ de la neurochirurgie	21
7.1. Relier objectifs, tâches et métriques	21
7.2. Intégration curriculaire en PRFI	21
8. Conclusion	22
III. Méthodologie	23
1. Conception générale et logique d'ensemble.....	23
1.1. Type d'étude.....	23
1.2. Hypothèses et objectifs opérationnels	23
2. Revue systématique et critères d'inclusion	23
2.1. Questions et critères d'éligibilité (PICO étendu)	24
3. Stratégie de recherche documentaire	25
3.1. Sélection des études	25
3.2. Extraction des données.....	25
3.3. Évaluation de la qualité et du risque de biais	25

4.	Synthèse et méta-analyse	26
5.	Présentation des résultats	26
6.	Gouvernance, éthique et enregistrement.....	27
7.	Gestion des données et science ouverte.....	27
8.	Critères d'exclusion :	28
9.	Conclusion	28
V.	Revue de la littérature.....	29
1.	Périmètre, stratégie générale et typologie des preuves	29
2.	Validité et efficacité	31
2.1.	Efficacité technique (apprentissage).....	31
2.2.	Résultats non techniques	33
2.3.	Transfert des acquis au bloc opératoire	34
2.4.	Adoption et régression :	34
3.	Tendance générale :	35
4.	Conclusion de la revue	35
VI.	Analyse des résultats et discussion	36
1.	Analyse des résultats.....	36
1.1.	Vue d'ensemble	36
1.2.	Présentation des résultats.....	36
1.3.	Résultats sur les compétences techniques	38
1.5.	Transfert vers la pratique.....	62
1.6.	Adoption et régression	67
1.7.	Discussion et analyse des résultats	73
1.8.	Synthèse et analyse des résultats	73
2.	Discussion :.....	83
2.1.	Neurochirurgie : spécificités cliniques et implications pédagogiques.....	83
2.2.	Simulation en neurochirurgie : moyens et trajectoire d'innovation.....	89
VII.	Adapter la simulation en neurochirurgie à un programme de formation d'un pays à revenu faible ou intermédiaire (PRFI).....	193
1.	Implémentation : coûts, faisabilité et PRFI	193
1.1.	Barrières et leviers en PRFI	193
1.2.	Modèles bas coût et rapport coût-utilité	194
1.3.	Organisation et durabilité	194
2.	Principes directeurs pour un contexte PRFI	196
2.1.	Frugalité intelligente (do more with less).	196
2.2.	Haute valeur clinique.	196
2.3.	Maîtrise documentée. \	196
2.4.	Facteurs humains sans surcoût.	196

2.5.	Implémentation mesurée.	196
2.6.	Maintenance réaliste.	196
VIII.	Projet d'un laboratoire de simulation en neurochirurgie– FMPM.....	197
1.	Introduction	197
2.	Cadre théorique et principes directeurs	197
3.	Recommandations stratégiques à plusieurs niveaux	199
3.1.	Gouvernance et organisation	199
3.2.	Design pédagogique	200
3.3.	Évaluation et métriques.....	201
3.4.	Choix technico-économiques	201
3.5.	Ressources humaines et développement des formateurs	202
3.6.	Données, traçabilité et science ouverte	202
3.7.	Éthique et équité	203
4.	Architecture curriculaire type sur 12 mois.....	203
4.1.	Modules et séquençage.....	203
4.2.	Volume horaire et évaluation	203
5.	Feuille de route d'implémentation (12 mois)	204
5.1.	Phases, livrables et responsabilités	204
5.2.	Gestion des risques.....	206
6.	Suivi-évaluation (Monitoring & Evaluation)	206
6.1.	Indicateurs d'implémentation (Proctor) et RE-AIM.....	206
6.2.	Indicateurs pédagogiques (noyau minimal)	207
6.3.	Fréquence et reporting.....	207
7.	Budget modèle et stratégies de financement.....	207
7.1.	Hypothèses générales	207
7.2.	Estimation du matériel	207
7.3.	Estimation par scénario (valeurs médianes).....	211
7.4.	Décomposition des postes (ordre de grandeur, MAD ↔ €)	211
7.5.	Option “avec personnel” (valorisation du temps formateur).....	212
7.6.	Leviers d'optimisation.....	212
7.7.	Volet architectural et conceptualisation du laboratoire	213
7.8.	Messages clés	214
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	215
	RÉSUMÉ.....	220
	REFERENCES	230



INTRODUCTION



L'accès universel à des soins chirurgicaux sûrs, de qualité et financièrement abordables constitue un déterminant majeur de la santé des populations. Pourtant, à l'échelle mondiale, environ cinq milliards de personnes n'ont pas accès, au moment opportun, à une prise en charge chirurgicale et anesthésique sûre. Le nombre et la situation s'empirent dans les pays à revenu faible et intermédiaire (PRFI). Ce constat, établi par la Lancet Commission on Global Surgery et régulièrement repris par la communauté scientifique, situe clairement la chirurgie – et donc la neurochirurgie – parmi les priorités de santé publique. (1)

La neurochirurgie est dotée d'une charge de morbi-mortalité lourde et souvent aiguë (traumatismes crâniens, pathologies vasculaires cérébrales, tumeurs, hydrocéphalie, épilepsie). Environ 22,6 millions de personnes requièrent annuellement l'expertise d'un neurochirurgien, dont 13,8 millions nécessitent un acte opératoire. Malgré cela, plus de 5 millions de cas essentiels restent non traités chaque année, faute de moyens humains et financiers. Le déficit est particulièrement marqué en Afrique et en Asie du Sud-Est. Les analyses de capacité proposent qu'au moins 23 300 neurochirurgiens supplémentaires seraient nécessaires pour absorber ce besoin non couvert. (2)

S'ajoute à cette pénurie, la répartition géographique de la main-d'œuvre neurochirurgicale qui demeure très inégale. Depuis 2016, la Fédération Mondiale de Neurochirurgie (WFNS) met à jour une carte interactive de la force de travail qui documente densités nationales et gradients régionaux, et dont les dernières publications confirment un écart systémique entre PRFI et pays à haut revenu. (3)

Parallèlement, l'augmentation de la complexité technique (neuroendoscopie, exoscope, navigation, endovasculaire), l'introduction rapide de nouvelles technologies et l'évolution des normes de qualité et de sécurité rendent insuffisante l'approche historique d'un apprentissage essentiellement au bloc opératoire. L'adage "Jamais la première fois sur le patient" prend toute son ampleur face à ces défis. Le développement des compétences doit s'effectuer de façon progressive, sûre et mesurée, en protégeant les patients et en respectant des contraintes organisationnelles

(temps de travail, disponibilité des salles, priorités cliniques). Dans ce contexte, la simulation s'est imposée comme un levier central de modernisation des curriculums en chirurgie.

La simulation correspond à l'ensemble des méthodes et des outils permettant de reproduire tout ou partie d'une situation clinique pour l'apprentissage, l'entraînement ou l'évaluation. La typologie est large :

- Simulateurs physiques de tâches (« task trainers »),
- Modèles cadavériques (frais, embaumement type thiel) et wet labs,
- Modèles imprimés en 3d, souvent patient-spécifiques, pour l'anatomie et les gestes, environnements de réalité virtuelle (VR), augmentée (AR) ou mixte, fréquemment couplés à un retour haptique
- Plateformes endovasculaires reproduisant le cathétérisme et les gestes endo-luminaux.

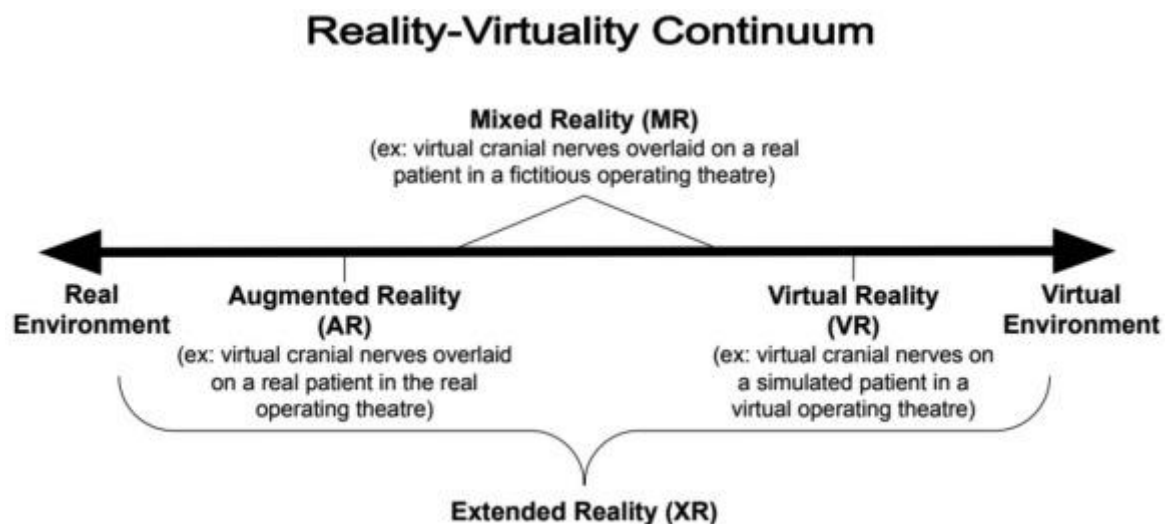


Figure 1 : Schéma du continuum entre réalité et monde virtuel.



Figure 2 : Modalités et typologie de l'entraînement par simulation.

En neurochirurgie, la simulation est mise en jeu pour des procédures clés: ventriculostomie/VCE, endoscopie endonasale de la base du crâne, mise en place de vis pédiculaires, clippage d'anévrisme, résection tumorale, et procédures endovasculaires. Des revues systématiques et de portée confirment l'expansion de ces approches et décrivent leurs caractéristiques pédagogiques et métrologiques. (4)

Ces plateformes permettent de standardiser l'exposition aux cas, de décomposer des gestes complexes et les planifier ainsi qu'intégrer des métriques objectives (trajectoires instrumentales, collisions, forces, précision), ouvrant la voie à des évaluations robustes et reproductibles. Dans les environnements VR/AR, les paramètres de performance (« automated performance metrics ») sont nativement enregistrés, facilitant la mesure des progrès, la définition de seuils de compétence, l'identification des lacunes et la recherche sur le transfert de l'apprentissage. (5)

Dans les PRFI, l'adoption de la simulation se heurte à des contraintes structurelles : coûts d'acquisition et de maintenance, disponibilité des pièces et des consommables, besoins en énergie et connectivité, pénurie de formateurs et charge clinique élevée. Les analyses récentes soulignent également un biais géographique de la production scientifique en simulation neurochirurgicale — avec une sous-représentation des PRFI — posant la question de la généralisation des recommandations issues de contextes à ressources abondantes. (11)

Face à ces obstacles, des solutions pragmatiques émergent :

- Impression 3D locale de simulateurs anatomiques et procéduraux (VCE/ventriculostomie, base du crâne, rachis), offrant coût réduit, réutilisabilité, portabilité et contextualisation patient-spécifique ;
- Systèmes hybrides combinant éléments physiques et réalité mixte pour enrichir le retour visuel/haptique à faible coût ;
- Télésimulation et télé-mentorat pour étendre l'accès à l'expertise, bien que dépendants de la qualité du réseau.

La littérature récente documente la validité et l'utilité de plusieurs modèles bas coût et plaide pour leur intégration curriculaire dans des programmes contraints, avec évaluation structurée. (12)

L'enjeu d'équité dépasse l'équipement : la formation des formateurs, la mutualisation inter-établissements, les réseaux professionnels (p.ex. plateformes WFNS) et les partenariats Nord-Sud sont déterminants pour pérenniser les initiatives, tout comme l'ancrage dans une politique institutionnelle (curriculum, évaluation, indicateurs de suivi). (3)

Sur le plan pédagogique, la thèse s'inscrit dans les modèles de l'apprentissage :

- La pyramide de Miller (Knows → Knows How → Shows How → Does), qui rappelle que les méthodes d'évaluation doivent monter en authenticité (du cognitif à la performance en situation réelle) ;

- Le modèle en trois stades de Fitts et Posner (cognitif, associatif, autonome), utile pour séquencer la pratique et ajuster l'intensité des scénarios. (13)

Pour l'évaluation des formations, le modèle de Kirkpatrick (réaction, apprentissage, comportement, résultats) et le cadre RE-AIM (Reach, Effectiveness, Adoption, Implementation, Maintenance) guideront l'analyse de l'impact au-delà des seuls scores techniques. Enfin, pour comprendre comment intervenir en contexte contraint, la thèse recourt au CFIR (Consolidated Framework for Implementation Research), adapté aux études de mise en œuvre en santé. (14)

Malgré son potentiel pédagogique et ses avancées technologiques, la simulation en neurochirurgie pose encore plusieurs questions clés :

1. Quels effets mesurés exerce-t-elle sur les compétences techniques (gestuelles) et non techniques (travail d'équipe, décision, communication) ?
2. Dans quelles conditions ces gains se transfèrent au bloc opératoire, et avec quel niveau de preuve ?
3. Quelles limites et conditions de faisabilité (coûts, maintenance, infrastructures, ressources humaines, acceptabilité, gouvernance) influencent son implémentation et sa pérennité dans des programmes de formation en PRFI ?

Ces interrogations s'inscrivent dans un contexte de déficit de soins persistants (plus de 5 millions de cas essentiels non traités par an) et d'un besoin de main-d'œuvre additionnelle chiffré à plus de 23 000 neurochirurgiens, ce qui confère à la formation efficace un rôle stratégique. (15)

Ce travail répond à un double besoin :

- Synthétiser de façon intégrée les preuves d'efficacité de la simulation sur les compétences techniques et non techniques, en mobilisant des méthodes d'évaluation robustes (OSATS, NOTSS, métriques instrumentées, NASA-TLX) ;

- Analyser les limites et conditions de mise en œuvre en PRFI, pour proposer une feuille de route réaliste (choix des simulateurs, séquençage pédagogique, formation des formateurs, financement, fabrication locale, télésupervision), guidée par des cadres d'implémentation (CFIR, RE-AIM) et des indicateurs de pérennité.

Au plan opérationnel, les résultats visent à informer :

- Les décideurs académiques (intégration curriculaire, investissement, maintenance),
- Les responsables de programmes (design pédagogique, évaluation, train-the-trainer),
- Et la communauté scientifique (normalisation des indicateurs et des reporting checklists), avec un accent sur l'équité d'accès.

Objectif principal

- Évaluer l'impact de la simulation en neurochirurgie sur les compétences techniques (p. ex. scores OSATS, précision, trajectoires, temps, erreurs) et les compétences non techniques (p. ex. NOTSS, CRM, communication/leadership).

Objectifs secondaires

1. Apprécier le niveau de preuve de transfert des apprentissages vers le bloc opératoire.
2. Identifier les limites d'implémentation en PRFI (coûts, maintenance, infrastructures, RH, langue/accès aux contenus) et proposer des stratégies d'atténuation adaptées (impression 3D locale, mutualisation, open-source, télésupervision).
3. Décrire un cadre de mise en œuvre et des indicateurs de suivi (adoption, fidélité, coûts récurrents, pérennité) utilisables par les programmes.
4. Chez les internes et jeunes neurochirurgiens, une exposition à des modules de simulation améliore-t-elle significativement les indicateurs techniques par rapport à l'enseignement conventionnel ?

5. La simulation, adossée à des scénarios et débriefings structurés, renforce-t-elle les compétences non techniques mesurées par des outils validés (NOTSS, CRM) ?
6. Quelles barrières/facilitateurs conditionnent l'adoptabilité, l'implémentation et la pérennité de la simulation dans des programmes PRFI, et quels choix technico-pédagogiques (fidelity mix, 3D imprimée, VR/AR, hybride) maximisent le rapport coût-utilité ?

Nos hypothèses de recherche sont ainsi :

- H1 (technique) : la simulation améliore significativement les scores techniques (OSATS, temps, erreurs, précision/trajectoires) à court terme, avec une rétention partielle à moyen terme. (16)
- H2 (non technique) : des scénarios CRM avec débriefing structuré (PEARLS) améliorent les scores NOTSS/CRM en simulation. (8)
- H3 (PRFI/implémentation) : en PRFI, l'adoption est limitée par les coûts, l'infrastructure, la maintenance et la disponibilité de formateurs ; des approches bas coût (impression 3D locale, systèmes hybrides, télésimulation) rendent l'implémentation faisable, sous réserve d'un cadre d'évaluation et d'une gouvernance adaptés. (11)

III. Cadre conceptuel et théorique

1. Fondements de la compétence et de l'apprentissage

1.1. La pyramide de Miller du savoir au savoir faire

Le modèle de Miller propose une progression du savoir (« Knows ») vers la performance en situation réelle (« Does »), en passant par la compétence appliquée (« Knows How ») et la démonstration standardisée (« Shows How », p. ex. OSCE/simulation). En formation chirurgicale, la simulation permet précisément de documenter la strate « Shows How », tandis que les indicateurs opératoires (données du bloc) reflètent la strate « Does ». Cette articulation justifie l'usage d'outils psychométriques distincts selon le niveau de la pyramide et l'analyse du transfert vers la pratique réelle. (17) (18)

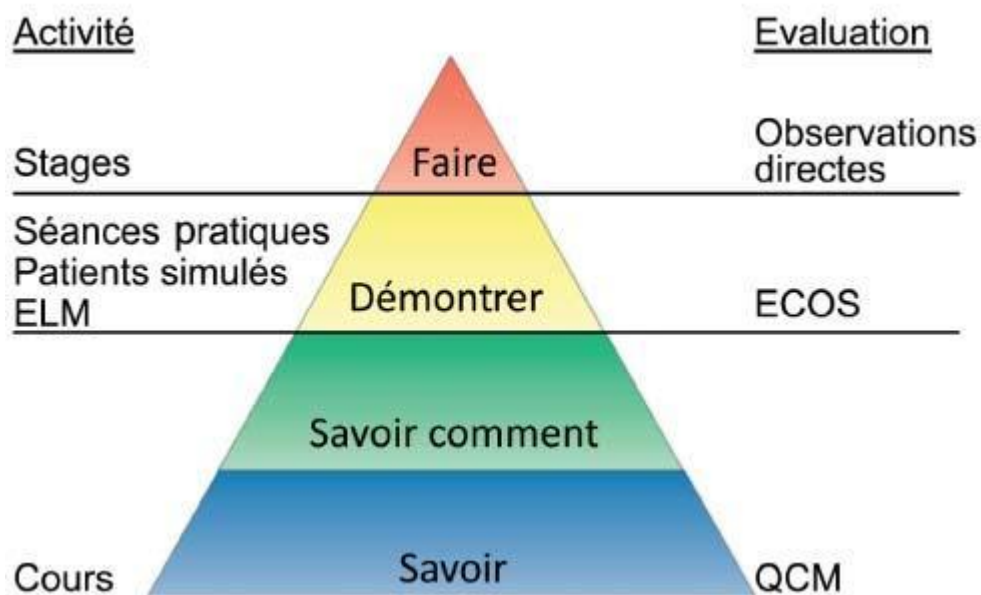


Figure 3 : Pyramide de Miller (2009).

1.2. Stades d'acquisition de compétences (Fitts et Posner)

Le modèle en trois stades — cognitif, associatif, autonome — décrit la transition d'un raisonnement explicite vers des schémas moteurs plus fluides, stabilisés par la pratique et le feedback. La simulation permet d'accélérer la phase associative (feedback fréquent, répétition, variabilité contrôlée), puis d'ancrer l'automatisation (pratique distribuée). (19)

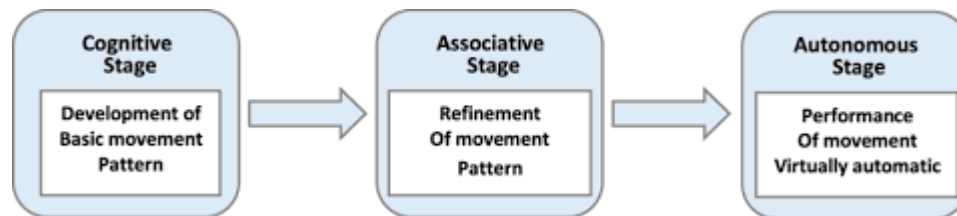


Figure 4 : Stades d'acquisition des compétences selon Fitts et Posner (1967).

1.3. Éducation médicale fondée sur les compétences (EMFC) et mastery learning

L'EMFC promeut des curricula centrés sur des résultats observables, moins contraints par le temps. Dans cette logique, la simulation fournit des tâches authentiques, des seuils de compétence et des métriques objectivables. Le mastery learning, adossé à la pratique délibérée, impose l'atteinte d'un standard avant progression (plutôt que la simple exposition) ; appliqué à la simulation, il est associé à des améliorations mesurables et, dans plusieurs domaines, à des effets translationnels sur les soins. (20)

2. Évaluer l'effet formatif et le transfert

2.1. Le modèle de Kirkpatrick

Pour une évaluation multi-niveaux des formations : Réaction (satisfaction), Apprentissage (connaissances/compétences), Comportement (changement en situation réelle) et Résultats (impact organisationnel/clinique). Le modèle insiste sur la chaîne de valeur reliant dispositif, transfert et résultats, et sur le rôle des conditions de soutien. Il s'agit d'une approche solide pour relier gains en simulation (niveaux 1-2) au comportement en salle d'opération (niveau 3) et, si possible, à des résultats cliniques/processus (niveau 4). (21)

THE KIRKPATRICK MODEL

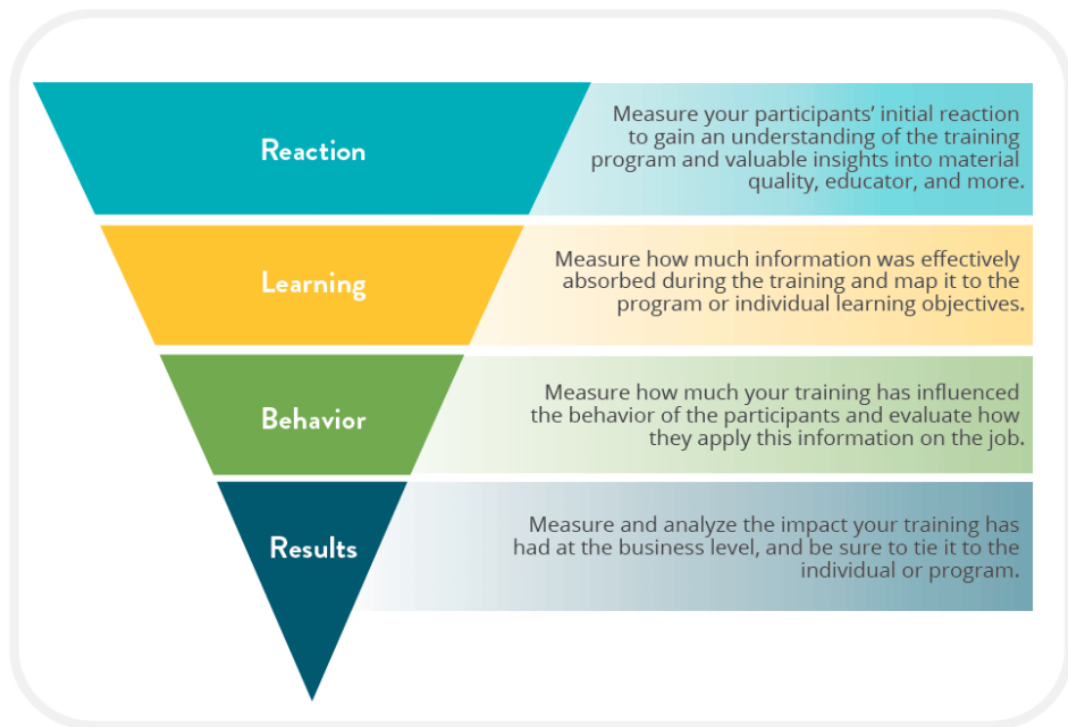


Figure 5: Les quatre niveaux d'évaluation selon Kirkpatrick (1959).

2.2. Validité des mesures et logique de preuve

La validité est unitaire (Messick) : on cumule des preuves (contenu, structure interne, relations avec d'autres variables, généralisabilité, conséquences) pour soutenir l'interprétation des scores. En éducation chirurgicale, cela implique d'établir

1. La validité de contenu (représentativité de la tâche)
2. La validité du construit (discrimination novices/experts)
3. Les relations (concurrente/prédictive, p. ex. transfert au bloc)
4. La fiabilité (cohérence/accord). (22)

2.3. Mesurer la charge de travail et la charge cognitive

Pour comprendre comment l'entraînement agit, l'outil NASA-TLX estime la charge de travail (mentale, physique, temporelle, effort, frustration, performance perçue). En simulation, il permet de comparer des scénarios (p.ex. VR haute vs moyenne fidélité), d'optimiser la progression (complexité) et d'interpréter l'efficacité de l'apprentissage. (10)

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
------	------	------

Mental DemandHow mentally demanding was the task?

|

Very LowVery High

Physical DemandHow physically demanding was the task?

|

Very LowVery High

Temporal DemandHow hurried or rushed was the pace of the task?

|

Very LowVery High

PerformanceHow successful were you in accomplishing what you were asked to do?

|

PerfectFailure

EffortHow hard did you have to work to accomplish your level of performance?

|

Very LowVery High

FrustrationHow insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

|

Very LowVery High

Figure 6 : Outil NASA-TLX pour l'auto-estimation de la charge de travail.

3. Fidélité, conception des simulateurs et débriefing

3.1. Repenser la « fidélité »

La « fidélité » n'est pas synonyme d'efficacité pédagogique. Hamstra et coll. recommandent de remplacer ce terme global par des notions plus opératoires : ressemblance physique et, surtout, alignement fonctionnel de la tâche (functional task alignment). C'est-à-dire, l'adéquation entre les exigences de la tâche et les objectifs d'apprentissage. Autrement dit, la « bonne » fidélité est celle qui sert les compétences ciblées au moindre coût. (23)

a. Scénarisation et CRM (Crisis Resource Management)

Les racines du CRM en santé remontent à l'anesthésie, par transposition des principes de l'aéronautique (travail d'équipe, communication, conscience de la situation, priorisation). En simulation, des scénarios de crise (p. ex. hémorragie, panne matérielle) permettent d'entraîner et d'évaluer ces comportements. (10)

b. Débriefing : cadre PEARLS

Le débriefing transforme l'expérience simulée en apprentissage. Le cadre PEARLS (Promoting Excellence And Reflective Learning in Simulation) propose une approche blended (auto-évaluation guidée, discussion focalisée, feedback/enseignement directif) avec script facilitateur, désormais largement diffusée en santé. (24)

L'outil de débriefing en soins de santé PEARLS			
	Objectifs	Tâche	Exemples de phrases
1 Mettre en place le cadre	Créer un environnement sécuritaire propice à l'apprentissage	Enoncer le but du débriefing: exprimer clairement la prémisse de base *	Prenons X minutes pour le débriefing. Notre objectif est d'améliorer notre façon de travailler ensemble et de prendre soin de nos patients. *Tout le monde est intelligent et veut s'améliorer.*
2 Réactions	Explorer les émotions	Solliciter les réactions initiales et les émotions	"Quelles sont vos réactions initiales?" "Comment vous sentez-vous?"
3 Description	Clarifier les faits	Développer une compréhension partagée du cas	"Pouvez-vous s'il vous plaît partager un court résumé du cas?" "Quel était le diagnostic de travail?" Tout le monde est d'accord? "
4 Analyse	Explorer une variété de domaines de performance et d'apprentissage	Voir au verso pour plus de détails	Déclaration de l'aperçu préliminaire (à utiliser pour introduire un nouveau sujet) "À ce stade, j'aimerais parler de [insérer un sujet ici] parce que [insérer une justification ici]" Mini résumé (à utiliser pour résumer la discussion d'un sujet) "C'était une excellente discussion. Y a-t-il d'autres commentaires relatifs à [insérer l'écart de performance discuté]?"
Problèmes en suspens/préoccupations?			
5 Application/Synthèse	Identifier les messages clés à retenir	Centré sur l'apprenant ----- Centré sur l'instructeur	"Quels sont les éléments clés de cette discussion pour notre pratique clinique?" "Les éléments d'apprentissage clés pour le cas étaient [insérer les objectifs d'apprentissage ici]."

* Copyright Centre de simulation médicale, utilisé avec leur permission
Reproduit avec la permission de Academic Medicine. A l'origine publié comme Bagg K, M Magardichian, Thomas B, Huang S, Eppich W, Cheng A. The PEARLS Healthcare Debriefing Tool. Acad Med. 2017. [Peer Author Correction] <http://journals.ama-assn.org/content/92/10/2600.full>

Figure 7 : Outil de debriefing PEARLS (2017)



Figure 8: Outil de debriefing PEARLS (2017)

4. Mesure des performances : outils techniques et non techniques

4.1. Compétences techniques

OSATS (Objective Structured Assessment of Technical Skill) : l'OSATS intègre des grilles globales et des listes spécifiques, validité de construit documentée, sensible à la progression et la discrimination novice/expert. C'est une échelle utilisable sur vidéo (bench) et en situation simulée, avec indices de fiabilité inter-évaluateurs satisfaisants. (25)

Modified objective structured assessment of technical skills (OSATS)		
Gentleness	1	
Minimizing tissue injury	2	Rough, tears tissue and poor control
	3	Minor trauma with occasional breaks
	4	Appropriate tension with negligible injury
	5	
Time and motion	1	
Efficiency in movement	2	Uncertain, inefficient and lack of progress
	3	Slow, reasonable and organized
	4	Confident, efficient and fluid
	5	
Instrument handling	1	
Fluid use of instruments	2	Overshoots target, slow to correct
	3	Some overshooting, but quick to correct
	4	Accurate direction, correct plane, minimal readjustments
	5	
Flow of operation	1	
Smooth transitions between steps	2	Uncertain, constantly changing focus
	3	Slow, but planned and reasonably organized
	4	Safe, confident, maintains focus until time to move on
	5	
Tissue exposure	1	
Tissue retraction and camera visualization	2	Use of one hand and poor coordination
	3	Use of both hands, but with sub-optimal dexterity
	4	Expertly utilized both hands complementarily
	5	
Summary score	1	
Overall assessment of trainee's technical skill	2	Deficient
	3	Average
	4	Masterful
	5	

Figure 9: Echelle OSATS pour quantifier l'amélioration en terme de compétences techniques.

Métriques instrumentées (trajectoires, collisions, forces, temps, erreurs): souvent intégrées aux plateformes VR/AR et utiles pour définir des seuils de maîtrise (mastery). Le CCI (Intraclass Correlation Coefficient) est recommandé pour juger l'accord inter-évaluateurs ; il convient de préciser le modèle (2-voies/effets aléatoires vs mixtes), le type (cohérence vs accord absolu) et l'unité (simple mesure vs moyenne), en reportant IC 95 % et seuils d'interprétation ($\approx < 0,50$: faible ; $0,50-0,75$: modérée ; $0,75-0,90$: bonne ; $> 0,90$: excellente). (26)

4.2. Compétences non techniques (individuelles et d'équipe)

- NOTSS (Non-Technical Skills for Surgeons): taxonomie et échelles comportementales couvrant situation awareness, décision, communication & travail d'équipe, leadership. Outil de référence pour l'observation structurée au bloc et en simulation. (8)

scholar.harvard.edu/NTSL

Hospital

Trainer name

Date

Trainee name

Operation

Category	Category rating*	Element	Element rating*	Feedback on performance and debriefing notes
Situation Awareness		Gathering information		
		Understanding information		
		Projecting and anticipating future state		
Decision Making		Considering options		
		Selecting and communicating option		
		Implementing and reviewing decisions		
Communication and Teamwork		Exchanging information		
		Establishing a shared understanding		
		Co-ordinating team activities		
Leadership		Setting and maintaining standards		
		Supporting others		
		Coping with pressure		

* 1 Poor; 2 Marginal; 3 Acceptable; 4 Good; N/A Not Applicable

1 Poor Performance endangered or potentially endangered patient safety, serious remediation is required

2 Marginal Performance indicated cause for concern, considerable improvement is needed

3 Acceptable Performance was of a satisfactory standard but could be improved

4 Good Performance was of a consistently high standard, enhancing patient safety; it could be used as a positive example for others

N/A Not Applicable

NOTES: Assessment Tool/NTSL

NON - TECHNICAL SKILLS FOR SURGEONS

Figure 10: Score NOTSS pour l'évaluation des compétences et exquies non techniques (2012).

- NOTECHS / Oxford NOTECHS II : évalue la performance d'équipe au bloc (leadership/management, coopération, résolution de problème & décision, conscience de la situation), avec propriétés de mesure établies et granularité accrue dans la version II.

(27)

LEADERSHIP & MANAGEMENT	
Leadership	Involves / Reflects on suggestions / Visible / Accessible / Inspires / Motivates / coaches
Maintenance of standards	Subscribes to standards / Monitors compliance to standards / Intervenes if deviation / Deviates with team approval / Demonstrates desire to achieve high standards
Planning & preparation	Team participation in planning / Plan is shared / Understanding confirmed / projects / changes in consultation
Workload management	Distributes tasks / monitors / reviews / prioritises tasks / Allots adequate time / responds to stress
Authority & assertiveness	Advocates position / Values team input / Takes control / Persistent / Appropriate assertiveness

TEAMWORK & CO-OPERATION	
Team building/ maintaining	Relaxed / Supportive / Open / Inclusive / Polite / Friendly / Use of humour / Does not compete
Support of others	Helps others / Offers assistance / gives feedback
Understanding team needs	Listens to others / Recognises abilities of team / Condition of others considered / Gives personal feedback
Conflict solving	Keeps calm in conflicts / Suggests conflict solutions / Concentrates on what is right

PROBLEM SOLVING & DECISION MAKING	
Definition & Diagnosis	Uses all resources / Analytical decision making / Reviews factors with team
Option Generation	Suggests options / Asks for options / Reviews outcomes / Confirms opinions
Risk Assessment	Estimates risks / Considers risk in terms of team capabilities / Estimates outcome
Outcome Review	Reviews outcomes / Reviews new options / Objective, constructive and timely reviews / Makes time for review / Seeks feedback from others / Conducts post treatment review

SITUATION AWARENESS	
Notice	Considers all elements / Monitors vital signs & progress of operation / Asks for or shares information / Encourages vigilance / Checks and reports changes / Requests reports and updates
Understand	Cross-checks above / Shares mental models / Speaks up when unsure / Updates other team members
Think Ahead	Identifies future problems / Discusses contingencies / Plans for future patient states / Anticipates high workload / Discusses constraints / Uses low workload periods

Below Standard = 1	Basic Standard = 2	Standard = 3	Exceed = 4
Behaviour directly compromises patient safety and effective teamwork.	Behaviour in other conditions could directly compromise patient safety and effective teamwork.	Behaviour maintains an effective level of patient safety and teamwork.	Behaviour enhances patient safety and teamwork. A model for all other teams.

Figure 11 : Echelle NOTECHS pour l'évaluation des compétences non techniques globales d'une équipe (1997).

5. Implémentation en PRFI : cadres et indicateurs

5.1. CFIR : comprendre le contexte et agir sur les déterminants

Le CFIR (Consolidated Framework for Implementation Research) offre un référentiel de déterminants (caractéristiques de l'intervention, contexte interne/externe, individus, processus) pour concevoir, adapter et évaluer l'implémentation. Des ressources récentes proposent un guide d'utilisation et des mises à jour ; des travaux ont évalué son usage et ses ajustements nécessaires en PRFI (p. ex. poids des facteurs d'infrastructure et de logistique). (30)

5.2. Proctor et al. : résultats d'implémentation à mesurer

La taxonomie de Proctor distingue huit résultats d'implémentation : acceptabilité, adoption, adéquation, faisabilité, fidélité, coûts d'implémentation, pénétration (couverture) et pérennité. Ces résultats complètent, sans s'y substituer, les résultats cliniques et éducatifs. Pour un programme de simulation en PRFI, ils structurent l'évaluation au-delà du seul gain de performance. (31)

5.3. RE-AIM : impact populationnel et pérennité

Le cadre RE-AIM (Reach, Effectiveness, Adoption, Implementation, Maintenance) aide à juger l'impact réel d'une intervention (ici, une curricularisation de la simulation) sur la population cible (internes/résidents), son adoption par les services, sa qualité de mise en œuvre et sa durabilité institutionnelle. Des synthèses récentes en documentent l'usage en « vraie vie ». (32)

5.4. Décrire l'intervention : TIDieR

Pour garantir répliquabilité et transparence, la checklist TIDieR décrit en 12 items le quoi, qui, où, comment et combien de l'intervention (simulateurs, scénarios, débriefing, critères de réussite, soutien/maintenance). C'est particulièrement important quand on vise une fabrication locale (p. ex. impression 3D) ou des systèmes hybrides. (33)

5.5. Volets numériques : télésimulation/telementorat

En contexte de ressources limitées, la télésimulation et le telementorat peuvent élargir l'accès à l'expertise et optimiser l'économie de programme, même si leur efficacité dépend de la connectivité et de l'ingénierie pédagogique. Des revues récentes synthétisent usages, dispositifs et défis, y compris dans des partenariats HIC-PRFI. (34)

6. Considérations méthodologiques et analytiques

6.1. Qualité des études et risque de biais

- MERSQI (qualité des études en éducation médicale) : utile pour apprécier la rigueur des études incluses (dessin, validité des instruments, données & analyse). Des variantes récentes (MMERSQI) existent.

Domain: item	Response options: scores ^b	Operational definitions
MERSQI:		
Study design	• Single-group cross-sectional or single-group posttest only: 1 • Single-group pretest and posttest: 1.5 • Nonrandomized, 2 group: 2 • Randomized controlled trial: 3	• Survey studies are cross-sectional. • Case-control and cohort studies (2 or more defined cohorts) are considered 2-group nonrandomized.
Sampling: institutions	• 1 institution: 0.5 • 2 institutions: 1 • 3 or more institutions: 1.5	• Number of institutions refers to origin of study participants (not study authors).
Sampling: response rate	• Not applicable • < 50% or not reported: 0.5 • 50%–74%: 1 • ≥ 75%: 1.5	• Response rate is the proportion of those eligible who completed the posttest or survey. For intervention studies, this is the proportion of those enrolled who completed the intervention evaluation. • Use "not applicable" only if a response rate truly does not apply (e.g., data obtained from a medical record or professional organization database).
Type of data	• Assessment by study participant: 1 • Objective: 3	• Observer ratings are considered objective.
Validity evidence for evaluation instrument scores	• Not applicable • Content: 1 • Internal structure: 1 • Relationships to other variables: 1	• Relevant content evidence would include using theory, guidelines, experts, and existing instruments to identify or refine the instrument. • Relevant internal structure evidence would include all reliability (internal consistency, interrater, interstation, and test-retest) and factor analysis. • Relevant evidence of relationships to other variables would include expert-novice comparisons and concurrent or predictive correlation with other variables. • Use "not applicable" only if the study does not measure a psychological construct and there is no instrument to rate (e.g., gender as the sole outcome); should be used very rarely.
Data analysis: sophistication	• Descriptive analysis only: 1 • Beyond descriptive analysis: 2	• Descriptive analyses include frequency, mean, and median. • Any test of statistical inference is considered "beyond descriptive."
Data analysis: appropriate	• Data analysis appropriate for study design and type of data: 1	• Considered "no" if there is a statistical error or if authors failed to analyze data at all.
Outcome	• Satisfaction, attitudes, perceptions, opinions, general facts: 1 • Knowledge, skills: 1.5 • Behaviors: 2 • Patient/health care outcome: 3	• General facts include participant demographics. • Knowledge/skills are in a test setting (paper, computer, simulation, or patients in a nonauthentic setting). • Behaviors are physician actions with real patients in a clinical context, or other activities in a real context. • Patient/health care outcomes are actual effects on real patients, programs, or society.

Figure 12 : Échelle MERSQI pour l'estimation de la qualité d'une étude scientifique (2007).

- RoB 2 (essais randomisés) et ROBINS-I (non randomisés) pour le risque de biais ; GRADE pour la certitude globale de la preuve, afin de qualifier la force des conclusions (transfert au bloc, résultats cliniques).

Grade	Definition
HIGH	We are very confident that the true effect is close to the estimate.
MODERATE	We have moderate confidence in the effect estimate: The true effect is likely to be close to the effect estimate, but there is a possibility that it is substantially different.
LOW	Our confidence in the estimate of the effect is limited: The true effect may be substantially different from the estimate.
VERY LOW	We have very little confidence in the estimate of the effect: The true effect is likely to be substantially different from the estimate.

Source: Adaptation of the article from the GRADE series: GRADE guidelines: 3. Rating the certainty of evidence¹⁰.

Figure 13 : Tableau GRADE pour la mesure de la certitude globale d'une preuve scientifique (2000)

6.2. Effet, puissance et précision

- Taille d'effet : Hedges' g (corrigé petit échantillon) est recommandé pour les comparaisons standardisées entre groupes (simulation vs contrôle), compatible avec les méta-analyses.
- Fiabilité inter-évaluateurs : CCI (spécifier modèle/type/unité), seuils d'interprétation et IC 95 %.

7. Application au champ de la neurochirurgie

7.1. Relier objectifs, tâches et métriques

- Procédure ciblée (p. ex. VCE/ventriculostomie, base du crâne, navigation, endovasculaire).
- Objectifs techniques : précision de trajectoire, respect de structures critiques, contrôle du saignement simulé, temps/erreurs. OSATS + métriques instrumentées. (7)
- Objectifs non techniques : gestion priorités, closed-loop, répartition des rôles, leadership. NOTSS/NOTECHS II, Ottawa GRS, TeamSTEPPS. (8)
- Charge de travail/cognitive : NASA-TLX pour ajuster la progressivité et prévenir la surcharge. (10)
- Débriefing : PEARLS systématique (script, objectifs, plan d'action). (24)

7.2. Intégration curriculaire en PRFI

- CFIR pour cartographier barrières/facilitateurs (infrastructure, coûts, consommables, RH), adapter l'intervention (p. ex. impression 3D locale, hybrides, télésimulation), et planifier le déploiement.
- Proctor pour choisir les indicateurs d'implémentation (adoption, faisabilité, coûts, pérennité).
- RE-AIM pour évaluer l'impact (portée, adoption par services, qualité de mise en œuvre, maintenance).
- TIDieR pour documenter précisément l'intervention et faciliter sa réplique/mise à l'échelle. (30)

8. Conclusion

Les repères théoriques sus-cités guideront l'analyse de l'efficacité de la simulation en neurochirurgie sur les compétences techniques et non techniques, l'évaluation du transfert vers le bloc opératoire, et l'étude des limites d'implémentation en PRFI.

Concrètement:

- la pyramide de Miller, les stades de Fitts & Posner et la EMFC/mastery learning cadrent la progression et le design des modules
- Kirkpatrick ancre l'évaluation multi-niveaux ; Messick/Downing et NASA-TLX structurent la validité et l'interprétation des mesures
- OSATS, NOTSS/NOTECHS II, Ottawa GRS, TeamSTEPPS fournissent l'arsenal métrique
- CFIR, Proctor, RE-AIM et TIDieR constituent l'ossature de l'implémentation et de son évaluation en PRFI.

Ces fondations soutiendront la méthodologie : choix des instruments, plan d'analyse (effets, fiabilité, CUSUM, risque de biais) et grille d'extraction pour la revue. Elles permettront aussi de justifier les arbitrages pédagogiques et économiques propres à un programme de simulation réaliste et pérenne dans un contexte à ressources limitées.

IV. Méthodologie

1. Conception générale et logique d'ensemble

1.1. Type d'étude

Ce travail de thèse repose sur une revue systématique de la littérature, conforme aux normes PRISMA 2020, avec méta-analyses lorsque les données sont combinables. Les objectifs de cette revue sont d'estimer l'effet de la simulation en neurochirurgie sur les compétences techniques et non techniques, d'en apprécier la transférabilité au bloc opératoire le cas échéant, et d'explorer les facteurs de variation (modalité, procédure, niveau d'expérience, contexte PRFI, dose, débriefing).

1.2. Hypothèses et objectifs opérationnels

Afin de répondre aux questions du travail, on a émis trois hypothèses de recherche, la simulation en neurochirurgie pourrait contribuer à:

H1 : l'amélioration des performances techniques (OSATS, temps, erreurs, précision).

H2 : l'amélioration des compétences non techniques (NOTSS/NOTECHS, Ottawa GRS) lorsque des séances CRM et un débriefing structuré (PEARLS) sont associés.

H3 : des effets comparables en PRFI sous des contraintes de coûts et d'infrastructures, sous réserve d'un cadre d'implémentation et d'évaluation.

2. Revue systématique et critères d'inclusion

Ont été incluses dans la revue de littérature les travaux intégrant une évaluation concrète des résultats de la simulation en neurochirurgie, quelque soit la ou les méthodes utilisées.

Le type d'études incluses sont les ECR, les études quasi-expérimentales, cohortes, les études avant-après, et les articles de validations.

2.1. Questions et critères d'éligibilité (PICO étendu)

Les populations visées étaient principalement les internes, résidents, fellows et jeunes spécialistes en neurochirurgie.

L'ensemble des interventions incluait simulateurs physiques, 3D imprimée, cadavérique, VR/AR/MR, haptique, endovasculaire, hybride.

Les articles choisis devaient contenir une comparaison directe entre méthodes de simulation et enseignement traditionnel ou le cas échéant, pas d'intervention.

L'évaluation des taux d'apprentissage ont été effectuée grâce aux pyramides de Miller, aux stades d'acquisition de Fitts et Posner, des concepts du mastery learning et de la pratique délibérée.

L'évaluation de l'effet formatif et le transfert au bloc opératoire ont intégré le modèle de Kirkpatrick, la notion validité unifiée (contenu, construit, prédictive) et l'échelle NASA-TLX quantifiant la charge de travail et la charge mentale.

L'évaluation de l'implémentation des différentes mesures de simulation s'est basée sur l'échelle CFIR. Les résultats explicites ont été analysés via le modèle Proctor et al.

Les résultats primaires ont été évalués par les échelles OSATS (global/spécifique), la comptabilisation des temps opératoires, le risque et le nombre d'erreurs, les taux de précision (trajectoires, Gertzbein-Robbins), l'API.

Les résultats secondaires ont été calculés par les scores NOTSS/NOTECHS, Ottawa GRS, les échelles d'auto-efficacité, NASA-TLX.

La mesure du transfert au bloc opératoire s'est faite par mesures en bloc (scores observés, précision radiologique, proxies).

3. Stratégie de recherche documentaire

Les articles choisis dans notre revue sont extraits des différentes bases de données et sites web de publication scientifique MEDLINE/PubMed, Scopus, Web of Science, Cochrane Central.

Il s'y ajoute aussi quelques articles retrouvés dans la littérature grise : HAL/Thèses, ProQuest, congrès (WFNS, EANS, AANS/CNS).

L'intervalle de notre recensement est de 2010 à 2025.

Les articles recensés sont soit en français ou en anglais.

L'approche de collecte des articles a combiné MeSH et mots-clés, booléens, troncatures, filtres « humains/education ».

3.1. Sélection des études

Le dédoublonnage des études a été effectué dans Zotero.

La lecture intégrale en double.

Puis l'arbitrage par un troisième évaluateur.

Enfin, la rédaction d'un rapport selon le modèle PRISMA puis estimation de l'accord inter-évaluateurs (kappa de Cohen, IC95 %).

3.2. Extraction des données

L'extraction des données s'est basée sur un formulaire générique incluant : bibliométrie, participants, intervention (type/dose/débriefing), comparateur, outcomes, statistiques et suivi.

3.3. Évaluation de la qualité et du risque de biais

L'évaluation de la qualité des études s'est basée sur le score RoB 2 pour les ECR, le score ROBINS-I pour les essais non randomisés et une appréciation narrative globale de la qualité éducationnelle.

La certitude globale des études s'est basée sur l'échelle GRADE par outcome.

4. Synthèse et méta-analyse

Dans la méta-analyse, les effets pour les variables continues ont été exprimés en différence de moyennes (DM) ou en différence de moyennes standardisée (DMS, Hedges g), et ceux pour les variables dichotomiques en rapport de risques (RR) ou rapport de cotes (OR). Les synthèses quantitatives ont utilisé des modèles à effets aléatoires, avec estimation de la variance inter-études τ^2 par REML et intervalles de confiance corrigés selon Hartung-Knapp. L'hétérogénéité a été estimée par I^2 et τ^2 , complétée par des analyses d'influence de type leave-one-out.

Des analyses en sous-groupes pré-spécifiées ont exploré l'effet de la modalité de simulation, du type de procédure, de l'expérience des participants, du contexte PRFI, de la "dose" de simulation et des modalités de débriefing. Lorsque le nombre d'études par critère le permettait (≥ 10), une méta-régression a été envisagée. Le biais de publication a été étudié par funnel plot, test d'Egger et méthode trim-and-fill. Des points techniques spécifiques ont été pris en compte : utilisation d'une corrélation pré-post fixée avec analyses de sensibilité, gestion des bras multiples par combinaison appropriée, et recours à une hiérarchie d'outcomes ou à des méthodes robustes en cas de dépendance entre mesures issues d'une même étude.

5. Présentation des résultats

Les résultats seront présentés de manière structurée à l'aide de tableaux descriptifs des caractéristiques des études, de matrices croisant Procédure $\times$ Modalité de simulation $\times$ Métriques afin de visualiser la couverture des gestes, des outils et des critères de jugement, et de graphiques de type forest plots pour les analyses quantitatives et funnel plots pour l'exploration du biais de publication. La certitude globale des preuves sera synthétisée dans des tableaux Summary of Findings selon l'approche GRADE. L'interprétation des résultats sera systématiquement articulée aux principaux cadres d'apprentissage (pyramide de Miller, mastery learning, Kirkpatrick) et aux cadres d'implémentation (par exemple Proctor, RE-AIM, CFIR), afin de relier les estimations d'effet aux enjeux pédagogiques et organisationnels de la simulation en neurochirurgie.

6. Gouvernance, éthique et enregistrement

Le protocole de revue sera pré-enregistré sur PROSPERO et la conduite ainsi que le reporting de l'étude suivront les recommandations PRISMA 2020. Aucune approbation éthique formelle n'est requise dans la mesure où aucune donnée individuelle de patients n'est collectée et que seules des données agrégées déjà publiées sont analysées. En revanche, un engagement explicite de transparence est pris, incluant la mise à disposition des scripts d'analyse et des tableaux d'extraction dans un dépôt accessible.

7. Gestion des données et science ouverte

Un plan de gestion des données sera élaboré, comprenant un dictionnaire de données décrivant les variables, les règles de transformation (par exemple harmonisation des échelles, calcul des différences pré-/post-intervention) et les modalités de versionnage des fichiers. Les scripts d'analyse et les jeux de données dérivées, strictement anonymisés et limités à des informations agrégées, seront déposés sur une plateforme de science ouverte de type Open Science Framework (OSF), afin de favoriser la reproductibilité et la réutilisation secondaire des résultats.

7.1. Limites et stratégies d'atténuation

Plusieurs limites méthodologiques anticipées seront prises en compte : hétérogénéité des mesures et des contextes d'étude, risque de biais fréquent dans les recherches en éducation médicale, tailles modestes de certains sous-groupes et possibilité de publication sélective. Pour atténuer ces limites, des analyses de sensibilité seront conduites (par exemple en excluant les études à haut risque de biais ou en faisant varier certaines hypothèses de calcul), et les résultats seront confrontés de façon critique aux cadres conceptuels existants dans une logique de triangulation. L'objectif est de proposer une interprétation prudente et nuancée, qui tienne compte à la fois des données quantitatives, des limites des études primaires et de la cohérence avec les modèles théoriques d'apprentissage et d'implémentation.

8. Critères d'exclusion :

Ont été exclues de notre revue de littérature les études sans issue, les séries descriptives pures et les éditoriaux.

9. Conclusion

La méthodologie proposée offre un cadre rigoureux et transparent pour estimer l'effet de la simulation en neurochirurgie et éclairer l'intégration curriculaire, y compris en contextes PRFI.

VI. Revue de la littérature

1. Périmètre, stratégie générale et typologie des preuves

La littérature sur la simulation en neurochirurgie a connu une croissance rapide en deux décennies, avec un pic lors de la décennie 2010 et une consolidation méthodologique depuis 2020 (revues systématiques, méta-analyses, cadres de validation). Trois familles de sources dominent:

1. Revues systématiques/méta-analyses cartographiant les types de simulateurs, leurs preuves d'efficacité et de validité (face, contenu, construit, prédictive/transfert).
2. Études de validation centrées sur une procédure (p.ex. ventriculostomie/VCE, base du crâne, clippage d'anévrisme, vis pédiculaires, endovasculaire), rapportant des métriques objectives et des échelles standardisées.
3. Travaux transversaux sur les technologies VR/AR/XR et l'haptique, les métriques instrumentées et les coûts/implémentation (dont PRFI).

En 2020, une revue systématique et méta-analyse confirmait l'intérêt de la simulation pour l'acquisition de compétences techniques en neurochirurgie, tout en soulignant l'hétérogénéité des méthodes et des critères d'évaluation. Les publications 2022-2025 renforcent surtout les volets VR/AR/haptique et l'impression 3D.

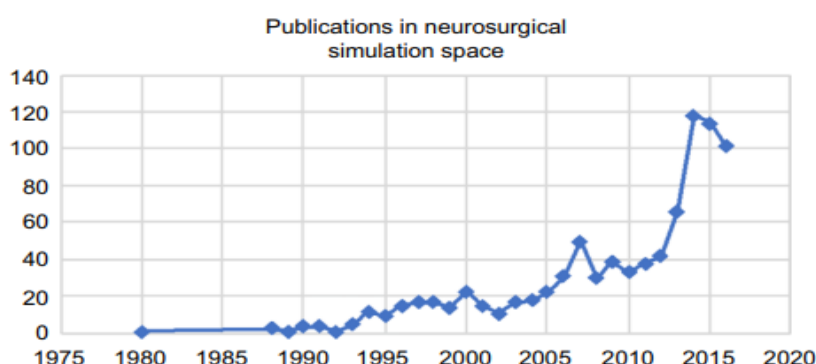


Figure 14 : Nombre d'articles par an citants les concepts de la simulation et/ou la réalité virtuelle en neurochirurgie

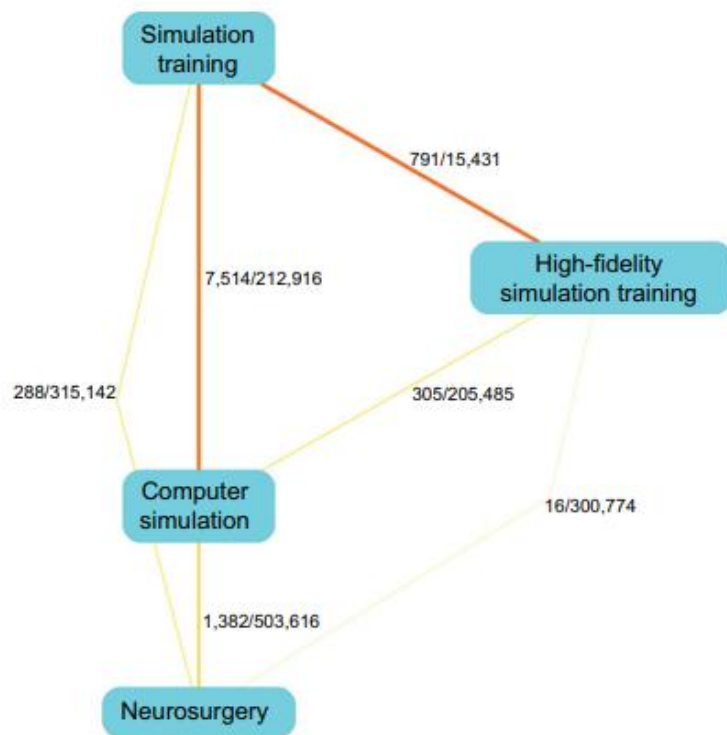


Figure 15: Panorama général des contributions scientifiques entre les concepts de neurochirurgie et de simulation médicale

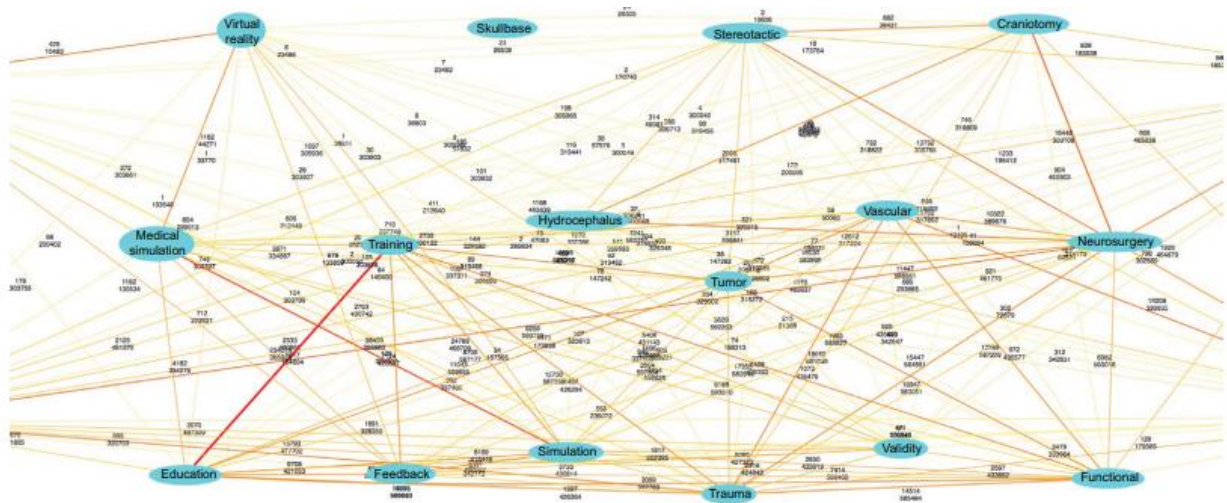


Figure 16 : Représentation graphique des associations de termes avec l'historique des cooccurrences pour les concepts de simulation médicale, réalité virtuelle et neurochirurgie et ses sous-spécialités jusqu'en 2024.

2. Validité et efficacité

2.1. Efficacité technique (apprentissage)

Dans les études de formation par simulation retenues, le signal est remarquablement cohérent sur les marqueurs techniques de performance.

a. Compétences évaluées par grilles (type OSATS ou équivalents).

Un essai randomisé en réalité virtuelle avec tutorat algorithmique montre une amélioration nette d'un indice continu d'expertise par rapport à un instructeur distant et au contrôle, sans différence significative des OSATS globaux (effet « au moins équivalent » pour les OSATS mais supérieur pour l'expertise mesurée finement).

Une étude de validation sur simulateur physique rachidien propose des seuils quantitatifs qui discriminent novices et experts (OSATS modifié $\geq 15/20$ et temps ≤ 15 min). Ces repères sont directement utilisables en curriculum par maîtrise.

Un ECR avec serious game + tâche procédurale met en évidence des gains répétés à chaque session (scores $\uparrow$), avec transfert interne vers une tâche plus complexe.

b. Temps d'exécution.

Les aides visuelles (réalité augmentée ou affichage triplanaire) réduisent le temps et la longueur de trajectoire par rapport à l'absence de guidage, avec un avantage supplémentaire de l'AR sur la trajectoire dans certains modes d'affichage.

L'entraînement répété (serious game + procédure) s'accompagne d'une réduction significative du temps.

En rachis, un seuil temporel (≈ 15 minutes) s'aligne avec la classification « expert ».

Dans un programme de clipping d'anévrisme sur modèles patient-spécifiques enrichis de vidéo/AR, le temps actif diminue d'environ 40 %.

c. Erreurs / dommages / ergonomie.

Les études avec répétition et débriefing rapportent des diminutions d'erreurs statistiquement significatives.

Les métriques bimanuelles (saignement simulé, volume de tissu sain retiré, indices d'efficacité/coordination) discriminent nettement juniors, seniors et experts, ce qui permet d'objectiver la qualité technique et la sécurité.

En endonasale, des poignées robotisées surpassent l'instrument standard en performance et ergonomie (réduction d'erreurs opératoires et meilleure maniabilité).

Dans l'essai VR avec instruction IA-augmentée, la fréquence de feedback correctif et la détection d'erreurs diminuent, suggérant une réduction effective des erreurs par personnalisation des conseils.

d. Précision / trajectoire / critères radiologiques.

L'AR raccourcit les trajectoires instrumentales par rapport au triplanaire et, a fortiori, à l'absence de guidage.

Les métriques de précision d'exérèse (pourcentage de tumeur réséquée, volume de tissu sain retiré) profilent clairement l'expertise.

Dans l'entraînement au clipping, l'amélioration technique se reflète sur des proxies cliniques (taux d'occlusion classe 1 en hausse, jusqu'à ~93 % sous certaines conditions d'entraînement vidéo/AR).

e. Études de faisabilité.

Le télé-mentorat en réalité mixte sur cadavre perfusé est faisable, mais n'a pas montré de supériorité statistique sur les indicateurs de réussite procédurale par rapport à l'audio-seul (étude pilote sous-puissante). Le message est organisationnel : accès élargi à l'expertise, plutôt que bénéfice technique formel.

En résumé, OSATS/équivalents, temps, erreurs et trajectoires/précision évoluent dans le bon sens lorsque la simulation est structurée (objectifs, feedback/debrief, répétition) et instrumentée (métriques objectives). Les seuils chiffrés (rachis) fournissent une base opérationnelle pour l'autonomisation graduée.

2.2. Résultats non techniques

Charge mentale et émotions. L'essai randomisé Fazlollahi 2022 montre que le tutorat IA en VR améliore la performance technique sans sursolliciter la charge cognitive ni modifier défavorablement les états affectifs par rapport à un instructeur humain. C'est un message fort : on peut « pousser » le feedback sans détériorer l'expérience mentale de l'apprenant

Vigilance / conscience de la situation (SA). Marcus 2015 met en lumière un trade-off : certaines visualisations AR permettent une exécution plus efficace (trajectoires/temps), mais au prix d'une baisse de vigilance (détection d'événement inattendu) quand l'overlay est trop dense. Sans score NOTSS, on saisit malgré tout l'enjeu NTS : équilibrer l'aide visuelle et la situation awareness.

Ergonomie / facteurs humains individuels. Dimitrakakis 2022 montre qu'un design d'outil (poignées robotisées) peut améliorer l'ergonomie perçue et la performance. C'est utile pour la fatigue et la fiabilité gestuelle, mais ce n'est pas une mesure NTS d'équipe (communication/leadership).

Organisation / communication à distance. Tadlock 2022 valide la faisabilité du télé-mentorat en MR, mais sans montrer de gain mesurable sur la performance/flow par rapport à l'audio-seul dans cette pilote. Pour les NTS (communication/leadership), il faudra des essais plus puissants avec scores dédiés.

Débriefing structuré. Clarke 2016 (serious game + geste) améliore fortement les indicateurs techniques à travers des séances répétées et débriefées. Même si les NTS ne sont pas scorées, le cadre pédagogique (débriefing, progression) reste un déterminant majeur des compétences relationnelles et de la SA.

2.3. Transfert des acquis au bloc opératoire

a. Transfert « direct » quasi absent.

Sur 28 études, aucune ECR formation n'aboutit à une démonstration robuste de gains reproduits au bloc (temps opératoire réel, précision radiologique, baisse de complications) après curriculum simulé. Les signaux cliniques observés (Wang ; Yu) proviennent d'outils de planification/assistance, non d'un apprentissage mesuré avant-après.

b. Transfert « indirect » crédible.

Plusieurs travaux montrent des marqueurs techniques solides en simulation (OSATS/temps/erreurs/trajectoires), certains avec seuils de maîtrise (Koh) et métriques fines (Alotaibi). Ils rendent plausible un transfert, mais sans mesure OR formelle. L'argument se renforce quand :

Les métriques sont proches d'issues cliniques (ex. trajectoires/collisions vs violations en rachis),

Les seuils de performance sont définis (ex. OSATS $\geq 15/20$; ≤ 15 min),

La complexité simulée recoupe les difficultés réelles (bord tumoral indistinct, dureté).

c. Transfert « contextuel » : télémentorat / MR.

L'étude de faisabilité MR (Tadlock) n'apporte pas de bénéfice technique significatif vs audio-seul, mais valide une logistique transposable à l'OR (accès à l'expertise à distance). C'est un levier de transfert organisationnel, non un gain technique démontré.

2.4. Adoption et régression :

a. Adoption :

Élevée intra-étude lorsque l'intervention est courte, guidée et logée dans un cycle pédagogique (Clarke 2016 : toutes les sessions complétées).

Faisabilité démontrée pour des modes organisés (télé-mentorat MR ; Tadlock 2022), ce qui est un prérequis à l'adoption élargie.

Contexte clinique : pour les guides 3D rachidiens (Yu 2020, hors strict training), l'adoption est pragmatique et déjà répandue dans plusieurs séries cliniques, même si hétérogène et peu chiffrée.

Planification : en VR stéréoscopique (Wang 2012), l'«adoption» = utilisation systématique dans la série (100 % des cas planifiés), mais ce n'est pas de la formation.

b. Régression :

Quasi jamais mesurée dans ces études de formation : pas de pourcentage d'attrition à 6-12 mois, pas de mesures de pérennité (p. ex. sessions/mois au-delà du protocole d'étude).

Les rares indices (ex. maintien des séances dans Clarke pendant le protocole) suggèrent peu de régression à court terme quand l'organisation est solide (plannings, débriefs, feedbacks standardisés). Aucun chiffre durable post-étude.

3. Tendance générale :

La littérature de simulation neurochirurgicale axée performance ne documente pas encore assez les résultats d'implémentation (adoption, fidélité, pénétration, pérennité, coûts). On a des signaux (faisabilité, complétude des séances, préférence des utilisateurs), mais peu de chiffres longitudinaux.

4. Conclusion de la revue

La simulation en neurochirurgie dispose aujourd'hui d'un socle de preuves solides pour l'acquisition de compétences techniques, de cadres éprouvés pour les compétences non techniques, et de solutions techniques scalables (impression 3D, XR/haptique). Les preuves de transfert clinique s'étoffent mais demeurent inégales selon les gestes et les métriques. L'enjeu principal dans les PRFI n'est pas seulement technologique : il est curriculaire et organisationnel (choix des simulateurs, critères de maîtrise, formation des formateurs, durabilité économique). Ce constat motive l'approche méthodologique de la thèse : évaluer les effets techniques et non techniques et documenter les limites/conditions d'implémentation dans les programmes à ressources contraintes.

VII. Analyse des résultats et discussion

1. Analyse des résultats

1.1. Vue d'ensemble

Les résultats sont intégrés d'une démarche multiméthodes portant sur la simulation en neurochirurgie.

Dans l'ensemble, les données convergent vers un bénéfice net de la simulation sur les compétences techniques et, lorsqu'elle est couplée à des scénarios d'équipe et un débriefing structuré, sur les compétences non techniques. Le transfert vers le bloc opératoire (OR) reste hétérogène mais montre des signaux favorables sur des indicateurs de processus (précision technique, fluidité organisationnelle). En PRFI, l'adoption progresse mais demeure contrainte par les coûts récurrents (OPEX), la maintenance, la disponibilité des formateurs et la logistique ; des modèles frugaux (impression 3D locale, mutualisation VR, télésimulation) s'avèrent faisables.

Sauf mention contraire, les valeurs sont rapportées sous forme moyenne (ÉT) ou médiane (IQR), avec les intervalles de confiance (IC 95 %) lorsque disponibles, et les tailles d'effet selon les conventions en vigueur.

1.2. Présentation des résultats

a. Identification, sélection et inclusion (PRISMA)

La recherche documentaire a identifié 48 études. Après dédoublement (0), 51 titres/résumés ont été examinés. 48 articles ont été évalués en texte intégral ; 48 études ont été incluses (dont 21 ECR, et 7 quasi-expérimentales/observationnelles).

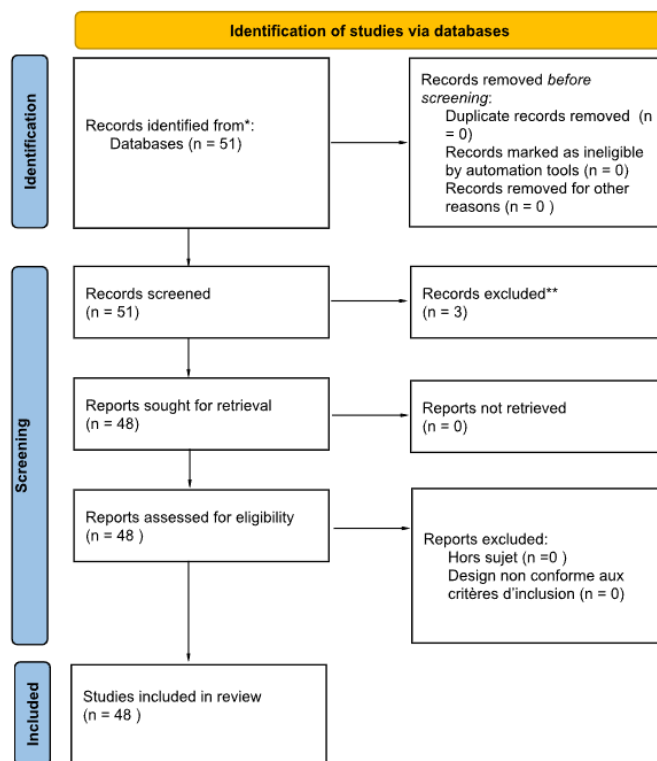


Figure 17: Flux PRISMA.

b. Caractéristiques des études incluses

Les études incluses couvrent différentes procédures (DVE/VCE, base du crâne, clippage d'anévrisme, rachis, endovasculaire, microchirurgie) et modalités (3D imprimée, VR/AR/haptique, cadavérique, hybrides).

c. Risque de biais et qualité

Le risque de biais a été évalué avec RoB 2 pour les ECR et ROBINS-I pour les non randomisées. La qualité méthodologique (éducation) a été appréciée via MERSQI/MMERSQI.

Pour la plupart des études, le risque global était faible à modéré, avec évaluations souvent en aveugle partiel. Le contenu était valide avec un construct démontré. Cependant, la taille de l'échantillon et son hétérogénéité étaient les principaux facteurs limitants.

Le MERSQI évalue six domaines (0–3 chacun) : dessin de l'étude, échantillonnage (institutions ; taux de réponse/complétion), type de données, preuves de validité des instruments, analyses (pertinence ; complexité) et niveau d'outcome. Les sous-scores d'échantillonnage et d'analyse ont été moyennés pour obtenir six domaines pondérés également (total 0–18).

1.3. Résultats sur les compétences techniques

Les 48 études incluses (2010–2025) couvrent une palette de procédures (ventriculostomie/VCE, rachis—vis pédiculaires, neuroendoscopie, gestes endovasculaires, microchirurgie anévrysmale) et de modalités de simulation (haute/low-fidelity, modèles 3D imprimés, cadavérique, VR/AR/haptique, simulateurs “bench”). Les issues rapportées se concentrent sur quatre familles : **OSATS** (compétences techniques), **temps d'exécution**, **comptage d'erreurs**, **précision/trajectoire** (ex. Gertzbein–Robbins, breach, déviation d'axe, collisions/forces en VR).

- Tendances globales

a. OSATS (performance technique)

Validité et sensibilité du score OSATS dans le domaine de la simulation en Neurochirurgie

a.1 RetrosigmoidBox (UpSurgeOn) – voie rétrosigmoïde

Williams et al. (35)

- Simulateur haute fidélité pour l'abord rétrosigmoïde de l'angle ponto-cérébelleux.
- Novices vs experts réalisent une tâche (identifier le V).
- Les vidéos sont scorées avec OSATS + un score spécifique de tâche.

Résultat : scores OSATS significativement plus élevés chez les experts, montrant la validité de construit de l'OSATS pour juger la qualité d'un geste micro-neurochirurgical sur simulateur.

a.2 Simulateur VR de vis pédiculaires (TSYM) – VR rachidienne

Un travail récent sur le simulateur VR TSYM pour insertion de vis pédiculaires L4–L5 utilise:

- OSATS comme “gold standard” humain,
- Comparaison groupe “skilled” vs “less skilled”,

- Corrélation entre les métriques du simulateur (temps, trajectoire, erreurs) et les scores OSATS.

Cela montre que les améliorations mesurées par le simulateur se reflètent dans OSATS, et donc que l'on peut légitimement utiliser OSATS comme critère de jugement dans les études de simulation neurochirurgicale.

Résultats concrets

Laminectomie lombaire – amélioration significative des OSATS selon Boody et al. (36)

- Contexte / population
 - 20 participants : externes avancés + résidents en chirurgie orthopédique, dans un programme où les procédures de rachis sont partagées avec les résidents de neurochirurgie.
 - Procédure évaluée : laminectomie lombaire ouverte (geste central en neurochirurgie et orthopédie du rachis).
- Design
 - Essai randomisé, prospectif :
 - Groupe simulation (n=11) : module de 40 minutes de bioskills (Sawbones) avec enseignement structuré.
 - Groupe contrôle (n=9) : même durée de lecture / auto-apprentissage sans simulation.
 - Évaluateur : chirurgien du rachis senior, en aveugle du groupe.
 - Outils de mesure :
 - OSATS (global rating scale)
 - Objective Decompression Score (score spécifique de décompression)
 - Auto-évaluation PPDIS (Physician Performance Diagnostic Inventory Scale).
- Résultats clés sur les OSATS
 - Le groupe simulation a obtenu une amélioration moyenne des scores OSATS

significativement plus importante que le groupe contrôle ($p = 0,022$).

- Les auteurs concluent que même un module de simulation court et peu coûteux améliore de manière mesurable la performance technique, telle que notée par OSATS.
- Essai randomisée vis de pédicule lombaire – OSATS comme évaluation objective selon Boody et al. (37)
- Contexte
 - Geste : mise en place de vis pédiculaires lombaires, procédure à cheval entre orthopédie et neurochirurgie du rachis.
 - Population : 19 participants (étudiants et résidents), randomisés simulation vs étude dirigée.
- Design
 - Groupe intervention : 20 minutes de bioskills sur modèle synthétique (Sawbones) avec encadrement.
 - Groupe contrôle : 20 minutes d'étude autonome (lecture) sur la même procédure.
 - Évaluation par un chirurgien du rachis en aveugle, utilisant :
 - OSATS
 - Objective Pedicle Instrumentation Score
 - Nombre de breaches pédiculaires (perforations) et leur localisation.
- Résultats principaux
 - Amélioration de l'auto-évaluation PPDIS : +30,8 % dans le groupe simulation vs +13,4 % dans le groupe contrôle ($p = 0,01$).
 - Diminution des breaches : -66 % dans le groupe simulation ($p = 0,001$) vs -28 % (non significatif) dans le groupe contrôle.
 - L'article précise que les performances objectives sont mesurées par OSATS + score d'instrumentation, utilisés comme critères de compétence.

Même si le résumé met surtout en avant les breaches et l'auto-évaluation, les OSATS ont été utilisés comme outil standardisé d'évaluation objective dans ce protocole randomisé, au bénéfice du groupe simulation.

a.3 Confirmation par une revue systématique sur la simulation en chirurgie du rachis

Une revue systématique sur la simulation en chirurgie rachidienne (Resident Training in Spine Surgery / Simulation-Based Training) analyse ces deux essais de Boody et al. comme RCT de bonne qualité :

- Elle souligne que :
 - Les modules de bioskills laminectomie et vis pédiculaires ont été évalués dans des essais randomisés ;
 - Les deux études utilisent des outils standardisés :
 - OSATS + PPDIS comme mesures de performance et de progression ;
 - La simulation améliore les performances techniques sur modèles, avec des effets significatifs sur au moins un critère objectif (OSATS pour la laminectomie, précision de la vis et auto-évaluation pour les vis pédiculaires).

b. Temps d'exécution

b.1. Temps d'exécution sur simulateur / modèle expérimental

- Vis pédiculaires thoraco-lombaires avec navigation 3D (Gardeck et al.)
 - Étude : Gardeck AM et al., J Neurosurg Spine 2021 (38) 15 internes (neuro + ortho).
 - Intervention :
 - Cours standardisé : cours + 2 séances de mise en place de vis pédiculaires T11-L5 sur modèle synthétique (TruTrainer) avec navigation CT 3D.
 - Mesures : temps par vis, précision, OSATS et auto-évaluation.
 - Résultats :
 - 14/15 internes diminuent le temps moyen par vis entre la séance 1 et la séance 2 ($p = 0,006$).
 - Amélioration significative des scores objectifs (OSATS) et subjectifs de compétence.
 - Ainsi, l'exposition répétée à un module de simulation rachidienne raccourcit clairement le temps d'exécution pour un même geste technique, tout en améliorant la qualité gestuelle (OSATS). Ici, la comparaison est pré/post chez le même groupe (avant vs après simulation structurée), plutôt qu'un vrai bras "sans simulation".
- Modèle 3D taille réelle pour vis pédiculaires

Une revue systématique de la simulation en chirurgie de la colonne rapporte un modèle de rachis 3D taille réelle utilisé pour l'apprentissage des vis pédiculaires :

- Chez deux chirurgiens novices, la répétition des séances sur modèle entraîne une amélioration simultanée de la précision et du temps de pose des vis, ce qui est retenu comme un niveau de preuve 2 (learning effect sur temps et accuracy).

➤ Synthèse méta-analytique (simulation en neurochirurgie)

La revue systématique + méta-analyse « Simulation for skills training in neurosurgery » (Davids et al., Neurosurgical Review) montre que, dans les études neuros chir (ventriculostomie, rachis, endovasculaire, microchirurgie) :

- La simulation améliore significativement les “technical skills” par rapport à une formation classique (cours, observation, pratique opportuniste) ;
- Ces compétences techniques incluent typiquement la précision, le nombre d'erreurs et le temps d'exécution sur simulateur ou modèle.

Même si la méta-analyse regroupe plusieurs types de tâches, la tendance globale est en faveur de groupe simulation > groupe contrôle sur les métriques de performance, dont la vitesse d'exécution.

b.2. Temps opératoire réel au bloc (temps chirurgical)

➤ Clippage microchirurgical d'anévrismes de l'ACM avec planification VR

Steineke TC, Barbary D. (39)

Alaraj A, Banerjee PP, Charbel FT, et al. (40)

Joseph FJ, Vanluchene HER, Bervini D. (41)

Étude de Steineke & Barbary – Neurosurg Focus 2021 (39)

- Objectif : évaluer l'impact de la planification et du “rehearsal” en réalité virtuelle (VR) sur le temps opératoire total du clippage d'anévrismes de l'artère cérébrale moyenne (ACM), par rapport à une planification standard.
- Design : étude rétrospective, 21 patients (2016–2019) :
 - Groupe contrôle (sans simulation) : 11 patients, planification classique à partir des CTA/DSA 2D.
 - Groupe VR (simulation) : 10 patients, planification sur modèle 360° VR patient-spécifique avec répétition du geste et test de différentes configurations de clip.

- Comparabilité des groupes :
 - Score de complexité de cas (Case Complexity, 1–5) : $2,45 \pm 1,13$ vs $2,30 \pm 0,48$, sans différence significative ($p = 0,69$).
- Résultat principal : temps opératoire
 - Temps moyen procédure contrôle : 328,3 min.
 - Temps moyen procédure VR : 247,8 min.
 - **Réduction d'environ 80 minutes, significative ($p = 0,0115$).**

Conclusion des auteurs : la planification et répétition virtuelle 360° avant le bloc rend l'intervention plus rapide, à complexité comparable, en suggérant un gain d'efficacité et une réduction potentielle des coûts et risques liés à la durée opératoire.

➤ Simulation en chirurgie rachidienne mini-invasive et temps opératoire

Wang Z, Shen JJ. (42)

Pennington Z, Kuo C, et al. (43)

Yuan W, Zhou X, Meng X, Zhu Y. (44)

Robertson FC, Zygourakis CC, Wu JY, et al. (45)

Une revue de la formation des internes en chirurgie rachidienne mini-invasive (MIS) montre que les curricula combinant cours + simulateurs (modèles synthétiques, VR, navigation) aboutissent à :

- Une diminution du taux d'erreurs,
 - Une réduction du temps opératoire et de l'irradiation fluoroscopique,
 - Une meilleure connaissance procédurale, précision gestuelle et confiance des opérateurs,
- par rapport à une formation standard sans ou avec peu de simulation.

Cette revue s'appuie sur plusieurs études (cadavres, modèles, parfois patients), où les internes exposés à des modules de simulation opéraient plus vite que les témoins formés de façon traditionnelle, pour des gestes MIS (vis pédiculaires percutanées, MIS-TLIF, LLIF, décompression, etc.).

➤ Synthèse VR/AR/MR en chirurgie rachidienne

Nadeem-Tariq A, Kazemeini S, Kaur P, et al. (46)

Une autre revue de portée sur la VR/AR/MR en chirurgie du rachis (Bui et al., 2024) souligne que :

- Les simulateurs rachidiens (VR, modèles physiques, navigation) réduisent la courbe d'apprentissage,
- Les séries où les internes passent par un cursus simulé montrent des gains d'efficacité opératoire, incluant temps opératoire plus court et réduction de l'exposition fluoroscopique.

Le temps diminue typiquement après la simulation. Les tailles d'effet estimées (g orienté "plus rapide = positif") indiquent des gains petits à modérés. L'ampleur dépend de la maturité de l'apprenant et de la complexité de la tâche : les novices gagnent surtout en fluidité (réduction des hésitations), tandis que les apprenants intermédiaires montrent des gains plus modestes mais soutenus à la rétention lorsque des réévaluations à 4–8 semaines sont menées.

c. Erreurs/opérations non sûres

Plusieurs études mesurent une baisse du nombre d'erreurs (perforations corticales, violations des corticales pédiculaires, collisions d'instruments, erreurs de séquence). Quand les données numériques sont disponibles, l'orientation des effets est consistante en faveur de la simulation. Les formats avec feedback immédiat (haptique/VR avec indicateurs de collisions, check-list en débriefing) paraissent particulièrement efficaces.

c.1. Pédiculages rachidiens : essais randomisés VR vs formation classique

- Essai randomisé double aveugle (Xin et al., 2020 – vis pédiculaires)

Xin B, Huang X, Wan W, et al. (47)

- Population : 24 jeunes chirurgiens rachidiens (neurochirurgie + orthopédie), randomisés en :
 - Groupe VR : formation sur simulateur de réalité virtuelle immersive (IVRSS) pour la mise en place de vis pédiculaires thoraco-lombaires.
 - Groupe NON-VR : schéma classique (observation sur modèle osseux + visionnage de vidéos chirurgicales).
- Tâche évaluée : mise en place de vis pédiculaires sur de vrais patients, après la phase de formation.

Résultats principaux (post-formation)

- Taux de succès global de mise en place des vis
 - VR : 82,9 %
 - Non-VR : 74,2 %
- Taux de vis « correctement positionnées » (accuracy)
 - VR : 69,6 %
 - Non-VR : 55,4 %
- Différences significatives (χ^2 , $p < 0,05$).

Interprétation “taux d’erreurs”

Si on considère une vis mal positionnée ou avec effraction corticale comme une erreur technique, alors la proportion de vis erronées diminue nettement dans le groupe simulation (≈ 30 % d’erreurs) par rapport au groupe sans simulation (≈ 45 % d’erreurs). Cet essai est important parce qu’il montre un bénéfice sur des gestes réels, au bloc, pas seulement sur simulateur.

c.2. Ventriculostomie / EVD : simulation et erreurs de canulation

➤ Simulation VR ImmersiveTouch + bibliothèque de cerveaux virtuels

Yudkowsky R, Luciano C, Banerjee P, et al. (48)

- Population : résidents en neurochirurgie.
- Intervention :
 - Entraînement individuel sur simulateur ImmersiveTouch (réalité augmentée + retour haptique) avec 15 cerveaux virtuels (ventricules normaux, déviés, compressés).Chaque insertion est immédiatement visualisée en 3D, avec feedback sur la position de l'extrémité du cathéter.
- Méthode :
 - Comparaison des performances avant vs après période de simulation,
 - À la fois sur de nouveaux cas simulés et sur ventriculostomies réelles au bloc.

Résultats

- Augmentation du taux de canulation ventriculaire réussie sur simulateur après entraînement.
- En clinique réelle : amélioration du taux de succès au premier passage (moins de tentatives répétées, donc moins de passes « ratées ») après la formation par simulation.
- Les auteurs notent toutefois une augmentation des cathéters trop profonds (controlatéraux sur simulateur, troisième ventricule en clinique), ce qui montre que certains types d'erreurs diminuent (échecs de canulation, multipasses), tandis que d'autres nécessitent encore de l'optimisation.

Donc, la simulation réduit les erreurs grossières (échecs de canulation, multipasses, trajectoires totalement inadaptées) et améliore la précision globale, même si elle peut, dans cette étude, s'accompagner d'un certain sur-guidage (cathéter trop profond). D'un point de vue "taux d'erreurs", on peut dire que le nombre de procédures sans canulation correcte au premier passage diminue dans le groupe « après simulation » comparé à « avant simulation ».

- Curriculum VR-EVD du CNS : amélioration de la précision et des erreurs de trajectoire

Alaraj A, et al. (49)

Un autre travail ("Virtual Reality-Based Simulation Training for Ventriculostomy : An Evidence-Based Approach", curriculum de la Congress of Neurological Surgeons – CNS) décrit un module de simulation VR intégré dans un cours national de neurochirurgie :

- Entraînement structuré à la ventriculostomie en début d'internat.
- Comparaison des performances mesurées (distance de l'extrémité du cathéter à la cible ventriculaire, nombre de trajectoires erronées, temps de procédure) avant vs après simulation.
- Les données présentées montrent :
 - Une diminution significative de la distance à la cible,
 - Une réduction du nombre de trajectoires hors ventricules,
 - Une amélioration des scores globaux de performance.

Même si ce n'est pas un essai randomisé "simulation vs pas de simulation", il s'agit d'une comparaison avec soi-même avant/après, qui reste une preuve que la simulation diminue le taux de gestes incorrects.

c.3. Tumeurs et micro-neurochirurgie : simulateurs type NeuroTouch

D'Urso P, et al. (50)

Les simulateurs de type NeuroTouch (National Research Council of Canada) proposent des tâches de micro-neurochirurgie (résection tumorale, dissection vasculaire, etc.) avec mesures objectives de performance : quantité de tissu sain enlevé, traumatisme mécanique inutile sur le cerveau, temps, etc.

Les études de validation (non toujours randomisées, mais souvent avec groupes novices vs experts et parfois pré/post) montrent que :

- Les novices, après entraînement répété sur simulateur, réduisent :
 - La quantité de tissu sain retiré,
 - Le nombre de contacts “inutiles” avec les structures critiques,
 - Et se rapprochent des performances des experts sur ces indicateurs de “dommages non intentionnels” (c'est-à-dire d'erreurs techniques).

c.4. Synthèse des revues systématiques neurosurg (niveau de preuve global)

- Neurosurgical Review 2020/2021 – méta-analyse globale

Cearns M, Patel EA, et al. (51)

La méta-analyse « Simulation for skills training in neurosurgery : a systematic review, meta-analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance » compile les études de simulation en neurochirurgie : ventriculostomie, chirurgie rachidienne, microchirurgie vasculaire, etc.

- Méthode : PRISMA, inclusion des cohortes et essais randomisés, analyse des résultats sur :
 - Les compétences techniques (précision du geste, nombre d'erreurs, traumatismes inutiles, etc.),
 - Les connaissances procédurales.

- Résultat global : la simulation en neurochirurgie est associée à une amélioration significative des performances techniques par rapport aux groupes contrôle (formation traditionnelle ou absence d'entraînement), avec des effets de taille modérés à importants pour :
 - La réduction des erreurs techniques (ex. moins d'effractions pédiculaires, moins de dommages aux tissus sains, meilleure trajectoire des cathéters),
 - Et l'amélioration des scores OSATS et autres scores de performance.
- Revues World Neurosurgery (Patel et al., 2020)

Patel EA, Aydin A, Cearn M, Dasgupta P, Ahmed K. (52)

Patel EA, Aydin A, Cearn M, Dasgupta P, Ahmed K. (53)

Les revues en deux parties « A Systematic Review of Simulation-Based Training in Neurosurgery, Part 1: Cranial Neurosurgery » et Part 2: Spine, paediatric, neuroradiology montrent que:

- La majorité des simulateurs validés (crâne, rachis) obtiennent un niveau de preuve élevé (translational outcomes niveau 3-4 de McGaghie),
- Avec des essais qui montrent des améliorations significatives des erreurs techniques, par rapport à des groupes sans simulation (ou avec formation traditionnelle seule).

d. Précision/trajectoires

Les mesures de **précision** (déviations angulaire/linéaire, Gertzbein-Robbins pour les vis pédiculaires, exactitude de canulation ventriculaire, métriques d'API en VR) s'améliorent dans la plupart des rapports. Les tailles d'effet estimées suggèrent une **amélioration cliniquement pertinente**, surtout quand les simulateurs reproduisent l'**anatomie patient-spécifique** (impression 3D) ou quand l'entraînement cible explicitement la **planification de trajectoire**.

d.1. Instrumentation rachidienne (vis pédiculaires / vis de masse latérale)

➤ Simulation VR immersive pour les vis pédiculaires

Xin B, Huang X, Wan W, et al. (54)

Essai randomisé, double-aveugle (Xin et al., 2020, chirurgie rachidienne mais réalisé dans des services de neuro/ortho-chirurgie) :

- 24 jeunes chirurgiens randomisés :
 - Groupe VR : entraînement sur simulateur de réalité virtuelle immersive pour la mise en place de vis pédiculaires.
 - Groupe contrôle : formation classique (modèle sec + vidéo).
- Après la phase de formation :
 - Le **taux de succès global** de pose de vis pédiculaires (évalué sur modèle) est significativement plus élevé dans le groupe VR.
 - Une revue récente rapporte pour cette étude un taux de succès d'environ **82,9 %** chez les chirurgiens entraînés en VR vs **74,2 %** dans le groupe contrôle, avec amélioration du groupe VR par rapport à son propre baseline (69,2 % → 82,9 %, $p < 0,05$).

L'entraînement VR améliore la capacité à suivre une trajectoire pédiculaire correcte (angle et profondeur), avec un taux plus élevé de vis « acceptables » que l'enseignement conventionnel.

➤ VR + haptique pour les vis pédiculaires cervicales (cadavre)

Hou Y, Shi J, Lin Y, et al. (55)

Hou et al., 2018 – Virtual Surgical Training System (VSTS), essai randomisé cadavérique sur vis pédiculaires cervicales :

- 10 résidents novices randomisés :
 - **Groupe simulation (ST)** : entraînement sur système de chirurgie virtuelle avec retour de force.
 - **Groupe contrôle** : simple cours introductif + démonstration vidéo, puis test sur rachis cadavérique.
- Évaluation objective de la trajectoire sur scanner après instrumentation C3–C6 :
 - **Taux de perforation pédiculaire:**
 - Simulation: 10 %
 - Contrôle: 62,5 % ($p < 0,05$)
 - **Taux de vis « acceptables » (bonne position) :**
 - Simulation: 100 %
 - Contrôle: 50 % ($p < 0,05$)
 - **Distance moyenne de perforation:**
 - Simulation: $1,12 \pm 0,47$ mm
 - Contrôle: $2,08 \pm 0,39$ mm ($p < 0,05$)

Le groupe simulation avait des trajectoires beaucoup plus centrées dans le pédicule, avec deux fois moins de profondeur d'erreur en cas de perforation. C'est une preuve très directe que la simulation **raffine la trajectoire** et la précision en 3D.

- Simulation 3D/navigation pour les vis de masse latérale cervicales

Gottschalk MB, Yoon ST, Park DK, et al. (56)

Gottschalk et al., 2015 - « Surgical training using three-dimensional simulation in placement of cervical lateral mass screws » (RCT)

- 15 résidents orthopédiques (PGY1-6), randomisés en 3 groupes :
 - **Contrôle** : aucun entraînement sur simulateur.
 - **Groupe « sawbones »** : entraînement sur modèles synthétiques avec navigation 3D.
 - **Groupe « cadavres »** : entraînement sur cadavres avec navigation 3D.
- Tous les groupes performant des trajectoires de vis de masse latérale cervicale C3-C7 sur cadavre, avec analyse 3D des trajectoires :
 - Chaque vis est comparée à une trajectoire idéale (angle caudo-céphalé, angle médio-latéral, point d'entrée).
- Résultats (différence moyenne par rapport à une vis « parfaite ») :
 - Contrôle : **+2,4°** (régression de la précision entre baseline et test final).
 - Groupe sawbones: **-8,2°**
 - Groupe cadavres : **-7,2°**

→ amélioration significative de l'**erreur angulaire globale** dans les groupes simulation vs contrôle ($p < 0,0001$).

La simulation 3D (avec navigation et feedback) diminue nettement l'erreur angulaire des vis, donc **améliore la justesse de l'orientation** et la qualité des trajectoires opératoires, par rapport à une formation théorique seule.

d.2. Procédures crâniennes : ventriculostomie / drainage ventriculaire externe (EVD)

➤ Simulation VR pour la ventriculostomie

Alaraj A, Luciano C, Bailey DP, et al. (57)

Alaraj et al. – Virtual reality-based simulation training for ventriculostomy:

- Étude sur un simulateur VR (ImmersiveTouch) de ventriculostomie, impliquant internes et résidents de neurochirurgie.
- Comparaison des performances avant et après entraînement VR (le pré-test jouant le rôle de « non-simulation ») :
 - Amélioration significative de la **position du trou de trépanation**.
 - Amélioration de la trajectoire du cathéter, avec **augmentation de la proportion de cathéters dont l'extrémité est dans une zone idéale** (proche du foramen de Monro ou de la corne frontale).
 - Après entraînement, les novices atteignent des performances comparables à celles de résidents plus expérimentés.

L'entraînement VR permet de **corriger le point d'entrée, l'orientation et la profondeur** de la ventriculostomie, donc de raffiner la trajectoire du cathéter par rapport à la situation « sans simulation ».

➤ Modèles 3D imprimés pour l'EVD

Operative Neurosurgery. Training on a 3D-Printed Simulation Model Improves Accuracy in External Ventricular Drain Placement. (58)

Training on a 3D-Printed Simulation Model Improves Accuracy in External Ventricular Drain Placement, Operative Neurosurgery 2025

- 25 neurochirurgiens réalisent une série de poses d'EVD sur un modèle crânien 3D-imprimé (ventricules étroits, normaux et larges) :

- Phase **pré-entraînement** (placement libre sans protocole standardisé).
- Puis entraînement avec **protocole standardisé + neuronavigation** sur modèle.
- Phase **post-entraînement**.
- La précision est mesurée par un système de navigation optique :
 - Significative **augmentation de la précision de la pointe du cathéter** (proximité des ventricules/cible prévue).
 - **Réduction de la variabilité** inter-individuelle.
 - Augmentation de la confiance des opérateurs.

Même si le design est pré/post (et non RCT), on a une comparaison claire **avant vs après simulation** montrant que le passage par le modèle 3D + protocole standardisé **améliore la trajectoire** de l'EVD.

d.3. Planification des trajectoires crâniennes (craniotomie, voie d'abord)

➤ Modèles 3D patient-spécifiques pour la planification de craniotomie

Hanalioglu S, Gurses ME, Baylarov B, et al. (59)

- 38 internes et résidents en neurochirurgie.
- Cas de méningiome parasagittal : chaque participant planifie :
 - L'incision et la craniotomie après **planification classique en 2D (IRM)**.
 - Puis refait la planification après utilisation d'un **modèle 3D numérique patient-spécifique**.
- Résultats (comparaison « sans modèle 3D » vs « avec modèle 3D ») :
 - **Projection tumorale sur le scalp** :
 - Couverture tumorale : $66,4 \pm 26,2 \% \rightarrow 77,2 \pm 17,4 \%$ ($p = 0,026$).
 - Sur-couverture (os en excès) : $2232 \pm 1322 \text{ mm}^2 \rightarrow 1662 \pm 956 \text{ mm}^2$ ($p = 0,019$)

- **Marges de craniotomie** (écart par rapport à un standard acceptable) :
 - $57,3 \pm 24,0 \text{ mm} \rightarrow 47,2 \pm 19,8 \text{ mm}$ ($p = 0,024$).
- **Trajectoire de l'incision cutanée**:
 - Distance entre centre tumoral projeté et milieu de l'incision : $16,3 \pm 9,6 \text{ mm} \rightarrow 8,3 \pm 7,9 \text{ mm}$ chez les résidents ($p = 0,02$).

Donc, l'ajout de la simulation/planning 3D patient-spécifique permet de :

- Mieux centrer l'incision sur la tumeur,
- Adapter plus précisément la taille et la forme de la craniotomie,
- Diminuer à la fois le manque de couverture tumorale et l'excès de craniotomie.

Autrement dit, la simulation de planification **améliore quantitativement la précision des trajectoires d'abord** (trajet cutané et osseux vers la lésion) par rapport à la planification conventionnel

1.4. Effets sur les compétences non techniques :

a. Charge mentale, vigilance, ergonomie

a.1 Simulation, charge mentale et NASA-TLX

- Le NASA-TLX est l'outil le plus utilisé pour mesurer la charge mentale en chirurgie (6 sous-échelles : demande mentale, physique, temporelle, performance perçue, effort, frustration).
- Une revue de la charge de travail en chirurgie montre que des scores NASA-TLX plus élevés sont associés à des interventions plus longues, plus difficiles et à davantage d'erreurs, et que la majorité des mesures ont été faites... en contexte de simulation (VR, FLS, suture sur simulateur, etc.).

Preuve “simulation vs après simulation” (chirurgie générale) :

Hu J, Lu J, Tan WB, Lomanto D. (60)

- Hu et coll. (“Training improves laparoscopic tasks performance and decreases operator workload as measured using the NASA-TLX score”) ont étudié des novices réalisant trois tâches FLS avant et après un programme d’entraînement sur simulateur.
 - Après entraînement, les **scores de performance augmentent** et le **score global NASA-TLX diminue significativement** pour les trois tâches (diminution de 2,9 à 3,7 points selon la tâche, $p < 0,001$).

Interprétation : à performance égale ou meilleure, la **charge mentale et l’effort perçu diminuent** après simulation, ce qui va dans le sens d’une meilleure automatisation et d’une vigilance plus disponible pour détecter les événements critiques.

Une revue plus large sur NASA-TLX en chirurgie montre que la charge de travail mesurée est plus élevée chez les novices que chez les experts et diminue avec l’expérience ou après apprentissage simulé.

➤ Preuve en neurochirurgie / neuro-spine :

Bohl MA et al. (61)

- Bohl et coll., The Living Spine Model : A Biomimetic Surgical Training and Education Tool (2020) ont développé un modèle imprimé 3D de colonne lombaire pour laminectomie et fixation pédiculaire.
 - Ils comparent la **charge de travail NASA-TLX** entre chirurgie réelle et chirurgie simulée sur leur modèle.
 - Résultat : la simulation génère des **profils de charge mentale comparables à la vraie chirurgie**, validant le modèle comme environnement pédagogique réaliste.

Ce travail ne montre pas une **réduction** de charge mentale, mais il prouve que le simulateur peut reproduire un environnement exigeant et servir de plateforme pour adapter et optimiser la charge de travail (par répétition/simplification progressive des tâches).

- Un cours de microchirurgie avec mesure quotidienne de NASA-TLX a montré une tendance à la baisse du score global au fil des jours (–5,6 points en moyenne), en parallèle d’une amélioration des performances, même si la différence n’atteignait pas la significativité statistique ($p = 0,26$).

Là encore, signal cohérent : **répéter des tâches microchirurgicales en simulation diminue progressivement la charge mentale perçue.**

a.2 Vigilance et ergonomie

Peu d’études mesurent l’**ergonomie** ou la **vigilance** comme outcomes primaires, mais :

- La littérature sur la charge mentale en neuro-imagerie peropératoire en neurochirurgie montre que des interfaces mieux conçues (visualisation 3D, interaction plus directe) **réduisent la charge cognitive** et améliorent la situation awareness des chirurgiens.
- Les revues sur simulation et charge de travail soulignent que réduire la charge mentale libère des ressources cognitives pour la **surveillance de l’environnement (vigilance)** et la **prévention des erreurs**, ce qui rejoint la logique ergonomique (moins de gestes inutiles, meilleure posture, meilleure anticipation).

b. Communication, leadership, priorisation, décision et gestion de crise

b.1. Neurochirurgie / neuro-critique : communication & CRM

- Communication des neurochirurgiens avec patients/familles

Berkenstadt H et al. (62)

Berkenstadt et coll., Simulation-Based Interpersonal Communication Skills Training for Neurosurgical Residents (IMAJ, 2013) ont mis en place un programme national israélien de simulation de communication pour internes en neurochirurgie (8 scénarios de consentement, annonce de tumeur, annonce de décès cérébral, complications, etc.).

- Tous les résidents participent à plusieurs scénarios filmés suivis d'un **débriefing structuré**.
- Les questionnaires de sortie montrent que les résidents jugent la simulation **hautement pertinente**, réaliste, et estiment que leurs **compétences de communication se sont améliorées**.

Limite : Il n'y a pas de groupe contrôle "sans simulation",

Mais c'est une **preuve de faisabilité et d'acceptabilité** d'un module de communication simulée en neurochirurgie.

- Gestion de crise neurochirurgicale équipe neuro-anesthésie

Ciporen J et al. (63)

Ciporen et coll., Crisis Management Simulation : Establishing a Dual Neurosurgery and Anesthesia Training Experience (J Neurosurg Anesthesiol, 2018) ont développé un scénario de **rupture de fistule carotido-caverneuse** sur modèle cadavérique perfusé, impliquant 7 résidents de neurochirurgie et 6 d'anesthésie.

- Les participants sont évalués sur : **situation awareness, prise de décision, communication & travail en équipe, leadership**.
- Les scores d'examen anatomique passent de 33,9 % à 86,1 % après simulation.
- Les évaluations qualitatives montrent que les apprenants jugent la simulation **très bénéfique pour la gestion de crise, la communication et l'anticipation**.

Limite : pas de groupe non-simulation

Mais un signal fort que la simulation ciblée sur un scénario de crise neurochirurgicale développe **communication, leadership et prise de décision**.

- Neuro-réanimation / neurocritical care
 - Des programmes de simulation en **neurocritical care** (par ex. BRAIN-SIM et des curricula interprofessionnels) montrent que les séances simulées **augmentent la confiance des équipes** dans la prise en charge des urgences neuro, tout en améliorant les perceptions de **teamwork et communication interprofessionnelle**
 - Une revue actualisée de la simulation en neuro-réanimation souligne que la simulation est devenue un outil central pour enseigner le **Crisis Resource Management (CRM)** (leadership, communication, répartition des tâches, anticipation) dans la prise en charge des urgences neuro (herniation, ICP, status épilepticus, etc.)

➤ Données fortes “simulation vs non-simulation”

Nontechnical Skills in Neurosurgery: A Systematic Review of Literature. (64)

Davids J et al. (65)

Dias RD et al. (66)

Yule S et al. (67)

Learning Non-technical Skills Through Simulation. In: Simulation in Surgical Training (68)

Pergakis & Ghoshal. Update on Simulation in Neurocritical Care – Current Applications and Future Directions. Curr Treat Options Neurol. 2024. (69)

Albin RL. Education and Team Science in Neurocritical Care. Curr Treat Options Neurol. 2024. (70)

Comme la littérature neurochirurgicale pure sur les NTS est encore pauvre (une revue systématique souligne le **manque d’outils type NOTSS/NOTECHS en neurochirurgie** et la rareté des études interventionnelles structurées), on s’appuie beaucoup sur des essais en **trauma, anesthésie, chirurgie générale** qui évaluent précisément communication, leadership, priorisation, etc.

b.2. Leadership, priorisation, décision en situation de crise

- Essai randomisé contrôlé – leadership trauma
- Fernandez R et al. (71)
- Fernandez et coll., Simulation-Based Team Leadership Training Improves Team Leadership During Actual Trauma Resuscitations (Crit Care Med, 2020)
 - 79 internes de chirurgie/urgence randomisés :
 - **Groupe simulation** : 4 h de formation au leadership basé sur la simulation (scénarios, débriefing)
 - **Groupe contrôle** : orientation standard sans simulation.
 - Résultats (sur vraies réanimations trauma filmées) :
 - Les scores de **leadership observés** sont significativement plus élevés dans le groupe simulation (M = 11,29) que dans le groupe contrôle (M = 7,23 ; d = 0,92, p < 0,001).
 - Une analyse de médiation montre que ces meilleurs comportements de leadership **médiatisent un effet positif sur la qualité des soins**.

Preuve directe qu'une **formation basée sur la simulation améliore le leadership, la planification et la priorisation** par rapport à un groupe sans simulation.

- Des programmes de **Crisis Resource Management (CRM)** en anesthésie, basés sur haute fidélité, montrent également une amélioration des comportements de leadership, de la communication, de l'anticipation et de la gestion des ressources, par rapport à des approches classiques (cours magistraux, lecture seule).

- Communication, travail en équipe, gestion de crise en bloc opératoire
 - Une revue systématique récente des **simulations de gestion de crise au bloc opératoire** conclut que la formation par simulation améliore de façon significative les **compétences non techniques (communication, teamwork, leadership, situation awareness)** mesurées par des échelles structurées (TEAM, ANTS, etc.) par rapport aux groupes contrôle ou à l'état initial.
 - Les simulations **in situ en bloc opératoire** (OR simulations) augmentent la confiance des participants dans 4 principes clés de CRM : communication efficace, utilisation des ressources, clarté des rôles et situation awareness.

b.3. NTS structurés avec NOTSS (situation awareness, décision, leadership, communication)

- Le système **NOTSS (Non-Technical Skills for Surgeons)** définit quatre domaines :
 1. Situation awareness (vigilance)
 2. Prise de décision
 3. Communication & travail en équipe
 4. Leadership
- Une revue critique de NOTSS rapporte que les chirurgiens ou étudiants ayant reçu une formation ciblée en NTS basée sur la simulation (par ex. scénario de crise en urologie) ont des scores NOTSS plus élevés que les témoins sans cette formation.

1.5. Transfert vers la pratique

Dans la sélection de 28 articles, **très peu** mesurent un **transfert de compétences** de la simulation **vers l'OR** au sens strict (apprentissage → performance clinique).

Les rares « oui » (Wang 2012 ; Yu 2020/Chengqiang Yu) relèvent plutôt d'**outils de planification / guidage** appliqués en clinique (donc **impact clinique**, mais **pas** démonstration d'un transfert après entraînement).

Les études de formation à proprement parler (Fazlollahi, Koh, Clarke, Marcus, Alotaibi, Dimitrakakis, Tadlock...) **s'arrêtent** pour l'essentiel aux **métriques simulées** (OSATS, temps, erreurs, trajectoires, indices bimanuels).

a. Données spécifiques à la neurochirurgie

a.1 Ventriculostomie : étude de Yudkowsky et al. (ImmersiveTouch)

Yudkowsky R, et al. (49)

Type d'étude:

- Étude avant-après (« groupe simulation » = après entraînement, « groupe non simulation » = période pré-entraînement, sur les mêmes internes).
- Interne en neurochirurgie, 4 programmes de Chicago.
- Entraînement sur simulateur de réalité augmentée/haptique ImmersiveTouch avec 15 cerveaux virtuels (ventricules normaux, déviés, comprimés).

Schéma:

- 1 séance de pratique de 2-3 h sur le simulateur (12 cas différents), avec feedback visuel 3D et haptique.
- Mesure de la performance :
 - Sur le simulateur (avant / après / 1 mois plus tard), et **en vraie chirurgie** (ventriculostomies réalisées 6 mois avant et 1 mois après la séance).

Résultats sur le simulateur

- **Taux de canulation réussie (global) :**
 - Avant simulation: 12 %
 - Après simulation: 32 %
 - Suivi à 1 mois : 26 %

→ Odds ratio (OR) de succès après vs avant : **3,43** (IC95 % 1,74–6,77 ; $p < 0,001$).

Cela montre déjà un **gain technique important** sur un environnement simulé.

Résultats en bloc opératoire (données « field / live surgery »)

Sur 12 internes ayant fourni des données de bloc opératoire : **138 ventriculostomies**, dont 91 avant et 47 après entraînement.

- **Succès de la canulation (au final)**
 - Réussite dans presque tous les cas (3 échecs seulement) → pas de différence significative possible sur le succès final (plafond).
- **Succès au premier passage (critère très pertinent pour la sécurité et l'efficacité) :**
 - Avant simulation: **82 %** des procédures
 - Après simulation: **94 %**
 - OR = **4,74** (IC95 % 1,10–20,4; $p = 0,04$).

Après un entraînement ciblé sur simulateur, les mêmes internes avaient **beaucoup plus de chances de réussir la ventriculostomie du premier coup au bloc** par rapport à leurs propres performances sans simulation.

- **Complications et autres paramètres :**
 - Pas d'augmentation significative des hémorragies (7 % des cas, pas influencé par la simulation).
 - Pas de différence significative sur la latéralité (ipsilatérale vs controlatérale) ni sur la profondeur du cathéter.
 - En revanche, une proportion plus élevée de cathéters aboutissait en **3^e ventricule** après simulation (probablement liée à une tendance à viser plus profondément vers le foramen de Monro).

Cette étude est l'une des rares en neurochirurgie à démontrer un **vrai transfert au bloc opératoire**, avec un **critère concret et clinique (première tentative réussie)**, en comparant une période **sans** simulation à une période **avec** simulation chez les mêmes opérateurs. Niveau de preuve : avant-après, donc moins fort qu'un RCT, mais très difficile à faire mieux pour des raisons éthiques.

a.2 Synthèse des revues systématiques en neurochirurgie

Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review and meta-analysis. (72)

Une revue systématique PRISMA sur la simulation en neurochirurgie ("Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review and meta-analysis") montre:

- Une **forte amélioration des compétences techniques** (précision, temps d'exécution, scores d'évaluation type OSATS ou dérivés) sur simulateur,
- Des **corrélations de plus en plus solides** entre performance sur simulateur et performance clinique,
- Mais **encore peu d'études** qui vont jusqu'aux **résultats en bloc ou aux issues patients** (Yudkowsky étant l'exemple emblématique).

Lemole GM Jr, et al. (73)

Une revue plus récente sur la réalité virtuelle/augmentée pour l'évaluation des compétences en neurochirurgie arrive à la même conclusion : les scores dans l'environnement VR/AR sont **valides et discriminants** entre novices et experts, et **corrélés à des indicateurs de performance réelle**, même si les études directement au bloc restent peu nombreuses.

Il **existe donc des preuves directes (ventriculostomie) et des preuves indirectes convergentes** (corrélations entre performance en VR et expertise clinique) que les compétences acquises en simulation **neurochirurgicale** se transfèrent réellement au bloc.

b. Données plus larges en chirurgie extrapolables à la neurochirurgie

Comme les RCT en neurochirurgie sont rares, une partie de l'argumentation repose sur des **données robustes d'autres spécialités chirurgicales**, qu'on peut raisonnablement transposer à la neurochirurgie (mêmes mécanismes d'apprentissage psychomoteur, stéréotaxie, gestion du stress, etc.).

b.1. Méta-analyses sur la simulation et la performance au bloc

Méta-analyse sur l'impact de la simulation sur la performance au bloc et les résultats patients (Neurosurgical Review / British Journal of Surgery). (73)

Une méta-analyse sur l'impact de la simulation sur les **résultats cliniques et la performance au bloc opératoire**, incluant plusieurs RCT dans différentes spécialités, montre que :

- Les chirurgiens formés par **simulation** (VR ou simulateur physique) réalisent des interventions **plus rapides** au bloc que ceux formés de manière traditionnelle uniquement.
- Ils commettent **moins d'erreurs techniques** et obtiennent de meilleurs scores d'évaluation per-opératoire (OSATS, GOALS, etc.).

Les auteurs concluent que la simulation **améliore la performance en salle d'opération** et peut contribuer à de meilleurs résultats patients (diminution des complications, réduction du temps opératoire, etc.).

b.2. Simulation VR et chirurgie robotique : transfert démontré

BJs Open 2021 – Virtual reality simulation in robot-assisted surgery: meta-analysis of transferability to the operating room. (74)

Une méta-analyse spécifique à la chirurgie robot-assistée (BJs Open 2021) a étudié si les compétences acquises sur simulateur VR se transfèrent au bloc :

- 3 études sur 4 démontrent une **amélioration significative de la performance en bloc opératoire** après entraînement VR (temps opératoire, précision, moins d'erreurs).
- L'analyse quantitative retrouve une **corrélation modérée à forte** entre la performance

sur simulateur et la performance intraopératoire ($r \approx 0,67$).

Ce type de résultat demeure très intéressant à citer en neurochirurgie puisque beaucoup de tâches (microneurochirurgie, endoscopie, navigation 3D) reposent sur les **mêmes principes psychomoteurs** que la chirurgie robotique

1.6. Adoption et régression

a. Adoption globale de la simulation en neurochirurgie

a.1 Vision des program directors (États-Unis)

Ganju A, Aoun SG, Daou MR, El Ahmadieh TY, Chang A, Bailes JE. (75)

Enquête Ganju et al., World Neurosurgery 2013 – 99 directeurs de programme US :

- Taux de réponse : 53,5 %.
- 72 % des répondants pensent que la simulation améliore les résultats patients,
- 74 % qu'elle doit compléter la formation traditionnelle, mais seulement 25 % qu'elle pourrait la remplacer.

Cette enquête mesure surtout l'adhésion conceptuelle, pas encore l'intégration systématique dans le cursus.

Enquête plus récente (JNS, 2023, PD survey), citée dans une lettre au JNS :

- Sur 48 directeurs de programme, seulement 50 % ont intégré la simulation dans le curriculum formel de résidence.
- Parmi ces programmes :
 - 54 % donnent toujours un feedback après simulation,
 - 42 % parfois,
 - Seulement 22 % utilisent une évaluation numérique structurée,
 - Et 13 % seulement utilisent l'enregistrement/lecture des séances.

- En 10–15 ans, la simulation est passée d'un concept "prometteur" à une pratique partiellement adoptée :
 - Quasi tous les PD jugent la simulation utile,
 - Mais **environ la moitié** seulement l'ont vraiment intégrée au programme avec une structure pédagogique.

b. Adoption par type de simulation

b.1. Boot camps et programmes nationaux structurés

Selden NR, Anderson VC, McCartney S, Origiano TC, Burchiel KJ, Barbaro NM. (76)

SNS PGY–1 boot camp (États–Unis) – Selden et al., J Neurosurg 2013 :

- En 2010, 94 % de tous les nouveaux résidents (PGY–1) en neurochirurgie US ont participé au boot camp SNS.
- 6 mois plus tard :
 - **99 %** pensent que le boot camp a été bénéfique et a amélioré la prise en charge des patients.
 - Le score de connaissances sur les items enseignés passe de **72 % à 83 %** et reste significativement plus élevé 6 mois après ($p < 0,0001$), sans chute majeure.

Taux d'adoption

- À l'échelle nationale, le **boot camp SNS** est quasi **universellement adopté** pour les PGY–1 US (≈ 94 % de couverture).
- C'est probablement l'exemple le plus fort d'implémentation réussie et durable d'un programme de simulation en neurochirurgie.

b.2. Cadavérisation (laboratoire d'anatomie)

Stengel FC, Gandía–González ML, Aldea CC, et al. (77)

Zoia C, Raffa G, Aldea CC, et al. (78)

Enquête EANS Young Neurosurgeons 2022 (Europe et régions associées) – Stengel et al., Brain & Spine 2022 :

- 543 réponses (résidents + neurochirurgiens).
- 40,7 % déclarent ne disposer d'aucune technologie d'entraînement, ni conventionnelle ni moderne.
- La formation sur cadavre est disponible pour 27,6 % seulement.
- Les technologies modernes (VR/AR, simulateurs, etc.) sont disponibles pour < 10 % des répondants.
- Les auteurs concluent que les cadaver labs sont plus fréquemment accessibles que les technologies modernes, mais qu'ils restent loin d'être universels.

En parallèle, des articles de revue en global neurosurgery signalent que l'accès à la cadavérisation a **tendance à diminuer** dans certains pays, pour des raisons **éthiques, légales et financières**, ce qui pousse vers des modèles synthétiques et imprimés en 3D.

Adoption / régression sur modèle cadavérique

- Adoption modérée : environ ¼ à ⅓ des jeunes neurochirurgiens européens ont accès à un cadaver lab.
- Tendance à la régression structurelle de cette modalité dans certains systèmes (coût, contraintes réglementaires), compensée par modèles synthétiques et 3D.

b.3. Technologies modernes : VR/AR, simulateurs haute fidélité, haptique

Toujours dans l'enquête EANS YN 2022 :

- 67 % des répondants n'ont jamais bénéficié de formation avec technologie "moderne" (VR, AR, simulateurs).
- < 10 % ont accès à ces technologies dans leur centre.
- Les technologies modernes sont beaucoup plus fréquentes dans les pays à PIB élevé.

Plusieurs revues (par ex. “History of VR/AR in neurosurgical training” et une revue systématique des simulateurs neurochirurgicaux) décrivent un **développement rapide** de ces systèmes et une “widespread adoption in recent decades” dans les centres universitaires pionniers, mais insistent sur le fait que cela concerne surtout quelques **centres riches** et des **cours nationaux/internationaux**, pas la majorité des résidences dans le monde.

Adoption VR/AR & simulateurs haute fidélité

- Très faible au niveau global ($\leq 10\%$ des répondants ont accès à ces outils dans l'enquête EANS).
- Adoption croissante mais encore concentrée dans quelques centres à haut niveau de ressources.

b.4. Modèles physiques, low-cost et 3D-print (boîtes, têtes, UpSurgeOn, etc.)

Les revues de la littérature sur les simulateurs en neurochirurgie notent :

- Une **multiplication** des modèles physiques (crâne en résine, modèles vasculaires, têtes en silicone ou gel, modèles imprimés 3D) pour la microchirurgie, la chirurgie vasculaire, les approches endonasales, etc.
- L'intérêt de ces modèles pour des contextes à ressources limitées, avec un coût très inférieur à la VR/AR.

Mais:

- Il n'existe pas (à ce jour) de grande enquête internationale donnant un pourcentage précis de programmes utilisant les modèles 3D/low-cost.
- On sait seulement qu'ils sont de plus en plus présents dans des cours type boot camps, ateliers de sociétés savantes et programmes de simulation locaux, mais toujours de manière hétérogène.

Adoption modèles physiques & 3D-print

- Adoption croissante et souvent plus réaliste pour les pays à ressources limitées.
- Absence de chiffres solides en %, mais la littérature montre une tendance à la substitution (partielle) des cadavres par des modèles 3D/low-cost, surtout dans les formations de base.

c. Taux de régression

c.1. Régression structurelle : baisse ou absence d'utilisation d'une modalité

- Cadavérisation :
 - Plusieurs revues notent une **réduction** du recours aux cadavres (coût, réglementation, bio-sécurité).
 - En parallèle, les enquêtes récentes (EANS) montrent qu'une **proportion importante de centres (≈ 40 %) n'ont aucun accès** ni à cadaver labs ni aux technologies modernes, ce qui suggère un **gap important** malgré la promotion internationale de la simulation.
- Technologies modernes (VR/AR, haptique) :
 - Le problème n'est pas tant la "régression" que la **non-diffusion** : 67 % des jeunes neurochirurgiens n'ont jamais été formés avec ces outils, et moins de 10 % y ont accès.
 - Autrement dit, les projets pilotes dans quelques centres n'ont pas encore abouti à une diffusion générale → **taux d'adoption stagnant** à l'échelle globale.

c.2. Régression des compétences (skill decay) après simulation

Littérature spécifique neurochirurgie:

- Le boot camp SNS montre que le **niveau de connaissances reste élevé à 6 mois** (72 % → 83 % pour les items enseignés, $p < 0,0001$), sans retour au niveau de base → **peu de régression**, voire consolidation.

- Des modules de simulation (CNS curriculum, micro-anastomose, ACDF, PCF, réparation de durotomie) démontrent une amélioration significative immédiate des scores pratiques et cognitifs ; les données de suivi à long terme sont cependant limitées.

Littérature plus large (toutes spécialités chirurgicales) :

- Une revue systématique sur la **“development and decay of procedural skills in surgery”** conclut que:
 - Sans pratique régulière, les scores techniques sur simulateurs ou en conditions réelles **diminuent en quelques mois** (souvent 4-6 mois),
 - Mais restent généralement **supérieurs au niveau de base** avant formation.
 - Certaines approches (apprentissage distribué, répétitions espacées, modèles physiques répétables) semblent **limiter la régression** mieux que des sessions uniques ou de courte durée.

Pour conclure :

Les données neurospécifiques sont rares. Cependant, les programmes type **boot camp** montrent une **bonne rétention à 6 mois**. De plus, les données transversales en chirurgie suggèrent un **déclin partiel** des compétences techniques si la pratique n'est pas entretenue, avec une variabilité selon le type de simulateur et la stratégie pédagogique.

1.7. Discussion et analyse des résultats

Notre revue de la littérature (2010–2025, 48 études incluses) documente les effets de la simulation sur les compétences techniques (OSATS, temps, erreurs, précision/trajectoires), sur les compétences non techniques (NOTSS/NOTECHS, charge mentale NASA–TLX), sur le transfert vers la pratique (bloc opératoire, indicateurs cliniques/radiologiques) et sur l'adoption/implémentation (y compris éléments analytiques multivariés). Cette discussion présente une lecture intégrative et critique de ces résultats, en les confrontant aux cadres théoriques de l'apprentissage et de l'implémentation (Miller, Fitts et Posner, mastery learning ; CFIR, Proctor, RE–AIM), et en ouvrant des perspectives pragmatiques pour des contextes variés, notamment les PRFI.

1.8. Synthèse et analyse des résultats

a. Synthèse globale des principaux résultats

Le travail réalisé met en évidence, à partir de la littérature, un faisceau de résultats convergents en faveur de la simulation en neurochirurgie, aussi bien pour les **compétences techniques** que pour les **compétences non techniques**.

Sur le plan **technique**, la plupart des études neurochirurgicales incluses – essais randomisés, études avant/après et séries de validation – montrent que la simulation améliore :

- Les scores de performance globale (osats et dérivés) ;
- La précision gestuelle (positionnement des vis pédiculaires ou de masse latérale, trajectoires ventriculaires, étendue de la craniotomie) ;
- Le taux d'erreurs techniques (perforations pédiculaires, canulations ventriculaires ratées, volume de tissu sain réséqué) ;
- Les temps d'exécution sur simulateur et, dans certaines études, les temps opératoires réels au bloc.

Ces résultats sont cohérents avec la méta-analyse de Davids et al., qui montre un effet global significatif de la simulation sur les compétences techniques en neurochirurgie, toutes modalités confondues (simulateurs physiques, VR/AR, modèles 3D, cadavérisation).

Sur le plan **non technique**, la littérature, plus limitée mais croissante, suggère que les dispositifs de simulation :

- Réduisent la **charge de travail mentale** mesurée par des outils comme le NASA-TLX ou le SURG-TLX, pour une performance égale ou améliorée ;
- Permettent de travailler la situation awareness, la communication, le leadership, la priorisation et la gestion de crise ;
- Améliorent les scores d'outils structurés de compétences non techniques (NOTSS, TEAM, ANTS...) dans des RCT ou des études avant/après, principalement en chirurgie générale, traumatologie et anesthésie, mais avec des déclinaisons émergentes en neurochirurgie.

Enfin, quelques travaux – particulièrement l'étude de Yudkowsky et al. sur la **ventriculostomie** – apportent des preuves directes de **transfert vers le bloc opératoire** : après un entraînement sur simulateur AR/haptique, les mêmes internes réalisent plus fréquemment une ventriculostomie réussie du premier coup chez le patient, sans augmentation de la morbidité.

Parallèlement, les enquêtes auprès des directeurs de programmes et des jeunes neurochirurgiens montrent une **adoption réelle mais incomplète** de la simulation dans les curricula, avec un décalage entre le niveau de preuve disponible et le degré d'implémentation, notamment en Europe et dans les pays à ressources limitées.

b. Triangulation des résultats techniques

b.1. Performances OSATS et habiletés techniques

Les essais randomisés de Boody et al. sur la laminectomie lombaire et la mise en place de vis pédiculaires démontrent que de courts modules de bioskills sur modèles synthétiques améliorent significativement les **scores OSATS** et la performance globale par rapport à des groupes témoins recevant seulement une formation théorique ou une auto-lecture.

Dans d'autres études, les simulateurs rachidiens (VR, navigation, modèles 3D) montrent une **amélioration progressive des scores techniques** au fil des séances, avec une diminution des erreurs et des temps d'exécution. Ces résultats recourent les conclusions de la méta-analyse de Davids et al., qui met en évidence des tailles d'effet globalement modérées à importantes sur les compétences techniques en neurosimulation.

Ainsi, l'analyse croisée des RCT, des cohortes avant/après et de la méta-analyse suggère nettement que la simulation ne se contente pas d'améliorer le ressenti des apprenants ; elle se traduit par des **gains objectifs** sur des échelles validées comme OSATS.

➤ Précision, trajectoires opératoires et erreurs techniques

Les études de simulation rachidienne et ventriculaire convergent vers une même conclusion : la simulation **raffine les trajectoires opératoires** et diminue les erreurs.

- Sur modèles cadavériques ou synthétiques, des essais randomisés montrent que les internes ayant bénéficié d'un entraînement sur simulateur (VR ou haptique) présentent des **taux de perforation pédiculaire nettement plus faibles** (parfois réduits de plus de moitié) et une **erreur angulaire moindre** que les témoins sans simulation.
- En ventriculostomie, la simulation AR/haptique (Immersive Touch) augmente le taux de canulation correcte sur simulateur et, surtout, le **taux de succès à la première tentative** au bloc opératoire.

Ces données techniques – diminution des perforations, trajectoires plus centrées, meilleure précision de la craniotomie avec les modèles 3D patient-spécifiques – sont cohérentes entre différents types de simulateurs, gestes et designs d'étude. Elles renforcent l'idée que la simulation permet un **affinement réel de la gestuelle**, et pas seulement un apprentissage superficiel.

➤ Temps d'exécution et temps opératoire

Plusieurs travaux montrent une **réduction des temps d'exécution** sur simulateur au fur et à mesure des séances (effet d'apprentissage), sans augmentation des erreurs, ce qui traduit un gain d'**efficacité** plutôt qu'une simple accélération.

Des études plus ambitieuses, notamment en planification VR de clipping d'anévrismes ou en chirurgie rachidienne mini-invasive, suggèrent que ces gains se prolongent dans le **temps opératoire réel**, avec des interventions plus courtes à complexité comparable dans les groupes exposés à la simulation ou à la planification VR que dans les groupes témoins.

La triangulation entre temps d'exécution simulé, précision gestuelle et temps opératoire va donc dans le même sens : la simulation semble favoriser une **exécution plus rapide et plus sûre** des gestes neurochirurgicaux.

b.2. Triangulation des résultats non techniques

➤ Charge mentale, vigilance et ergonomie

Même si les données spécifiquement neurochirurgicales restent limitées, plusieurs éléments convergent :

- Dans la plupart des disciplines chirurgicales, la simulation répétée réduit les scores de **charge mentale NASA-TLX** à performance égale ou supérieure, traduisant une meilleure automatisation, une diminution de l'effort subjectif et une plus grande disponibilité attentionnelle pour la surveillance de l'environnement.
- En neurochirurgie, certains modèles (par exemple le "Living Spine Model") reproduisent des profils de charge mentale comparables à la chirurgie réelle, ce qui valide la simulation comme environnement ergonomique pertinent pour analyser et optimiser le workload des opérateurs.

Ainsi, en combinant les données de la chirurgie générale (où l'effet de la simulation sur la charge de travail est mieux documenté) et les études neurochirurgicales de validation, on peut soutenir qu'un curriculum simulé bien structuré est susceptible de **réduire la charge cognitive inutile**, d'améliorer la **vigilance** et d'optimiser l'**ergonomie** au bloc.

➤ Communication, leadership, priorisation et gestion de crise

Les preuves les plus robustes sur les compétences non techniques proviennent de RCT et d'études avant/après en traumatologie, chirurgie et anesthésie :

- L'essai randomisé de Fernandez et al. montre que des internes ayant reçu une **formation au leadership basée sur la simulation** obtiennent des scores significativement plus élevés de leadership observé lors de vraies réanimations traumatiques, par rapport à des témoins sans simulation, avec un effet médiateur sur la qualité de la prise en charge.
- Une méta-analyse des interventions sur les compétences non techniques confirme que les programmes de simulation améliorent la **communication, la gestion d'équipe, la prise de décision et le leadership**, avec des effets durables lorsqu'ils sont intégrés au curriculum et accompagnés de débriefings structurés.

En neurochirurgie, les études restent peu nombreuses mais convergentes : ateliers de communication simulée (annonce de diagnostic grave, consentement éclairé, gestion de complications), scénarios de crise neurochirurgicale en collaboration neuro-anesthésie, et programmes de neuro-réanimation simulée. Ils montrent une forte **acceptabilité**, une amélioration perçue des compétences de communication et de gestion de crise, et une cohérence avec les priorités identifiées par la revue systématique sur les non-technical skills en neurochirurgie.

En triangulant ces résultats avec ceux provenant d'autres spécialités chirurgicales, il apparaît raisonnable de considérer que la simulation est un **vecteur privilégié** pour développer, en neurochirurgie, les compétences de communication, de leadership, de priorisation et de gestion de crise, même si la quantification fine par des scores type NOTSS reste à systématiser.

c. Qualité méthodologique et force probante

c.1. Essais randomisés contrôlés (niveau de preuve élevé)

Plusieurs RCT apportent une **preuve expérimentale directe** de l'efficacité de la simulation sur des critères objectifs :

- RCT sur bioskills rachidiens (Boody et al., Hou et al.) montrant une amélioration significative des scores OSATS, une diminution des perforations pédiculaires et une meilleure précision angulaire dans les groupes simulation vs témoins.
- RCT sur leadership en réanimation traumatique, montrant une amélioration des comportements de leadership observés et un impact indirect sur la qualité des soins.

Ces études bénéficient souvent d'une randomisation explicite, d'évaluateurs en aveugle et de l'utilisation d'outils validés (OSATS, checklists, échelles de leadership), ce qui confère un **niveau de preuve II** solide pour certaines dimensions (techniques et non techniques).

c.2. Études avant/après et cohortes (niveau de preuve intermédiaire)

Une large part de la littérature neuro chirurgicale repose sur des **études avant/après**, sans groupe contrôle parallèle :

- Yudkowsky et al. En ventriculostomie (pré/post simulation, avec mesure en bloc opératoire) ;
- Programmes de simulation en microchirurgie, neuro-endoscopie, chirurgie vasculaire ou rachidienne ;
- Curricula de neuro-réanimation ou d'EVD sur modèles physiques / 3D.

Ces études sont plus vulnérables aux biais (tendance naturelle à s'améliorer avec le temps, autres facteurs de formation), mais elles fournissent des **indications convergentes** : amélioration des scores techniques, réduction des erreurs, meilleure confiance des opérateurs et, parfois, modifications observées dans la pratique réelle.

c.3. Revues systématiques et méta-analyses

Les revues de Davids et al. (Neurosurgical Review) et de Patel et al. (World Neurosurgery) apportent une **vision d'ensemble** sur la diversité des simulateurs et la qualité de leur validation.

- Davids et al. intègrent des cohortes et RCT pour conclure à une **amélioration significative des compétences techniques** et des connaissances procédurales grâce à la simulation, avec une hétérogénéité modérée des résultats.
- Patel et al. évaluent chaque simulateur selon le cadre de validité de Messick et le modèle de McGaghie pour la translation, montrant que quelques simulateurs atteignent un **niveau de translation 3-4** (impact sur la pratique clinique), mais que la majorité reste au stade de validation de contenu, de construit ou de fidélité.

Ces synthèses renforcent l'argumentaire en faveur de la simulation, tout en rappelant que la **force probante** varie selon les dispositifs, les gestes et les outcomes étudiés.

c.4. Outils de mesure et validité

L'usage d'outils standardisés et validés – OSATS pour les compétences techniques, NASA-TLX/SURG-TLX pour la charge mentale, NOTSS/TEAM/ANTS pour les compétences non techniques – améliore la qualité méthodologique globale.

Toutefois:

- Ces outils ne sont pas toujours adaptés spécifiquement à la neurochirurgie (adaptations ad hoc, grilles maison) ;
- Les évaluateurs ne sont pas systématiquement en aveugle ;
- La fidélité inter-juges est parfois peu ou pas rapportée.

La force probante des résultats est donc **variable** d'une étude à l'autre, ce qui justifie une interprétation prudente et contextuelle.

d. Biais et limites

d.1. Biais de sélection et de publication

La plupart des travaux incluent :

- Des effectifs limités (souvent < 30 participants) ;
- Des volontaires motivés (biais de sélection) ;
- Des centres académiques à haut niveau de ressources.

Par ailleurs, les études négatives ou neutres sont probablement **sous-publiées** (biais de publication), ce qui peut conduire à **surestimer** l'ampleur des effets dans les méta-analyses.

d.2. Hétérogénéité des interventions et des outcomes

Les simulateurs utilisés (VR, AR, haptique, modèles 3D, cadavres, boîtes physiques), les tâches (rachis, ventriculostomie, microchirurgie, endoscopie) et les modalités pédagogiques (durée, supervision, feedback, mastery learning ou non) varient énormément :

- Cette hétérogénéité rend difficile la **pooling** statistique ;
- Elle limite la possibilité de recommander un **format unique "optimal"** de simulation.

De plus, les critères de jugement varient : succès technique binaire, scores OSATS, métriques fines de trajectoire, temps, NASA-TLX, NTS, etc. La triangulation est donc souvent qualitative plutôt que strictement méta-analytique.

d.3. Biais de mesure

Plusieurs études utilisent des évaluations :

- Réalisées par des encadrants non aveugles du groupe ou du temps (pré/post) ;
- Reposant sur des échelles non publiées ou peu validées ;
- Ou sur de l'auto-évaluation des compétences.

Cela expose à des **biais de désirabilité sociale** et à un **effet Hawthorne** (les participants se sachant évalués, modifient leur comportement).

d.4. Limites de la généralisation, notamment en contexte à ressources limitées

La majorité des études sont issues de **pays à revenu élevé**, avec accès à des infrastructures (laboratoires de simulation, VR/AR, navigation, impression 3D) et à du temps pédagogique dédié. Les enquêtes européennes et nord-américaines montrent un écart important entre ces centres pionniers et la majorité des programmes, et plus encore avec les pays à ressources limitées.

Il existe donc un **biais de contexte**, et la transférabilité directe des résultats dans des systèmes de santé à faibles ressources doit être discutée. C'est tout l'intérêt d'une réflexion sur des modèles **frugaux** de laboratoire de simulation, comme celui proposé dans la thèse.

d.5. Limites propres au travail

Selon la nature précise de ta thèse (revue narrative structurée, scoping review, revue systématique), il faudra expliciter :

- La non-exhaustivité possible des bases de données et des langues ;
- L'absence éventuelle d'enregistrement préalable (prospero) ;
- L'absence de méta-analyse quantitative en raison de l'hétérogénéité des données
- Le fait que le travail de conceptualisation du laboratoire repose en partie sur des hypothèses (priorisation des gestes, choix des simulateurs, modélisation des coûts) qui nécessiteront une validation empirique ultérieure.

e. Implications et perspectives

Malgré ces limites, la triangulation des résultats techniques et non techniques, croisée avec la qualité méthodologique des études les plus robustes, permet de défendre plusieurs points forts :

- **Sur le plan des compétences techniques**, la simulation en neurochirurgie apparaît comme un outil efficace pour :
 - Accélérer la courbe d'apprentissage,
 - Réduire les erreurs techniques,
 - Améliorer osaTS, précision et temps d'exécution.
- **Sur le plan des compétences non techniques**, les données issues d'autres disciplines, appuyées par les premières expériences neurochirurgicales, montrent que la simulation permet de travailler de manière structurée la charge mentale, la vigilance, la communication, le leadership et la gestion de crise.
- **Sur le plan de la sécurité des patients**, quelques études (ventriculostomie, traumatologie, chirurgie mini-invasive) apportent des éléments de translation vers des outcomes cliniques (moins de multipasses, temps opératoires réduits, meilleure organisation d'équipe), justifiant la poursuite et l'extension de ces approches.
- **Sur le plan de l'implémentation**, les enquêtes montrent un décalage entre le **niveau de preuve** et le **taux d'adoption** effectif, particulièrement marqué en Europe et dans les pays à ressources limitées. Le modèle de laboratoire de simulation proposé par la thèse, fondé sur des solutions frugales (modèles physiques, impression 3D, VR mutualisée) et sur une intégration curriculaire explicite, s'inscrit comme une réponse pragmatique à ce "gap" de mise en œuvre.

À court terme, les perspectives de recherche incluent :

- L'évaluation prospective d'un curriculum local de simulation en neurochirurgie (avec OSATS, NTS, NASA-TLX, transferts au bloc) ;
- La mesure des retombées organisationnelles et cliniques (temps opératoire, erreurs, complications) ;
- L'analyse des **conditions d'implémentation** (acceptabilité, coûts, pérennité) dans un contexte à ressources limitées.

2. Discussion :

Ce travail a pour ambition d'inscrire la simulation en neurochirurgie dans un cadre scientifique, pédagogique et socio-organisationnel robuste, en la confrontant aux exigences contemporaines de qualité et de sécurité des soins, à la pression réelle sur les plateaux techniques et à l'impératif de formation équitable des futurs spécialistes. Le sujet de thèse s'enracine dans une double tension : d'une part, la neurochirurgie se caractérise par des procédures à haut risque dont la variabilité et la rareté relative compliquent l'apprentissage sur patients ; d'autre part, les institutions sont sommées de garantir des standards objectifs de compétence avant délégation de gestes critiques. La simulation constitue, dans ce contexte, un dispositif de mise en condition, de répétition contrôlée et de mesure, qui permet d'articuler acquisition de compétences, traçabilité et respect des principes éthiques fondamentaux (*primum non nocere*).

2.1. Neurochirurgie : spécificités cliniques et implications pédagogiques

La neurochirurgie est une discipline de haute densité cognitive et motrice, où des marges d'erreur millimétriques engagent des risques fonctionnels majeurs (langage, motricité, vigilance, fonctions végétatives). Elle conjugue :

- (i) des espaces opératoires confinés
- (ii) des structures critiques (vaisseaux perforants, noyaux gris, tronc cérébral, moelle, racines)
- (iii) une variabilité anatomique interindividuelle importante
- (iv) des contraintes temporelles (ischémie, saignement)
- (v) une coordination d'équipe sophistiquée (neuro-anesthésie, neuroradiologie, perfusion, instrumentistes). Ces spécificités conditionnent un profil d'apprentissage très particulier.

a. Contraintes anatomiques et physiopathologiques

Le cerveau et la moelle ne tolèrent que faiblement la traction, la compression, la chaleur ou la dissection. La simple manipulation d'un sillon, d'une artère perforante ou d'une racine peut induire un déficit irréversible. Trois éléments en découlent :

- Navigation spatiale 3D et rotation mentale : l'opérateur doit convertir en temps réel des reconstructions 2D/3D (IRM, angio-IRM/CT, tractographie) en trajets effectifs dans un corridor étroit, en tenant compte des déformations (brain shift, collapsus ventriculaire).
- Hiérarchie des priorités tissulaires : préserver le parenchyme sain et les voies de passage (capsule interne, faisceaux de langue) prime sur la complétude de la résection quand le risque fonctionnel dépasse le bénéfice marginal.
- Physiologie per-opératoire : les variations tensionnelles, le CO₂, la volémie et la température influencent la perfusion cérébrale et la tumeur/œdème ; le chirurgien coopère étroitement avec l'anesthésiste pour stabiliser le terrain neuro-vasculaire.

b. Exigences psychomotrices fines et habiletés instrumentales

Les gestes neurochirurgicaux exigent une dextérité bimanuelle symétrique et un contrôle des forces à très faible amplitude :

- Contrôle moteur fin : micro-disséquer, coaguler, aspirer sans violer une frontière fonctionnelle ; poser une vis pédiculaire sans brèche corticale ; clipper un col d'anévrisme sans comprimer un perforant.
- Couplage visuo-moteur : microscope, endoscope, exoscope et navigation modifient la parallaxe et imposent un remappage œil-main ; l'apprentissage inclut la compensation de la latence et des angles obliques.
- Gestion des tremblements et des micro-impacts : appuis, triangulation des instruments, économie de mouvements ; progression du geste par petites séquences stables.

- Ergonomie microchirurgicale : posture prolongée, contraintes cervicales/rachidiennes, fatigue musculaire de l'épaule/avant-bras ; une ergonomie déficiente dégrade la précision et accroît le risque d'erreur.

c. Décision per-opératoire sous incertitude

- La planification préopératoire (imagerie, modèles 3D, voies d'abord) se heurte à des incertitudes intra-opératoires :
- Information partielle et dynamique : brain shift, saignements inattendus, plan tumorale indistinct, adhérences.
- Arbitrages temps-sécurité-complétude : savoir quand persévérer et quand renoncer (principe d'asymétrie bénéfice/risque).
- Boucles de rétroaction : réponse tissulaire, monitoring neurophysiologique, indices hémodynamiques guident la mise à jour du plan opératoire (raisonnement bayésien implicite).
- Gestion des événements rares mais critiques : rupture anévrysmale, œdème aigu, embolie gazeuse, brèche veineuse profonde — exige des protocoles de crise et une équipe entraînée à la communication en conditions de charge.

d. Compétences non techniques (NTS) spécifiques

La performance dépend autant de la qualité des interactions que de l'habileté technique :

- Communication fermée (closed loop), leadership adaptatif, répartition des rôles, priorisation des tâches (p. ex. « aspirer – coaguler – protéger »), situation awareness partagée (anticiper ce qui peut survenir dans 30-60 s).
- Gestion de la charge mentale : maintenir la vigilance sélective sans tomber dans la cécité attentionnelle (surinformation, overlays intrusifs, alarmes), organiser le champ de travail pour réduire la charge extrinsèque.

- Culture de sécurité : checks en amont (time-out, compatibilité implants), briefing clair, débriefing systématique (apprentissages transférables, erreurs « récupérées »).

→ Variabilité des gestes et « sous-cultures » techniques

La neurochirurgie n'est pas monolithique ; chaque sous-domaine impose un profil d'exigences :

- Vasculaire : manipulation du col, respect perforants, tempo (contrôle temporaire), tolérance ischémique, micro-sutures fines.
- Oncologie crânienne : dissection capsulaire, limites fonctionnelles (mapping), hémostase en terrain œdémateux, protection vasculaire veineuse.
- Base du crâne/endoscopie : corridors étroits, angles contraints, repères ostéo-duraux, gestion du LCR.
- Rachis : orientation 3D des vis pédiculaires, fluoroscopie raisonnée, préservation radiculo-médullaire, gestes décompressifs en fenêtre opératoire étroite.
- Fonctionnelle (DBS, rhizotomie) : stéréotaxie, micro-enregistrements, corrélation clinique-neurophysiologie.

e. Limites d'exposition clinique et impératifs de sécurité

Plusieurs tendances réduisent l'apprentissage « sur le patient » :

- Réglementations du temps de travail, pression d'efficacité opératoire, casuistique variable, complexité croissante et judiciarisation.
- Rareté d'événements critiques (bon pour le patient, défavorable à l'entraînement aux crises).
- Inégalités d'accès : disparités régionales/PRFI, plateaux techniques hétérogènes.

Conséquence directe : l'apprentissage nécessite des espaces protégés et standardisés pour répéter les gestes, expérimenter les situations rares, et acquérir des réflexes d'équipe avant la salle d'opération.

f. Traduction pédagogique des spécificités

Ces contraintes se mappent naturellement sur des cadres de compétence et des modes d'évaluation adaptés.

f.1. Cadres de compétence

- Miller (sait → sait comment → montre comment → fait) : la neurochirurgie impose de documenter le “montre comment” en environnement simulé avant d'autoriser le “fait” supervisé.
- Fitts et Posner (cognitif → associatif → autonome) : la simulation fait passer plus vite de la phase cognitive (règles, erreurs fréquentes) à la phase associée (raffinement), puis permet de stabiliser des boucles autonomes (micro-séquences).
- Mastery learning / pratique délibérée : progression conditionnelle à des seuils (p. ex. OSATS spécifique $\geq X/20$, 0 erreur critique, temps $\leq$ seuil).

f.2. Instruments de mesure

- OSATS global + check-lists spécifiques (étapes critiques) ; Global Rating Scales (qualité de la technique, respect des tissus, flux opératoire).
- Métriques instrumentées : trajectoire/longueur de chemin, collisions, forces, économie de mouvements, indices bimanuels (efficacité/coordination), volumes de tissu sain retiré, saignement simulé.
- NTS : NOTSS/NOTECHS (à intégrer), NASA-TLX (charge), Outils CRM (leadership, communication).
- Fiabilité : enregistrements vidéo, double cotation à l'aveugle, ICC ; ré-évaluation de rétention (4-8 semaines).

g. Didactique du geste

- Décomposition hiérarchique (task analysis) : gestes en segments élémentaires (ex. exposition, dissection, contrôle vasculaire, hémostase), chacun ayant objectifs et erreurs critiques.
- Scaffolding : début par tâches partielles (nœuds, micro-sutures, coupes standardisées) avant tâches intégrées (résection, clipping, décompression complète).
- Complexité graduée : augmenter une dimension à la fois (profondeur, saignement simulé, visibilité réduite, temps limité), pour stresser la compétence sans submerger la charge mentale.

h. Ergonomie, sécurité et facteurs humains

La performance technique est indissociable de l'ergonomie et des facteurs humains

- Posture et micro-ergonomie : réglage du microscope/exoscope, hauteur de table, positionnement des mains/appuis.
- Interface de visualisation : AR/VR utiles si l'overlay reste parcimonieux (sinon, cécité attentionnelle) ; design pédagogique à co-construire avec l'équipe.
- Pré-briefing et time-out : mise en commun des modèles mentaux (qui fait quoi, quand, comment), anticipation des scénarios de crise, matériel back-up.
- Débriefing structuré (PEARLS) : lien entre faits observables (vidéo, métriques) et principes (respect des tissus, gestion du temps, communication) ; plan d'action individuel.
- i. Spécificités en pays à revenu faible ou intermédiaire (PRFI)
- Les contraintes d'accès (simulateurs, imagerie avancée, consommables, formateurs) accentuent l'importance de :
- Modules frugaux (impression 3D locale, tâches physiques low-cost), couplés à des créneaux mutualisés VR et du télé-mentorat planifié.

- Standardisation simple (grilles OSATS/NOTSS adaptées, check-lists), maintenance réaliste (SLA interne, pièces de rechange) et gouvernance légère (coordonnateur, audit 10 %).
- Ciblage des gestes à fort impact (ETV/DVE, vis pédiculaires, hémostase de base du crâne) avec seuils de maîtrise explicites et rétention contrôlée.

2.2. Simulation en neurochirurgie : moyens et trajectoire d'innovation

La formation médicale simulée a évolué depuis des modèles simples — dérivés de poumons et de foies de mouton utilisés par les prêtres-templiers en Mésopotamie — jusqu'aux modèles complexes de l'anatomie humaine produits par Galien, Vésale et Léonard de Vinci, puis aux simulateurs Resusci Anne et Harvey développés il y a un demi-siècle, pour aboutir aujourd'hui à une vaste gamme de machines sophistiquées simulant des procédures allant de l'accouchement aux traumatismes de guerre. Grâce à cette maturité technologique, l'utilisation de la simulation médicale s'est rapidement élargie au cours de la dernière décennie, les médecins et les médecins en formation reconnaissant l'intérêt d'apprendre de nouvelles compétences dans un environnement contrôlé plutôt que directement sur des patients. Les simulateurs offrent un moyen optimal de développer les compétences des apprenants soumis à des restrictions d'horaires de travail, et de maintenir le niveau de compétence des médecins exerçant dans des centres à faible volume d'activité.

a. Cartographie des moyens de simulation

a.1. Moyens physiques

→ Drainage ventriculaire externe (DVE)

Le drainage ventriculaire externe (DVE) est une mesure thérapeutique utilisée chez les patients de neurochirurgie en cas de traumatisme, d'hémorragie ou d'hydrocéphalie. La mise en place d'un DVE permet de mesurer la pression intracrânienne (PIC) et de drainer l'excès de liquide céphalo-rachidien (LCR) des ventricules en cas d'élévation de la PIC.

La ventriculostomie consiste à ponctionner les ventricules cérébraux afin d'accéder au LCR. Il s'agit d'une compétence enseignée très tôt dans la formation en neurochirurgie. La simulation en neurochirurgie permet d'améliorer l'expertise des résidents dans les compétences procédurales fondamentales, sans risque supplémentaire pour les patients, ce qui fait de la simulation de la ventriculostomie un élément essentiel de la formation des internes en neurochirurgie.

- **Histoire de la ventriculostomie**

La pose d'un cathéter ventriculaire est une compétence clé acquise précocement par tous les neurochirurgiens. Le drainage ventriculaire externe est l'une des procédures neurochirurgicales les plus fréquemment réalisées et permet l'évacuation externe de l'excès de LCR contenu dans les ventricules.

Le premier DVE documenté a été réalisé par Claude-Nicolas Le Cat en 1744. En 1881, Carl Wernicke a effectué la première mise en place stérile d'un dispositif ventriculaire externe. Le drainage externe du LCR a gagné en popularité à la fin du XIX^e siècle, avant que les progrès technologiques ne permettent l'amélioration des matériaux des cathéters et l'internalisation des dérivations, ouvrant la voie aux shunts ventriculaires modernes. Le design actuel des shunts ventriculaires est apparu en 1950 et continue d'évoluer.

Bien que les cathéters aient connu une évolution remarquable, la technique de pose est restée globalement inchangée depuis plus d'un siècle. Les premières descriptions de la ponction ventriculaire remontent à 1850, avec des résultats initialement défavorables chez les nourrissons hydrocéphales. Par essais et erreurs, la technique s'est perfectionnée, conduisant à l'identification de repères anatomiques optimaux.

W. W. Keen fut le premier à décrire une technique de DVE et donna son nom à un point d'entrée défini comme situé à « 3 cm au-dessus et 3 cm en arrière du pavillon de l'oreille ». En collaboration avec Harvey Cushing, Theodore Kocher décrivit un autre point d'accès, situé sur la ligne médio-pupillaire, à 10 cm en arrière du nasion, connu aujourd'hui sous le nom de point de Kocher. Ce point, recommandé dès 1908 par Tillman, reste une référence majeure en neurochirurgie moderne.

Initialement utilisée pour l'hydrocéphalie, la ventriculostomie est aujourd'hui couramment indiquée dans les traumatismes et les hémorragies cérébrales, avec environ 25 000 procédures réalisées chaque année. En conséquence, la pose d'un DVE est l'un des premiers gestes enseignés aux jeunes internes et doit être maîtrisée précocement afin de réduire les risques pour les patients.

Les revues systématiques montrent que la ventriculostomie est la procédure la plus fréquemment simulée en neurochirurgie. Bien que considérée comme à faible risque, elle est souvent difficile pour les résidents juniors, qui peuvent nécessiter plusieurs tentatives avant une ponction réussie. Afin de limiter les complications potentielles (hémorragie, infection, mauvais positionnement du cathéter, voire décès), la simulation, en particulier par réalité virtuelle, est recommandée pour l'apprentissage des gestes de base.

- **Simulation de la ventriculostomie**

Plusieurs types de technologies de simulation existent en neurochirurgie, mais peu sont spécifiquement dédiées à la ventriculostomie. La simulation peut être physique (non virtuelle) ou virtuelle, parfois associée à un retour haptique. Chaque approche présente des avantages et des limites.

- **Simulation physique**

Traditionnellement, la formation par simulation repose sur les dissections cadavériques, les mannequins et les modèles synthétiques. Les dissections cadavériques ne reproduisent pas fidèlement la ventriculostomie en raison de l'absence de pression ventriculaire intacte.

Les avancées en impression 3D permettent aujourd'hui de créer des modèles crâniens anatomiquement précis. Ces modèles offrent l'avantage de permettre l'identification tactile des repères anatomiques, comme le point de Kocher, se rapprochant des conditions réelles.

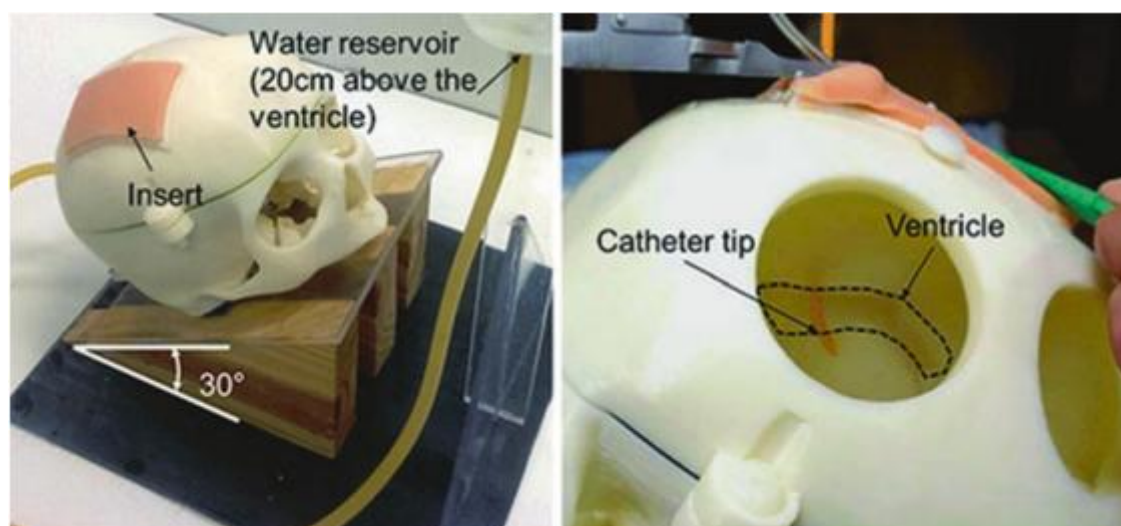


Figure 18 : modèle de simulation physique: crâne incluant le système ventriculaire utilisé pour mise en place d'une ventriculostomie frontale.

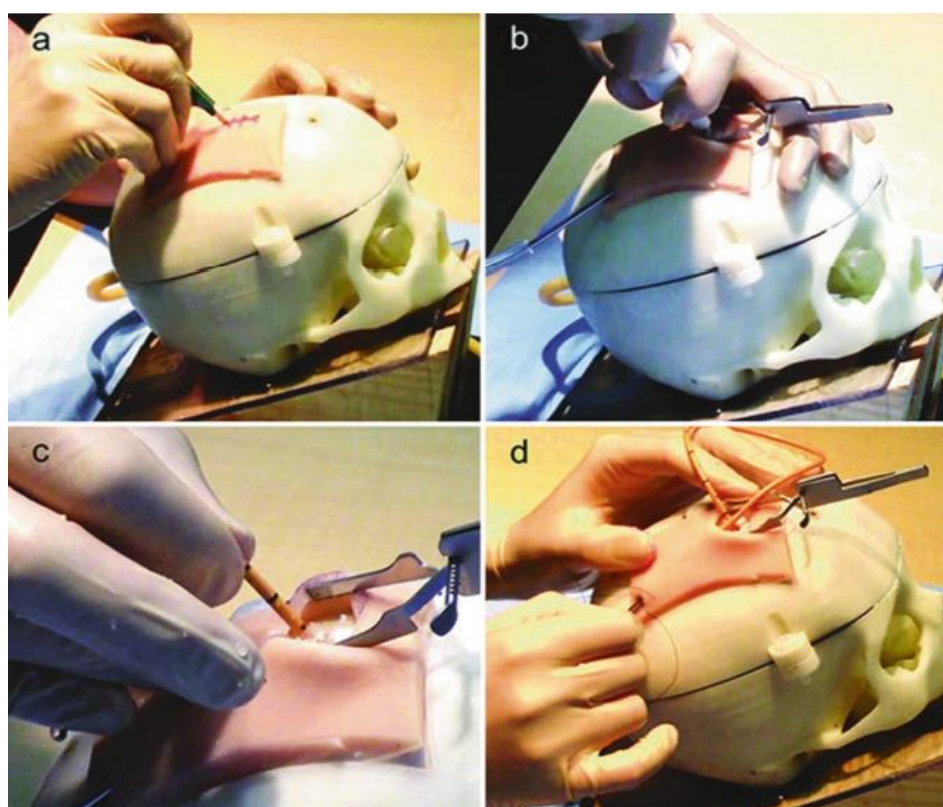


Figure 19 : Modèle de simulation physique de pose d'une DVE: incision (a), forage de l'os (b), placement du cathéter (c), suture (d)

Des simulateurs physiques à faible coût intégrant des moules cérébraux gélifiés et des systèmes de pression contrôlée ont montré un potentiel prometteur pour l'apprentissage de la ventriculostomie, selon des évaluations qualitatives réalisées auprès de résidents et d'étudiants.

- **Simulation mixte**

La simulation mixte combine des modèles physiques à des systèmes de réalité virtuelle avec retour haptique. Elle permet un apprentissage basé sur des structures anatomiques réelles tout en fournissant un retour sensoriel et visuel en temps réel.

Des modèles spécifiques au patient, imprimés en 3D et couplés à des systèmes de suivi électromagnétique, permettent d'analyser la trajectoire du cathéter et la position finale de son extrémité. Des études ont montré que cette approche est réaliste et bénéfique, les résidents seniors obtenant de meilleures performances que les juniors, reflétant l'expérience clinique réelle.

- **Simulation en réalité virtuelle**

Les plateformes de réalité virtuelle avancées, associées à des systèmes haptiques, offrent une immersion complète dans l'expérience neurochirurgicale. Parmi les simulateurs existants, ImmersiveTouch est l'un des seuls à proposer des modules spécifiques de ventriculostomie.

ImmersiveTouch combine un affichage stéréoscopique haute résolution et un retour haptique permettant de reproduire les résistances tissulaires. Le système fournit un retour en temps réel sur la trajectoire du cathéter et évalue les performances selon des critères objectifs (localisation du trou de trépanation, trajectoire, profondeur d'insertion, distance par rapport au foramen de Monro).

Les modules permettent également de visualiser la position exacte du cathéter dans le cerveau virtuel et de s'entraîner sur des anatomies normales ou pathologiques, notamment des ventricules déplacés, illustrant la courbe d'apprentissage associée à ces procédures complexes.

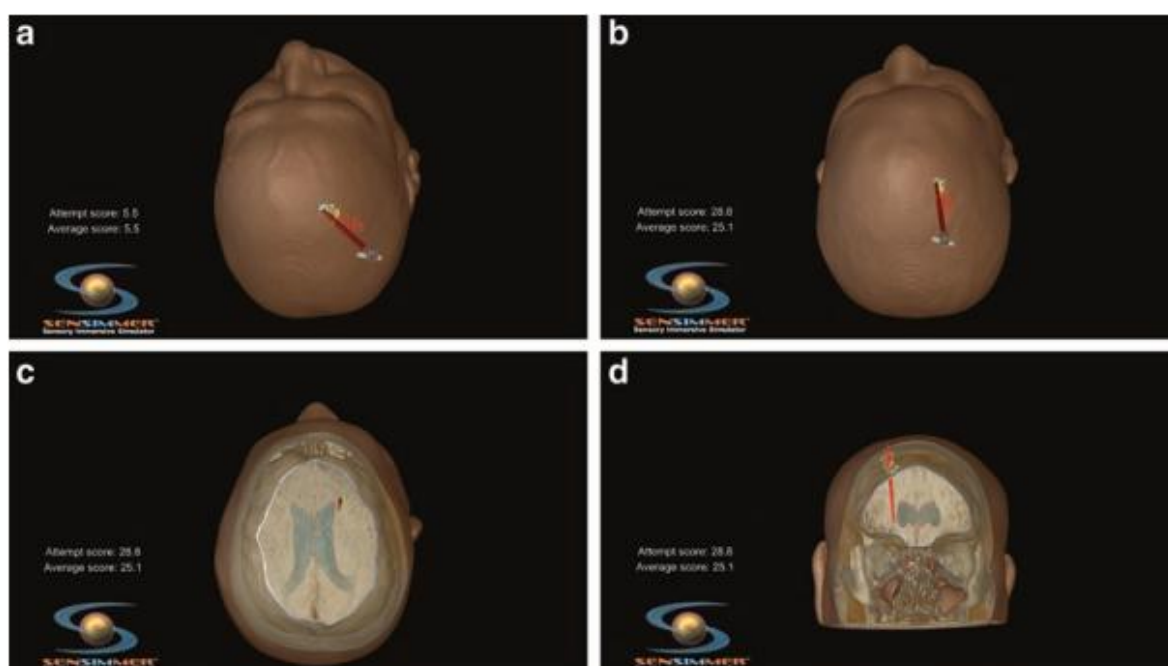


Figure 20 : Cathéter ventriculaire ImmersiveTouch mal positionné: hors du système ventriculaire indiqué en rouge sur l'image (a), cathéter mal positionné sous différents angles (b), coupe virtuelle du cerveau en coupes axiale (c) et coronale (d) montrant: la position du cathéter hors de la corne frontale

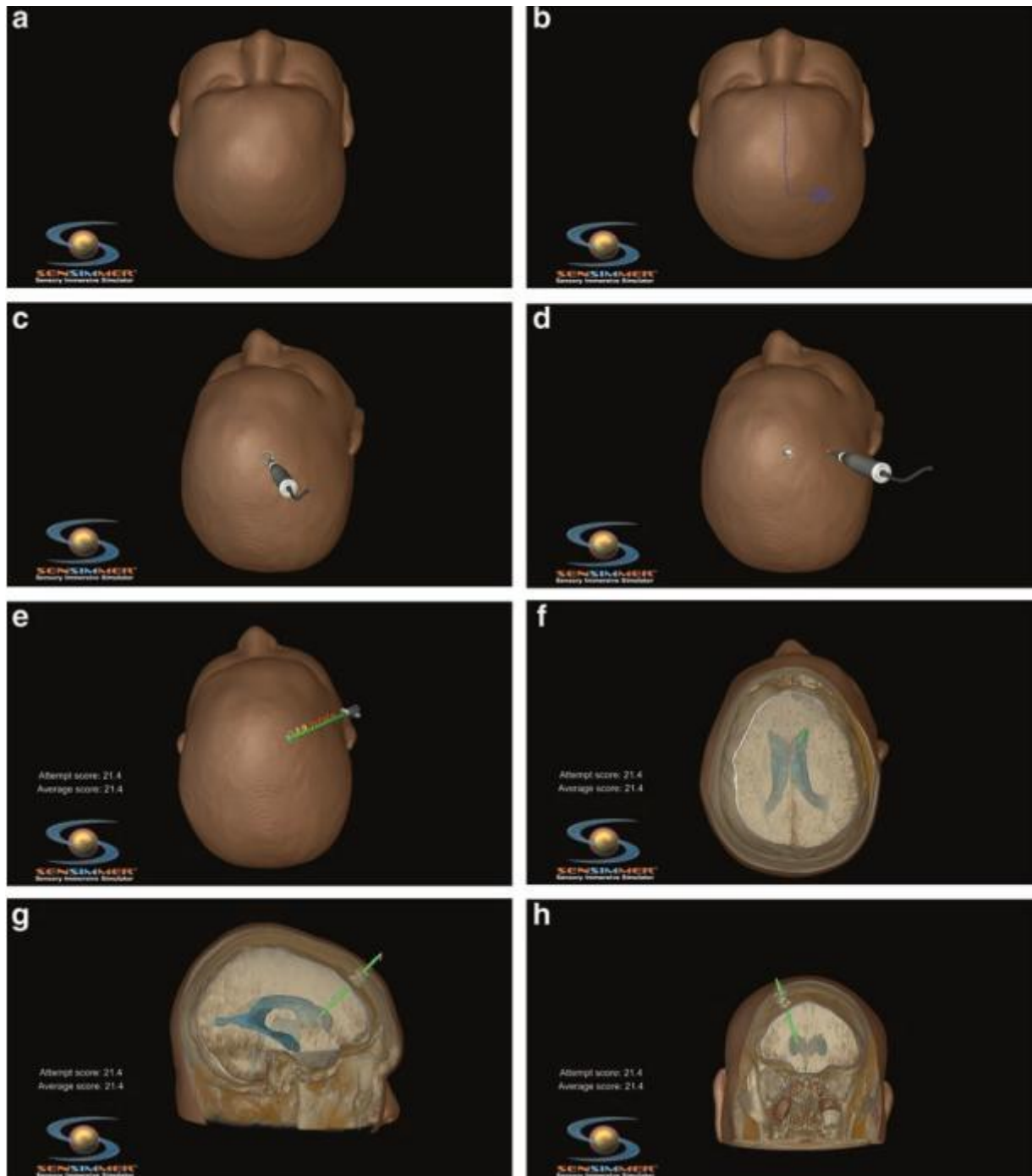


Figure 21: Ventriculostomie occipitale ImmersiveTouch: planification incluant le positionnement de la tête (a), l'identification des repères cutanés (b), le trou de trépanation (c), la mise en place du cathéter ventriculaire (d), la coupe virtuelle du cerveau dans le plan sagittal (e) et les plans axiaux (f) identifiant l'emplacement du cathéter dans le système ventriculaire.

- **Avantages des technologies actuelles**

Les implications de la simulation en neurochirurgie font encore l'objet de recherches, mais les résultats préliminaires sont prometteurs. La ventriculostomie est une procédure standard, enseignée précocement à tous les résidents. Schirmer et al. (79) ont utilisé la plateforme ImmersiveTouch pour simuler la ventriculostomie dans un module de traumatologie développé pour le CNS Resident Simulation Symposium, avec des résultats positifs. Les résidents ayant utilisé les modules ImmersiveTouch ont montré de meilleures performances en ventriculostomie, les résidents juniors bénéficiant davantage de la simulation que les résidents seniors.

Lors d'évaluations menées auprès de résidents et de fellows lors du congrès de l'AANS en 2006, Banerjee et al. ont montré que le module de ventriculostomie d'ImmersiveTouch permettait une mise en place précise du cathéter, avec des résultats comparables à ceux d'une étude rétrospective portant sur 97 patients ayant bénéficié d'une pose libre du cathéter. Ces résultats soutiennent la capacité du module à reproduire fidèlement la procédure réelle.

Les résidents et fellows en neurochirurgie ont rapporté que les informations sensorielles et visuelles fournies par la simulation de ventriculostomie étaient réalistes et favorisaient le développement des compétences procédurales pertinentes. De plus, ImmersiveTouch propose des modules d'anatomie normale et pathologique, permettant aux résidents de s'entraîner à une variété de scénarios de ventriculostomie afin d'améliorer leurs performances en pratique clinique.

- **Limites des technologies existantes**

Les limites des simulateurs physiques dépendent largement des capacités actuelles de l'impression 3D. Le principal défi réside dans le choix de matériaux capables de reproduire fidèlement les propriétés biomécaniques du tissu cérébral et des ventricules. Tai et al. ont utilisé un matériau de type gélatine offrant une expérience de simulation réaliste.

Un autre inconvénient des simulateurs physiques est leur usure progressive, nécessitant un remplacement fréquent de certaines pièces après utilisation, comme les inserts crâniens à usage unique. Ces limites s'appliquent également aux composantes physiques des simulateurs

mixtes. Malgré ces coûts de remplacement à long terme, les simulateurs physiques, dont le coût de fabrication est d'environ 1 000 dollars, restent nettement moins onéreux que les systèmes de réalité virtuelle.

L'un des principaux désavantages des systèmes de réalité virtuelle est leur coût financier élevé, qui limite leur accessibilité à de nombreux programmes de formation en neurochirurgie. Le coût initial varie selon les options, avec des contrats de location débutant à environ 20 000 dollars et des options d'achat à partir de 75 000 dollars. Ces estimations n'incluent pas le temps et les ressources nécessaires à l'installation initiale ni à la maintenance future.

Par ailleurs, les systèmes de réalité virtuelle sont encombrants et nécessitent un espace dédié. Selon l'organisation du programme de formation, l'accès à ces systèmes peut être limité pour les résidents en dehors de leurs activités cliniques quotidiennes. Tous les systèmes de simulation doivent compléter, et non remplacer, la formation pratique au lit du patient.

Bien que le retour haptique et les capacités de traitement continuent de s'améliorer, la technologie actuelle ne reproduit pas encore parfaitement la complexité réelle de la pose d'un DVE ni les complications peropératoires en temps réel auxquelles les résidents peuvent être confrontés.

- **Conclusion**

Les avancées technologiques récentes ont permis le développement de nouveaux modules de formation dédiés à la ventriculostomie, incluant des modèles physiques et des simulateurs basés sur la réalité virtuelle. Ces outils sont désormais largement utilisés dans la formation des résidents en neurochirurgie et constituent un complément essentiel à l'apprentissage clinique traditionnel.



→ Chirurgie endovasculaire

• Introduction

La chirurgie vasculaire traditionnelle est progressivement remplacée par la chirurgie endovasculaire (interventionnelle) pour le traitement de diverses maladies vasculaires. Par ailleurs, les dispositifs médicaux endovasculaires arrivent rapidement sur le marché, obligeant les praticiens à apprendre continuellement l'utilisation de nouveaux équipements. L'usage traditionnel des modèles animaux pour l'entraînement diminue également, car les technologies endovasculaires et de simulation ont dépassé les scénarios relativement simples reproductibles chez l'animal (géométries simples, vaisseaux de plus petite taille, etc.), le tout avec un coût élevé à la fois éthique et financier. De plus, l'utilisation de simulateurs en médecine — et notamment en chirurgie endovasculaire — peut contribuer à respecter le principe fondamental de « ne pas nuire », dans un contexte où la complexité technologique et le système actuel de formation médicale seraient associés à environ 200 000 décès annuels liés à des événements indésirables évitables chez des patients hospitalisés aux États-Unis.

Les bénéfices de la formation par simulateur ont été confirmés par de nombreuses études : réduction des coûts, augmentation de l'intérêt et de la confiance chez les étudiants et les apprenants, diminution du temps de formation, amélioration du travail d'équipe au sein des équipes opératoires, amélioration de l'efficacité des procédures (réduction du volume de produit de contraste injecté, diminution de la durée de fluoroscopie et du temps opératoire, etc.) et baisse des complications. Les simulateurs à haute fidélité favorisent des améliorations plus importantes des compétences chirurgicales, en particulier chez les praticiens expérimentés réalisant des procédures sophistiquées. Les simulateurs permettent également de planifier les traitements, en testant avant l'intervention le choix optimal et la séquence d'utilisation de dispositifs tels que stents, coils ou agents embolisants. La simulation médicale apporte donc de multiples bénéfices pour les résultats thérapeutiques et la prise en charge des patients, et permet de réduire l'erreur inhérente au paradigme « voir une fois, faire une fois, enseigner une fois » grâce à l'expérience acquise en simulation.

- **Autres modèles de simulation**

Il faut noter que plusieurs fantômes physiques de tête ont été développés à partir de différents matériaux simulant les tissus, afin de répondre à des besoins variés (imagerie, planification chirurgicale, simulation opératoire), avec un recours croissant à l'impression 3D au cours de la dernière décennie. Parmi ces modèles figurent : des gels d'agar liés à l'oxyde ferrique et à l'hydroxyapatite pour simuler respectivement l'hémorragie et la calcification ; de la cire de paraffine pour les tissus mous extracrâniens et une solution de chlorure de manganèse pour la « matière cérébrale » en IRM ; l'impression 3D de sulfate de calcium, ou de nylon polyamide avec billes de verre, comme substitut de l'os temporal pour l'entraînement en chirurgie ORL ; des chambres en résine époxy imprimées en 3D remplies de solutions et gels (phosphate dipotassique, agarose) pour mimer l'os et le cerveau ; ou encore des mélanges (paraffine, Téflon, carbonate de calcium) visant à reproduire les densités et les propriétés physiques os/tissus mous.

Des modèles combinant crâne et réseau vasculaire ont été réalisés avec du nylon et des billes de verre ou des photopolymères rigides pour le crâne, et des silicones ou photopolymères flexibles pour la vasculature ; le mélange nylon-billes de verre aurait un comportement qualitativement comparable au forage et au rongement de l'os humain. Divers médias (cire de paraffine, polyuréthane, résine époxy) ont également été infiltrés dans des structures crâniennes imprimées par technologie poudre/liant, afin de reproduire l'atténuation acoustique des crânes néonataux ou les forces de fracture des sinus humains.

Plusieurs simulateurs endovasculaires virtuels existent aussi. Ils reposent sur un retour haptique issu de logiciels qui tentent de reproduire le comportement des dispositifs médicaux simulés. Les systèmes virtuels ont des avantages : portabilité, mise en route rapide, absence de radiation, pas de coût de dispositifs physiques, et retour automatique sur la performance. En revanche, ils peuvent souffrir d'un retour haptique peu réaliste ; s'entraîner dans un environnement trop simplifié peut conduire à une complaisance apprise chez les débutants ; le suivi et le déploiement des dispositifs ne valent que ce que le code permet ; et les nouveaux dispositifs ne peuvent être simulés qu'une fois leur comportement encodé. Ce chapitre se concentre donc sur les simulateurs physiques à haute fidélité — ou « répliqueurs » — pour la formation en neurochirurgie endovasculaire.

- **Réplicateurs (simulateurs physiques endovasculaires à haute fidélité)**

Le terme « simulateur » étant souvent associé aux systèmes virtuels, un autre terme est nécessaire pour désigner les systèmes physiques. Des composants physiques (modèles vasculaires, pompes) existent depuis des années pour la recherche, le test de dispositifs et la formation, en contexte commercial ou en laboratoire. Ici, le terme « réplicateur » est choisi pour distinguer les simulateurs physiques complets et haute fidélité des systèmes virtuels et des composants isolés.

Un réplicateur neuro-endovasculaire doit intégrer : des répliques vasculaires anatomiquement exactes, un débit pulsatile physiologique, des paramètres d'atténuation aux rayons X adéquats, ainsi que d'autres considérations physiques (viscosité du fluide proche de celle du sang, friction luminale physiologique contre cathéters, suspension des vaisseaux équivalente au parenchyme, etc.).

Les pompes de circulation utilisées en simulation doivent reproduire un débit pulsatile physiologique, car l'hémodynamique dépend de l'éjection du ventricule gauche, de la compliance de l'aorte et des résistances du réseau artériel. Les phénomènes de propagation et de réflexion des ondes de pression (dont l'encoche dicrote) expliquent la variation de la pression pulsée dans l'arbre artériel. Pour une simulation haute fidélité, il faut donc : (1) des pressions et débits d'entrée réalistes dans le temps, (2) une grande vasculature anatomiquement correcte avec une compliance proche du réel, et (3) une reproduction des résistances/compliances distales via un modèle de type Windkessel.

Les pompes se classent en pompes dynamiques (ex. centrifuges, débit plutôt continu) et pompes volumétriques (piston, péristaltiques, débit transitoire). Un débit simplement cyclique ne suffit pas : un vrai débit pulsatile nécessite des systèmes de contrôle et de rétroaction, souvent couplés à des capteurs de pression et de débit.

Enfin, le fluide de travail doit imiter les propriétés du sang (densité et viscosité), généralement avec des solutions épaissies (glycérine, sorbitol). Le caractère non newtonien peut être reproduit si nécessaire (ex. anévrysmes) par des additifs, et la température du fluide doit être physiologique pour certains dispositifs à mémoire de forme.



Figure 23 : Images ou schémas de différents types de pompes. Dans le sens horaire, en partant du haut à gauche : une pompe centrifuge, une pompe péristaltique et trois pompes à flux pulsé disponibles dans le commerce : la SuperPump de ViVitro Labs, le Replicator de Vascular Simulations et la CompuFlow de Shelley Medical Imaging Technologies.

- **Répliques vasculaires**

Des répliques de pathologies cérébrovasculaires sont fabriquées depuis près de trois décennies pour la recherche et le test de dispositifs, via des méthodes allant des moulages de têtes de cadavres à l'impression 3D directe. La conception passe souvent par la segmentation d'imageries patient (angiographie rotationnelle, scanner, IRM) ou par des géométries idéalisées en CAO. Un moule est ensuite créé par impression 3D ou usinage ; un moulage acrylique/époxy issu d'une tête cadavérique peut également servir de moule.

Plusieurs procédés existent :

- Fonderie à cire perdue / moulage par investissement (création d'une réplique en cire puis remplacement par polymère/résine).
- Moulage par injection/infusion de silicone liquide dans des moules (parfois imprimés en 3D), suivi de polymérisation et destruction du moule.
- Revêtement par trempage-rotation (dip-spin coating) pour obtenir des parois fines et homogènes sur un noyau imprimé en 3D, ensuite détruit pour récupérer une lumière vasculaire souple.

Le matériau choisi doit être durable, résistant à la fatigue, capable de reproduire des géométries complexes, avec une friction luminale réaliste pour les cathéters et une distensibilité comparable aux artères. Le silicone est largement utilisé pour sa polyvalence, même si la maîtrise précise des propriétés des matériaux « souples imprimés » reste encore émergente.

Pour obtenir une compliance réaliste, il faut rapprocher épaisseur pariétale et module élastique des artères humaines. Certaines valeurs sont données : épaisseur pariétale approximative (extra-crânien 0,75–1,0 mm ; intra-crânien ~0,5 mm), compliance dynamique, module élastique circonférentiel, résistance à l'éclatement, résistance à l'arrachement de suture, etc. Une silicone de dureté ~25 Shore A correspond approximativement à un module de ~0,5 MPa ; en contrôlant épaisseur et matériau, on peut approcher la compliance physiologique.

La friction luminale est cruciale pour la poussée, la navigabilité et la transmission du couple des dispositifs. Or, la silicone brute a un coefficient de friction très élevé ($\approx 0,6$ ou plus), bien supérieur à celui de tissus biologiques ; il faut donc réduire cette friction par revêtement, par fluide induisant un glissement, ou les deux. Le PVA est parfois cité comme substitut supérieur, notamment car sa friction intrinsèque est plus faible.

Enfin, les vaisseaux intracrâniens étant soutenus par l'espace sous-arachnoïdien et le parenchyme, ils ne sont pas « libres ». Pour simuler cette interaction extravasculaire, on peut suspendre les répliques dans un milieu gélatineux reproduisant la flexion.

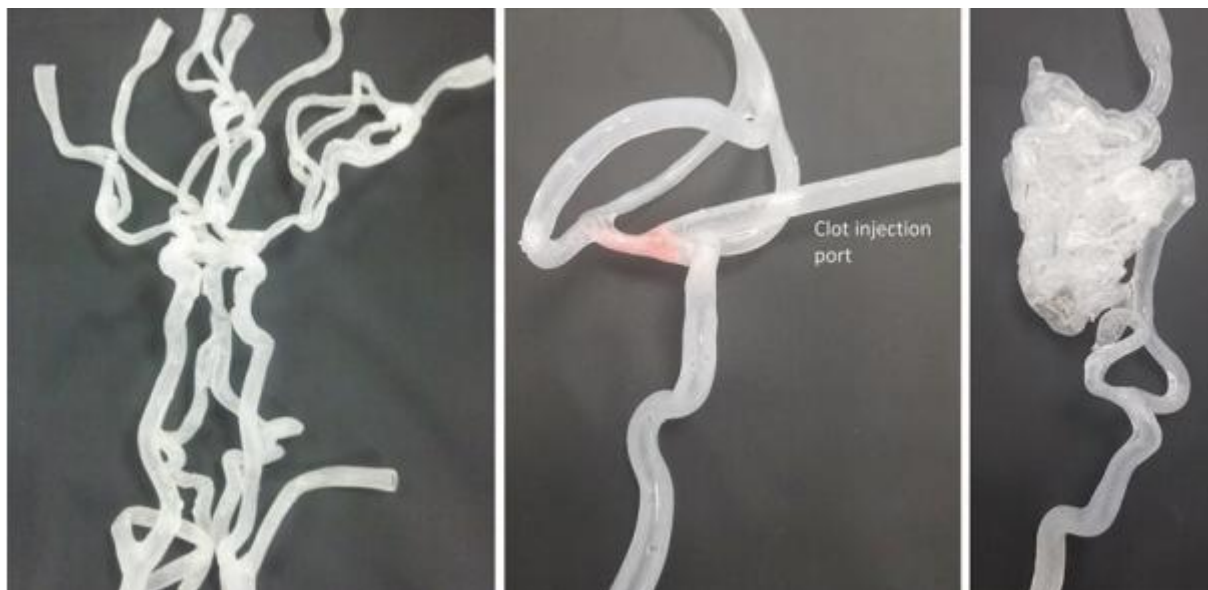


Figure 24: Images de répliques en silicone souple (de gauche à droite) d'un polygone de Willis, d'une occlusion de l'artère cérébrale moyenne avec injection d'un thrombus synthétique par un « port de caillot », et d'une malformation artério-veineuse.

- **Atténuation aux rayons X**

Comme la plupart des procédures neurointerventionnelles se font sous fluoroscopie/angiographie, une structure de crâne ayant une atténuation physiologique est nécessaire afin de simuler les repères osseux, les artéfacts de soustraction et l'apprentissage des injections de contraste (quantité, débit) — particulièrement chez les débutants. Le fantôme crânien sert aussi à reproduire les exigences de la chaîne d'imagerie face aux dispositifs endovasculaires de plus en plus fins.

Des propriétés mécaniques et radiologiques de l'os sont décrites : épaisseur globale du crâne (environ 5–10 mm, moyenne ~7–8 mm), densité de l'os cortical, modules élastiques, résistances mécaniques, et plages d'atténuation (HU) pour l'os trabéculaire et cortical, ainsi que

pour le parenchyme cérébral (≈ 30 HU). Si le parenchyme est simulé par un gel, on peut y ajouter des agents radio-opaques (sulfate de baryum, agents iodés, dioxyde de titane). Les crânes radiographiques sont souvent fabriqués par moulage de plastiques modifiés ; l'impression 3D pourrait permettre des crânes spécifiques au patient avec radio-opacité contrôlée via des techniques d'infiltration post-traitement.

Une angiographie native de contraste injecté dans un système à débit pulsatile, avec artères intracrâniennes suspendues dans un gel et intégrées à un crâne à atténuation physiologique, illustre le niveau de fidélité possible. Des améliorations supplémentaires sont envisageables : blush parenchymateux, distinction os cortical/trabéculaire, sinus veineux, et substitut de cuir chevelu/peau.



Figure 25 : (À gauche) Image d'un fantôme crânien contenant des répliques vasculaires en suspension dans un gel. Le gel (~ 35 UH) et le crâne (800–1000 UH) présentent tous deux une atténuation physiologique aux rayons X. (À droite) Angiographie native d'une réplique vasculaire de la carotide commune droite à l'intérieur du crâne.:

→ Modèles 3D:

• Introduction

La formation en neurochirurgie a évolué avec les progrès technologiques. Traditionnellement, la neurochirurgie s'enseignait sur des patients réels au bloc opératoire. L'adage classique « voir une fois, faire une fois, enseigner une fois » s'est longtemps imposé. Les changements liés aux restrictions des heures de travail, ainsi que d'autres évolutions culturelles, ont toutefois rendu nécessaire le développement de nouveaux outils de formation.

L'enseignement s'est également appuyé sur les cadavres. Ceux-ci constituent une excellente méthode pour apprendre l'anatomie. Cependant, ils sont souvent coûteux, et les techniques de conservation modifient les plans de dissection. De plus, les cadavres ne présentent généralement pas de pathologies.

Avec l'avancée des technologies, les neurochirurgiens utilisent désormais des systèmes de neuronavigation comme outil d'apprentissage. Plus récemment, les simulateurs se sont répandus. Ils sont très utiles, mais restent insuffisamment réalistes pour une pratique procédurale avancée.

Les modèles imprimés en 3D ont l'avantage de fournir des supports spécifiques au patient, permettant d'enseigner différentes approches et techniques. La stéréolithographie est « une méthode et un appareil permettant de fabriquer des objets solides en “imprimant” successivement de fines couches de matériaux polymérisables, superposées les unes aux autres ». Cette technique permet de créer des modèles 3D complexes du crâne, du cerveau, de la colonne vertébrale et d'autres structures anatomiques. Les imprimantes 3D les plus avancées permettent l'utilisation de plusieurs couleurs et matériaux, donnant un aspect et un ressenti plus réalistes aux tissus. Sans surprise, leur coût est nettement plus élevé que celui des imprimantes plus simples.

- Crânien

- ⇒ Clipage d'anévrisme

La dissection microchirurgicale et le clipage des anévrismes cérébraux font partie des procédures les plus dépendantes du niveau technique en neurochirurgie. Classiquement, ces compétences se développent grâce au travail sur cadavre et à l'observation de neurochirurgiens plus expérimentés. Avec l'augmentation des techniques endovasculaires, le nombre d'anévrismes traités par clipage a diminué dans le monde. Les cas opérés sont en général les plus complexes, non accessibles au traitement endovasculaire, réduisant encore les opportunités de formation. De plus, les cadavres présentant une pathologie spécifique aux anévrismes sont rares. L'impression 3D répond progressivement au besoin d'un environnement de formation plus adapté.

L'impression 3D de la vasculature cérébrale, notamment des anévrismes, a été l'une des premières applications en neurochirurgie. D'Uso et al. (80) ont été les premiers, en 1999, à utiliser des données 3D issues de CTA et MRA pour fabriquer des biomodèles intracrâniens par stéréolithographie. Leur étude prospective (16 patients) a montré une bonne concordance avec les constatations peropératoires, sauf dans un cas comportant un thrombus intraluminal. Les modèles étaient utiles pour informer les patients, aider au positionnement et soutenir la chirurgie, en permettant des mesures précises. Les limites incluaient la difficulté de représenter les petits vaisseaux, l'élimination du matériau de support sans perte d'anatomie, et la segmentation dépendante de l'opérateur. Le délai moyen de fabrication était de 3 jours, pour un coût d'environ 300 \$ par modèle.

Wurm et al. (81) ont étudié 13 anévrismes (1999–2003). Après des débuts avec CTA, ils ont utilisé l'angiographie rotationnelle 3D, améliorant l'exactitude grâce aux progrès de l'imagerie, du post-traitement et de la stéréolithographie. Les modèles facilitaient la compréhension des relations anatomiques mais, du fait de leur rigidité, étaient moins adaptés à la simulation du clipage et à la dissection. Un délai d'environ 50 heures était observé entre l'imagerie et l'obtention du modèle.

Wurm et al. (82) ont ensuite cherché à rendre les modèles plus fonctionnels pour la dissection et l'application de clips. Ils sont passés à la technologie PolyJet Matrix, permettant d'imprimer, en un même objet, des matériaux rigides et flexibles. Le modèle comprenait un crâne rigide, des vaisseaux colorés rigides, et un anévrisme flexible (photopolymère type caoutchouc). L'anévrisme était remplaçable pour répéter l'entraînement. Le processus durait environ 1,5 semaine et coûtait ~2000 €. Les auteurs concluaient à un intérêt pour l'entraînement et un bon retour haptique, mais sans reproduction parfaite des propriétés intrinsèques de la paroi vasculaire, ni des tissus environnants (fissure sylvienne, cerveau, etc.).

Kimura et al. (83) ont proposé une autre méthode pour créer des vaisseaux et anévrysmes creux et élastiques à partir de CTA. Les modèles servaient à la planification : dans 5 cas sur 8, le nombre et l'orientation des clips planifiés correspondaient à ceux utilisés. Les modèles ont aussi été utilisés pour former des novices, avec inspection endoscopique de la lumière avant/après clippage. Le délai de production était de 3 à 7 jours, pour un coût de 300 à 400 \$. Les limites : fixation au crâne, délai de fabrication, absence de tissus environnants.

D'autres travaux ont évalué la précision des modèles PolyJet basés sur CTA, en comparant les mesures à l'angiographie par soustraction digitale (référence). Les prototypes reproduisaient correctement les mesures, avec un coût faible, mais sans vaisseaux creux ni tissus adjacents, et avec un besoin important d'expertise anatomique pour régler correctement la segmentation.

Mashiko et al. (84) ont utilisé une technique combinant ABS et silicone pour fabriquer des modèles creux, élastiques et durables (supportant de nombreuses applications de clips). Les modèles ont globalement bien reproduit l'anatomie, mais certaines différences peropératoires ont persisté (épaisseur du col, vaisseau adhérent non visible). Le coût des matériaux par modèle vasculaire était très faible, mais l'investissement initial pour l'impression en interne était élevé ; ils ont néanmoins montré des économies (moins de clips "gaspillés").

Benet (84) a implanté des modèles d'anévrismes imprimés en 3D dans des cadavres afin de simuler dissection et clipage dans un environnement plus réaliste. Une limite notable était la discordance possible entre l'anatomie osseuse du patient et celle du cadavre.

D'autres équipes (ex. Lan et al. (85)) ont créé des modèles multicolores intégrant certaines structures (comme le nerf optique), à haute résolution, améliorant la planification et l'enseignement. Anderegg et al. (86) ont développé des modèles de cas complexes pour discuter stratégies (bypass, occlusion) grâce à une meilleure segmentation semi-automatique et à l'intégration d'objets (os, coils, vaisseaux extracrâniens), mais avec des limites de rigidité et de visualisation des perforantes.

Mashiko et al. et Ryan et al (87, 88). ont introduit des modèles plus complets intégrant cerveau, crâne et vasculature, parfois modulaires et remplaçables, pour simuler le corridor opératoire et répéter l'application de clips. Malgré ces progrès, certaines limites technologiques demeurent : difficulté d'intégrer tous les nerfs crâniens, incapacité à reproduire les très petits vaisseaux perforants, absence d'un matériau simulant la dissection arachnoïdienne, et épaisseur minimale des parois vasculaires différente du réel.

Un exemple clinique illustre l'intérêt : un anévrisme de 7 mm de la communicante antérieure, initialement planifié par voie ptérionale gauche, a finalement été optimisé vers une voie orbito-zygomatique droite après planification sur modèle 3D, facilitant l'anticipation de la transgression du sinus frontal, le choix des clips et le positionnement du patient.



Figure 26 : Après avoir testé plusieurs clips et orientations, le meilleur clip et la meilleure position ont été testés sur un modèle 3D

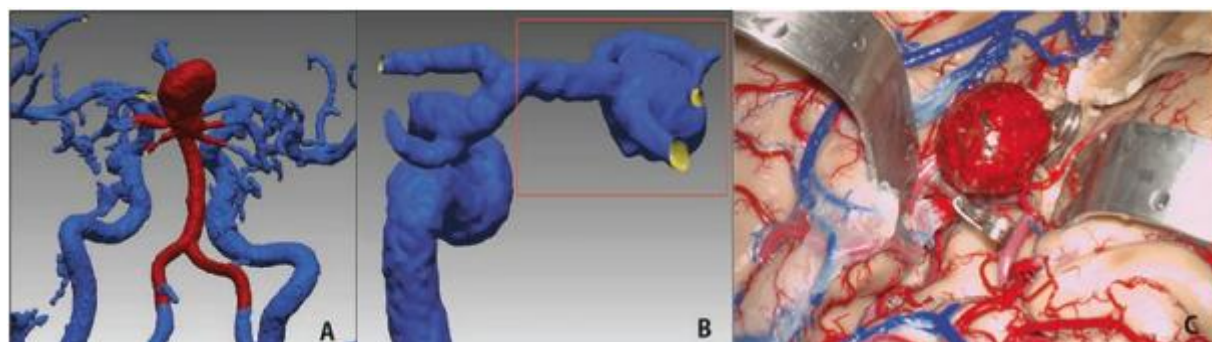


Figure 27 : (a) Modèle d'anévrisme de l'apex basilaire généré par ARM, (b) Modèle d'anévrisme de l'artère cérébrale moyenne généré par ARM, (c) anévrisme imprimé en 3D implanté sur un cadavre



Figure 28 : Les résidents répètent l'application du clip sous le microscope sur un modèle 3D.

⇒ **Base du crâne / Tumeurs**

La chirurgie tumorale, notamment de la base du crâne, requiert une formation intensive. Or, l'évolution des traitements non chirurgicaux (radiothérapie, chimiothérapie) réduit parfois le nombre de cas opérés. Les modèles 3D peuvent compléter ou remplacer certaines séances de laboratoire sur cadavre.

La précision anatomique peut être validée par neuronavigation : Waran et al. (90) ont montré que des crânes imprimés à partir de CT haute résolution pouvaient être enregistrés et localisés avec précision sur un système de navigation. Plusieurs travaux portent aussi sur des laboratoires de compétences pour l'os temporal, avec des matériaux simulant l'os, des structures colorées, et parfois des éléments permettant de signaler une lésion lors de la dissection (nerf facial, carotides, sinus sigmoïde).

Concernant les tumeurs de la base du crâne, des modèles stéréolithographiques ont été utilisés tôt (D'Urso et al. (91)), mais les anciennes imprimantes limitaient l'impression multi-objets. Des technologies plus récentes ont permis des impressions multi-matériaux et multi-couleurs (Kondo et al. (92)) afin de mieux visualiser les structures profondes, par exemple en représentant la tumeur sous forme de maillage. Un travail institutionnel a utilisé la fusion CT/MRI et la navigation pour comparer des corridors opératoires et quantifier les zones visibles, malgré l'impossibilité d'intégrer toutes les structures adjacentes (tronc cérébral, nerfs crâniens, etc.).

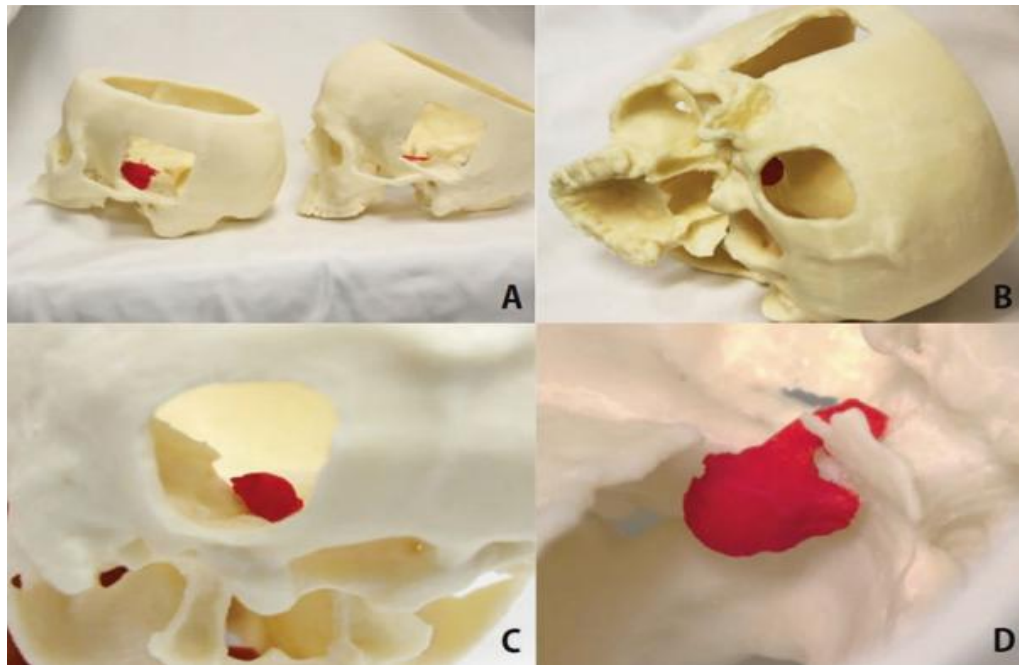


Figure 29 : (a) Abord de la tumeur pétroclivale par la fosse crânienne moyenne, (b) abord rétrosigmoïde de la tumeur, (c) vue de la tumeur à travers le foramen magnum, (d) vue agrandie de la tumeur pétroclivale

⇒ **Hypophyse / Endoscopie**

Les techniques endoscopiques se sont fortement développées pour traiter diverses pathologies (tumeurs hypophysaires, tumeurs intraventriculaires, hydrocéphalie). L'adoption de nouvelles technologies requiert une formation souvent basée sur cadavres et mentorat ; les modèles 3D offrent une alternative sans risque pour le patient.

Des modèles 3D ont été utilisés pour simuler l'ETV et la biopsie pinéale, avec des scores élevés de réalisme et une navigation possible. Pour l'approche transsphénoïdale, une étude institutionnelle a montré une amélioration objective de l'identification des repères anatomiques après entraînement sur modèle 3D. Les modèles sont également utiles pour l'anatomie endonasale, malgré certaines limites d'accès transnasal dans des pathologies comme l'invagination basilaire. Un avantage clé sur les cadavres : la présence de la pathologie, rare dans les spécimens conservés.

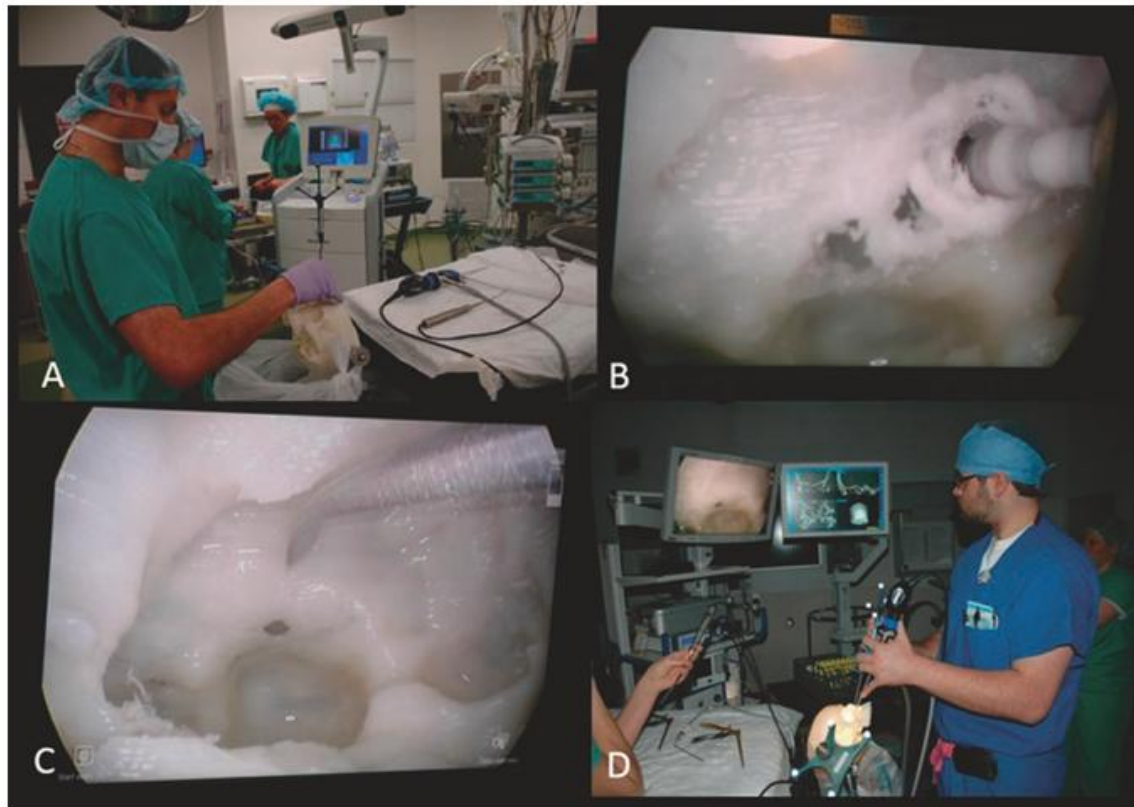


Figure 30 : (a) Enregistrement du modèle imprimé en 3D, (b) forage du sinus sphénoïdal par endoscopie, (c) identification des différentes structures anatomiques par endoscopie, (d) exercices de navigation endoscopique par les résidents et internes

⇒ **Procédures mineures / DVE**

Les gestes au lit du malade sont fréquents et parfois vitaux (DVE, ponctions lombaires, voies centrales, intubation). Le DVE est couramment réalisé pour traiter l'hydrocéphalie, l'hémorragie intraventriculaire, les fuites de LCR, etc. Les cadavres sont peu adaptés (altération du système ventriculaire). Des simulateurs VR existent, et des modèles 3D ont été conçus pour reproduire peau, os, dure-mère et ventricule rempli d'eau, avec réservoir de contrôle. Tai et al. ont montré une forte valeur pédagogique, notamment pour les novices. Ryan et al. (93) ont décrit des modèles très peu coûteux (quelques dollars par modèle cérébral). D'autres modèles plus réalistes existent mais restent chers (base réutilisable + inserts jetables). Les modèles 3D peuvent aussi être enregistrés en neuronavigation.

- Rachis

La chirurgie du rachis représente une part importante de l'activité neurochirurgicale. Les modèles 3D aident à comprendre l'anatomie et à planifier des cas complexes, notamment en reprise avec déformation. Des équipes ont imprimé des modèles crânio-vertébraux incluant os et vaisseaux pour choisir l'approche optimale. Des guides d'aide à la pose de vis pédiculaires ont été développés et ont montré une précision accrue, notamment en rachis thoracique ou en reprise. En chirurgie lombaire de reprise, l'utilisation de modèles 3D peut réduire le temps opératoire et les pertes sanguines, sans forcément modifier les résultats cliniques.

L'impression 3D ouvre aussi la voie aux implants sur mesure (ex. cage d'ACDF personnalisée) offrant un ajustement très précis, ainsi qu'à des implants poreux imprimés pour des résections tumorales complexes. Sur le plan pédagogique, des études montrent que les étudiants apprennent mieux l'anatomie (ex. fractures) avec des modèles imprimés qu'avec le scanner seul. Les radiologues peuvent également utiliser ces modèles comme fantômes pour CT/MR et pour simuler des interventions guidées.

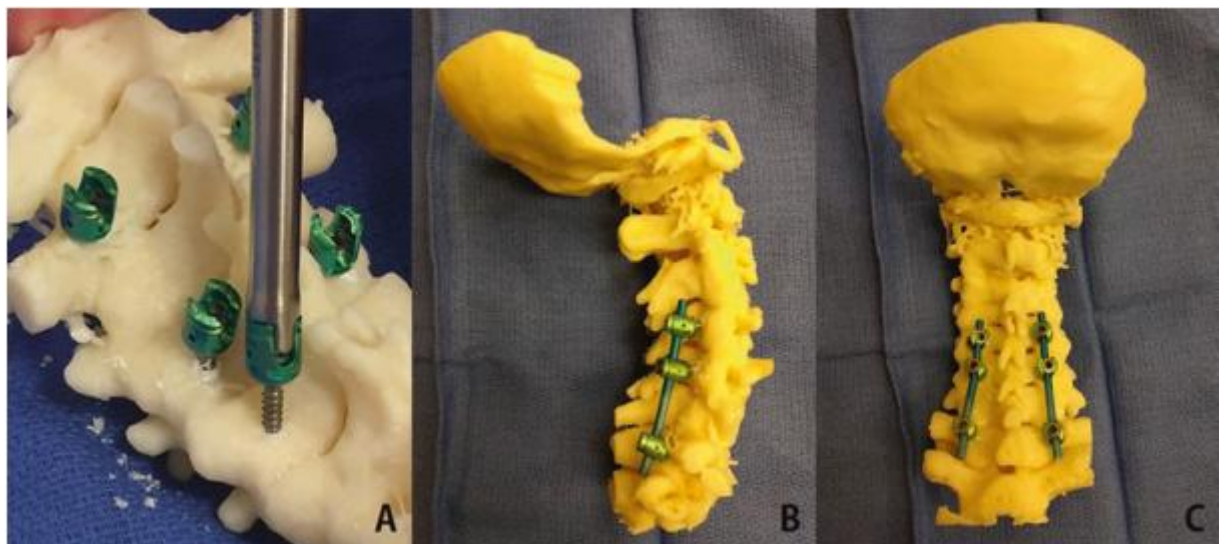


Figure 31 : (a) Mise en place des vis de masse latérale dans le modèle imprimé en 3D, (b) vue latérale et (c) vue postérieure du modèle imprimé en 3D après instrumentation cervico-thoracique

- **Perspectives futures**

À mesure que l'imagerie, les techniques et les imprimantes 3D progressent, l'impact sur la formation en neurochirurgie augmente. Les besoins principaux sont : imprimer en une seule fois (moins d'assemblage), obtenir une résolution élevée, et reproduire des propriétés tissulaires proches du réel. Si la reproduction du tissu cérébral devient suffisamment fidèle, l'entraînement avec le matériel réel pourra se faire sans risque, y compris pour des situations spécifiques au patient, potentiellement même en urgence (anévrismes rompus).

- **Conclusion**

Les modèles 3D constituent une ressource majeure pour la formation en neurochirurgie. Ils offrent des applications variées en neurochirurgie crânienne et rachidienne, et permettent de répéter une procédure sur une réplique fidèle d'un patient avant de l'effectuer sur un être vivant. Les imprimantes modernes peuvent combiner couleurs et duretés, rendant possible l'impression d'un crâne dur et de vaisseaux souples. Plus les modèles deviendront réalistes, plus leur utilité pédagogique augmentera. Dans le contexte actuel (semaine de 80 heures), ces modèles complètent utilement l'exposition au bloc opératoire. Il est souvent plus sûr de s'entraîner sur une réplique précise avant d'opérer un patient. Les modèles 3D deviendront probablement un pilier durable de la formation en neurochirurgie, et leur intérêt pédagogique ne fait aucun doute. L'avenir de la formation neurochirurgicale par modèles 3D est très prometteur.

a.2. Moyens biologiques

→ **Microchirurgie d'anastomose**

Les artères cérébrales diffèrent des artères extracrâniennes par une paroi plus fine et l'absence de membrane élastique externe. Ces particularités rendent les vaisseaux intracrâniens plus vulnérables à certaines pathologies vasculaires, telles que la maladie de moyamoya, les occlusions athéroscléreuses, les anévrismes intracrâniens et les malformations artéριοveineuses. Chacune de ces pathologies pose des défis chirurgicaux spécifiques, et les neurochirurgiens cérébrovasculaires doivent maîtriser leur prise en charge microchirurgicale.

En conséquence, les neurochirurgiens doivent acquérir un large éventail de compétences microvasculaires complexes, souvent nécessaires en situation d'urgence, où la différence entre un bon et un mauvais pronostic peut se jouer en quelques secondes ou minutes. La rapidité d'exécution est donc essentielle. Les techniques microvasculaires doivent être développées en amont afin que le chirurgien soit prêt lorsqu'il est confronté à une urgence cérébrovasculaire. Cependant, en raison de la réglementation croissante du temps de travail des résidents, des exigences accrues de rapidité de prise en charge, et du recours croissant aux techniques endovasculaires, il devient difficile pour les résidents d'acquérir l'expérience pratique nécessaire à la maîtrise de ces techniques. Dans ce contexte, des modèles simples et accessibles de formation microvasculaire constituent un moyen clé pour développer, affiner et maintenir ces compétences chirurgicales.

- **Environnement chirurgical et simulation**

Le développement de modèles de simulation adaptés aux procédures cérébrovasculaires nécessite une reproduction fidèle des particularités de l'environnement opératoire. Celles-ci incluent une craniotomie limitant la liberté de mouvement tout en offrant un appui pour les mains, des corridors chirurgicaux étroits avec ou sans écarteurs cérébraux, l'éloquence des régions cérébrales adjacentes, la fragilité et la souplesse du tissu cérébral, ainsi que la présence de liquide céphalorachidien.

Le **facteur temps** constitue une autre dimension cruciale : de nombreuses procédures cérébrovasculaires sont une véritable course contre la montre, car l'application de clips temporaires ou la compromission vasculaire peut entraîner une ischémie cérébrale irréversible. La présence de **petites artères perforantes** ajoute un niveau supplémentaire de complexité.

Outre les variables anatomiques, l'environnement microchirurgical présente des **conditions dynamiques spécifiques**, telles que la tension de surface, le magnétisme des instruments, la résistance à la traction de l'adventice, les adhérences et la contractilité vasculaire. Les **outils du neurochirurgen** doivent également être pris en compte : microscope opératoire, instruments longs et bayonnés, microdissecteurs et autres instruments spécifiques à la microchirurgie. L'ensemble de ces éléments crée un environnement complexe que tout neurochirurgen doit maîtriser avant de pouvoir pratiquer en toute sécurité des procédures microchirurgicales intracrâniennes.

- **Principes de l'entraînement à la microanastomose**

Il est largement admis que les compétences en **microanastomose** doivent être perfectionnées en laboratoire avant d'être appliquées chez un patient réel. La participation à un cours de microchirurgie, permettant l'apprentissage des principes fondamentaux, constitue le point de départ d'une formation plus approfondie en laboratoire.

L'entraînement à la microanastomose repose sur **trois composantes essentielles** :

- **Participation régulière à des cours spécialisés**, offrant des modèles de haute fidélité et un encadrement par des experts, permettant une réévaluation annuelle des techniques et un retour structuré.
- **Exercices quotidiens autodirigés** sur des modèles facilement accessibles. Des modèles biologiques simples ou artificiels peuvent être utilisés pour entretenir et améliorer les compétences de base.
- **Application en salle d'opération**, où les techniques acquises sont mises en pratique de manière sécurisée pour disséquer l'arachnoïde, manipuler les vaisseaux cérébraux et réaliser des anastomoses microvasculaires.

Cette combinaison constitue un **algorithme idéal** pour l'apprentissage et le maintien des compétences manuelles. Les modèles d'entraînement doivent être utilisés de manière progressive, en commençant par des supports « secs » avant de passer à des modèles biologiques « humides ». Ce chapitre se concentre sur les **modèles biologiques** pour l'entraînement microvasculaire.



Figure 32: Pratique de la microchirurgie vasculaire sur un modèle de placenta pendant la formation en pontage à l'Institut neurologique Barrow

- **Laboratoire et éthique des modèles biologiques**

L'intégration de modèles biologiques dans la formation des résidents nécessite des **infrastructures adaptées**, conformes aux réglementations institutionnelles pour la manipulation et l'élimination des tissus humains et animaux. Une large majorité des directeurs de programmes de résidence aux États-Unis estiment qu'un laboratoire de dissection est indispensable à la formation en neurochirurgie.

Les travaux impliquant des animaux vivants doivent être approuvés par un comité d'éthique institutionnel (IACUC), tandis que l'utilisation de placentas humains requiert l'approbation d'un comité d'éthique de la recherche. Une formation spécifique du personnel est indispensable avant toute manipulation de modèles biologiques.

- **Modèles biologiques de pratique**

- **Artères de volailles**

Les artères d'ailes de poulet ou, de préférence, de dinde constituent un excellent modèle biologique simple. Les artères de dinde sont plus longues et de plus grand diamètre, proches de celles des artères cérébrales humaines. Elles peuvent être utilisées pour tous les types d'anastomoses, la création d'anévrismes et l'application de clips. Ces modèles sont peu coûteux, facilement accessibles et ne nécessitent aucune autorisation réglementaire.

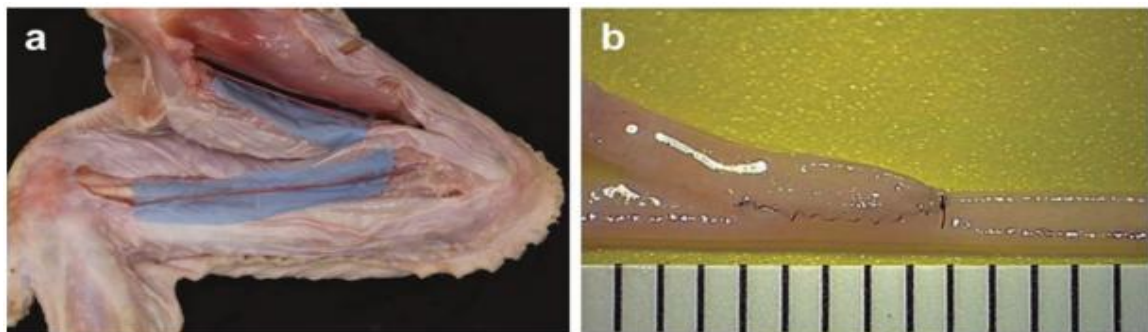


Figure 33 : Modèle d'aile de dinde pour la pratique de la microchirurgie vasculaire. (a) Vue d'ensemble de l'artère disséquée. (b) Anastomose terminale-latérale réalisée.

- **Vaisseaux placentaires**

Le **placenta humain** est l'un des modèles biologiques les plus réalistes pour l'entraînement microvasculaire. Les artères placentaires présentent des dimensions et une structure histologique proches de celles des artères cérébrales humaines, et sont recouvertes d'une membrane amniotique rappelant l'arachnoïde. Ce modèle permet de simuler des anastomoses, la création et le clipage d'anévrismes, ainsi que la microdissection tumorale. Ses limites incluent une durée d'utilisation restreinte et un risque infectieux nécessitant un dépistage rigoureux.

Les **placentas bovins** offrent une grande quantité de vaisseaux de calibres variés, adaptés à des procédures complexes comme les pontages de tailles différentes ou la simulation de malformations artérioveineuses.

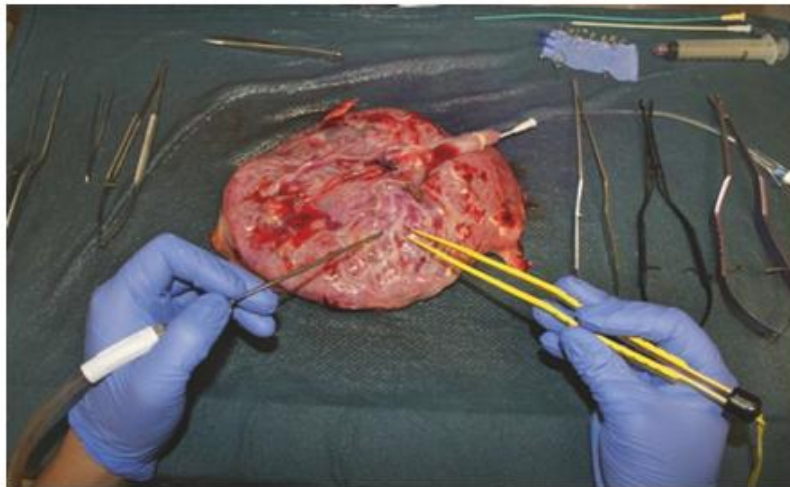


Figure 34 : Modèle de placenta humain pour la pratique de la microchirurgie. Le placenta est nettoyé et connecté à un flux sous pression. La microdissection est pratiquée à l'aide d'un dispositif d'aspiration et d'un dispositif bipolaire.

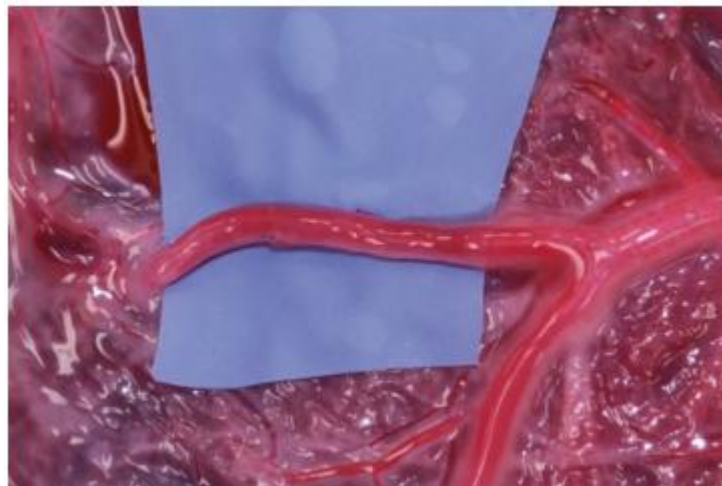


Figure 35 : Un segment disséqué d'une artère placentaire humaine

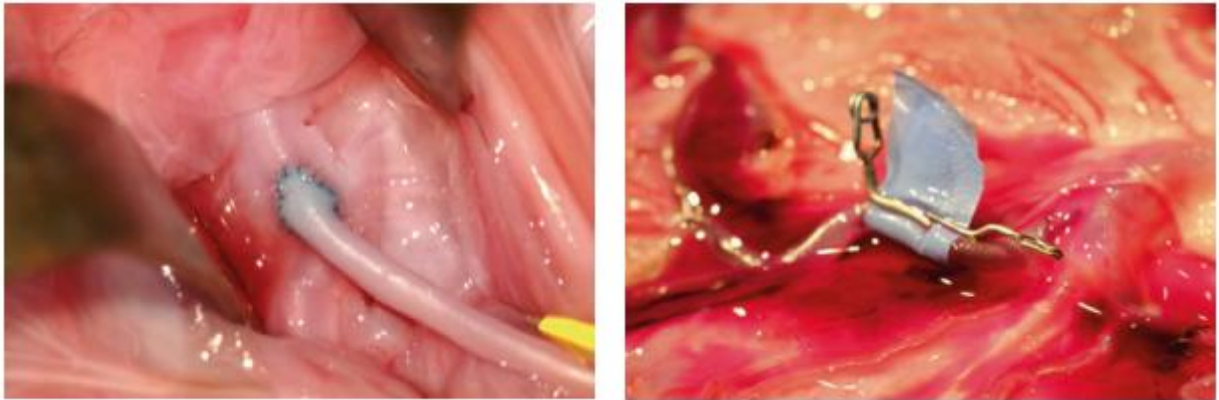


Figure 36 : (à gauche) Anastomose termino-latérale complète des artères placentaires. Des écarteurs auto-rétracteurs sont utilisés pour créer un couloir de travail à travers la deuxième placenta. (à droite) Exercice de technique d'enroulement de clip utilisant une artère placentaire.

➤ **Rats de laboratoire**

Les rats constituent un modèle vivant très réaliste, permettant d'évaluer les résultats fonctionnels des anastomoses (saignement, thrombose, spasme). Ils offrent un environnement proche de la réalité opératoire, mais leur utilisation est limitée par des contraintes éthiques, réglementaires, logistiques et financières.



Figure 37 : Un rat anesthésié est placé sur une table spéciale. La peau à proximité des incisions est rasée. Des projections des vaisseaux couramment utilisés en microchirurgie sont présentées.

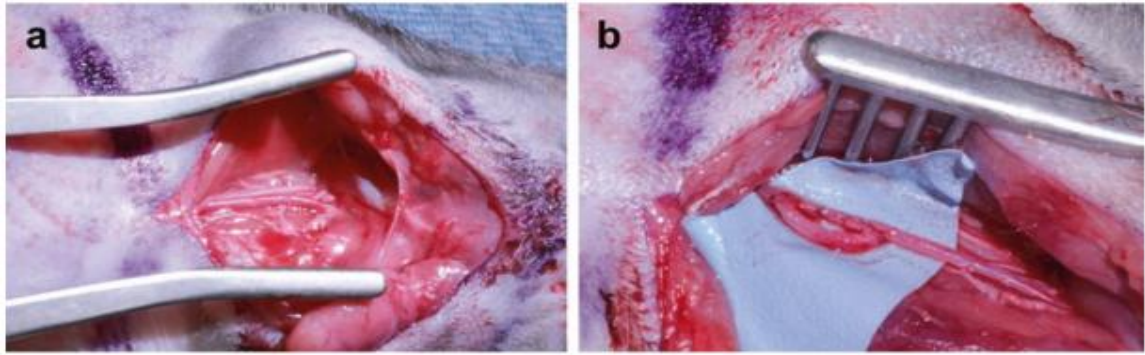


Figure 38 : Pratique microvasculaire sur l'artère carotide droite du rat. (a) L'artère carotide commune et sa bifurcation sont disséquées. (b) Deux anastomoses termino-latérales sont créées, formant une boucle, à l'aide d'un greffon artériel prélevé sur l'artère carotide controlatérale.

➤ **Têtes cadavériques humaines**

Les têtes cadavériques injectées et légèrement fixées offrent la meilleure reproduction de l'anatomie et de l'environnement chirurgical réel. Elles permettent de simuler des procédures complètes, y compris des pontages intracrâniens à haut débit. Toutefois, leur coût, leur disponibilité et la complexité de leur préparation limitent leur usage.



Figure 39 : Tête de cadavre fixée et injectée de silicone utilisée pour la dissection microchirurgicale.

- **Avantages et limites des modèles biologiques**

Les modèles biologiques offrent le **meilleur retour tactile** et une fidélité élevée par rapport aux tissus humains. Ils permettent de pratiquer non seulement la suture, mais aussi la préparation du champ opératoire, la gestion des complications et les étapes critiques de la microchirurgie. Toutefois, ils manquent souvent de structures environnantes (cerveau, craniotomie, corridors profonds), limites pouvant être partiellement compensées par l'intégration de modèles imprimés en 3D.

- **Conclusion**

Bien que rarement utilisées, les compétences de pontage microvasculaire sont **essentielles et vitales** lorsqu'elles sont requises. Elles doivent être acquises avant toute situation clinique réelle. De nombreux modèles biologiques validés existent pour l'entraînement à la microanastomose. L'intégration de programmes structurés de formation microvasculaire, reposant sur des modèles biologiques adaptés, peut être mise en œuvre dans pratiquement tous les services de neurochirurgie pour la formation des résidents et des fellows.

→ Chirurgie des anévrysmes

Avec la popularité croissante des stratégies endovasculaires et des traitements mini-invasifs, **moins d'anévrysmes sont traités par chirurgie ouverte** à l'époque moderne, bien que cette intervention demeure **cruciale** et **particulièrement exigeante**. Le traitement chirurgical des anévrysmes requiert un niveau élevé de compétence et d'expérience afin d'obtenir d'excellents résultats et d'éviter des complications, dont l'une des plus redoutables est la **rupture anévrysmale peropératoire**, crise dramatique pouvant menacer la vie du patient et ses fonctions neurologiques.

La réduction du temps de travail des résidents, associée à la tendance vers des traitements minimalement invasifs voire non invasifs des anévrysmes cérébraux, a entraîné une **diminution de l'exposition des résidents à la chirurgie réelle** et de leur expérience pratique au bloc opératoire. Cette baisse devient particulièrement problématique lorsque les chirurgiens doivent faire face à des complications, notamment les lésions vasculaires et la rupture peropératoire d'anévrysmes. Une fois leur formation terminée, les résidents devront gérer seuls des cas complexes, y compris des ruptures peropératoires. Pour développer la compétence nécessaire, il faut donc mettre en place des mécanismes compensatoires afin de pallier la diminution de l'apprentissage « mains sur le patient » ; une part importante de l'entraînement doit désormais se faire en laboratoire.

La simulation et l'entraînement en laboratoire constituent les meilleures stratégies pour compenser cette perte d'exposition et de compétences. Yasargil (94) et d'autres pionniers l'avaient compris dès l'essor de la micro-neurochirurgie. Dans son ouvrage de référence *Microneurosurgery*, Yasargil soulignait que, dans des organes délicats comme le système nerveux central, les compétences individuelles du chirurgien déterminent fortement le pronostic ; d'où l'importance de l'entraînement en laboratoire, préparant les chirurgiens à l'expérience du bloc. Pour simuler une intervention réelle, il faut reproduire et intégrer tous les éléments de la chirurgie « vivante ». John Hunter, chirurgien écossais du XVIII^e siècle, aurait résumé la chirurgie comme « l'anatomie plus l'hémostase ». Les modèles intégrant ces éléments sont idéaux pour un entraînement avancé et pour combler l'écart entre le laboratoire et le bloc opératoire.

Bien que les modèles et simulateurs actuellement disponibles offrent de nombreuses possibilités, ils ne reproduisent pas entièrement les caractéristiques de la vascularisation cérébrale humaine vivante, en particulier **l'association entre anatomie humaine réelle et conditions opératoires réalistes**. Ce chapitre décrit un modèle d'anévrisme plus réaliste, appelé **modèle de «cadavre vivant»**, permettant un entraînement répétitif dans des conditions proches du réel. Il utilise des têtes cadavériques humaines préparées spécifiquement à cet effet. Ce modèle est utilisé concrètement dans plusieurs centres de formation aux États-Unis, dans des cours et dans la pratique quotidienne.

- **Préparation du modèle de « cadavre vivant »**
 - **Préparation de la pièce anatomique**

Les spécimens cadavériques étaient conservés grâce à un désinfectant à base d'alcool et de l'éthylène glycol. Des tubes adaptés permettaient de canuler les principaux vaisseaux du cou ainsi que les espaces sous-arachnoïdiens via le canal rachidien, puis l'arbre vasculaire était irrigué au sérum physiologique afin d'évacuer caillots et résidus sanguins. Les vaisseaux étaient ensuite connectés à des réservoirs de « sang artificiel » (poches de perfusion placées sous manchons de pression). La pression artérielle simulée était maintenue à 120–130 mmHg, et la pression veineuse à 10–15 mmHg.

Le réservoir artériel était relié à une pompe fournissant une pression pulsatile (pompes type ballon de contre-pulsion intra-aortique ou dispositifs similaires), avec un rythme de 80 pulsations par minute. Un des tubes rachidiens était relié à un réservoir de liquide clair, suspendu à un pied à perfusion, afin de simuler le **liquide céphalorachidien (LCR)**, à un débit d'environ 15–20 cm par heure. L'autre tube était laissé ouvert à une hauteur donnée pour drainer l'excès de liquide. Des détails supplémentaires ont été publiés ailleurs.

Le simulant sanguin pouvait être fabriqué à partir de peintures à base d'eau ou acheté prêt à l'emploi. Lorsque la pompe était activée, le liquide remplissait les vaisseaux, pulsait dans les artères et restait sous pression statique dans le réseau veineux.

Ainsi, l'anatomie humaine est présentée dans des conditions beaucoup plus réalistes, permettant une simulation fidèle du saignement, de la pulsatilité artérielle et de la souplesse tissulaire.

➤ Création de pseudo-anévrismes

Des pseudo-anévrismes peuvent être créés par l'instructeur ou par le stagiaire. Une large craniotomie ptériale était réalisée afin d'autoriser plusieurs approches. La scissure sylvienne et les citernes basales étaient ouvertes, les vaisseaux exposés, puis l'artère cible disséquée pour préparer la création de l'anévrisme. Pendant tout ce temps, la pompe fonctionnait : les vaisseaux étaient remplis sous pression, et le LCR simulé occupait les espaces sous-arachnoïdiens.

Le stagiaire devait gérer des étapes proches de la chirurgie réelle : coagulation des vaisseaux cutanés, hémostase osseuse, coagulation des vaisseaux durs, ouverture de l'arachnoïde et drainage du LCR. Cette expérience est particulièrement marquante, notamment pour les jeunes résidents.

Des greffons veineux prélevés au cou étaient utilisés pour fabriquer le sac anévrysmal. Une fine couche de tissu adipeux était conservée afin de sceller un futur orifice et simuler une rupture. Le greffon était découpé (10-15 mm), retourné, suturé à une extrémité avec du 8-0 ou 9-0, puis remis dans sa position initiale : les sutures se retrouvaient à l'intérieur du sac, et le tissu graisseux recouvrait la ligne de suture, donnant un dôme arrondi. Ensuite, une artériotomie adaptée était réalisée sur l'artère porteuse, et l'anévrisme était suturé en place.

Aux bifurcations, la base était façonnée pour intégrer une ou deux branches afin de permettre une reconstruction. Une attention particulière était portée au respect de la configuration du vaisseau porteur et des branches adjacentes. Pour simuler certains anévrismes (ophtalmiques ou communicants postérieurs), l'anévrisme était placé au contact immédiat de ces structures afin de rendre la dissection et le clipage plus difficiles.

Après fixation, l'anévrisme était testé : remplissage du sac, perfusion distale et absence de fuite ; des points supplémentaires étaient ajoutés si nécessaire.

➤ **Exercices d'entraînement**

Des résidents et internes de tous niveaux ont réalisé des procédures neurovasculaires dans des conditions très proches du réel. Ils pouvaient utiliser aspiration, coagulation bipolaire, micro-Doppler et l'ensemble des instruments du bloc opératoire. Deux exercices principaux sont décrits : **clippage d'anévrisme** et **prise en charge d'une rupture peropératoire**.

La tête était fixée sur un porte-tête. Les réservoirs sanguins étaient placés légèrement au-dessus pour éviter l'embolie gazeuse et contrôler la pression simulée. Le réservoir de LCR était réglé autour de 18-20 cc/h, la pompe installée à proximité.

➤ **Exercice de clipage**

En général, l'instructeur réalisait d'abord une démonstration. Ensuite, les apprenants s'entraînaient au clipage, aux techniques de reconstruction et à la gestion de rupture. Avant chaque exercice, des espaces péri-anévrismaux étaient remplis de sang coagulé artificiel pour simuler une hémorragie sous-arachnoïdienne. Les stagiaires devaient obtenir un contrôle proximal, disséquer le dôme, préparer le collet, puis appliquer les clips comme en situation réelle. Pour un niveau avancé, des matériaux plus adhérents pouvaient être ajoutés pour compliquer la dissection, et des anévrismes complexes nécessitant plusieurs clips étaient créés. Les exercices peuvent être répétés plusieurs fois sur le même spécimen ou d'autres spécimens.

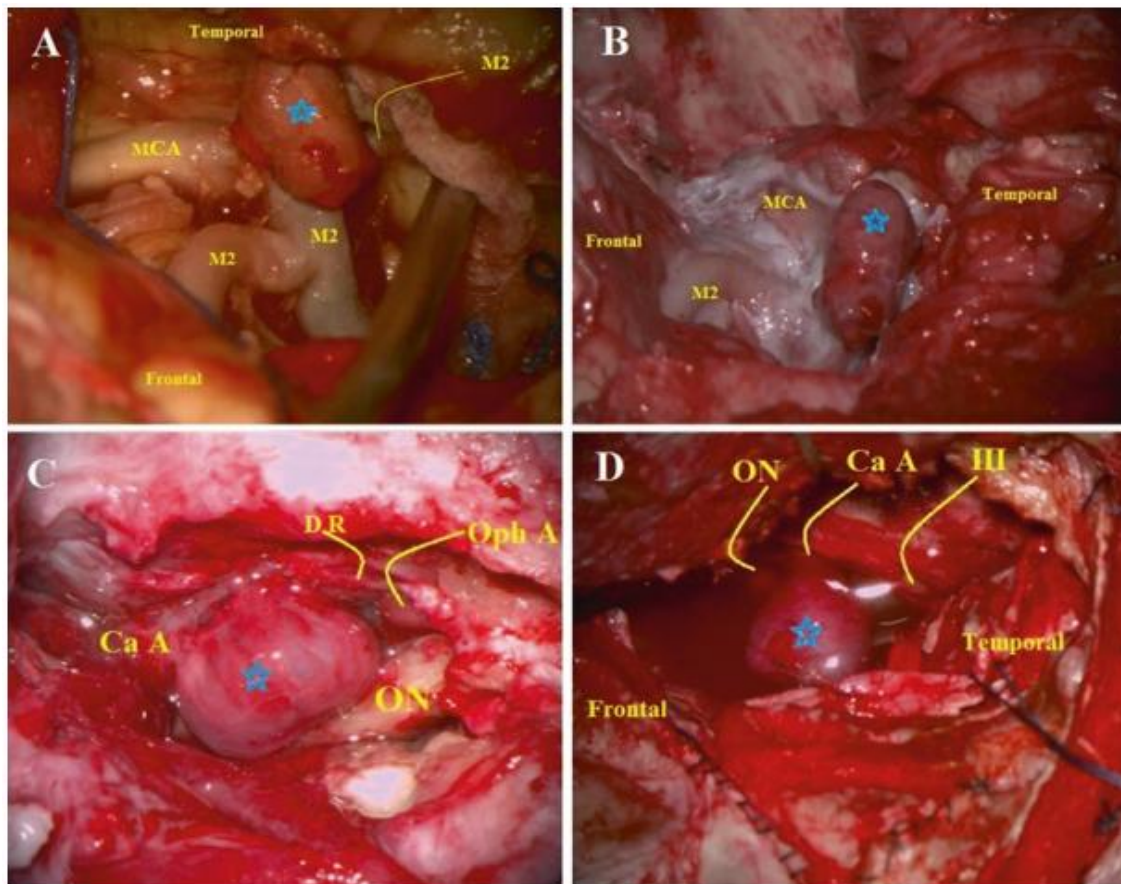


Figure 40 : Clipage d'anévrisme : (a) anévrisme de l'artère cérébrale moyenne droite, (b) position du clip, (c, d) vérification de l'absence d'anévrisme résiduel sous le clip.

➤ **Gestion de la rupture peropératoire**

Après entraînement au clipage, un petit orifice est créé sur le dôme. À basse pression, il n'y avait pas de saignement important ; mais si la pression était augmentée, un saignement massif survenait. Pour reproduire cela, un second réservoir artériel, maintenu sous forte pression (jusqu'à 220 mmHg), pouvait être ouvert brusquement, déclenchant une hémorragie simulant une rupture.

Les médecins en formation apprenaient alors une séquence d'actions visant à contrôler l'hémorragie rapidement : contrôle de pression, tamponnade temporaire, aspiration, contrôle proximal par clips temporaires, clipage du point de rupture ou du dôme visible, coagulation bipolaire dans certains cas, et travail sous hypotension ou « arrêt cardiaque simulé ».

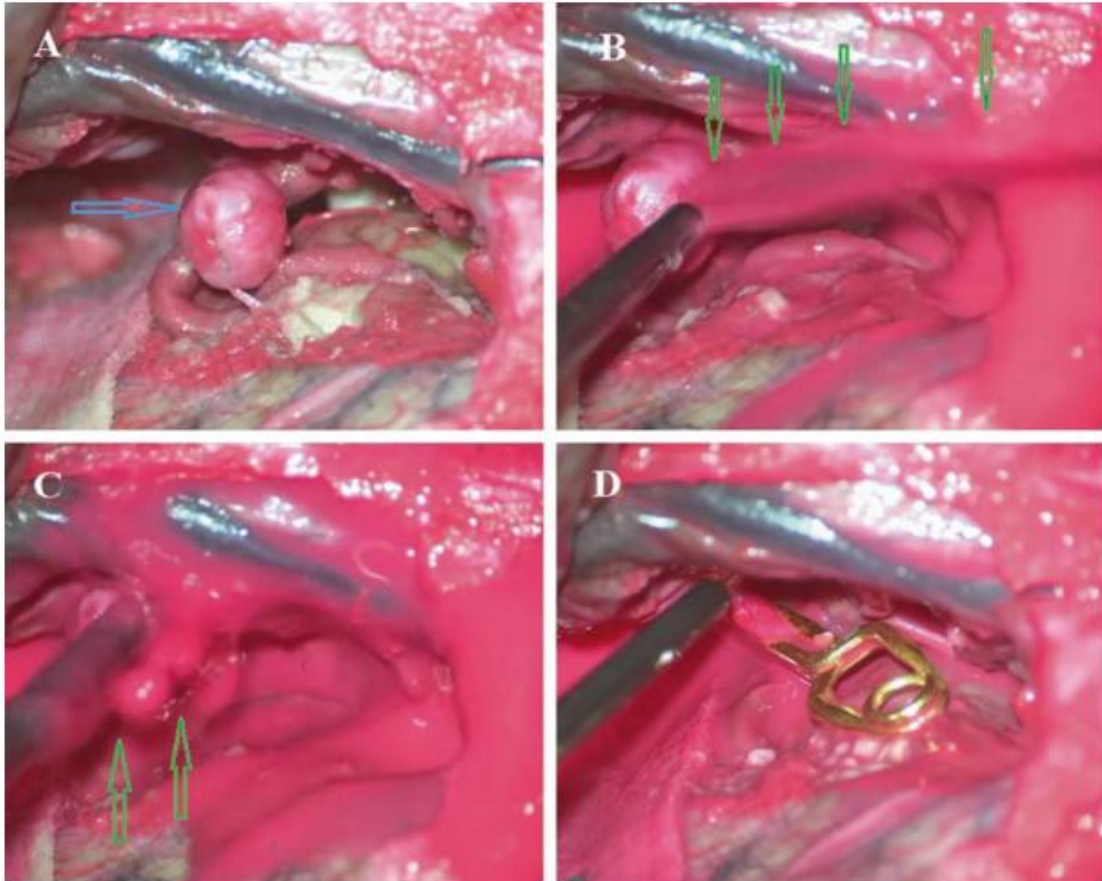


Figure 41 : Prise en charge de la rupture: (a) anévrisme de l'artère cérébrale moyenne droite (flèche bleue), (b, c) jet de saignement provenant du dôme de l'anévrisme (flèches vertes) et contrôle de l'hémostase par aspiration, (d) clip temporaire au point de saignement

- **Évaluation et applications**

Les participants étaient très enthousiastes à l'idée de s'entraîner sur un cadavre pouvant saigner. Beaucoup ont déclaré que cette session était la meilleure partie du cours. Le modèle permettait de pratiquer toutes les manœuvres de contrôle d'hémorragie (tamponnade, aspiration, contrôle proximal/distal, clips temporaires, coagulation, hypotension/arrêt simulé). Dans une étude publiée, la majorité des participants considéraient le modèle comme une simulation fidèle de la chirurgie réelle d'anévrisme et de la rupture peropératoire.

Le modèle « cadavre vivant » ne se limite pas aux pseudo-anévrismes : il peut être utilisé pour de nombreuses procédures (endoscopie, craniotomies, dissections cisternales, pontages STA-MCA, réparations vasculaires, thrombectomie, chirurgie de base du crâne, lésions tumorales artificielles, etc.). Pour optimiser l'utilisation du spécimen, il est conseillé de commencer par les procédures les moins invasives avant d'explorer les régions plus profondes.

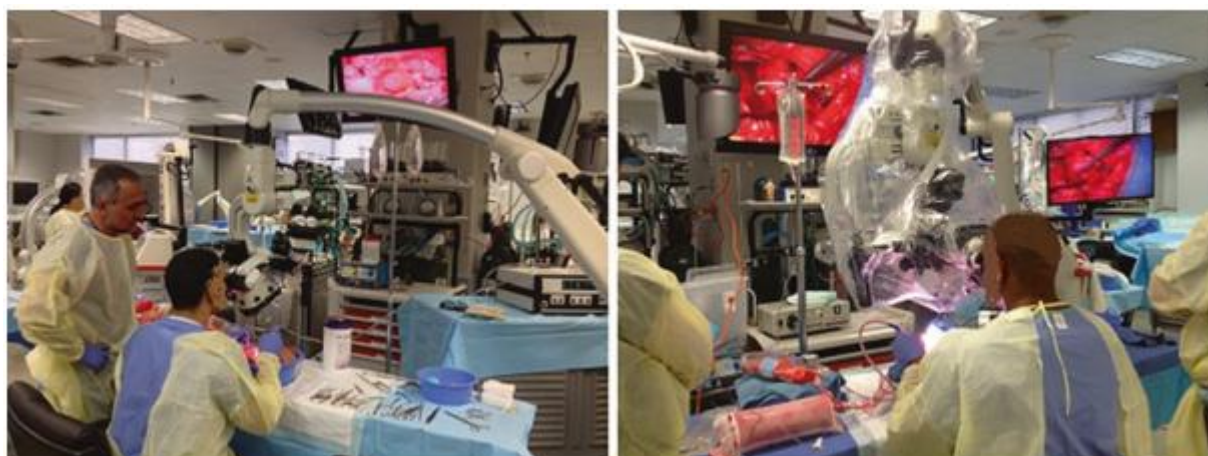


Figure 42 : Des médecins en formation s'exercent au clippage d'anévrismes et à la prise en charge des ruptures sous supervision ; le champ opératoire est visible sur les écrans suspendus.

Tableau I: Le questionnaire administré après la fin de la formation.

Question	Strongly disagree (%)	Disagree (%)	Neutral (%)	Agree (%)	Strongly agree (%)
This model was a true simulation of the conditions of live surgery on aneurysms.		1.09	2.19	28.57	68.13
This model promotes the acquisition of microsurgical skills.			6.59	21.97	71.42
This model offers benefits not available in existing training models.			6.59	21.97	71.42
The tissue characteristics in this model are very similar to those of living tissues	3.29	1.09	3.29	32.96	59.34
The scenario of aneurysm clipping and intraoperative rupture is realistic			7.69	30.76	61.53
This model could significantly improve current training in the management of intraoperative cerebrovascular complications				24.17	75.82
This model could add significantly to training in microneurosurgical techniques				26.37	73.62
This model will be a valuable addition to the medical device development and testing process	1.09	2.19	7.69	23.07	65.93
This model is superior to existing models for cerebral revascularization		1.09	4.39	27.47	67.03

- **Avenir du modèle**

Les cadavres représentent déjà un outil majeur de formation. L'ajout de conditions « vivantes » (saignement, pression, pulsations, LCR) rend ce modèle unique. Les risques biologiques peuvent être réduits par précautions universelles et sérologies. Les cadavres légèrement embaumés offrent une meilleure durabilité tout en conservant des caractéristiques proches du vivant.

La préparation du modèle est jugée réalisable : la cannulation et l'irrigation peuvent souvent être réalisées en environ 90 minutes. La création d'un anévrisme prend du temps, mais constitue aussi une partie formatrice importante (approche, dissection microchirurgicale, anastomose).

Les auteurs envisagent un cours avancé d'une semaine pour les résidents en fin de formation, où ils réaliseraient un large éventail de procédures, créeraient des anévrismes à différents sites et s'entraînaient au clippage et à la gestion des complications, comme étape de transition avant l'exercice autonome. Un système de pompe compacte a été conçu pour faciliter l'usage du modèle.

- **Conclusion**

Les pseudo-anévrismes créés sur une vascularisation humaine réelle permettent une **simulation authentique** des conditions de chirurgie des anévrismes cérébraux et de la rupture peropératoire. Le modèle de « cadavre vivant » associe une anatomie humaine réelle à des conditions proches du vivant et peut améliorer significativement la formation en chirurgie des anévrismes et, plus largement, en neurochirurgie, notamment pour des situations auxquelles les résidents sont insuffisamment exposés durant leur cursus.

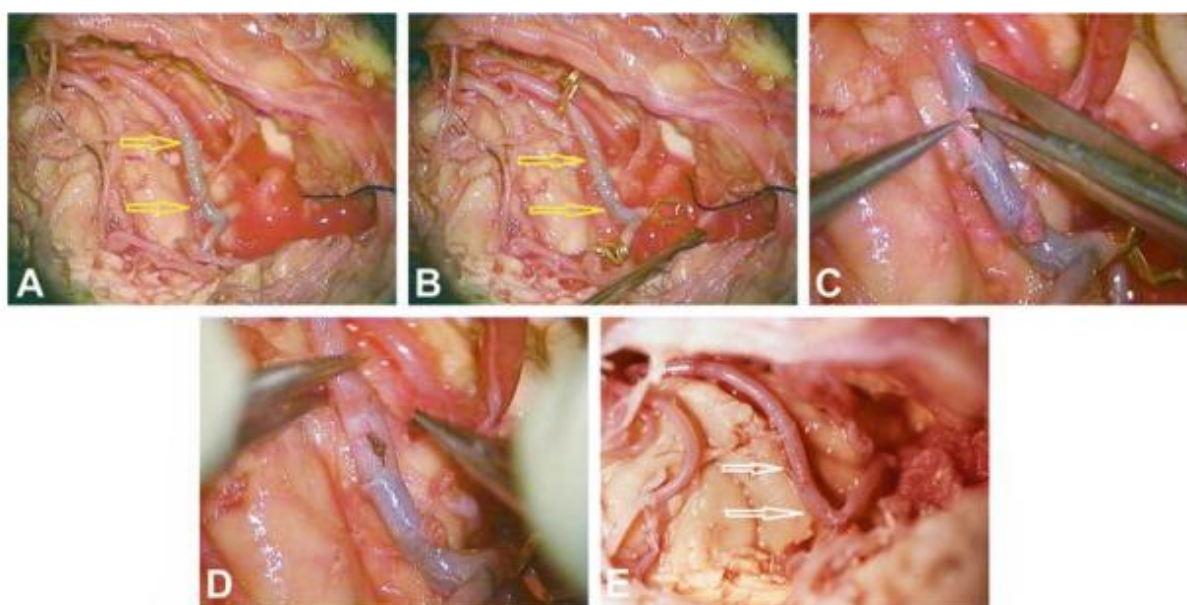


Figure 43: Thrombectomie : (a, b) thrombose obstruant un segment de la branche M2 de l'artère cérébrale moyenne (flèches jaunes), (c, d) évacuation des caillots, (e) rétablissement du flux sanguin dans ce segment de l'artère (flèches blanches)

→ Chirurgie du rachis

La chirurgie rachidienne remonterait à l'Égypte ancienne, vers 3000 av. J.-C. La neurochirurgie exige un haut niveau de compétence en raison de l'anatomie complexe du système nerveux central et périphérique et parce que des lésions irréversibles peuvent être causées facilement. En chirurgie du rachis, les images (IRM/CT) peuvent montrer une pathologie évidente, mais l'intervention reste souvent complexe et exigeante. Les patients neurochirurgicaux peuvent être dans un état critique, d'où la nécessité de chirurgiens expérimentés capables d'opérer avec précision.

Une étude (Mody et al., UTMB (95)) a interrogé des membres de l'American Academy of Neurological Surgeons sur les erreurs de "mauvais niveau" opéré : plus de la moitié déclaraient avoir commis au moins une erreur au cours de leur carrière, mais le risque annuel diminuait nettement avec l'expérience. L'arrivée de nouvelles techniques et équipements pousse les médecins à développer leurs compétences via des laboratoires de chirurgie simulée. Depuis quelques décennies, l'intérêt pour ces formations augmente, et les modèles cadavériques humains et animaux ont orienté la formation internationale en chirurgie du rachis. Grâce aux donneurs, seniors et juniors peuvent s'entraîner sur une anatomie réelle, améliorer leurs dissections et répéter des gestes cervicaux, thoraciques et lombaires en respectant la stabilité de la colonne et la protection de la moelle et des racines.

- **Pourquoi des modèles cadavériques en formation ?**

- **Rôle du rachis**

La colonne supporte le poids du haut du corps et contient la moelle épinière, voie principale des messages entre cerveau et corps. Elle comprend 24 vertèbres et le sacrum (7 cervicales, 12 thoraciques, 5 lombaires + sacrum), avec quatre courbures. Les disques intervertébraux répartissent les charges. Chaque vertèbre est unique ; la stabilité vient aussi des muscles et ligaments, permettant des mouvements en 3D. La colonne est décrite en trois colonnes (antérieure, moyenne, postérieure). Sa fonction essentielle est la posture et la protection des structures neurologiques.

➤ Apprendre sur cadavre

Comme le tissu nerveux est très sensible, la précision opératoire est indispensable. Des études montrent que certaines techniques (notamment mini-invasives) nécessitent une courbe d'apprentissage importante : par exemple, la baisse des complications et du temps opératoire survient après un certain nombre de cas. La pose de vis pédiculaires demande aussi un volume d'expérience (nombre de cas/vis) parfois difficile à atteindre pendant l'internat, d'autant que l'exposition des étudiants à la neurochirurgie peut être limitée dans certains pays. La dissection cadavérique améliore la compréhension anatomique, et une grande proportion de programmes de neurochirurgie aux États-Unis intègre la dissection sur cadavre, souvent avec instrumentation. Le CNS (Congress of Neurological Surgeons) a structuré des programmes de simulation : répéter les gestes sur modèles avant le bloc rend les résidents plus prêts lorsqu'ils opèrent des patients. L'idée générale : encourager l'entraînement cadavérique tôt pour comprendre l'anatomie et renforcer les compétences.

➤ À propos des cadavres et de leur conservation

La dissection cadavérique existe depuis l'Antiquité (Herophilus, Erasistratus), et Da Vinci a étudié finement le corps humain. Aujourd'hui, c'est un pilier de l'enseignement de l'anatomie, mais aussi un support pour perfectionner les gestes chirurgicaux. Le don du corps reste insuffisant ; des méthodes de conservation permettent néanmoins de garder les tissus dans un état acceptable assez longtemps pour organiser des cours.

Quatre méthodes principales sont citées : **fresh frozen** (congélation), **formol**, **méthode de Theil**, et **solution saline saturée**. La "fresh frozen" offre souvent un rendu proche du frais ; Theil et saline saturée donnent une bonne mobilité et souplesse ; le choix dépend des contraintes du laboratoire. Certains travaux rapportent une satisfaction élevée des stagiaires avec la méthode de Theil pour l'insertion de vis.

La formation pédiatrique sur cadavres est rare dans le monde. Au Royaume-Uni, l'âge minimal de don est 17 ans. La dissection se fait dans le respect de la personne et pour des objectifs éducatifs. Globalement, améliorer la conservation tissulaire et l'accès à la simulation peut contribuer à réduire morbidité et mortalité.

- **Mise en place d'un laboratoire de formation**

De nombreux laboratoires cadavériques permettent de travailler les techniques classiques et d'essayer de nouveaux instruments/approches. En l'absence de cadavres humains, des animaux (mouton, porc) peuvent servir : le mouton est utile surtout pour le lombaire et certaines voies transthoraciques, le porc pour des approches antérieures transabdominales. Les tissus frais sont préférés pour se rapprocher de la réalité.

Des conditions proches du bloc sont nécessaires : infrastructure, imagerie peropératoire (C-arm, guidage par imagerie), analyse des images pré/post-op, discussion de cas avec des experts pour entraîner la décision (choix de l'approche et des instruments). Les cours incluent aussi des enseignements théoriques, des discussions de cas et des controverses (y compris quand ne pas opérer). Les échanges entre orthopédistes et neurochirurgiens sont importants. Beaucoup de participants modifient leur stratégie thérapeutique après discussion avec des experts. Certains cas (révisions, tumeurs/métastases, fractures, infections, scoliose/déformations) sont difficiles à "voir" sur cadavre, mais sont discutés pour enrichir l'apprentissage.

Les laboratoires servent également à présenter et tester de nouveaux outils dans un environnement sécurisé, réduisant le risque d'erreur au bloc. Ils entraînent aussi à l'installation du patient : un mauvais positionnement peut causer des complications graves (atteinte nerveuse, perte visuelle, voire décès). Les cours améliorent l'attitude, la confiance et les compétences.

- **Partie pratique**

On ne peut pas préserver fonctionnellement moelle et nerfs pour s'entraîner avec monitoring neurophysiologique comme sur le vivant, mais des études cadavériques aident à comprendre les variations anatomiques. Les muscles, articulations et vertèbres sont généralement en bon état selon la méthode de conservation ; Theil et saline saturée offrent souvent plus de souplesse et de mobilité que le formol.

➤ **Rachis cervical (C1-C7)**

La chirurgie cervicale vise surtout la décompression médullaire et la stabilité. Elle est difficile car C1 (atlas) et C2 (axis) ont une morphologie particulière et le cou contient des structures vitales. Après chirurgie, le cou doit rester fonctionnel avec une mobilité acceptable. Les cadavres permettent de simuler la plupart des gestes cervicaux et d'enseigner les repères anatomiques, avec une attention particulière à C1-C2. Les complications cervicales peuvent être graves, donc l'excellence technique est essentielle.



Figure 44 : Les internes apprennent les repères anatomiques et la chirurgie de la colonne cervicale.

➤ **Rachis thoracique et lombaire**

Le thoracique (12 vertèbres) et le lombaire (5 vertèbres) sont souvent abordés ensemble. Le thoracique est mécaniquement stable, mais les rapports étroits (pédicules/racines) rendent la chirurgie délicate. On peut simuler compressions médullaires (tumeurs, hernies discales) et stabilisations/arthrodèses ; les scolioses et déformations sont moins souvent présentes, mais peuvent être “simulées” selon les principes. La pose de vis thoraciques a une courbe d'apprentissage : l'entraînement sur cadavres améliore nettement la précision, surtout avec l'aide de l'imagerie (fluoroscopie/CT-guidance). Certains centres proposent aussi des approches thoraciques laparoscopiques/mini-invasives.

Le lombaire est fréquemment pathologique (ex : hernie discale). Les voies d'abord (latérale, postéro-latérale, postérieure) et les gestes de décompression/stabilisation (laminotomie, laminectomie, foraminotomie, fusion, cages intersomatiques) peuvent être répétés sur cadavre, même si la stabilité mécanique "réelle" ne peut pas être testée comme chez un patient vivant.



Figure 45 : Fusion vertébrale thoracique et lombaire. Exercices pratiques des résidents et internes. Sous supervision, les vis thoraciques et lombaires sont mises en place sous contrôle fluoroscopique.

- **Chirurgie mini-invasive, recherche et innovation**

Avec l'essor de l'endoscopie et de la robotique, la formation aux techniques mini-invasives devient nécessaire. Les patients préfèrent des incisions plus petites (moins de douleur, meilleure récupération). Des revues suggèrent des avantages en termes de saignement et récupération. Mais les compétences se gagnent surtout par la pratique : la courbe d'apprentissage est nette. Les cours cadavériques permettent de s'entraîner en sécurité avec un encadrement expert.

Les cadavres servent aussi à la recherche : études anatomiques (variations selon sexe/populations), test de nouvelles techniques avant application clinique, comparaison de méthodes de guidage pour les vis, utilisation de l'échographie pour des gestes (ponction lombaire), et études biomécaniques sur implants et montages (stabilité, contraintes, etc.). Beaucoup d'études restent limitées par un faible nombre de cadavres, justifiant des travaux supplémentaires.

- **Conclusion**

La formation et la recherche en chirurgie du rachis sur cadavre sont devenues essentielles, quel que soit le niveau d'expérience. Malgré des limites, les preuves soutiennent un impact positif sur la performance. Éthiquement, il est préférable d'améliorer sa qualification avant d'opérer des patients. Comme les techniques et équipements évoluent rapidement, les chirurgiens doivent suivre ces changements ; d'où la multiplication de cours cadavériques organisés par de grandes sociétés et des centres universitaires. Le but final : mieux choisir les indications, améliorer la technique, renforcer la confiance et réduire les erreurs.

→ Chirurgie de la moelle

- Introduction

La lombalgie, avec ou sans radiculopathie, toucherait environ **70 %** des adultes au cours de leur vie dans les pays développés et constitue un problème de santé majeur à l'échelle mondiale. La lombalgie peut entraîner des limitations fonctionnelles et, par conséquent, un handicap, ce qui génère une charge médicale et économique importante pour les individus et la société. Aux États-Unis, plus de **100 milliards de dollars** sont consacrés chaque année au traitement des patients souffrant de douleur neuropathique chronique. Les médicaments et la chirurgie correctrice ont montré une certaine efficacité dans la prise en charge de la douleur chronique. Cependant, l'efficacité thérapeutique n'est pas toujours obtenue avec ces traitements, qui peuvent par ailleurs entraîner des effets indésirables graves. Il existe donc un besoin évident pour le neurochirurgien d'apprendre des techniques chirurgicales alternatives pour traiter la douleur chronique et réduire le handicap associé.

- Stimulation médullaire

La stimulation médullaire (spinal cord stimulation, SCS) s'est imposée comme un traitement reconnu de la douleur neuropathique chronique. Les avantages de la SCS incluent son efficacité, sa réversibilité, son caractère minimalement invasif et un faible taux de complications, ce qui la rend plus populaire qu'auparavant dans la prise en charge de la douleur. Grâce aux améliorations des électrodes (leads) et des batteries des systèmes de SCS, elle est devenue l'intervention chirurgicale la plus couramment utilisée pour la douleur chronique. Environ 14 000 patients dans le monde subissent une implantation de SCS chaque année. Plus de 60 000 systèmes de SCS ont été implantés aux États-Unis au cours des 15 dernières années, avec de très bons résultats pour un grand nombre de patients. Récemment, deux innovations technologiques, les paddles percutanés et les dispositifs de SCS sans fil, ont été développées, ce qui devrait accroître l'intérêt neurochirurgical pour l'insertion percutanée des électrodes. Malgré les progrès technologiques et le grand nombre d'interventions réalisées, 30 % des patients implantés n'obtiennent pas un soulagement durable à long terme lors du suivi. De nombreux facteurs influencent les taux de

succès de la SCS, notamment l'expérience du médecin, la technique chirurgicale, la sélection des patients et les soins de suivi postopératoire. Il a été montré que l'expérience et les compétences techniques des chirurgiens ont un impact positif sur la morbidité et la mortalité. Toutefois, la SCS ne fait pas partie du cursus standard de formation en neurochirurgie, et l'apprentissage de l'implantation d'un système de SCS n'est pas obligatoire. Comme l'implantation et la prise en charge des systèmes de SCS reposent sur un travail multidisciplinaire, tous les médecins concernés devraient connaître la sélection des patients, l'implantation et le suivi. Afin d'en faciliter l'application, des recommandations et exigences de formation relatives aux dispositifs de SCS ont été publiées par la North American Neuromodulation Society (NANS) à destination des neurochirurgiens, chirurgiens orthopédistes, anesthésiologistes, médecins de réadaptation, neurologues et autres.

La chirurgie neurologique nécessite des années de formation pour acquérir les connaissances et les compétences techniques indispensables à des soins de qualité, sûrs et efficaces. L'apprentissage par observation et pratique au bloc opératoire (OR) a longtemps constitué l'essentiel de la formation chirurgicale, mais il se heurte à de nombreuses difficultés : sécurité du patient, limitations des horaires de travail, et coût du temps passé au bloc. Par ailleurs, les chirurgiens doivent s'entraîner pour améliorer leurs compétences et maintenir leur niveau de maîtrise. La SCS est une procédure neurochirurgicale relativement simple ; néanmoins, elle exige une formation afin de maximiser le bénéfice thérapeutique tout en minimisant les risques chirurgicaux pour les patients. De plus, le niveau élevé de fonctionnement de certains patients souffrant de douleur neuropathique chronique, ainsi que le faible nombre de chirurgiens réalisant la SCS, limitent les possibilités de formation pratique au bloc. Ainsi, améliorer l'enseignement et la formation à la SCS est très important, à la fois pour la sécurité du chirurgien et celle du patient. Heureusement, la technologie de simulation offre des possibilités d'enseignement et permet aux chirurgiens de s'exercer en dehors du bloc opératoire. Elle peut fournir une formation appropriée pour acquérir des compétences, des techniques et des connaissances avant de pratiquer sur de vrais patients.

- **Formation par simulation**

La simulation permet aux chirurgiens d'utiliser des modèles pour s'exercer à des procédures chirurgicales dans un cadre contrôlé. Elle joue un rôle important en apportant une éducation et une formation adaptées, permettant aux neurochirurgiens d'acquérir des compétences techniques et des connaissances sans compromettre la qualité des soins ni la sécurité des patients. Il est clair que l'endroit idéal pour l'acquisition initiale et le perfectionnement des compétences chirurgicales, y compris la Spinal Cord Stimulation (SCS), n'est pas le bloc opératoire. De plus, il est nécessaire que les neurochirurgiens apprennent des compétences techniques pour offrir des soins sûrs. La formation basée sur la simulation permet de reproduire les techniques de SCS dans un environnement protégé, non seulement pour les internes et fellows, mais aussi pour les praticiens déjà en exercice.

La simulation est actuellement utilisée de différentes manières dans l'enseignement : réalité virtuelle (simulateurs informatiques), modèles physiques (modèles cadavériques et synthétiques) et simulateurs de réalité mixte, avec un focus sur les compétences techniques et non techniques ainsi que les connaissances. Les bénéfices de la simulation ont été démontrés en formation neurochirurgicale : elle offre aux chirurgiens des occasions d'affiner leurs techniques et d'améliorer la sécurité et l'efficacité des procédures avant la pratique clinique réelle.

Les techniques chirurgicales travaillées dans la simulation de la SCS incluent : [1] l'identification des repères anatomiques, [2] l'utilisation de la fluoroscopie pour la mise en place des électrodes de SCS, et [3] l'implantation du générateur. La simulation serait une stratégie d'apprentissage efficace pour la procédure de SCS. Point important : les chirurgiens peuvent revenir à l'entraînement par simulation autant de fois que nécessaire jusqu'à se sentir à l'aise pour réaliser la procédure. La simulation de la SCS peut aider à placer les électrodes efficacement, réduisant ainsi les complications postopératoires.

Dans notre pratique, nous utilisons des électrodes percutanées permanentes et la technique dite de « **tunnel trial** » pour l'implantation d'un système de SCS. Cela se fait habituellement dans un bloc opératoire standard. Cette technique permet d'éviter que le patient subisse une insertion d'électrode deux fois. Son principal avantage est que la même électrode utilisée pendant l'essai servira aussi d'électrode permanente. De plus, l'insertion devient plus facile après exposition du fascia profond, ce qui rend l'accès à l'espace épidural moins compliqué et plus prévisible. Dans ce chapitre, nous décrivons pas à pas la simulation de la SCS pour le traitement de la douleur chronique, ce qui pourrait offrir aux chirurgiens et spécialistes de la douleur un environnement d'apprentissage sans risque afin d'améliorer leurs performances. Les chirurgiens peuvent être formés à l'aide de modèles physiques pour la technique de SCS. Les détails sont décrits ci-dessous.

- **Douleur chronique : indications et sélection des patients**

La SCS est principalement utilisée pour traiter les douleurs neuropathiques, telles que le **failed back surgery syndrome (FBSS)**, le **syndrome douloureux régional complexe** (type I : dystrophie sympathique réflexe ; type II : causalgie), la neuropathie périphérique, l'arachnoïdite spinale, la radiculite lombaire et les douleurs ischémiques sévères liées aux maladies périvasculaires. Le FBSS est l'indication la plus fréquente de la SCS. Chez les patients présentant une douleur neuropathique, une IRM et/ou un scanner sont nécessaires pour exclure des pathologies pouvant être traitées chirurgicalement.

Dans l'utilisation de la SCS, une sélection appropriée des patients est un déterminant majeur du succès. Les patients sont sélectionnés en fonction d'un diagnostic correct, de l'échec des traitements conservateurs, d'une évaluation psychologique, d'une évaluation médicale, des attentes du patient et d'un essai de SCS démontrant un soulagement de la douleur. Comprendre les facteurs qui prédisent un bon résultat est essentiel pour bien informer et conseiller les patients.

- **Techniques chirurgicales de la procédure de SCS**

La NANS propose des cours de formation cadavérique aux procédures de SCS lors de réunions annuelles.

Il existe des laboratoires médicaux chez **Medtronic**, **St. Jude** et **Boston Scientific**, qui offrent un environnement réaliste permettant au chirurgien de simuler des procédures de SCS sous la supervision de leurs experts. Nous avons utilisé la technique de « tunnel trial », qui consiste à insérer dès le départ une ou plusieurs électrodes percutanées permanentes. Cette technique comprend deux étapes : **étape 1** (implantation des électrodes) et **étape 2** (internalisation des électrodes et implantation du générateur).

➤ **Étape I : implantation des électrodes**

L'implantation des électrodes est réalisée sous sédation/analgésie surveillée. Le patient est placé en position ventrale. Une vue de face (AP) de la colonne lombaire est obtenue avec l'arceau (C-arm) pour déterminer le site d'incision. Après injection d'un anesthésique local, une incision droite de 2 cm est réalisée, et une loge est créée sous la peau et au-dessus du fascia par dissection des tissus mous.

D'abord, une aiguille de **Tuohy 18G** est introduite dans l'espace épidural, généralement au niveau **L2-L3**, sous contrôle fluoroscopique, en utilisant la technique de perte de résistance. Ensuite, un guide métallique est introduit à travers l'aiguille et retiré après confirmation. La première électrode percutanée est insérée via l'aiguille dans l'espace épidural puis avancée jusqu'au niveau cible (par exemple **T8-T9**) sous fluoroscopie en temps réel. De la même façon, une seconde électrode percutanée est mise en place à travers l'aiguille et avancée parallèlement à la première jusqu'au niveau souhaité.

Après positionnement côte à côte des électrodes dans l'espace épidural postérieur, l'essai de stimulation peropératoire commence. La sédation du patient est interrompue avant le début des tests peropératoires. Les électrodes sont connectées à des rallonges temporaires et au dispositif de test). En demandant au patient de décrire ses sensations, différentes configurations et paramètres sont testés jusqu'à obtenir une bonne couverture des zones douloureuses. Un repositionnement des électrodes peut être nécessaire pour ajuster la distribution des paresthésies. Une fois l'essai peropératoire terminé, la position des électrodes est enregistrée avec l'arceau fluoroscopique. Les aiguilles sont retirées et les électrodes sont ancrées au fascia.

Deux câbles d'extension temporaires sont tunnelisés en sous-cutané du côté opposé à l'emplacement prévu du générateur et extériorisés à la peau à 10 cm de l'incision médiane initiale. Les câbles d'extension sont connectés aux électrodes de SCS. L'excédent des électrodes est enroulé au-dessus du fascia mais sous la connexion avec les câbles temporaires afin de protéger les électrodes lors de l'internalisation. La fermeture se fait plan par plan : Vicryl 2-0 pour le sous-cutané et nylon 3-0 pour la peau. Une suture nylon fixe les câbles d'extension temporaires à la peau pour éviter leur déplacement et réduire le risque infectieux. Les câbles d'extension sont connectés au câble de test et l'impédance de tous les contacts est vérifiée et confirmée dans les limites normales.

Le patient teste ensuite le dispositif pendant environ **7 jours** afin de vérifier que les paresthésies sont perçues au bon endroit et que le soulagement est suffisant. Si l'essai est concluant, on procède à l'internalisation des électrodes et à l'implantation du générateur (IPG). En revanche, si l'essai échoue, les électrodes/ancres/rallonges doivent être retirées au bloc.

➤ **Étape II : internalisation des électrodes et implantation du générateur de SCS**

Cette procédure est réalisée sous anesthésie générale. Si le patient n'est pas conducteur, le générateur est généralement implanté du côté droit de l'abdomen afin d'éviter la zone de la ceinture de sécurité. Dans ce cas, le patient est intubé et placé en décubitus latéral, côté droit vers le haut. Cela permet l'accès à la fois aux régions lombaire et abdominale antérieure. Après préparation, champs et anesthésie locale, la cicatrice lombaire est réouverte prudemment, puis les électrodes et les câbles d'extension sont identifiés. Les câbles d'extension sont coupés et retirés. Les électrodes sont inspectées (intégrité) et leur longueur est vérifiée afin de déterminer le site d'incision abdominale permettant d'accueillir le générateur. Dans certains cas, des rallonges peuvent être nécessaires.

Une seconde incision est réalisée sur le côté droit de l'abdomen, entre la 12^e côte et la crête iliaque. La loge du générateur est créée dans le plan sous-cutané au-dessus du fascia, avec une épaisseur de tissu au-dessus du générateur inférieure à 2,0 cm. Les électrodes sont passées

à l'aide d'un passeur spécifique entre les incisions lombaire et abdominale, connectées au générateur et fixées avec des vis de serrage (set screws). Le générateur est ensuite placé dans la loge et fixé au fascia sous-jacent avec des sutures non résorbables. Enfin, le dispositif de SCS est interrogé afin de confirmer que l'impédance de tous les contacts est dans les limites normales. Les incisions sont ensuite fermées. La préférence est de placer le générateur dans la paroi abdominale, car cela facilite la recharge et la programmation, et diminue l'inconfort en position assise ou allongée. De plus, une implantation abdominale pourrait réduire les contraintes exercées sur les électrodes et les rallonges, diminuant ainsi le risque de migration ou de fracture.

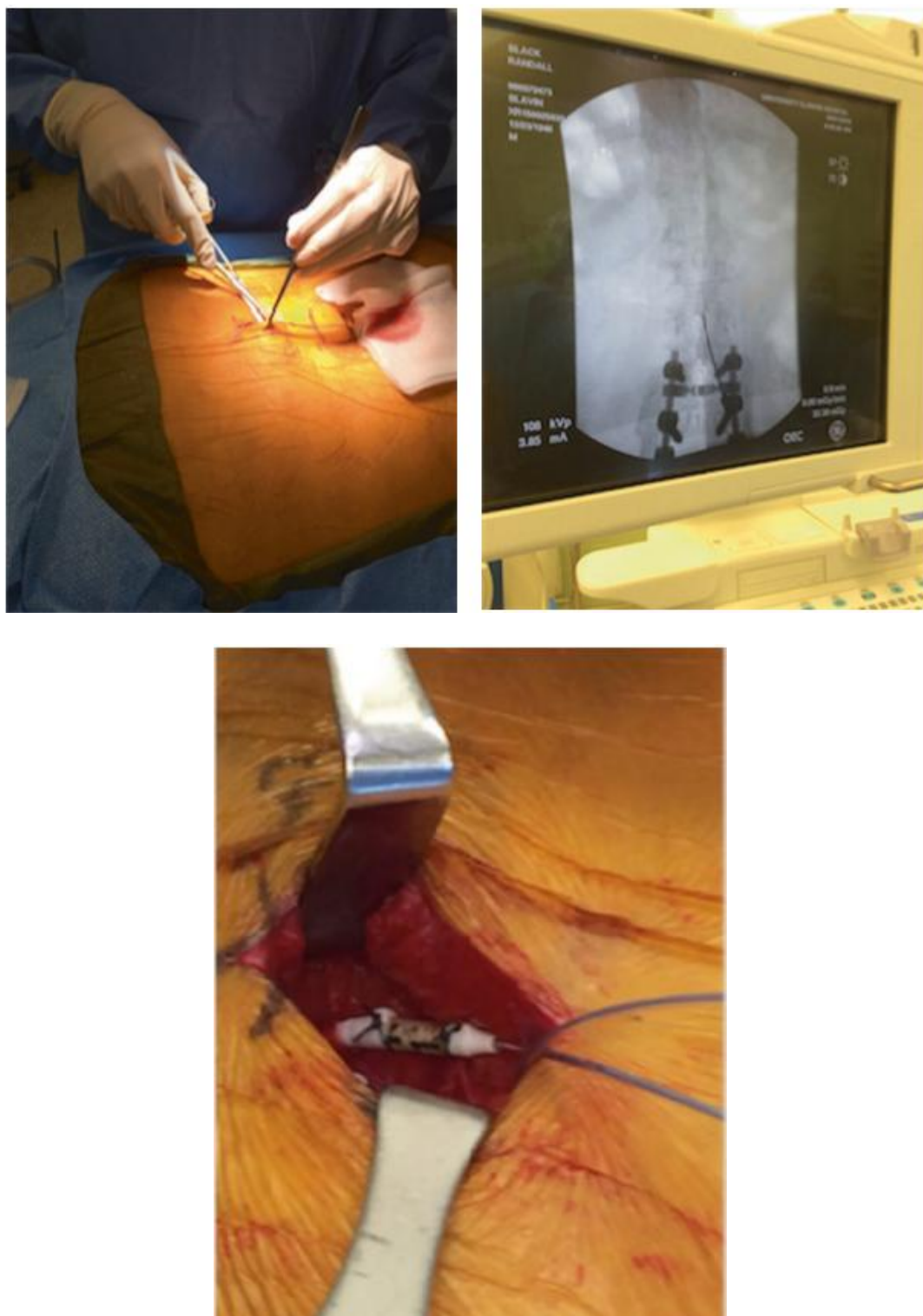


Figure 46 : Procédure d'implantation des électrodes et du générateur de SCS.

a.3. Réalité virtuelle

→ **Haptics**

L'haptique désigne l'étude et les technologies liées au sens du toucher. Elle permet à l'utilisateur de « toucher » et de ressentir des objets virtuels simulés dans un environnement numérique. De la même manière que l'image est liée à la vision et le son à l'audition, l'haptique est liée au toucher : les dispositifs haptiques permettent ainsi de « sentir » des objets générés par ordinateur grâce à un retour tactile et/ou un retour de force.

L'haptique est un domaine interdisciplinaire qui combine l'informatique, la conception mécanique, la physique et la perception humaine. Le terme est apparu au début du XX^e siècle dans le champ de la psychophysique. La recherche s'est ensuite orientée vers la télérobotique dans les années 1970–1980, puis le début des années 1990 a vu l'apparition du premier dispositif haptique commercialisé, le SensAble PHANToM. Au cours des vingt dernières années, l'haptique est devenue un champ de recherche et de développement très actif à l'échelle mondiale.

Contrairement à l'infographie classique, qui correspond surtout à une interaction à sens unique (l'utilisateur envoie une commande et reçoit principalement un retour visuel), l'haptique repose sur une interaction symétrique et bidirectionnelle. L'utilisateur contrôle le système, mais reçoit aussi un retour physique de la part du dispositif. Parmi les exemples de systèmes bidirectionnels, on peut citer les télémanipulateurs robotiques, les exosquelettes, les appareils de rééducation et d'exercice, les dispositifs d'assistance intelligents, les prothèses avancées et la télérobotique « en champ proche ».

Cette spécificité bidirectionnelle peut être décrite comme une interaction à « double boucle » : une boucle de contrôle se déroule du côté de la machine (au niveau du dispositif haptique), et une autre boucle se déroule du côté de l'humain (au niveau du système sensorimoteur). C'est cette double boucle qui distingue l'haptique d'une interaction informatique basée uniquement sur le visuel.

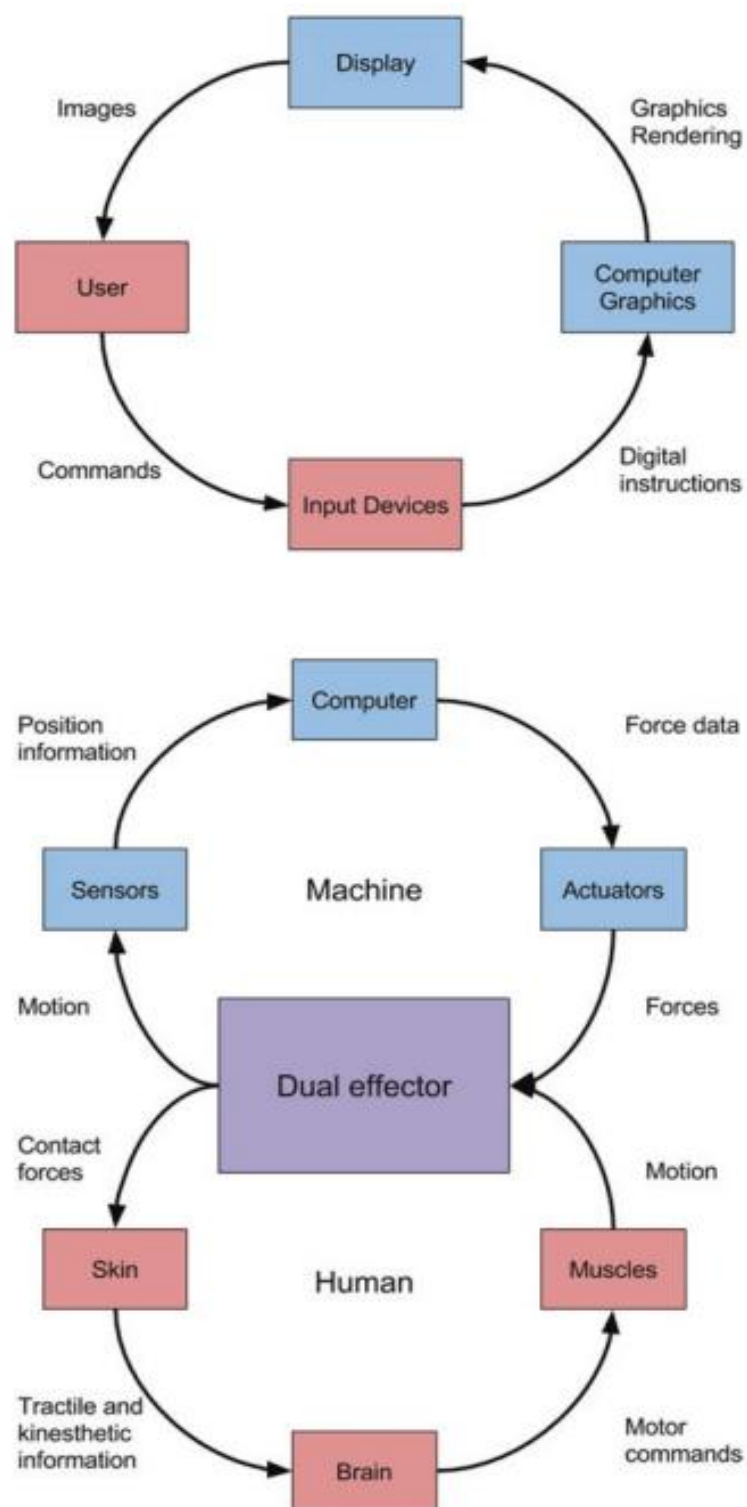


Figure 47 : Interaction à double cycle

- **Evaluation des compétences techniques en VR**

Place de la RV dans l'évaluation des compétences après une simulation en neurochirurgie

Depuis une dizaine d'années, la réalité virtuelle prend une place grandissante dans la formation médicale, surtout en chirurgie. En chirurgie générale, on a par exemple montré que l'entraînement sur simulateur pour la cholécystectomie laparoscopique aide les apprenants à commettre moins d'erreurs importantes et à terminer l'intervention plus vite.

En neurochirurgie, l'essor des simulateurs de RV répond à plusieurs objectifs complémentaires. D'abord, ces outils offrent un cadre d'entraînement sécurisé : on peut y répéter des gestes techniques sans exposer un patient au risque. Cet aspect devient encore plus important avec l'évolution des attentes sociétales autour de la transparence des résultats chirurgicaux et du rôle des résidents au bloc. L'idée directrice est donc d'aider les internes à développer des compétences opératoires sur des modèles proches du réel, dans un environnement où l'erreur ne met personne en danger, avec l'espoir final d'améliorer les résultats cliniques.

Plusieurs systèmes ont été créés dans cette logique (Surgical Theater®, NeuroTouch®, Symbionix® ANGIO Mentor™, ImmersiveTouch®...). En parallèle, le Congress of Neurological Surgeons (CNS) a structuré cette dynamique : un comité dédié à la simulation a été fondé en 2010, et a proposé un curriculum basé sur simulateur, couvrant des volets vasculaires, crâniens et rachidiens. L'objectif est double : proposer des simulateurs (virtuels et physiques) utiles à l'apprentissage, et mettre en place des méthodes standardisées pour évaluer la progression et comparer les performances des participants.

- **Procédures concernées**

Les simulateurs de RV couvrent un large spectre de procédures neurochirurgicales, de la plus simple à la plus complexe, et plusieurs programmes d'enseignement structurés ont été évalués chez des résidents.

Pour le rachis, des cours courts mais organisés ont été décrits : un entraînement d'environ 90 minutes sur l'ACDF (avec tests avant/après, cours théoriques et atelier pratique) montre une progression mesurable. Un autre programme de deux heures sur la décompression cervicale postérieure (laminectomie, foraminotomie) améliore aussi les scores théoriques et techniques après la session. Le comité du CNS a également conçu des modèles ciblant des situations « à risque » mais fréquentes, comme la réparation d'une durotomie et d'une fuite de LCR, au niveau lombaire et cervical.

Côté endovasculaire, l'intérêt est similaire. Des cours sur simulateur consacrés à l'angiographie cérébrale diagnostique ont montré une amélioration des résultats à l'écrit et en pratique. D'autres études, y compris des essais pilotes, constatent une diminution du temps de procédure et du temps de fluoroscopie après plusieurs répétitions. Pour des gestes comme la réparation endovasculaire d'anévrismes ou le stenting carotidien, l'entraînement sur simulateur semble aussi améliorer des éléments concrets : rapidité, choix de la taille des dispositifs, nombre de complications, ou encore la réussite de certaines étapes techniques (cannulation, déploiement de protections emboliques). Certaines analyses longitudinales sur plusieurs semaines montrent une progression globale mesurée par des indicateurs quantifiables (durée, fluoroscopie, dose de contraste, nombre de coils, passages de dispositifs de thrombectomie, etc.).

Pour la neurochirurgie crânienne, la simulation s'étend de gestes « fondamentaux » (ventriculostomie) à des procédures complexes (clipping d'anévrisme, résection tumorale). Des modules du CNS ont évalué des scénarios de traumatologie (ventriculostomie, craniotomie) et montrent des gains sur la précision du geste et le temps d'exécution. D'autres systèmes, comme ImmersiveTouch® ou des simulateurs de réalité mixte, semblent améliorer la réussite au premier passage et la précision de placement des cathéters. On retrouve également des simulateurs dédiés à la voie endonasale transsphénoïdale et à la résection tumorale, notamment sur NeuroTouch®, avec des améliorations de performance rapportées.

- **Outils de mesure de la progression**

Les partisans de la RV avancent qu'elle renforce à la fois la dimension cognitive (planification, compréhension anatomique, stratégie) et la dimension technique (gestes, coordination, contrôle). L'immersion est plus crédible qu'avant, car ces plateformes intègrent désormais des retours haptiques : la machine « simule » la force à appliquer, la résistance d'un tissu, ou le comportement d'un instrument. Certaines technologies, comme Surgical Theater®, offrent en plus des visualisations avancées : coupes, sélection de tissus, reconstruction de l'anatomie, parfois à partir de données de patients, ce qui peut aider à comprendre les rapports entre structures et à concevoir une voie d'abord.

Un avantage majeur de la RV est la mesure objective et le suivi longitudinal : on peut quantifier les performances au fil du temps. Les curricula peuvent aussi être construits par niveaux, avec des tâches progressives et l'introduction graduelle de complications. Sur NeuroTouch®, par exemple, des métriques informatisées ont été définies et organisées par « niveaux » :

- Un premier niveau centré sur la sécurité et la qualité (volume réséqué, perte sanguine)
- Un second niveau davantage moteur (temps, trajectoires, fréquence d'activation, forces appliquées)
- Puis des métriques plus avancées combinant coordination bimanuelle, efficacité et indices de contrôle fin

Ces indicateurs ont même été utilisés pour distinguer novices et experts et proposer des objectifs chiffrés pour les résidents.

Plusieurs études vont dans le même sens : les simulateurs arrivent à discriminer des niveaux d'expérience. Par exemple, pour une rhizotomie trigéminal percutanée simulée, les résidents plus avancés se rapprochent davantage du point d'entrée idéal, atteignent mieux la cible et obtiennent de meilleurs scores. Pour la résection tumorale simulée, des tâches avec des lésions variées permettent aussi de distinguer clairement les experts des débutants. En stenting carotidien simulé, des paramètres comme le temps de fluoroscopie ou certaines erreurs de déploiement différencient également les opérateurs.

- **Limites et obstacles**

Malgré ses atouts, la RV ne remplace pas le bloc opératoire réel. Le réalisme s'améliore, mais reste imparfait. Les environnements ne sont pas toujours pleinement tridimensionnels, même si des technologies holographiques (type HoloLens) pourraient réduire cet écart. Autre limite importante : la plupart des simulateurs ne sont pas encore réellement « patient-spécifiques », ce qui réduit l'intérêt pour une répétition préopératoire personnalisée, même si certaines versions récentes cherchent à intégrer davantage de détails issus de l'imagerie du patient.

Sur le plan scientifique, la littérature reste limitée : beaucoup d'études sont petites et potentiellement influencées par des biais de publication. Il faut donc des validations à plus grande échelle.

Le coût est un autre enjeu. Peu d'articles détaillent la faisabilité économique. Un exemple cité décrit un programme complet (cadavres, simulateurs physiques, plateformes informatiques) avec un coût initial élevé et un coût annuel ensuite, partiellement allégé par des partenariats industriels. Mais ces chiffres varient selon les ressources locales et la nature exacte du curriculum (tout numérique ou non).

- **Perspectives**

Même si la simulation n'est pas uniformément intégrée dans tous les internats de neurochirurgie, on peut imaginer, à terme, des scénarios RV utilisés jusque dans des évaluations certifiantes. Les études se multiplient pour confirmer la validité des simulateurs, et l'évolution rapide des capacités d'imagerie, de calcul et des logiciels laisse penser que la RV prendra une place croissante — notamment si la personnalisation à partir de données de patients devient plus courante. Pour l'instant, ces outils servent surtout à apprendre et consolider les gestes de base ; à l'avenir, avec plus de soutien institutionnel et des innovations techniques, ils pourraient devenir plus accessibles et plus efficaces comme compléments structurants de la formation neurochirurgicale.

→ Patient-specific simulation en VR

• Introduction

La neurochirurgie se déroule dans un environnement tridimensionnel d'une complexité extrême, où chaque millimètre compte. Le chirurgien doit atteindre une cible intracrânienne en empruntant un trajet qui soit non seulement techniquement accessible, mais surtout sûr, c'est-à-dire respectueux des structures neurologiques et vasculaires. Dans ce contexte, la planification préopératoire apparaît comme une condition essentielle à la réussite de l'intervention. Elle ne se limite pas à « préparer une opération » au sens administratif du terme : elle constitue une étape structurante au cours de laquelle le neurochirurgien analyse la pathoanatomie propre au patient, anticipe les contraintes opératoires et choisit une stratégie visant à réduire l'invasivité.

L'objectif d'une planification adéquate est d'orienter le geste vers une approche réellement optimale, entendue comme celle qui minimise la dissection exploratoire, limite la rétraction cérébrale, et évite l'exposition inutile de structures neuronales non concernées par la mission chirurgicale. Cette « minimalité » ne signifie pas faire petit à tout prix, mais faire strictement ce qui est nécessaire en conservant des conditions de sécurité maximales.

➤ **Fondements de la planification : la nécessité d'un modèle mental tridimensionnel**

Dans la pratique clinique, le neurochirurgien s'appuie sur plusieurs modalités d'imagerie : IRM (et ses sous-techniques telles que l'angiographie IRM ou la DTI), scanner (CT) et angiographie. Chaque modalité apporte une information complémentaire. L'IRM offre une excellente lecture des tissus mous mais reste moins précise pour l'os ; le CT visualise finement l'architecture osseuse et, après injection de contraste, les vaisseaux, mais fournit moins de détails sur les tissus mous. Aucune modalité, prise isolément, n'est donc suffisante pour appréhender la globalité du problème chirurgical.

La planification complète suppose ainsi la synthèse de ces informations en une représentation tridimensionnelle cohérente. Or, construire un modèle mental 3D à partir d'images 2D hétérogènes est une tâche cognitivement coûteuse. Elle est compliquée par des variations de

paramètres d'acquisition (épaisseur de coupe, échelle, orientation du patient), obligeant le chirurgien à intégrer des données non uniformes et parfois difficiles à superposer. Cette phase d'intégration constitue un point critique : si la compréhension spatiale est incomplète ou erronée, le risque peropératoire augmente, notamment sous la forme de surprises anatomiques ou de corridors plus étroits que prévu.

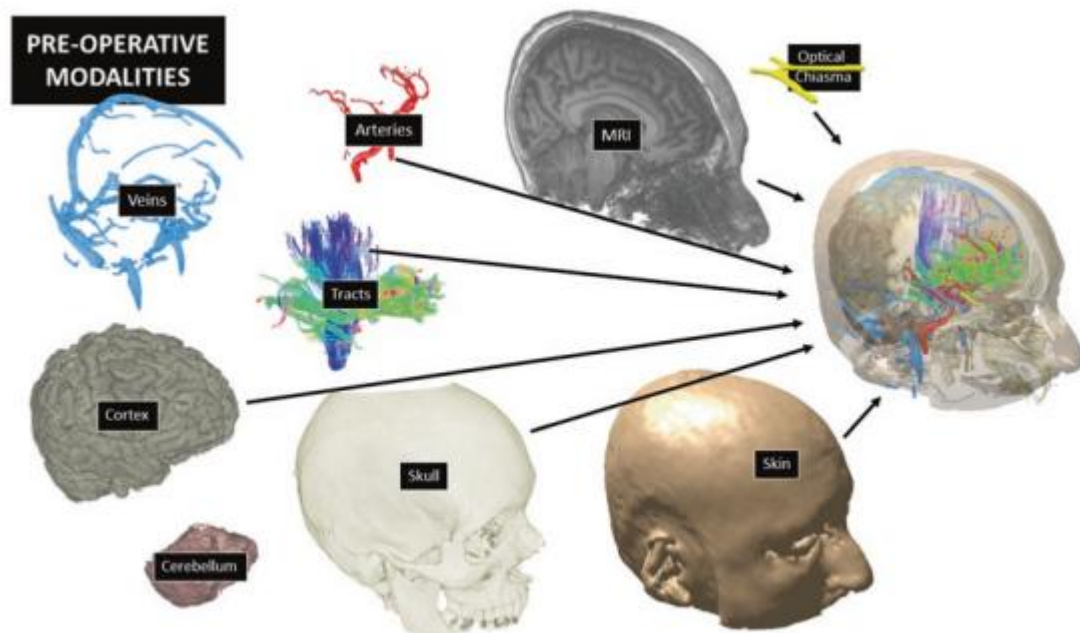


Figure 48 : Plusieurs modalités d'imagerie sont nécessaires pour obtenir un tableau complet de l'état d'un patient.

➤ **Apport et limites des outils informatiques de planification 3D**

Depuis les années 1980, l'évolution du rendu graphique a permis l'émergence d'outils de reconstruction 3D. Les premières générations, souvent limitées au CT et à des visualisations statiques, ont néanmoins amélioré la perception spatiale du chirurgien. Aujourd'hui, la reconstruction 3D à partir de séquences CT/CTA/MRA est couramment utilisée, notamment en chirurgie craniofaciale et en neurochirurgie vasculaire.

Cependant, un problème persiste : la qualité d'une planification 3D ne dépend pas uniquement de l'existence d'une reconstruction, mais surtout de la manière dont cette reconstruction peut être explorée et manipulée. Dans de nombreux systèmes, l'utilisateur interagit avec la 3D par des moyens fondamentalement bidimensionnels (souris, clavier, curseur sur écran). Cette discordance ergonomique peut rendre laborieuses des opérations pourtant essentielles : simuler une craniotomie, « enlever » de l'os virtuellement, isoler des structures, reproduire un champ opératoire ou un angle microscope. Autrement dit, la 3D est présente, mais l'outil de manipulation reste 2D, créant un décalage entre l'intention chirurgicale et l'exécution du geste virtuel.

Dans une perspective de sécurité, un système de planification doit donc offrir des vues 3D facilement accessibles sous tout angle, permettre d'ajouter ou de retirer des structures de la visualisation, et autoriser des manipulations rapides visant à révéler les relations anatomiques profondes (vaisseaux derrière un parenchyme, nerfs au contact d'une lésion, rapports osseux limitant un corridor). L'intérêt est de transformer l'image en support actif de décision, plutôt qu'en simple « illustration ».

➤ De la visualisation à la simulation : mesurer, annoter, tester des scénarios

La planification opératoire ne se réduit pas à « voir » la lésion : elle consiste à vérifier la faisabilité technique d'un trajet et à anticiper les contraintes. Dans cette logique, les outils de simulation deviennent centraux. Le chirurgien a besoin de mesurer des distances pertinentes (peau-os, os-cible, dimensions intra-lésionnelles), d'identifier et d'annoter des repères anatomiques utiles peropératoirement, et de maintenir une orientation stable malgré les changements de point de vue induits par la position de la tête ou du microscope.

Un élément majeur est la craniotomie. Le choix de son emplacement, de sa taille et de son étendue conditionne l'ensemble du déroulement chirurgical : une fois l'ouverture osseuse réalisée, elle impose des angles d'attaque, des possibilités de maniement instrumental et une liberté de dissection plus ou moins grande. Une planification efficace doit donc permettre de tester

virtuellement plusieurs craniotomies, d'apprécier si l'accès est dégagé, puis d'ajuster position et dimension jusqu'à obtenir un compromis optimal entre exposition suffisante et agressivité minimale.

➤ **Deux orientations technologiques : simulateurs de gestes et outils d'aide à la décision**

Ils existent deux grandes familles de systèmes en réalité virtuelle ou apparentés :

1. **Les simulateurs orientés "compétences"** : leur objectif est l'entraînement technique (drilling, dissection, hémostase, etc.) dans un environnement réaliste. Ils offrent parfois un retour haptique (force), mais reposent fréquemment sur des modèles génériques, car convertir automatiquement des DICOM patient-specific en modèles biomécaniques capables de simuler la déformation tissulaire reste difficile.
2. **Les outils orientés "décision"** : ils fournissent une représentation 3D précise et spécifique au patient pour planifier une intervention, mais restent souvent « rigides » (peu ou pas de simulation de la mécanique des tissus). Ils sont adaptés à l'analyse anatomique et à la trajectoire, davantage qu'à l'apprentissage gestuel pur.

Cette séparation est largement dictée par les limites actuelles de modélisation. L'idéal théorique serait un système combinant réalisme biomécanique et personnalisation patient-spécifique ; néanmoins, en pratique, les systèmes existants se situent généralement dans l'un des deux pôles.

➤ **Le Dextroscope : une réalité virtuelle « pragmatique » centrée sur la planification**

Le Dextroscope est présenté comme une réponse spécifiquement pensée pour la planification neurochirurgicale. Son ambition principale est de transformer des données multimodales (IRM, MRA, CT, DTI...) en un patient virtuel unique, manipulable en 3D. L'originalité du dispositif repose sur une conception pragmatique de la VR : plutôt que d'immerger totalement l'utilisateur (casque et isolation), le système « immerge » essentiellement les mains du chirurgien dans les données, ce qui correspond mieux à l'activité réelle de planification, centrée sur la manipulation et l'exploration.

D'un point de vue ergonomique, le Dextroscope crée une interaction stéréoscopique via un écran et un miroir, donnant l'impression que l'objet 3D flotte dans l'espace de travail. L'utilisateur, assis, dispose d'un support d'avant-bras favorisant la précision et la stabilité. Une main contrôle la pose globale du modèle (déplacement/rotation), tandis que l'autre utilise un stylet pour sélectionner des outils et effectuer des opérations détaillées. Le choix de lunettes stéréoscopiques (plutôt qu'un casque lourd) facilite la collaboration et l'utilisation prolongée, ce qui répond aux exigences d'un environnement clinique où les échanges entre experts restent essentiels.

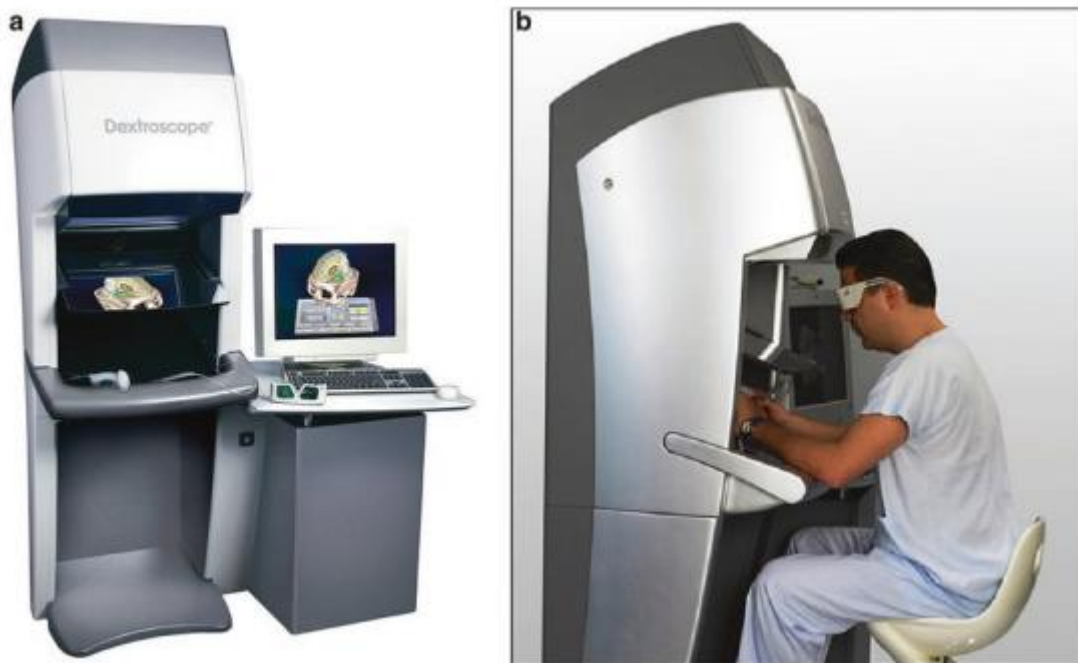


Figure 49 : (a, b) L'environnement de réalité virtuelle Dextroscope

➤ **Outils de reconstruction, fusion et segmentation : rendre l'anatomie exploitable**

Pour qu'une planification 3D soit opérationnelle, les différentes modalités doivent être co-enregistrées dans le même espace de coordonnées. Le Dextroscope inclut des outils de fusion d'images pour aligner CT, IRM, angiographie, etc. Ensuite, la segmentation devient une étape clé : les structures importantes (tumeur, vaisseaux, anévrisme, nerfs, ventricules, base du crâne, faisceaux de substance blanche) doivent être isolées pour être manipulées clairement.

La segmentation peut être automatique lorsque le contraste est suffisant, ou semi-automatique lorsque les limites sont ambiguës. Dans ce dernier cas, l'utilisateur intervient, par exemple en dessinant les contours slice par slice tout en conservant un contexte volumique. Pour la DTI, l'extraction des tracts peut être automatique, mais leur sélection doit être adaptée à la zone d'intérêt : la possibilité de déplacer une région d'intérêt en 3D et d'obtenir un retour immédiat sur les faisceaux intersectés constitue un avantage notable pour analyser les risques fonctionnels d'un trajet.

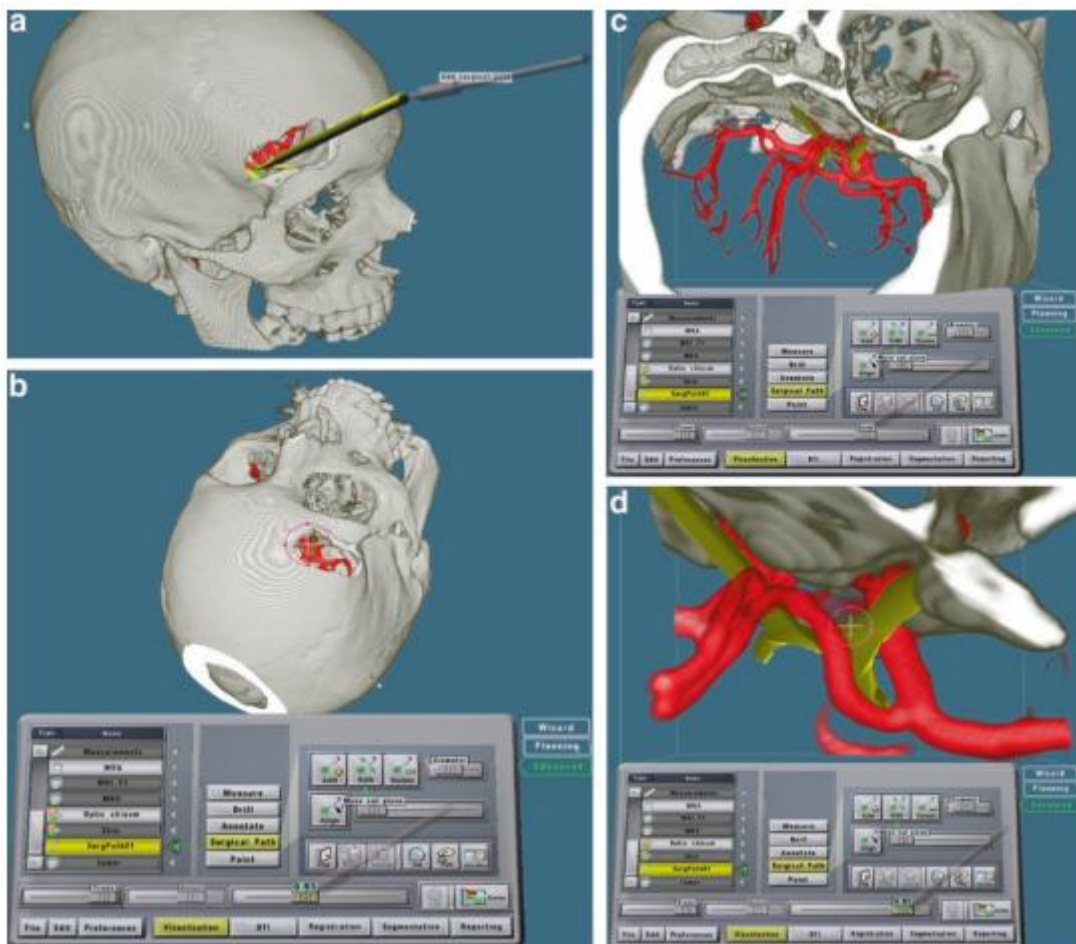


Figure 50 : Interface de planification chirurgicale. (a) Positionnement des points cible et d'entrée pour définir une trajectoire dans l'image 3D. (b) Alignement de la vue le long de la trajectoire. (c) Zoom le long de la trajectoire, simulant une vue microscopique. (d) Atteinte du point cible de la trajectoire.

➤ **Mesure, forage virtuel, trajectoires et simulation de clipping**

Le système propose des outils de mesure (distances, courbes sur peau ou os pour transfert peropératoire, volumes, angles), ainsi que des outils d'édition volumique assimilables à un « forage » virtuel. Celui-ci permet de simuler l'ouverture osseuse et d'explorer la visibilité d'un corridor. La trajectoire entrée-cible peut être définie et visualisée ; le point de vue peut ensuite « glisser » le long de cette trajectoire comme le ferait un microscope, afin d'anticiper ce qui sera rencontré et de vérifier l'accessibilité réelle.

Un aspect particulièrement intéressant en neurochirurgie vasculaire est la simulation de pose de clips d'anévrisme. Disposer de clips virtuels et pouvoir tester forme, taille et position sur un anévrisme segmenté permet de raisonner à l'avance sur l'occlusion du sac, la préservation des branches adjacentes et l'adéquation avec les contraintes du corridor.

➤ **Déclinaisons pédagogiques et extension peropératoire**

En plus du Dextroscope, il existe des variantes destinées à l'enseignement (Dextrobeam) ou à un usage plus léger (DextroVision). L'idée est de diffuser l'interaction 3D dans des contextes collectifs (auditorium, démonstration) ou de bureau, même si l'ergonomie peut être sacrifiée dans les configurations compactes.

Par ailleurs, l'extension vers le bloc opératoire est illustrée par DEX-Ray, un système de navigation en réalité augmentée superposant en temps réel des informations 3D sur une vidéo du champ chirurgical. L'intérêt majeur est l'effet « see-through » : voir au-delà de la surface exposée pour guider l'orientation et la progression. La limite principale mentionnée concerne les corridors profonds et étroits, où les performances sont contraintes par la qualité de la caméra et la sensibilité à la lumière.

➤ **Domaines d'application : quand la complexité rend la planification déterminante**

Les applications rapportées incluent de nombreuses catégories d'interventions : anévrismes, malformations artérioveineuses, décompressions microvasculaires, cavernomes,

tumeurs de base du crâne, approches keyhole et transnasales, ainsi que des cas exceptionnels comme la séparation de jumeaux craniopages. Le fil conducteur est clair : plus la situation est anatomiquement complexe, plus l'intérêt d'un environnement de planification 3D interactif augmente, notamment lorsque l'objectif est de réduire l'invasivité tout en maintenant un niveau de sécurité élevé.

En neurochirurgie vasculaire, l'argument central est que la compréhension tridimensionnelle de l'architecture lésionnelle (collet, dôme, branches, perforantes, rapports osseux et parenchymateux) conditionne directement la stratégie de corridor et de geste. Pour les MAV, la planification est d'autant plus critique que les relations feeders/drainage et la progression de dissection nécessitent une anticipation rigoureuse. Pour la décompression microvasculaire, comprendre précisément le conflit neurovasculaire permet de diminuer la dissection exploratoire et d'améliorer la précision du geste. Pour les cavernomes profonds, le défi majeur est souvent moins l'exérèse elle-même que la définition d'un trajet d'accès fonctionnellement acceptable.

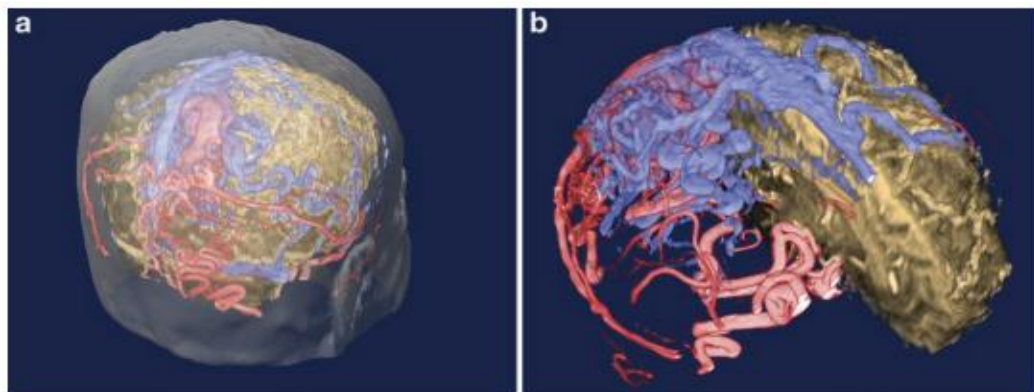


Figure 51 : Cas de MAV. Volumineuse MAV pariéto-occipitale droite. Images fusionnées d'angio-IRM (rouge) et de phlébographie par résonance magnétique (bleu). (a) Vue supéro-postéro-latérale droite montrant les artères méningées moyennes bilatérales et l'artère occipitale droite comme vaisseaux nourriciers superficiels. Les vaisseaux artérialisés et dilatés du nidus se drainent principalement dans le sinus sagittal. (b) Vue antérieure. L'artère cérébrale postérieure droite, dilatée et sinueuse, apparaît comme le vaisseau nourricier profond ; la portion antérieure du drainage veineux est clairement visible.

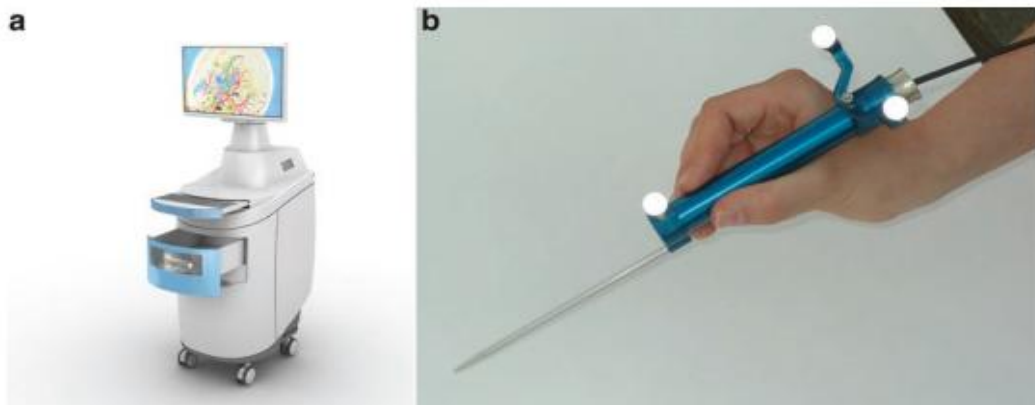


Figure 52 : Le système DEX-Ray montrant l'écran stéréoscopique et le tiroir contenant la sonde de la caméra (a) et (b), la sonde de la caméra étant tenue à la main

- **Conclusion**

La planification préopératoire fondée sur des modèles 3D spécifiques au patient constitue un levier majeur d'amélioration de la sécurité et de réduction de l'invasivité en neurochirurgie. Si la fusion multimodale et la segmentation sont des prérequis techniques indispensables, l'efficacité réelle dépend également — et parfois surtout — de l'ergonomie de l'interaction avec la 3D. Un système peut produire une reconstruction remarquable, mais rester peu exploitable si la manipulation est lente, ambiguë ou non intuitive.

Dans cette perspective, des environnements tels que le Dextroscope cherchent à rapprocher la planification de l'expérience opératoire : visualiser en profondeur, rendre des structures transparentes, simuler des corridors, tester des craniotomies, définir des trajectoires, et répéter mentalement les étapes clés avant d'entrer au bloc. À terme, l'intégration de ces plans dans le champ opératoire via la réalité augmentée représente une évolution logique : convertir la chirurgie en une séquence d'étapes anticipées et contrôlées, réduisant la part d'improvisation, limitant la dissection exploratoire, et augmentant la sécurité du patient.

→ Immersive touch

Dans d'autres spécialités chirurgicales, en particulier la chirurgie laparoscopique et les interventions endovasculaires, la réalité virtuelle (VR) a progressivement acquis une légitimité pédagogique forte, car elle répond à une contrainte centrale de la formation contemporaine : permettre l'acquisition de gestes techniques complexes sans faire porter au patient le risque inhérent aux premières étapes de la courbe d'apprentissage. La valeur ajoutée de la VR tient à sa capacité à offrir des situations d'entraînement répétables et standardisées. Là où l'exposition opératoire dépend des opportunités cliniques, des aléas organisationnels et de la variabilité anatomique, la simulation permet de reproduire le même scénario autant de fois que nécessaire et d'inscrire l'apprentissage dans une progression structurée. Cette répétition, associée à des retours immédiats et mesurables (temps d'exécution, trajectoires instrumentales, erreurs, respect d'éléments anatomiques sensibles), favorise une amélioration objectivable et tend à réduire l'hétérogénéité des progrès entre apprenants, comparativement à un apprentissage reposant uniquement sur la diversité fortuite des cas rencontrés au bloc opératoire.

En neurochirurgie, l'intérêt croissant pour la VR s'explique par des contraintes encore plus marquées. La précision requise y est extrême, les marges d'erreur sont très étroites et les conséquences d'un geste inadéquat peuvent être fonctionnellement irréversibles. À cette exigence intrinsèque s'ajoutent des facteurs structurels qui restreignent l'exposition opératoire des résidents : diffusion de techniques moins invasives réduisant le volume de certaines chirurgies ouvertes, limitations de temps et de coûts au bloc, contraintes sur le temps de travail, et pression croissante autour de la sécurité et de la transparence des résultats. Dans ce contexte, la VR apparaît comme une réponse méthodologique à une question formatrice : comment enseigner des techniques sophistiquées et à risque dans un cadre sécurisé, sans dépendre exclusivement du nombre de cas opérés et sans augmenter le risque patient ? Toutefois, l'argument central du texte est que l'amélioration observée en simulation, à elle seule, ne suffit pas à justifier une intégration institutionnelle large. La condition déterminante demeure la démonstration, robuste et reproductible, d'un transfert des compétences acquises sur simulateur vers la performance « in vivo », c'est-à-dire vers la qualité du geste réel et la sécurité en conditions opératoires.

- **Typologie des systèmes VR:**

Trois niveaux de systèmes VR sont décrits, qui correspondent à la fois à un gradient technologique et à des objectifs pédagogiques distincts.

Les systèmes dits « simplifiés » offrent une représentation tridimensionnelle essentiellement visuelle de l'anatomie. Ils peuvent être construits à partir d'images de dissection ou de reconstructions issues de l'imagerie patient-spécifique, et ils se révèlent particulièrement utiles pour l'apprentissage des rapports spatiaux, la compréhension des corridors et la planification préopératoire. Leur limite principale est qu'ils entraînent peu la dimension psychomotrice du geste : ils enseignent surtout à voir, anticiper et planifier, mais restent insuffisants pour apprendre à manipuler, doser la force, gérer la friction tissulaire ou développer des automatismes instrumentaux.

Les systèmes « augmentés » introduisent une interaction plus active en permettant à l'utilisateur de manipuler la reconstruction tridimensionnelle, parfois avec une déformation tissulaire en temps réel et des retours additionnels, tels que des signaux sonores. Cette couche interactive rapproche l'apprenant de certains aspects procéduraux : orientation dans l'espace opératoire, compréhension des effets d'une traction ou d'un déplacement, choix de trajectoires et exploration de points de vue. Néanmoins, l'entraînement reste souvent incomplet sur le plan sensorimoteur, car le geste est principalement guidé par la vision et ne reproduit qu'imparfaitement la résistance des tissus, la variabilité de consistance ou les contraintes mécaniques qui conditionnent la sécurité en neurochirurgie.

Les systèmes « immersifs » sont présentés comme les plus prometteurs, car ils associent une visualisation stéréoscopique à un retour haptique ou kinesthésique. Cette combinaison permet d'approcher les exigences psychomotrices réelles : coordination œil-main dans un espace tridimensionnel, précision millimétrique, contrôle fin de la trajectoire, gestion de la force appliquée et, dans de nombreux cas, coordination bimanuelle. Cette dimension est particulièrement critique en neurochirurgie, où la réussite dépend autant de la compréhension anatomique que de la

capacité à manipuler des structures fragiles en minimisant traction, écrasement et contraintes sur le tissu nerveux. Dans cette catégorie, on identifie trois plateformes historiques à retour haptique : TempoSurg, NeuroTouch et ImmersiveTouch. TempoSurg est surtout orienté vers la simulation du forage du rocher, utile dans un champ anatomique spécifique mais limité par son périmètre et par la résolution de certaines structures critiques. NeuroTouch se concentre sur des tâches ciblées telles que la navigation endonasale, la réduction tumorale, l'hémostase ou la microdissection, avec réglage de la difficulté et production de métriques, ce qui en fait un outil pertinent pour l'entraînement de micro-compétences.

- **ImmersiveTouch**

ImmersiveTouch est présent comme un système pionnier pour l'intégration cohérente d'un affichage stéréoscopique haute résolution, du suivi de la tête et de la main, et d'un stylet haptique simulant les instruments. Sur le plan matériel, l'objectif est d'aligner précisément le geste réel de l'utilisateur avec sa représentation virtuelle afin que l'interaction ne soit pas seulement visuelle, mais aussi tactile et kinesthésique. Sur le plan logiciel, la plateforme s'appuie sur un enchaînement de modules permettant la reconstruction et la segmentation volumique à partir d'IRM ou de CT, la synchronisation des informations de tracking, l'attribution de propriétés mécaniques aux structures virtuelles (rigidité, viscosité, frictions), puis le rendu graphique en temps réel en tenant compte de la perspective de l'utilisateur. La logique directrice est que la co-intégration du visuel et de l'haptique rapproche le geste simulé du geste réel, et qu'elle permet, en conséquence, un entraînement plus fidèle de la coordination, de la précision et du dosage de la force.

- **Intérêt et validité**

L'intérêt pédagogique repose sur plusieurs mécanismes. La répétition et la progression graduée favorisent la consolidation d'automatismes, réduisent la charge cognitive liée à l'exécution instrumentale et libèrent des ressources attentionnelles pour la stratégie opératoire. L'existence de métriques objectivables ouvre la voie à une évaluation plus standardisée, fondée non seulement sur l'observation qualitative d'un superviseur, mais également sur des indicateurs

quantifiables et comparables dans le temps. Enfin, les bibliothèques d'anatomies variées permettent d'exposer les apprenants à des configurations rares ou à des variantes qu'ils ne rencontreraient pas nécessairement en volume suffisant durant la formation clinique, ce qui répond directement à la raréfaction de certaines opportunités opératoires.

La valeur de ces dispositifs dépend de la qualité de leur validation, d'autant plus que leur coût est élevé. Trois exigences structurent cette validation. La première est la capacité à discriminer les niveaux de compétence : un simulateur doit distinguer de manière fiable novices, intermédiaires et experts au moyen de métriques pertinentes. La deuxième est la démonstration d'une amélioration des performances après entraînement répété, ce qui établit l'efficacité pédagogique intrinsèque du dispositif. La troisième, la plus déterminante, est la démonstration d'un transfert vers la chirurgie réelle : il faut montrer que les gains obtenus en simulation se traduisent par une amélioration au bloc, en termes de précision, d'efficience, de réduction des erreurs et, idéalement, de baisse des complications. Ce niveau de preuve demeure hétérogène selon les modules, certains gestes standardisables et facilement mesurables étant plus simples à valider que des interventions hautement complexes.

Dans cette logique, la ventriculostomie apparaît comme le module le plus étudié et le mieux validé. L'objectif est d'améliorer le placement d'un cathéter ventriculaire à partir de repères externes en minimisant le nombre de tentatives. Le simulateur permet de planifier la trajectoire, propose différents sites de burr hole, intègre progressivement une simulation du forage et restitue une sensation de « pop » lors de l'entrée dans le ventricule. Il autorise également une vérification anatomique finale par ouverture virtuelle, renforçant le lien entre geste et résultat. La présence de multiples variantes anatomiques (ventricules normaux, comprimés, déviés ou de type slit ventricles) augmente l'intérêt pédagogique en confrontant l'apprenant à des situations proches de la réalité clinique. Des dispositifs d'évaluation, y compris des compétitions, ont été rapportés comme capables de discriminer les niveaux d'expérience.

Le forage osseux est une compétence transversale fondamentale, initialement intégrée au module de ventriculostomie puis développée sous forme de module indépendant (burr hole, clinoïdectomie, craniectomies). Néanmoins, l'évaluation de son efficacité éducative, prise isolément, reste moins robuste, ce qui limite la portée des conclusions quant à son impact direct sur la performance clinique.

La rhizotomie trigéminalaire percutanée vise l'apprentissage d'une trajectoire précise vers le foramen ovale à partir de repères externes, avec possibilité de recourir à une fluoroscopie simulée. Les évaluations disponibles suggèrent une discrimination entre résidents juniors et seniors, soutenant une validité en tant qu'outil d'évaluation de l'expérience. En revanche, les données montrant un bénéfice direct sur la performance clinique réelle demeurent incomplètes, ce qui illustre l'écart fréquent entre validité de construit et démonstration de transfert.

Le module d'hémostase simule une cavité opératoire avec des saignements distribués de manière aléatoire, et il évalue l'usage du bipolaire sous contrainte temporelle afin d'éviter des lésions des tissus adjacents. Ce module semble plus bénéfique pour des apprenants débutants que pour des résidents avancés, ce qui suggère qu'il cible prioritairement des compétences élémentaires comme l'orientation, la vision binoculaire et le timing du geste, plutôt que des habiletés complexes de haut niveau.

Le clipping d'anévrisme est particulièrement pertinent sur le plan pédagogique, car la réduction des opportunités de clipping au profit de l'endovasculaire diminue l'exposition opératoire des apprenants. ImmersiveTouch propose un prototype intégrant même une simulation de rupture en cas de manipulation excessive. Cependant, la complexité computationnelle de la déformation vasculaire limite encore la finesse du rendu haptique. Les validations disponibles reposent surtout sur des appréciations subjectives, même si des différences de performance entre niveaux d'expérience ont été rapportées. Ce type de module pourrait être plus efficace pour améliorer des compétences déjà présentes que pour initier entièrement un novice à une procédure aussi délicate.

Enfin, la ponction lombaire, la mise en place de vis pédiculaires, la fixation percutanée et la vertébroplastie sont des modules centrés sur l'identification de repères, la précision des trajectoires et l'usage mesuré de la fluoroscopie. Le retour haptique y est présenté comme un levier important pour réduire la dépendance à l'imagerie et, par conséquent, l'exposition aux radiations. Certaines évaluations rapportent une amélioration de la précision et une diminution des demandes de fluoroscopie après entraînement.

- **Limites structurelles de la simulation par VR**

Une difficulté majeure est l'existence d'une courbe d'apprentissage propre à la technologie : la familiarisation avec l'interface, les dispositifs haptiques et les modalités de contrôle peut influencer les performances mesurées et brouiller l'évaluation du niveau chirurgical réel. Une autre limite est l'absence d'équivalence automatique entre compétence en simulation et dextérité opératoire : seuls des protocoles méthodologiquement robustes, idéalement randomisés, peuvent attribuer de façon crédible une amélioration clinique à la simulation plutôt qu'à d'autres facteurs. Le réalisme visuel et haptique demeure également un défi pour les interventions les plus complexes, car la fidélité biomécanique exige une puissance de calcul importante et des modèles de tissus encore imparfaits.

Malgré ces réserves, la VR est présentée comme une technologie particulièrement attractive dans un contexte de contraintes croissantes : exigences sociétales élevées en matière de résultats, restrictions du temps de formation et impératif de réduire l'apprentissage « sur le patient ». La VR ne concerne pas uniquement les novices : elle peut contribuer au maintien des compétences, à la remise à niveau, à l'apprentissage de nouvelles techniques et, potentiellement, à la préparation préopératoire centrée sur l'anatomie spécifique d'un patient. L'argumentation converge ainsi vers l'idée que les simulateurs de VR, en particulier ceux intégrant un retour haptique, constituent une voie prometteuse pour structurer l'acquisition et l'évaluation des compétences en neurochirurgie. Néanmoins, une adoption large et formelle dans les curricula suppose encore un effort de validation méthodique démontrant un bénéfice clinique transférable, reproductible et pertinent en conditions opératoires réelles.

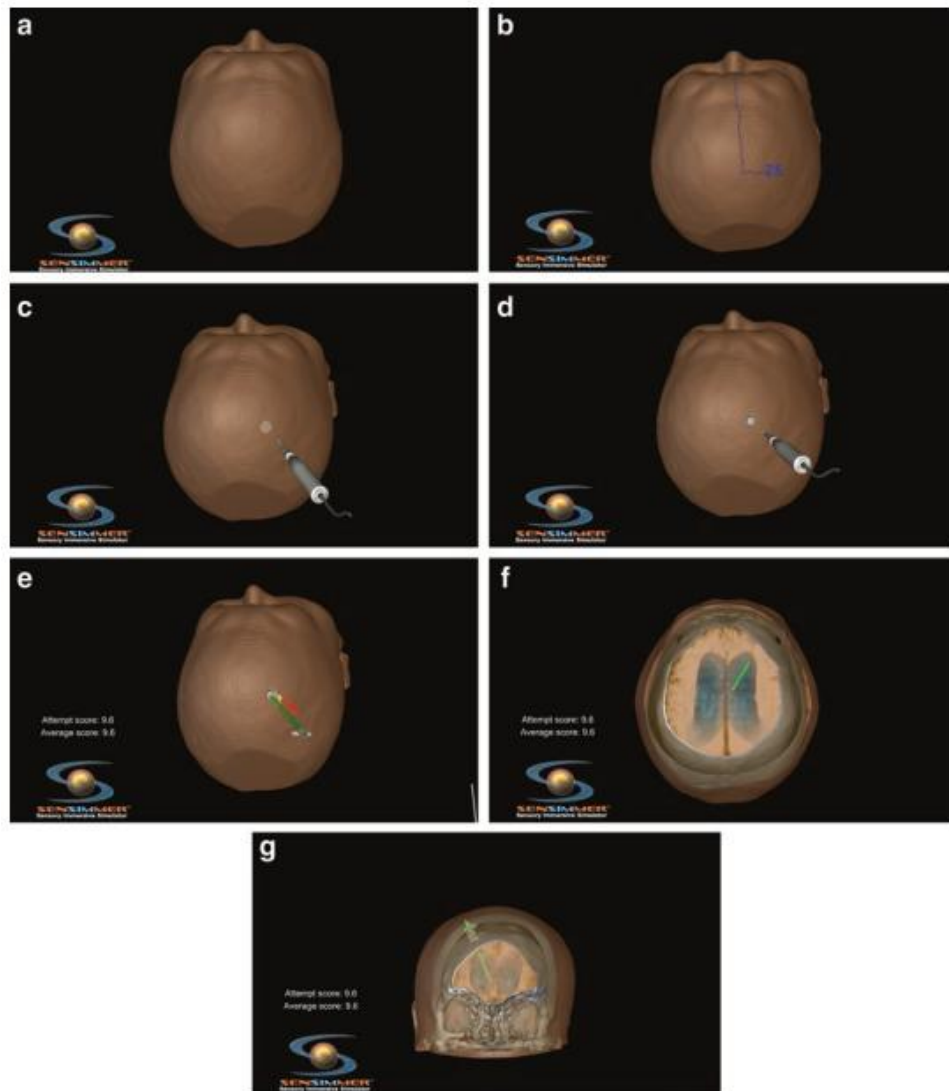


Figure 53 : (a) Reconstruction virtuelle de la tête à partir d'une tomodensitométrie (TDM) tridimensionnelle.(b) Le résident peut mesurer la distance par rapport aux repères externes pour l'aider à choisir l'emplacement correct du trou de trépanation. (c, d) Module de forage osseux simulant la réalisation du trou de trépanation. (e) À la fin de l'essai de positionnement du cathéter, le logiciel calcule la précision de la position et attribue un score. Si le résultat est concluant, le cathéter devient vert. (f, g) Vérification directe de la position finale du cathéter dans la tête virtuelle : (f) projection axiale, (g) projection coronale

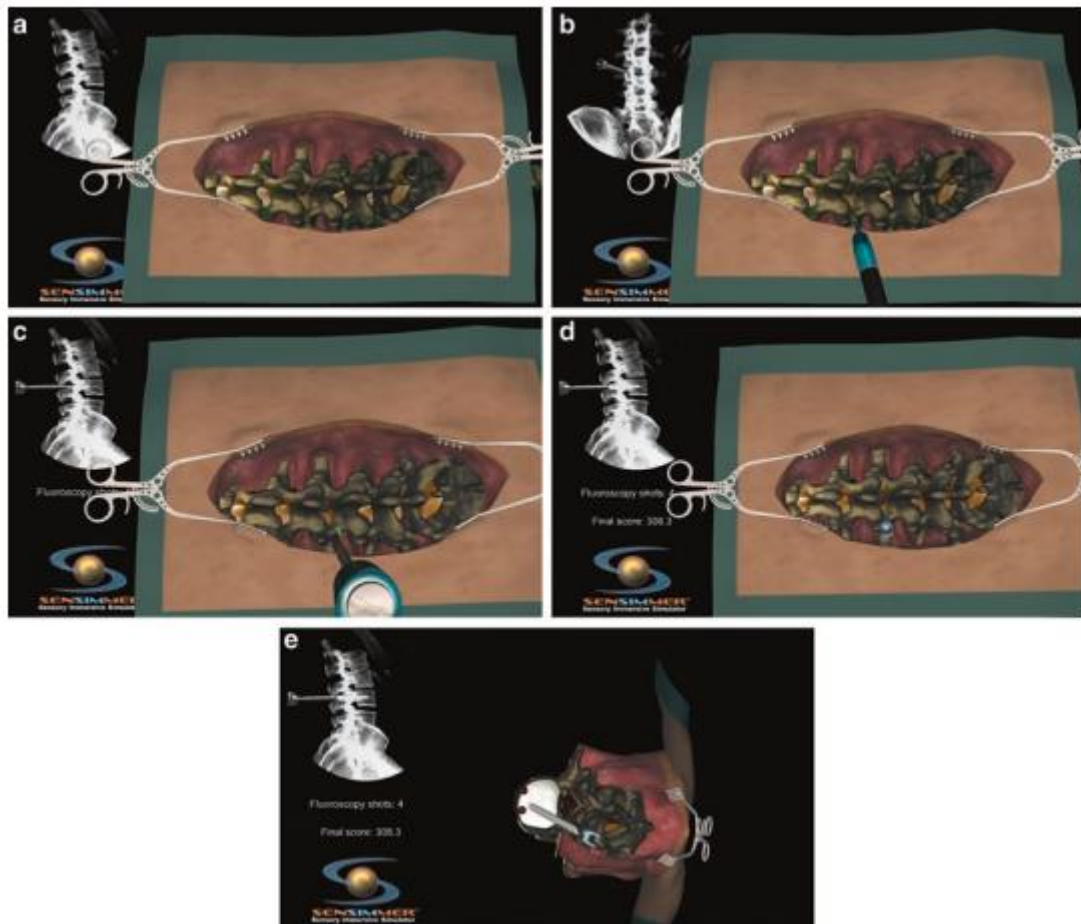


Figure 54 : (a) Modèle lombaire avec rétraction des tissus mous et exposition des repères osseux. (b, c) Le stylet haptique simule les instruments chirurgicaux : le localisateur de pédicule (b) et la sonde pédiculaire (c). (d) Positionnement des vis et guidage par imagerie sagittale simulée pouvant aider les débutants à sélectionner la trajectoire correcte tout au long de la procédure.(e) À la fin de la tâche, le stagiaire peut vérifier la précision de sa procédure en observant directement la trajectoire de la vis sur la colonne vertébrale virtuelle.

- **NeuroVR**

La plateforme NeuroVR™ s'inscrit dans la continuité des dispositifs de simulation destinés à reproduire, le plus fidèlement possible, l'environnement technique et sensoriel du bloc opératoire. Sur le plan architectural, le simulateur repose sur une interaction permanente entre un système de rendu graphique tridimensionnel et un système de rendu haptique bimanuelle, l'ensemble étant piloté par un ou plusieurs ordinateurs exécutant le moteur de simulation. L'objectif n'est pas uniquement de « visualiser » une scène anatomique, mais de permettre à l'opérateur d'agir sur cette scène et d'en percevoir, en retour, les contraintes mécaniques et fonctionnelles comme il le ferait lors d'un geste réel. La simulation vise ainsi à rapprocher l'entraînement d'une situation opératoire authentique, où la qualité de la performance dépend à la fois de la perception visuelle, de la précision gestuelle, de la gestion du champ, et de la capacité à moduler la force appliquée aux tissus.

- **Matériel/ Hardware :**

Le dispositif de rendu graphique est conçu pour reproduire l'ergonomie d'un microscope opératoire, ce qui constitue un point essentiel dans la neurochirurgie microscopique où la posture, l'angle de vision et la perception de profondeur conditionnent directement la précision des gestes. NeuroVR™ comprend un oculaire binoculaire produisant une vision stéréoscopique du champ opératoire virtuel, avec des réglages de hauteur et d'inclinaison afin de s'adapter à la morphologie et à la posture de l'utilisateur. À cette visualisation s'ajoute un écran LCD de grande taille, destiné à présenter l'espace de travail chirurgical virtuel avec un haut niveau de réalisme. La configuration (dimensions et distance) de l'écran contribue à offrir un champ de vision et une mise au point qui réduisent la fatigue visuelle, aspect non négligeable dans des procédures longues où l'ergonomie influence la stabilité gestuelle. Un écran tactile complète l'ensemble : il sert à la navigation dans l'interface, à l'affichage des consignes de tâche, et à la restitution des résultats de performance. Il a aussi une fonction pédagogique collective, puisqu'il peut être utilisé comme support d'observation pour un public (superviseur, groupe d'apprenants), facilitant la supervision et la discussion autour des choix techniques réalisés pendant la simulation.

La composante haptique constitue toutefois l'élément le plus déterminant, car elle vise à reproduire le versant « tactile » du geste neurochirurgical. Le système combine deux dispositifs haptiques, un pour chaque main, associés à une tête en plastique ouverte. Cette tête a une valeur ergonomique et cognitive : l'espace vide simule le défaut de craniotomie, et correspond au champ chirurgical virtuel visible à l'écran. Autrement dit, l'apprenant n'agit pas dans un espace abstrait, mais dans une configuration qui cherche à superposer, autant que possible, l'organisation spatiale attendue en chirurgie réelle. Les outils haptiques permettent la manipulation bimanuelle, ce qui est central en neurochirurgie, où l'opérateur coordonne fréquemment aspiration et coagulation, ou endoscope et instrument de travail, et doit maintenir une stabilité bimanuelle sous contrainte de profondeur. Les poignées sont conçues aux dimensions des instruments réels, afin de préserver des repères sensorimoteurs plausibles, et la structure comporte des réglages de position ainsi que des repose-poignets ajustables, ce qui rappelle l'importance de la stabilité mécanique des mains dans le travail microchirurgical. Une bibliothèque de neuf instruments virtuels est disponible, couvrant un spectre large allant de la microchirurgie (bipolaire, microciseaux, aspiration, microdébrideur, aspirateur ultrasonique) aux techniques endoscopiques et de navigation (endoscope, neuroendoscope, pointeur de neuronavigation), en passant par le forage (microdrill). Le contrôle fonctionnel s'effectue via deux pédales, ce qui rapproche encore l'interface des dispositifs opératoires réels où le pied commande fréquemment certaines fonctions (aspiration, activation d'ultrasons, irrigation, etc.), et permet de travailler l'intégration main-œil-pied, souvent sous-estimée dans les approches purement « visuelles » de simulation.

➤ **Logiciel/ Software :**

Le moteur informatique, décrit comme reposant sur un ordinateur principal à double processeur quadricœur, assure l'articulation technique entre image et haptique. Il calcule les collisions entre les instruments virtuels et les surfaces tissulaires, puis génère en temps réel des déformations et des modifications topologiques de la scène. Cette dimension est importante, car une simulation utile en neurochirurgie ne peut se limiter à des objets rigides : l'acte chirurgical modifie le tissu (rétraction, section, aspiration, coagulation), et la pertinence pédagogique dépend

de la capacité du système à produire un retour cohérent entre l'action et la réponse du modèle. Le texte précise que le réalisme des interactions tissu-instrument a été amélioré par l'étude de tissu cérébral fraîchement excisé, dont des propriétés mécaniques et thermiques ont été analysées afin d'approcher un comportement réaliste. De plus, la simulation intègre des phénomènes de saignement déclenchés lors de la dissection de tissus vascularisés. Le débit de saignement dépend, selon le texte, du calibre des vaisseaux rencontrés et du niveau de vascularisation du tissu sectionné. L'intérêt de cette modélisation est pédagogique : elle impose à l'apprenant de gérer un champ dégradé, de prioriser une stratégie d'exposition, de contrôler l'aspiration et la coagulation, et de maintenir une progression technique malgré l'apparition de complications locales. Enfin, l'environnement est enrichi par le calcul d'ombres portées, et par un battement cardiaque audible synchronisé avec l'image d'un tissu cérébral pulsatile, afin de renforcer l'immersion. Ces ajouts ne sont pas uniquement « décoratifs » : ils visent à reproduire des indices sensoriels qui participent à la perception du relief, du mouvement et de la dynamique du champ.

➤ Intérêt et validité

Sur le plan pédagogique, la logique de NeuroVR™ repose sur une formalisation modulaire des compétences. Le Conseil national de recherches du Canada a identifié des tâches représentatives de la neurochirurgie et les a décomposées en sous-tâches techniques élémentaires, associées à des compétences spécifiques et organisées selon des niveaux de difficulté. Cette approche correspond à une philosophie de formation progressive : l'apprenant acquiert d'abord des gestes simples et reproductibles, puis combine ces gestes dans des scénarios de plus en plus complexes, jusqu'à simuler des procédures complètes basées sur des cas inspirés de situations cliniques. Chaque module est associé à des métriques calculées automatiquement, permettant d'objectiver la performance et de fournir un retour visuel à l'issue de la simulation. Ce point est crucial dans une logique de formation fondée sur les compétences : la progression ne repose plus uniquement sur le nombre d'actes réalisés, mais sur des indicateurs de qualité et de sécurité mesurables.

➤ Modules et techniques :

Les modules de manipulation instrumentale constituent le premier niveau d'apprentissage. Ils ciblent l'appropriation isolée d'instruments clés, en entraînant l'utilisateur à contrôler le champ opératoire (aspiration), à réaliser une résection par aspirateur ultrasonique sur des tumeurs de rigidité variable, à maîtriser la coagulation et la dissection au bipolaire sans excès de force ni de durée, et à sectionner des structures fines aux microciseaux en préservant les tissus adjacents et les microvaisseaux. L'intérêt de ces exercices réside dans leur caractère répétable et standardisé : l'apprenant peut se confronter à des variations (rigidité tumorale, fragilité des structures, densité de microvaisseaux) et développer une sensibilité progressive à la force appliquée, à la trajectoire de l'instrument et à la stabilité du geste.

Le niveau suivant correspond aux modules de compétences fondamentales, qui cherchent à structurer l'apprentissage de séquences techniques plus proches du réel et intégrant la perception anatomique. Les modules d'anatomie, par exemple, permettent de se familiariser avec des repères rencontrés dans des procédures courantes. Certains exercices portent sur la sélection d'un point de trépanation pour ventriculostomie « freehand » à partir de repères externes, ce qui renvoie à la nécessité, en pratique, de traduire une connaissance anatomique en un geste spatial précis. D'autres exercices entraînent la navigation endoscopique intraventriculaire ou endonasale, avec apprentissage des repères, gestion de l'orientation dans un espace étroit et adaptation à une visibilité parfois altérée, notamment via la simulation de sang ou de contact accidentel brouillant l'optique. La bimanualité est travaillée dans un module spécifique où l'endoscope est tenu d'une main tandis que l'autre main manipule un instrument actif, comme le microdébrideur, sous commande au pied. Cette configuration reproduit une contrainte centrale des approches endonassales : la nécessité de coordonner vision, stabilité et geste actif dans un champ limité.

D'autres modules fondamentaux visent des gestes neurochirurgicaux à forte valeur transversale, notamment la résection tumorale et l'hémostase. Les modules de debulking entraînent à réduire une tumeur de type méningiome avec contrôle du saignement jusqu'à

l'exposition du cerveau sain, ce qui impose de moduler l'agressivité du geste en fonction du retour visuel et haptique. Le module de résection tumorale élargit encore la difficulté en proposant des localisations différentes de gliomes (superficielle, sous-corticale, transsulcale, transfissurale), où la stratégie d'accès, la gestion des limites tumeur-cerveau sain et l'intégration aspiration-bipolaire deviennent déterminantes. Le module d'hémostase se distingue par l'apprentissage de la sélection de la technique adaptée (aspiration, cautérisation, clips, suture, agents hémostatiques, irrigation, application de patties), et par l'idée que l'échec n'est pas seulement lié à un « mauvais geste », mais au choix inapproprié d'une stratégie. Les métriques incluent alors des éléments directement pertinents pour la sécurité, comme la perte sanguine totale et le volume de tissu sain lésé, ainsi que le temps nécessaire à la maîtrise du saignement. Le module d'exposition, enfin, entraîne à ouvrir des plans anatomiques (par exemple la fissure de Sylvius) en combinant traction maîtrisée et section fine de fibres, ce qui renvoie à un aspect majeur de la microdissection : progresser sans traction excessive et sans perte d'orientation.

À un niveau supérieur, les modules chirurgicaux cherchent à simuler des procédures complètes, en intégrant plusieurs étapes et plusieurs instruments. Le module endoscopique comprend des exercices endonasaux (navigation vers l'ostium sphénoïdal, forage, progression dans le sinus, ethmoïdectomie, puis étapes de chirurgie hypophysaire jusqu'à l'aspiration tumorale), ainsi qu'un module de troisième ventriculostomie reposant sur l'identification des repères, le choix du site de perforation et l'élargissement contrôlé. Le module de microchirurgie, quant à lui, simule des résections tumorales plus complètes, incluant des méningiomes de convexité de rigidité et vascularisation variables, et des gliomes sous-corticaux où l'enjeu est d'éviter l'ablation de tissu sain. Enfin, la dimension rachidienne est abordée via un exercice d'hémi laminectomie, où l'apprenant doit retirer la lame tout en minimisant saignements et lésions des structures adjacentes, rappelant que la simulation ne se limite pas au crâne, mais peut couvrir des compétences clés de la neurochirurgie au sens large.

➤ Intégration institutionnelle

L'intégration institutionnelle d'un tel dispositif suppose toutefois une validation méthodologique. Le texte souligne que NeuroVR™ doit démontrer sa validité et sa fiabilité selon plusieurs niveaux. La validité d'apparence, d'abord, correspond au réalisme perçu et à la proximité avec les conditions du bloc ; elle a été explorée via des évaluations répétées par un réseau d'experts, avec mise à jour itérative des modules, ainsi que par des questionnaires auprès de résidents et d'étudiants. La validité de contenu, ensuite, concerne l'adéquation entre les tâches simulées et les compétences réellement nécessaires en neurochirurgie. La validité de construit constitue un point central : le système doit pouvoir discriminer des niveaux d'expertise en utilisant des métriques objectives. NeuroVR™ quantifie par exemple la proportion de tumeur réséquée (qualité), la perte sanguine et le volume de cerveau sain retiré (sécurité), et différents paramètres d'application de force (maximum, somme, moyenne), ce qui permet d'évaluer non seulement le résultat final mais aussi la manière dont il est atteint. Des métriques liées à l'efficacité, telles que la longueur des trajectoires instrumentales, la distance moyenne entre les instruments, la fréquence d'activation des pédales ou l'usage simultané bimanuel, cherchent à objectiver la coordination et l'économie gestuelle. Plusieurs études ont montré une discrimination cohérente entre experts, résidents et étudiants, ce qui permet d'envisager la définition de seuils ou « benchmarks » de compétence destinés à structurer des curricula standardisés.

La validité concurrente, enfin, est validée à travers une étude pilote portant sur la chirurgie endonasale endoscopique sur une période de six mois. Des résidents entraînés sur module endoscopique auraient amélioré davantage leur score en conditions opératoires réelles que des résidents non entraînés. Bien que ces données soient présentées comme préliminaires et nécessitant confirmation, elles constituent un point important, car elles touchent l'enjeu principal de la simulation : démontrer que l'amélioration observée dans un environnement contrôlé se traduit effectivement par une performance plus sûre et plus efficace au bloc opératoire.

Au-delà de la formation des débutants, NeuroVR™ est aussi un outil potentiellement utile pour analyser, comprendre et optimiser le développement des habiletés psychomotrices, y compris chez des opérateurs expérimentés. Le modèle de Fitts et Posner décrit l'apprentissage moteur comme une progression allant d'un stade conscient et contrôlé vers une automatisation. Dans cette perspective, la constance des forces appliquées est interprétée comme un indice d'automatisme : les experts tendraient à produire des profils de force plus stables que les résidents, traduisant une maîtrise moins coûteuse cognitivement. Par ailleurs, le simulateur a été utilisé expérimentalement pour étudier l'impact de conditions de travail défavorables, telles que le stress aigu induit par un saignement important simulé, ou la dégradation liée à l'interruption du sommeil après une garde. Cette dimension ouvre la voie à une utilisation plus large de la simulation comme laboratoire de recherche sur la performance opératoire, pouvant, à terme, orienter des stratégies de prévention des erreurs et de préparation cognitive.

Enfin, l'une des perspectives les plus structurantes est la possibilité de générer des modèles anatomiques à partir de l'imagerie réelle des patients. Une telle évolution transformerait le simulateur en outil de répétition préopératoire « patient-spécifique », permettant au chirurgien de se familiariser avec une anatomie particulière, d'explorer plusieurs corridors chirurgicaux et d'anticiper des difficultés avant d'être confronté aux contraintes irréversibles du bloc. Dans une logique de sécurité et de réduction des erreurs évitables, l'intérêt serait double : améliorer la qualité de la planification et renforcer la préparation technique, en particulier pour les cas complexes où la marge d'improvisation doit être minimale.

a.4. Simulation non procédurale en anesthésie et en soins intensifs

→ **Neuroanesthésie :**

- **Simulation haute fidélité en neuroanesthésie : apport du programme NeuroSim à la gestion des incidents critiques peropératoires**

La neurochirurgie constitue un environnement opératoire où la marge d'erreur est particulièrement réduite, en raison de la vulnérabilité du parenchyme cérébral et de la rapidité avec laquelle une dégradation physiologique peut compromettre le pronostic. Lors d'un incident critique peropératoire tel qu'une hémorragie ou un épisode ischémique, le cerveau peut œdématiser en quelques minutes. Cette dynamique entraîne une hausse rapide des pressions intracrâniennes, tandis que l'hémorragie peut envahir le champ opératoire et rendre le geste plus difficile. Dès lors, la qualité de la prise en charge dépend non seulement de la technicité du geste chirurgical mais aussi, et parfois surtout, de la capacité de l'équipe à prendre des décisions rapides, à manipuler la physiologie de manière cohérente et à mobiliser des compétences non techniques (communication, coordination, leadership, conscience situationnelle).

Dans cette perspective, l'un des enjeux centraux est la construction d'un « modèle mental partagé » entre l'anesthésiste et le chirurgien. L'idée est que l'équipe doit converger vers une compréhension commune des objectifs prioritaires, des compromis acceptables et des actions à mener selon l'évolution de la situation. Lorsque les objectifs anesthésiques et chirurgicaux paraissent entrer en tension, par exemple entre le contrôle de l'hémorragie et la préservation de la perfusion cérébrale, l'absence d'alignement cognitif peut amplifier la désorganisation, retarder les décisions et aggraver le risque patient. La simulation immersive s'avère donc comme un moyen de préparer ces situations rares mais à haut impact, en permettant de répéter les prises de décision et les comportements d'équipe dans un cadre sécurisé.

- **Validité de la simulation en neuroanesthésie:**

Un corpus de preuves soutient l'intérêt pédagogique de la simulation, aussi bien pour l'acquisition de compétences techniques que pour la démonstration de performance ou l'entraînement aux compétences non techniques. En général, la satisfaction des participants est généralement élevée, ce qui s'explique par l'ancrage de la simulation dans l'apprentissage expérientiel : l'apprenant n'est pas seulement exposé à un contenu théorique, mais placé en situation, confronté à l'incertitude, à la pression temporelle et à la nécessité d'agir, puis invité à analyser son action. Cette articulation entre expérience et réflexion constitue le cœur du modèle décrit.

- **NeuroSim:**

Le NeuroSim est un programme de simulation à haute fidélité dédié à la neuroanesthésie, explicitement adossé au curriculum britannique de la spécialité tel que défini par le Royal College of Anaesthetists. NeuroSim s'intègre à un ensemble plus large de formations consacrées à la neuroanesthésie et à la neuro-réanimation, couvrant un spectre étendu de situations pertinentes pour un service de neurochirurgie. Toutefois, la particularité de NeuroSim réside dans son orientation « bloc opératoire » : il s'agit d'un entraînement en salle de simulation reproduisant l'environnement, les interactions et les contraintes d'une salle d'opération, avec pour objectif principal l'entraînement collectif à la gestion d'incidents critiques.

Bien que le public cible soit prioritairement constitué d'anesthésistes en formation, l'approche est intrinsèquement multidisciplinaire. Les scénarios peuvent être modulés pour générer des apprentissages utiles à l'ensemble des professionnels impliqués dans la prise en charge neurochirurgicale. Cette dimension est fondamentale : en neurochirurgie, la sécurité repose sur la synchronisation des actions et la cohérence des priorités. NeuroSim n'est donc pas seulement un lieu d'évaluation individuelle, mais un espace de mise en commun des raisonnements, des attentes et des stratégies, notamment autour de processus pathologiques fréquents et structurants comme le traumatisme crânien grave ou l'hémorragie sous-arachnoïdienne.

Sur le plan pédagogique, NeuroSim se distingue de l'enseignement traditionnel reposant sur les discussions « au bloc » et les cours magistraux. Le programme, conçu à partir de 2009 sur la base de discussions cliniques, mobilise les principes de l'apprentissage de l'adulte : immersion, engagement actif, contextualisation, et consolidation des connaissances par l'action. Chaque scénario vise à activer des connaissances de base (anatomie, physiologie, physiopathologie) et à entraîner leur mobilisation dans une situation évolutive, où l'apprenant doit diagnostiquer, hiérarchiser et intervenir en temps réel. La présence d'une équipe enseignante multidisciplinaire jouant les rôles de chirurgien, d'anesthésistes et d'infirmier·e·s renforce la plausibilité de l'expérience : les échanges, les injonctions et les contraintes reproduisent le climat cognitif et relationnel du bloc, ce qui favorise l'adhésion des participants et la pertinence des apprentissages.

- **Organisation d'un scénario**

L'organisation d'un scénario repose sur une structure relativement stable. Un pré-briefing présente l'histoire clinique et les informations initiales, afin d'établir un cadre commun. Le participant principal entre ensuite dans la situation simulée et reçoit une transmission, comme dans la réalité. Un principe important est souligné : l'apprenant n'est jamais invité à « jouer » un rôle qui n'est pas le sien. Il agit dans son périmètre habituel, avec ses compétences actuelles, ce qui maintient la crédibilité de la simulation et permet d'observer des raisonnements authentiques. L'incident critique survient ensuite et se déroule de manière dynamique, avec une évolution des paramètres selon une trame préécrite mais ajustable en temps réel. Enfin, le scénario se conclut par un débriefing, présenté comme l'étape la plus déterminante pour transformer l'expérience en apprentissage.

Sur le plan technique, les scénarios peuvent être conduits sur différents dispositifs de simulation, pourvu que ceux-ci permettent l'affichage et la manipulation des constantes, la modification d'éléments cliniques pertinents (par exemple la taille pupillaire) et la connexion du mannequin à un ventilateur. L'exemple le plus connu et le plus utilisé est le mannequin SimMan 3G. Quel que soit le mannequin utilisé, il est essentiel que ce dernier puisse reproduire une

dynamique physiologique cohérente. À cet égard, la simulation n'est pas seulement une « représentation », elle doit aussi être un système réactif : les actions thérapeutiques attendues doivent produire des effets plausibles, afin d'éviter que l'apprenant interprète une absence de réponse comme un problème diagnostique, alors que cela n'est pas l'objectif pédagogique.



Figure 55: Mannequin de simulation SimMan 3G.

Le pilotage en coulisse reste crucial. Un technicien reçoit des consignes précises sur l'évolution des paramètres et sur les réponses attendues aux actions des participants. Un formateur, souvent celui qui conduit le débriefing, observe depuis la régie, ajuste la progression en fonction de la conduite des apprenants et communique avec un membre de l'équipe présent dans la salle via oreillette. Cette organisation permet de préserver la trajectoire pédagogique du scénario, tout en conservant une part d'adaptation qui rend l'exercice vivant et évite l'effet « scénario figé ». Elle autorise aussi l'introduction d'éléments destinés à orienter l'attention vers les apprentissages visés, par exemple un signe neurologique nouveau, une contrainte chirurgicale explicite ou une information critique provenant d'un appel téléphonique.

- **Scénario exemple : Traumatisme crânien grave chez un patient polytraumatisé**

L'exemple central et reproductible est celui de la gestion d'un traumatisme crânien grave chez un patient polytraumatisé. Le scénario commence avec un patient déjà installé au bloc, abdomen ouvert, et une hémorragie active liée à une rate rompue. Le chirurgien peine à contrôler le saignement, tandis que l'apprenant, placé en position de responsabilité temporaire, doit évaluer et stabiliser la situation. Les constantes initiales (tachycardie et hypotension) s'aggravent progressivement, créant une pression temporelle réaliste. L'objectif pédagogique majeur est de faire apparaître un dilemme classique : augmenter la pression artérielle pour préserver la perfusion cérébrale peut aggraver l'hémorragie et compromettre le contrôle chirurgical, tandis que tolérer une hypotension prolongée peut accélérer la dégradation neurologique.

La dimension neurochirurgicale est introduite par l'apparition d'un signe inquiétant, notamment une mydriase nouvellement constatée, souvent révélatrice d'une souffrance intracrânienne évolutive. À ce moment, la gestion optimale ne dépend plus seulement de gestes isolés, mais d'une coordination fine entre anesthésie et chirurgie : discussion explicite des priorités, formulation d'un plan commun, et exploration de solutions permettant de concilier des exigences apparemment opposées. La stratégie "correcte" serait donc une approche où le contrôle de l'hémorragie est recherché de façon pragmatique (par exemple via un packing abdominal) afin de libérer ensuite la possibilité d'optimiser la perfusion cérébrale. Le scénario devient ainsi un support concret pour entraîner la négociation clinique, l'anticipation et la communication structurée, tout en ancrant ces comportements dans des mécanismes physiopathologiques précis.

- **Fidélité de la Simulation en neuroanesthésie :**

La fidélité est multifactorielle et dépend de ce que l'on cherche à entraîner. Pour l'anesthésie, un mannequin relié à un monitoring et capable de reproduire des variations physiologiques peut représenter une haute fidélité pour l'entraînement aux incidents critiques. Pour la chirurgie, des modèles cadavériques ou animaux sont souvent perçus comme plus fidèles pour l'apprentissage du geste, car la texture et la résistance des tissus sont déterminantes. Dans

le cadre de NeuroSim, la fidélité jugée essentielle est « fonctionnelle » et « sémantique » : ce qui compte, c'est que la situation se comporte comme elle devrait se comporter, de sorte que les décisions prises par l'apprenant reposent sur une interprétation valide. Si l'environnement répond de manière incohérente, l'apprenant risque d'être détourné des objectifs, la crédibilité du scénario s'effondre et l'adhésion émotionnelle diminue.

- **Debriefing**

Le débriefing reste le moteur principal de l'apprentissage. NeuroSim utilise une approche de type « debriefing with good judgement », qui vise à conjuguer exigence pédagogique et sécurité psychologique. Le débriefing est conçu comme un dialogue constructif où les participants sont respectés et invités à expliciter leur perception de la situation. Il débute généralement par un récit du participant principal, ce qui permet de mettre à jour ses hypothèses, ses émotions, ses priorisations et ses points de confusion. Le formateur peut alors relier les comportements observés aux objectifs d'apprentissage, en discutant les choix thérapeutiques, la communication, l'anticipation et l'utilisation de l'équipe. Une idée clé du texte est que le débriefing doit conserver une certaine flexibilité : un scénario peut révéler des « cadres mentaux » inattendus, et les mettre en lumière permet souvent un apprentissage profond, même si cela dépasse partiellement les objectifs préétablis. L'enjeu n'est donc pas seulement de corriger des erreurs, mais de comprendre pourquoi elles ont eu lieu, en reliant décisions et représentations cognitives.

- **Conclusion :**

La simulation haute fidélité en neuroanesthésie est une méthode particulièrement adaptée aux exigences de la neurochirurgie moderne, où les incidents critiques associent urgence décisionnelle, complexité physiologique et nécessité d'un travail d'équipe parfaitement coordonné. NeuroSim illustre une approche où la valeur pédagogique provient moins du réalisme superficiel que de la cohérence fonctionnelle des scénarios, du rôle structurant de l'équipe enseignante et de la qualité du débriefing. En permettant de répéter des situations à haut risque dans un environnement sécurisé, la simulation contribue à aligner les modèles mentaux, à

consolider les connaissances applicatives et à renforcer les compétences non techniques, avec une finalité explicite : améliorer la performance collective au bloc et, in fine, la sécurité des patients.

Tableau II : Scénarios standards de Neuroanesthésie.

Tight dura + venous sinus bleed	Venous air embolus
TBI in setting of polytrauma	Prone post fossa cardiac arrest
Recovery room deteriorating GCS	
ACOMM or PCOMM aneurysm clip	Unstable C-spine for imaging in a live patient model

Soins intensifs ou Neuroréanimation

- **La simulation en réanimation générale comme socle de la neuro-réanimation**

- **Introduction :**

La simulation en médecine de soins critiques s'est développée rapidement avec une finalité claire : renforcer la formation continue des professionnels et sécuriser la prise en charge de patients instables, exposés à des risques majeurs. Les réanimateurs doivent maîtriser à la fois des gestes techniques (intubation, pose de voie veineuse centrale, échographie au lit du malade) et des conduites complexes reposant sur des algorithmes décisionnels, souvent sous contrainte temporelle. Dans ce cadre, la simulation constitue un outil structurant, car elle permet d'entraîner simultanément les compétences techniques et non techniques dans un environnement contrôlé. Elle favorise l'acquisition de procédures, l'entraînement à la gestion de crise, la coordination d'équipe et la répétition de scénarios critiques sans exposition directe du patient au risque d'une erreur d'apprentissage. La valeur pédagogique des scénarios est indéniable pour enseigner la communication, non seulement au sein d'équipes multidisciplinaires, mais aussi dans la relation avec les patients et leurs proches, ce qui est central en soins critiques où les décisions engagent souvent le pronostic vital et fonctionnel.

➤ La neuroréanimation comme surspécialité :

Dans cette perspective, la neuro-réanimation se présente comme une surspécialité relativement récente, centrée sur la prise en charge de pathologies neurologiques aiguës complexes, sur la gestion médicale postopératoire des patients neurochirurgicaux et sur les manifestations neurologiques de maladies systémiques. L'argument fondamental est la gravité propre aux atteintes du système nerveux : ces patients peuvent se détériorer brutalement, et la progression de la lésion neurologique entraîne des conséquences souvent définitives. C'est précisément cette combinaison de gravité, de rapidité évolutive et d'irréversibilité potentielle qui justifie une surveillance intensive et une expertise spécifique. Il existe de plus en plus d'unités de neuro-réanimation encadrées par des médecins formés à la surspécialité est associée, dans la littérature, à une baisse de la mortalité hospitalière et à une réduction de la durée de séjour. Des domaines de compétence sont propres à la neuro-réanimation : la gestion de la pression intracrânienne, l'optimisation hémodynamique du débit sanguin cérébral, et l'usage d'outils avancés de neuromonitoring tels que l'électroencéphalographie continue, l'oxygénation tissulaire cérébrale ou encore la microdialyse. Les neuro-intensivistes proviennent de formations initiales diverses (neurochirurgie, neurologie, anesthésie-réanimation, médecine interne), mais leur point commun est une approche intégrative des interactions entre cerveau et autres organes, visant à produire un plan de soins unifié qui tienne compte des objectifs neurophysiologiques tout en gérant les contraintes systémiques. Les pathologies fréquemment rencontrées sont l'AVC ischémique, les hémorragies intracrâniennes et sous-arachnoïdiennes, le traumatisme crânien, et l'état de mal épileptique.

➤ Enjeu de la simulation en neuroréanimation :

La simulation est particulièrement pertinente en neuro-réanimation. D'une part, les urgences neurologiques peuvent survenir dans des lieux très variés, du terrain préhospitalier au service d'urgence, du scanner à la salle d'intervention endovasculaire, du bloc opératoire à l'unité de soins intensifs. Or, les premiers intervenants et de nombreux soignants non spécialisés

disposent souvent d'une exposition limitée à ces situations, ce qui fragilise la reconnaissance précoce, la hiérarchisation des priorités et l'engagement rapide des traitements. D'autre part, ces urgences neurologiques sont réputées difficiles à enseigner et à apprendre : elles exigent des examens ciblés, une interprétation rapide d'informations multiples, et une compréhension fine de la physiopathologie, alors même que l'état du patient évolue rapidement. La méconnaissance ou la sous-estimation d'une neuropathologie aiguë peut conduire à des retards de traitement, à des séquelles neurologiques graves, et à une augmentation de la morbidité et de la mortalité.

➤ Time is Brain

Cette logique est résumée par le principe « Time is brain ». Dans les premières heures d'une urgence neurologique, l'objectif prioritaire est d'éviter ou de réduire l'agression secondaire, car c'est elle qui conditionne largement le devenir fonctionnel. D'où l'intérêt majeur d'un diagnostic rapide, d'une « réanimation neurologique » précoce et d'un triage efficace. La simulation, en ce sens, n'est pas seulement un outil d'apprentissage de gestes ; elle devient un levier organisationnel visant à réduire la perte de temps, limiter les erreurs et améliorer la collaboration interprofessionnelle par une communication concise et structurée. De ce fait provient la standardisation croissante des parcours et des protocoles, notamment en AVC ischémique avec les stratégies endovasculaires, qui imposent une coordination rapide entre équipes. De même, des recommandations récentes (par exemple sur les objectifs tensionnels et la réversion des troubles de la coagulation dans l'hémorragie intracérébrale spontanée) nécessitent une application précoce ; ces décisions peuvent être entraînées de manière efficace par des scénarios simulés.

➤ Apprentissage basé sur la simulation

La simulation prend tout son éloge dans le contexte de l'enseignement médical contemporain. Les restrictions du temps de travail en formation diminuent l'exposition clinique réelle, et plusieurs spécialités ont déjà intégré la simulation à leurs curricula. La neuro-réanimation fait désormais l'objet d'attentes explicites dans les parcours de formation, avec l'apparition de jalons obligatoires (milestones) en neurologie et en réanimation. Cependant, la formation des

réanimateurs est courte et dense, et l'exposition répétée à toutes les pathologies n'est pas garantie, en particulier quand les patients neurologiques sont principalement gérés par des unités spécialisées. De ce fait, des spécialistes de réanimation générale peuvent se retrouver peu confiants face à une crise neurologique aiguë. La simulation est donc proposée comme un moyen de réduire cette incertitude : elle offrirait un cadre pour appliquer des prises en charge fondées sur les preuves, en tenant compte des objectifs neurophysiologiques (stratégies ventilatoires, hémodynamique, contrôle glycémique, osmothérapie, coordination avec les gestes neurochirurgicaux), et en entraînant des scénarios relativement rares mais à haut risque.

➤ Simulation haute fidélité en neuroréanimation

Sur le plan pratique, l'utilisation de mannequins haute fidélité est primordiale. Ceux-ci permettent de dérouler des scénarios préprogrammés, modulables en temps réel par un instructeur. Les paramètres manipulables incluent les constantes hémodynamiques et respiratoires, la température, l'EtCO₂, et même des données neurophysiologiques telles que la pression intracrânienne. Certains signes cliniques peuvent également être mimés, comme la réactivité pupillaire ou des crises convulsives. Néanmoins, des obstacles propres à la neuro-réanimation existent : la simulation reproduit difficilement certains déficits focaux (par exemple une asymétrie faciale), que ni les mannequins ni même les acteurs ne peuvent toujours imiter de manière convaincante. En contrepartie, un avantage majeur est la facilité d'intégrer au scénario les données qui orientent réellement la décision en neuro-réanimation : EEG, Doppler transcrânien, imagerie (CT, IRM), et indicateurs comme la pression intracrânienne et la pression de perfusion cérébrale. Autrement dit, même si l'examen neurologique « visible » est imparfaitement reproduit, l'environnement décisionnel, lui, peut être rendu très réaliste.



Figure 56 : Simulation haute fidélité de la réactivité pupillaire

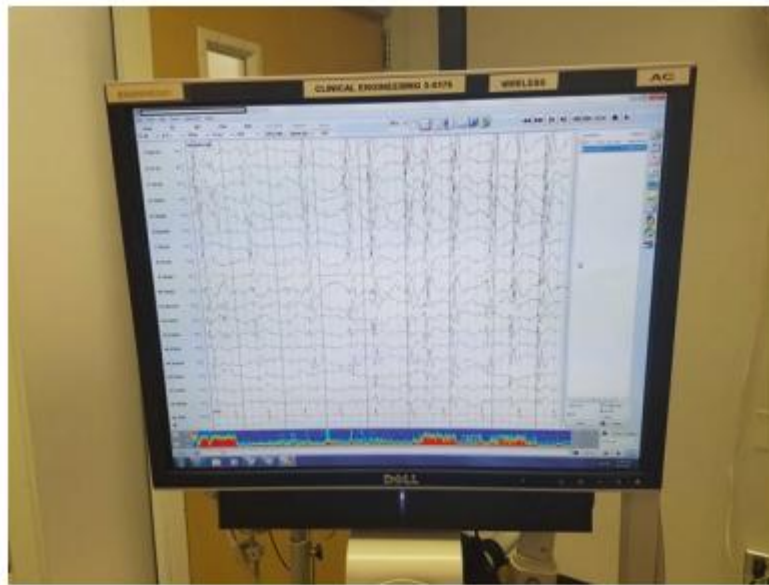


Figure 57 : Tracé d'électroencéphalographie

➤ **Preuves dans la littérature médicale :**

Les preuves et les revues restent limitées. Plusieurs axes sont néanmoins présentés. Des modèles de simulation haute fidélité ont été décrits pour des situations telles que le vasospasme cérébral aigu, le traumatisme crânien fermé et le choc spinal, avec intégration de tracés en temps réel de pression intracrânienne et de perfusion cérébrale ; l'idée est que la simulation, en environnement protégé, permet de consolider la connaissance théorique en comportements cliniques opérationnels.

Concernant les compétences procédurales, Mussachio et al. sont l'un des premiers chercheurs ayant investigué le bénéfice potentiel de l'enseignement basé sur la simulation. Ces chercheurs ont développé avec succès des modèles avancés de simulation haute fidélité destinés à l'entraînement en unité de soins neurocritiques, incluant des scénarios de vasospasme cérébral aigu, de traumatisme crânien fermé et de choc spinal. Dans ces scénarios, un mannequin haute fidélité est utilisé, associé à des tracés en temps réel de la pression intracrânienne et de la pression de perfusion cérébrale. Le dispositif est également équipé d'un boîtier vocal permettant au formateur (proctor) de parler au nom du patient simulé. Le groupe avance que, si les cours magistraux traditionnels peuvent fournir une base solide de connaissances, la simulation, dans un environnement protégé et sans risque, permet de consolider ces connaissances de manière indispensable pour garantir des interventions sûres et efficaces. Une étude de Barsuk et al. sur la ponction lombaire avec mannequins « part-task » rapporte une amélioration des performances chez des résidents en neurologie par rapport à l'apprentissage clinique traditionnel, y compris chez des apprenants ayant déjà une expérience préalable, ce qui suggère un bénéfice additionnel de la simulation en termes de sécurité et de confiance

L'équipe Papangelou et al. a développé le scénario « brain code », centré sur l'engagement rapide de mesures visant à traiter une menace d'engagement cérébral ou une hypertension intracrânienne réfractaire. Ces scénarios s'apparentent à une logique d'algorithmes, comparable à l'ACLS, et se prêtent bien à la simulation car ils ne reposent pas nécessairement sur des déficits focaux complexes, mais sur des signes accessibles (comme l'asymétrie pupillaire) et sur une priorisation de tâches : ABC, positionnement, hyperventilation transitoire, osmothérapie, imagerie, monitoring de la PIC. L'évaluation inclut des checklists et des mesures de « temps jusqu'à l'intervention ». Le texte reste prudent dans l'interprétation : l'amélioration observée à quelques mois ne peut être attribuée exclusivement à la simulation, car les apprenants continuent à progresser via la clinique et les enseignements parallèles. Il n'en demeure pas moins que l'approche est jugée potentiellement bénéfique, malgré son caractère exigeant en ressources.

Tableau III : : Checklist des objectifs d'un scénario de simulation au sujet de l'état de mal épileptique

Objectives	Actions	Pitfalls
ABCs	Evaluate and manage airway and provide supplemental oxygen Monitor vital signs Obtain code status Assess and support ventilation Intubation if necessary Finger stick blood glucose Check or establish vascular access Fluid resuscitation Note time of onset and length of seizure	-Not recognizing need to protect airway with advanced airway -Cervical collar requiring in-line manual stabilization -Failure to obtain IV access -Invasive hemodynamic monitoring if necessary
Control seizures	By 5 min: Emergent initial therapy with benzodiazepine Appropriate choice of medication and dosing Diagnose SE if > 5 min in duration: Urgent control with antiepileptic drug therapy Administer intravenous antiepileptic drugs based on guidelines [93] Diagnose refractory SE: Start continuous infusion, e.g., propofol, pentobarbital, midazolam	-Delay in management and treatment -Incorrect choice of medication -Unawareness of side effects of medications (e.g., hypotension, PR prolongation on EKG, propofol infusion syndrome, arrhythmias, etc.)
Perform seizure workup and determine etiology of seizure	Obtain or review past medical history and perform targeted history (e.g., seizure or alcohol abuse history) Neurological exam Request appropriate labs and imaging studies: Stat labs – Blood glucose, toxicology screening and antiepileptic drug levels, complete blood count, basic metabolic panel, calcium (total and ionized), magnesium CT head, continuous EEG Depending on clinical setting – Request: Blood cultures, urinalysis, cerebrospinal fluid analysis, MRI brain	-Not sending toxicology screen and glucose -Pearl exam: Gold standard for diagnosis is continuous EEG -Failure to obtain imaging -Lumbar puncture only after neuroimaging to rule out potential cerebral herniation
Consider nonconvulsive SE if patient comatose and control electrographic seizure activity	Continuous electroencephalography	-Not recognizing and failing to treat nonconvulsive SE -Not escalating medical management in setting of refractory SE
Management of medication side effects, knowledge of treatment protocol with appropriate intravenous antiepileptic drugs (per current guidelines)	Knowledge of pharmacokinetics and pharmacodynamics Knowledge of SE treatment protocol Recognize and manage antiepileptic medication side effects	-Inappropriate medication selection for treatment -Titrate to goal – Burst suppression on EEG
Communication	Call for help Communicate with primary team Update family in professional manner	-Failure to call for help -Not addressing family's questions and concerns

D'autres exemples concernent l'AVC ischémique aigu et l'état de mal épileptique. Pour l'AVC, l'équipe Garside et al. et pour l'état de mal épileptique, l'équipe Ermak et al. ont mis en disposition des scénarios interactifs combinés à un enseignement didactique qui ont été utilisés pour entraîner des équipes d'urgence à la reconnaissance et aux premières mesures, en intégrant des vidéos de patients réels afin de contourner les limites des mannequins sur les déficits focaux ; les apprenants rapportent une meilleure confiance, même si l'impact durable sur le comportement clinique reste à documenter. Pour l'enseignement aux étudiants, des scénarios programmés sur mannequin avec réponses pupillaires et constantes spécifiques, complétés par un examen neurologique formalisé sur demande, ont permis un apprentissage centré sur la démarche diagnostique et la conduite initiale plutôt que sur la localisation lésionnelle fine. L'usage de la vidéo comme support de débriefing et d'auto-évaluation est présenté comme un outil d'individualisation pédagogique, permettant de cibler les lacunes repérées pendant le scénario.

L'équipe Smith et al., dans le cadre d'un projet d'amélioration de la qualité au Royaume-Uni sur la prise en charge des traumatisés crâniens en réanimation générale, suggèrent qu'un entraînement répété par simulation auprès des équipes infirmières a amélioré les connaissances, les compétences et la confiance, et que ceci pourrait se traduire par de meilleurs résultats à coût réduit.

Un autre champ important est celui de la détermination de la mort encéphalique. MacDougall et al. justifient l'intérêt de la simulation par la variabilité interinstitutionnelle des pratiques et par les difficultés de documentation. Des programmes combinant cours et simulation ont été mis en place pour former des médecins de spécialités diverses à l'application des recommandations, en intégrant des « pièges » (hypothermie, sédation, situations incompatibles) et en évaluant la performance via des checklists. Les résultats rapportent des gains de score et une amélioration de la confiance, tout en soulignant que les contraintes de ressources humaines et matérielles sont un frein, pouvant être atténué par des partenariats inter-établissements.

➤ Programmes de formation en urgences neurologiques et neurochirurgicales

Au-delà des scénarios institutionnels, plusieurs formations sont disponibles, notamment l'ENLS (Emergency Neurological Life Support) porté par la Neurocritical Care Society. Ce programme propose des protocoles, checklists et points décisionnels destinés à standardiser la prise en charge initiale d'un ensemble d'urgences neurologiques et à améliorer la communication. Il peut être suivi en présentiel ou en ligne et constitue un cadre utile pour concevoir des scénarios de simulation, même si ses recommandations sont décrites comme reposant largement sur l'expertise en l'absence de données robustes pour certaines situations. D'autres offres incluent des modules en ligne sur la mort encéphalique (accessibles mais sans pratique) et des ateliers présentiels annuels proposant une journée complète de stations de simulation, de cours et d'études de cas, avec retour individualisé, mais à coût élevé.

Tableau IV: Scénarii possibles pour simulation en neuroréanimation.

Traumatic brain injury
Traumatic spine injury and spinal cord compression
Subarachnoid hemorrhage and acute cerebral vasospasm
Intracranial hypertension and herniation (brain code)
Coma
Brain death and organ donor management
Status epilepticus – Convulsive vs nonconvulsive
Acute nontraumatic weakness
Meningitis/encephalitis
Acute ischemic stroke
Intracerebral hemorrhage
Resuscitation in shock states

➤ Implémentation d'un curriculum de simulation

Un scénario pertinent doit s'appuyer sur des objectifs pédagogiques explicités, des « pearls and pitfalls » de l'examen et de la prise en charge, et des critères mesurables. La simulation doit permettre de travailler la décision clinique, mais aussi le leadership, la conscience situationnelle et la dynamique d'équipe, en intégrant au besoin des tâches techniques et des tâches de communication difficiles, comme l'annonce de mauvaises nouvelles ou les discussions de limitation/arrêt des thérapeutiques. Ces échanges sont émotionnellement chargés, fréquents en soins critiques, et insuffisamment préparés chez de nombreux apprenants ; la simulation offre alors un espace protégé pour s'exercer. Pour renforcer le réalisme malgré les limites des mannequins, des adjoints pédagogiques peuvent être mobilisés : acteurs jouant un proche, vidéos d'examen neurologique, données biologiques, imagerie, EEG, Doppler, et paramètres neurophysiologiques. L'objectif final est clair : former des équipes issues de disciplines variées autour d'un but commun, fournir une prise en charge plus sûre, plus rapide et plus efficace, et limiter l'agression secondaire.

➤ Conclusion :

La simulation en neuro-réanimation doit viser un public large, au-delà des seuls spécialistes, parce que les urgences neurologiques traversent l'ensemble du système de soins. Malgré les limites technologiques actuelles, l'entraînement par simulation est présenté comme susceptible d'améliorer non seulement des compétences techniques, mais aussi des variables essentielles à la qualité des soins tels que la confiance, la base de connaissances, et surtout la communication au sein des équipes et avec les familles. Le texte identifie des scénarios prioritaires (AVC, état de mal épileptique, traumatisme crânien, mort encéphalique) et souligne qu'une implémentation est possible même avec des ressources limitées, notamment via des collaborations interinstitutionnelles. Il conclut toutefois sur une exigence de recherche : la neuro-réanimation étant un champ encore jeune en simulation, il reste nécessaire de développer des mesures d'efficacité plus solides et de poursuivre l'évaluation de l'impact réel sur la formation et sur les résultats des patients.

VIII. Adapter la simulation en neurochirurgie à un programme de formation d'un pays à revenu faible ou intermédiaire (PRFI)

1. Implémentation : coûts, faisabilité et PRFI

1.1. Barrières et leviers en PRFI

Dans les pays à revenu faible et intermédiaire (PRFI), l'implémentation de programmes de simulation en neurochirurgie se heurte à un ensemble de contraintes structurelles et économiques. Les principaux freins identifiés concernent les budgets d'acquisition et de maintenance des plateformes de réalité virtuelle ou haptique, le coût des licences logicielles et des consommables, ainsi que les exigences en termes d'infrastructure (qualité de l'alimentation électrique, stabilité de la connectivité). S'y ajoutent des chaînes d'approvisionnement fragiles, susceptibles d'interrompre la disponibilité du matériel ou des pièces de rechange, et une faible disponibilité de formateurs spécifiquement formés à la simulation.

Sur le plan scientifique, plusieurs travaux récents soulignent une sous-représentation majeure des PRFI dans la littérature consacrée à la simulation neurochirurgicale, avec des disparités d'adoption marquées en défaveur de ces contextes. Cette invisibilité relative limite la production de modèles explicitement conçus pour ces environnements.

En miroir, plusieurs leviers peuvent être mobilisés. Le développement de l'impression 3D locale permet la fabrication de modèles anatomiques dédiés (phantoms pour VCE/DVE, colonnes rachidiennes, anévrismes intracrâniens), à partir de fichiers STL open-source ou générés localement. Des systèmes hybrides combinant simulateurs physiques et couches de réalité augmentée (AR) offrent un compromis intéressant entre coût, réalisme et flexibilité. Les approches open-source (plans de simulateurs, bibliothèques de modèles 3D) réduisent les barrières d'entrée technologiques et financières. Enfin, la télésimulation et le télémentorat constituent des solutions prometteuses pour apporter une expertise pédagogique à distance sans exiger la présence physique permanente de formateurs spécialisés.

1.2. Modèles bas coût et rapport coût-utilité

Plusieurs travaux décrivent des simulateurs bas coût présentant un rapport coût-utilité favorable. Parmi eux, on peut citer un simulateur de VCE low-cost dont le coût direct, hors imprimante 3D, est estimé à environ 123 USD, des dispositifs de type SpineBox en open-access pour l'apprentissage de la pose de vis pédiculaires, ou encore des modèles de DVE patient-spécifiques produits par impression et moulage locaux, avec des coûts d'unité compatibles avec une utilisation répétée.

La littérature sur l'impression 3D en éducation neurochirurgicale met en évidence un maillage géographique très inégal : la majorité des initiatives sont concentrées dans des centres à hauts revenus, tandis que les PRFI apparaissent surtout comme bénéficiaires potentiels, et rarement comme producteurs de modèles. Dans ce contexte, la fabrication locale est proposée comme une réponse à la fois aux contraintes de coût et aux difficultés logistiques liées à l'importation de matériel spécialisé.

Les revues publiées sur la période 2024-2025 confirment une accélération de l'adoption de la 3D dans de multiples spécialités chirurgicales, ce qui renforce l'intérêt de stratégies mutualisées (plateformes partagées d'impression 3D, bibliothèques de modèles ouvertes) et suggère un potentiel de diffusion rapide si des investissements initiaux ciblés sont consentis.

1.3. Organisation et durabilité

Au-delà de la technologie, la durabilité des programmes de simulation dépend d'abord de leur organisation pédagogique et institutionnelle. Il apparaît essentiel de formaliser un curriculum explicite, en alignant :

- Des objectifs pédagogiques clairement définis,
- Des tâches simulées correspondant à ces objectifs,
- Des métriques d'évaluation appropriées (scores, temps, erreurs, trajectoires, nts),
- Des seuils de performance qui conditionnent la progression de l'apprenant.

La formation des formateurs constitue un second pilier : sans un noyau de cliniciens et pédagogues formés aux principes de la simulation (briefing, débriefing, feedback, sécurité psychologique), même l'équipement le plus avancé est sous-utilisé ou mal exploité.

Sur le plan de l'implémentation, il est recommandé de suivre de manière systématique des indicateurs dédiés : acceptabilité (perception par les apprenants et les formateurs), adoption (taux d'utilisation), faisabilité (contraintes logistiques, disponibilité des créneaux), coûts (investissement et fonctionnement), et pérennité (maintien de l'activité au-delà de la phase pilote). Le cadre de Proctor et al. pour les résultats d'implémentation, le modèle RE-AIM (Reach, Effectiveness, Adoption, Implementation, Maintenance) et la checklist TIDieR pour la description des interventions offrent des repères utiles pour structurer ce suivi et documenter précisément le programme.

La mutualisation des ressources entre établissements (partage d'une salle de simulation, d'une imprimante 3D, d'un parc de simulateurs ou d'un pool de formateurs) apparaît comme une stratégie particulièrement pertinente dans les PRFI, où les volumes d'activité et les budgets individuels de chaque centre peuvent être limités.

Enfin, des données récentes issues d'autres domaines neurochirurgicaux en PRFI (par exemple en neuro-oncologie ou en organisation des soins) mettent en évidence des barrières systémiques très similaires : pénurie de ressources humaines, financement instable, faiblesse de l'infrastructure et absence de culture institutionnelle de l'évaluation. Ces convergences renforcent l'idée que la mise en place de programmes de simulation viables ne peut se penser isolément, mais doit s'intégrer dans une approche plus globale de renforcement des systèmes de formation et de soins.

L'objectif est de transformer un ensemble de modalités (VR/AR/MR, 3D, simulateurs physiques, télésimulation) en un **dispositif frugal, robuste et pérenne**, aligné sur les priorités cliniques locales, lesté par des **indicateurs mesurables** et soutenu par une **gouvernance légère**. La logique ci-dessous conjugue **exigence académique** (standards d'évaluation, qualité) et **réalisme logistique** (coûts, maintenance, RH).

2. Principes directeurs pour un contexte PRFI

2.1. Frugalité intelligente (do more with less).

Privilégier des technologies robustes, modulaires et réutilisables (impression 3D FDM, simulateurs physiques « maison »), et mutualiser les actifs coûteux (plateforme VR unique à l'échelle de l'hôpital ou du réseau).

2.2. Haute valeur clinique.

Sélectionner d'abord les gestes à fort impact (ventriculostomie/ETV, dérivations, vis pédiculaires, décompression lombaire) et réserver les modules complexes après consolidation du socle.

2.3. Maîtrise documentée.

Curricula par seuils de maîtrise (OSATS spécifiques + 0 erreur critique + temps $\leq$ seuil + NTS), rétention (4-8 semaines) et traçabilité vidéo.

2.4. Facteurs humains sans surcoût.

Intégrer NOTSS/NOTECHS et débriefing PEARLS à chaque séance, avec des scénarios « sentinelles » (événements inattendus) même sur fantômes low-cost.

2.5. Implémentation mesurée.

Piloter par Proctor/RE-AIM : adoption (sessions/mois), pénétration (≥ 70 % exposés/semestre), fidélité (≥ 80 % items), pérennité (programme actif à 12 mois).

2.6. Maintenance réaliste.

SLA interne (délai cible de réparation ≤ 72 h), stock minimal de pièces/consommables 3-6 mois, choix de matériaux locaux.

IX. Projet d'un laboratoire de simulation en neurochirurgie– FMPM

1. Introduction

Ce chapitre vise à traduire les résultats de recherche et leur interprétation en un ensemble d'actions concrètes pour :

- Concevoir un curriculum de simulation en neurochirurgie à la FMPM ;
- L'implanter et le pérenniser dans un contexte à ressources limitées (pays à revenu faible ou intermédiaire, PRFI) ;
- Assurer le suivi de son efficacité, de ses coûts et de son équité d'accès.

Il s'adresse prioritairement aux responsables de formation, chefs de service, décideurs institutionnels et équipes pédagogiques impliqués dans la formation des neurochirurgiens.

2. Cadre théorique et principes directeurs

La démarche proposée s'inscrit dans une logique d'éducation médicale fondée sur les compétences (EMFC) et de Mastery Learning, où la progression de l'apprenant n'est pas conditionnée par le temps passé, mais par l'atteinte de seuils de performance prédéfinis.

a. EMFC & Mastery Learning

L'enseignement est structuré autour de performances attendues, définies a priori selon une approche PBP (Procedure-Based Proficiency). L'apprenant progresse de module en module uniquement lorsqu'il atteint le niveau de maîtrise requis, mesuré par des scores objectifs (par exemple, des seuils OSATS ou des critères anatomiques/techniques explicites). La durée de formation est donc variable, mais le niveau de compétence final est homogène

b. Alignement fonctionnel de la fidélité

La sélection des outils de simulation (impression 3D, réalité virtuelle – VR, réalité augmentée – AR, modèles cadavériques) est guidée par le principe d'alignement fonctionnel : il s'agit de choisir la forme de fidélité (anatomique, haptique, procédurale, cognitive) qui sert le

mieux l'objectif pédagogique au meilleur rapport coût-utilité. Dans un PRFI, cela implique souvent de privilégier des modèles 3D bas coût pour les gestes fondamentaux, et de réserver la VR/AR ou les cadavres à des tâches à forte valeur ajoutée (trajectoires complexes, forces, fluences, etc.).

c. Évaluation intégrée, technique et non technique

L'évaluation est conçue comme un composant structurant du curriculum, et non comme un ajout terminal. Elle comprend :

- Des dimensions techniques : OSATS génériques et spécifiques, indicateurs de performance instrumentés (API) tels que temps, erreurs, trajectoires, forces (en VR) ;
- Des dimensions non techniques : NOTSS (Non-Technical Skills for Surgeons), NOTECHS et grilles CRM (Crisis Resource Management) ;
- L'évaluation de la charge de travail perçue via le NASA-TLX, permettant d'ajuster la difficulté pour éviter la surcharge et favoriser un apprentissage optimal.

d. Débriefing structuré et apprentissage réflexif

Le débriefing constitue un pilier central de l'efficacité de la simulation. L'utilisation systématique de cadres structurés, notamment PEARLS, favorise la réflexion guidée, la verbalisation des stratégies cognitives et le transfert vers la pratique réelle. Le débriefing ne se limite pas à corriger les gestes ; il vise également les comportements d'équipe, la communication et la prise de décision.

e. Implémentation pragmatique en contexte PRFI

- L'implantation dans un milieu à ressources contraintes repose sur :
- La fabrication locale des simulateurs (impression 3D, bricolage pédagogique) ;
- La mutualisation inter-établissements des équipements coûteux (VR, cadavérique, microscopes) ; la télésimulation pour élargir la portée du dispositif ;
- L'utilisation de cadres d'implantation tels que Proctor et RE-AIM pour structurer le suivi.

f. Équité et durabilité

L'accès doit être assuré de manière équitable en termes de territoire, genre et niveau de formation. La durabilité repose sur :

- La transparence des coûts (CAPEX/OPEX)
- Des contrats de maintenance planifiés ;
- Un suivi de la rétention des compétences et de la pérennité du programme sur 12-24 mois.

3. Recommandations stratégiques à plusieurs niveaux

3.1. Gouvernance et organisation

Une inscription explicite de la simulation dans le projet d'établissement est recommandée. Cela implique:

- Un mandat institutionnel formalisé (objectifs, indicateurs, budget dédié) ;
- Une matrice RACI (Responsible, Accountable, Consulted, Informed) pour chaque module :
 - Exemple (DVE/VCE):
 - Responsable (R): Référent simulation
 - Approbateur (A) : Chef de service, Doyen
 - Consultés (C) : cadre de bloc, anesthésie, ingénierie pédagogique
 - Informés (I) : direction, cellule qualité
- Des matrices analogues sont définies pour les modules Rachis, Base du crâne, Endovasculaire et Microneurochirurgie, avec des référents cliniques dédiés (rachis, ORL-neuro, neuroradiologie, microchirurgie).
- Un cycle qualité trimestriel, incluant :

- Revue des scores OSATS/NOTSS et des indicateurs API ;
- Analyse de la fidélité ($\geq 80\%$ des items couverts) ;
- Suivi des coûts (CAPEX/OPEX) ;
- Taux de couverture de la population cible ;
- Satisfaction des apprenants et formateurs.

3.2. Design pédagogique

Les objectifs pédagogiques sont déclinés par procédure (DVE/VCE, rachis, base du crâne, endovasculaire, microneurochirurgie), avec des critères de performance mesurables.

- Progression des modalités : Les apprenants passent typiquement :

1. De modèles 3D bas coût (phantoms imprimés localement) ;
2. A la VR/AR avec API riches ;
3. A des modèles cadavériques (lorsqu'ils sont disponibles) ;
4. A des simulations patient-spécifiques pour les cas complexes.

Séance type

1. Briefing (5–7 min) : objectifs, critères de succès, items de sécurité (time-out simulé), rôles.
2. Simulation (30–60 min) : scénario selon niveau ; mesures actives (OSATS spécifique, métriques VR, temps, erreurs).
3. Évaluation sommative (5–10 min) : cotation OSATS/NOTSS ; export des métriques.
4. Débriefing PEARLS (10–15 min) : partir des observables, relier aux principes, plan d'action individuel (objectifs SMART).
5. Traçabilité : enregistrement vidéo (si prévu), saisie portefeuille de compétences.
6. Rétention : Un re-test systématique à 4–8 semaines est recommandé. En cas de baisse significative des performances, des séances de “booster training” ciblées sont proposées.

3.3. Évaluation et métriques

- Technique :
 - OSATS global + OSATS spécifique par procédure ;
 - Indicateurs API instrumentés (temps, erreurs, trajectoires, forces en VR).
- Non technique :
 - NOTSS pour les compétences individuelles de non-technique ;
 - NOTECHS pour l'évaluation en équipe ;
 - Grilles CRM (ex. Ottawa GRS) pour la gestion de crises.
- Fiabilité :

La qualité de mesure est évaluée via le coefficient de corrélation intraclasse (CCI), modèle à deux voies, accord absolu, moyenne des notateurs. Un CCI $\geq 0,75$ est visé. Une calibration de 10-15 minutes par visionnage de vidéos ancrées est réalisée avant chaque session d'évaluation.
- Charge de travail : Le NASA-TLX est utilisé pour ajuster la difficulté et prévenir la surcharge cognitive et psychologique.

3.4. Choix technico-économiques

- DVE/VCE & Rachis Recommandation de recourir à l'impression 3D locale (fichiers STL open-source, pièces remplaçables), afin de disposer de simulateurs réutilisables et de consommables à faible coût.
- Endovasculaire

Une plateforme VR mutualisée au niveau régional est privilégiée pour accéder à des API riches (fluence RX, injection de contraste, forces, trajectoires). Elle est complétée par des bancs physiques locaux pour les gestes de base (cathétérisme, manipulation de guides).

- Base du crâne Utilisation de modèles 3D patient-spécifiques pour l'anatomie fine ; modèles hybrides (3D + AR) pour la planification des trajectoires ; recours aux pièces cadavériques lorsque disponibles pour le retour haptique.
- Microneurochirurgie
Combinaison de sessions VR haptique mutualisées (annuelles) et de bancs de micro-sutures (par ex. sur aile de poulet, tubes vasculaires) pour travailler la délicatesse gestuelle.

3.5. Ressources humaines et développement des formateurs

- Programme Train-the-Trainer (deux cohortes/an, demi-journée chacune), centré sur :
 - L'utilisation standardisée des grilles OSATS/NOTSS ;
 - La conduite de débriefings structurés (PEARLS) ;
 - La création d'un climat de sécurité psychologique pour les apprenants.
- Incitations :
 - Reconnaissance dans la charge pédagogique officielle ;
 - attestations de participation;
 - Valorisation académique (communications, posters, publications).
- Continuité :
Chaque module est porté par un binôme clinicien-pédagogue, avec un plan de relève pour prévenir les effets du turn-over.

3.6. Données, traçabilité et science ouverte

- Création d'un dépôt interne (tableur sécurisé ou REDCap) pour les scores anonymisés et un journal de maintenance (pannes, pièces remplacées, dates, coûts).
- Élaboration d'un dictionnaire de données (variables, unités, règles de calcul, tailles d'effet, DMCP).

- Partage des modèles 3D et des fiches TIDieR sous licence permissive (par ex. CC BY-NC) au sein d'un réseau régional, afin de réduire les coûts et de favoriser la diffusion.

3.7. Éthique et équité

- Recueil de consentements écrits pour l'enregistrement vidéo et les évaluations ; procédures d'anonymisation rigoureuses.
- Suivi de l'équité d'accès par des quotas internes (genre, sites périphériques), des créneaux dédiés et des indicateurs de portée (Reach).

4. Architecture curriculaire type sur 12 mois

4.1. Modules et séquençage

- T1 - DVE/VCE
- Trois séances de 90 minutes. Seuil OSATS-DVE $\geq 16/20$, avec validation des étapes critiques. Introduction des NOTSS de base.
- T2 - Rachis (vis pédiculaires)
- Trois séances de 90 minutes, avec critère anatomique de Gertzbein $\leq B$. Intégration d'un scénario CRM de gestion d'hémorragie simulée.
- T3 - Base du crâne Deux séances 3D (90 minutes) + une séance hybride/AR (90 minutes), avec débriefings renforcés centrés sur les trajectoires et la préservation des structures critiques.
- T4 - Endovasculaire et Microneurochirurgie Deux séances VR endovasculaire mutualisées + deux séances sur banc local ; entraînement microchirurgical sur banc de sutures ; évaluation sommative + re-test de rétention.

4.2. Volume horaire et évaluation

- Volume minimal recommandé : 12-16 heures de simulation par apprenant et par an, dont au moins 4 heures évaluatives.

- Épreuves sommatives :
 - OSATS (générique + spécifique);
 - NOTSS;
 - API (si VR disponible);
 - NASA-TLX pour la charge.
- En cas de non-atteinte des seuils, un plan individuel de rattrapage est proposé (par exemple, deux séances ciblées de 45 minutes).
- Filières d'objectifs (fondations et approches)
- Fondations (PGY-1 / 2) : travail de la micro-gestuelle (micro-anastomose, sutures fines), ergonomie, utilisation des loupes/microscope, répétition mentale ("mental rehearsal") sur modules 3D ou application.
- Approches (PGY-2/3+) : progression graduée d'approches (ptériorale → interhémisphérique → rétrosigmoïde → sous-occipitale → temporale), avec insistance sur le séquençage opératoire, la précision gestuelle et le respect des plans
- Pathologies avancées (PGY-3/4+) : anévrysmes (clippage), tumeurs (éventuellement avec échographie et fluorescence à visée didactique), hémorragies intra-parenchymateuses. L'objectif est de préparer à la prise en charge de cas rares ou à haut risque dans un environnement sécurisé.
- Techniques endoscopiques (PELD/TELD) : entraînement à la gestion des flux, à l'orientation endoscopique, au concept de "mobile X-ray" pour le contrôle per-opératoire des implants et repères.

5. Feuille de route d'implémentation (12 mois)

5.1. Phases, livrables et responsabilités

- Phase 0 – Pré-démarrage (M0-M1) Cartographie des besoins, du contexte (CFIR) et des parties prenantes. Livrables : diagnostic, plan de travail, budget de principe.

- Responsables : chef de service, référent simulation. Indicateurs : acceptabilité, adéquation, faisabilité initiale.
- Phase 1 – Design (M1–M2) Définition des objectifs, des tâches, des métriques et des seuils de performance.
- Livrables : curriculum écrit, grilles OSATS/NOTSS, check-lists, fiches TIDieR. Indicateurs : fidélité prévue, coûts projetés.
- Phase 2 – Prototype (M2–M3) Construction/ adaptation des simulateurs 3D ; validation de la fidélité de face et de contenu.
- Livrables : phantoms v1, scripts de débriefing (PEARLS), vidéos ancrées. Indicateurs : satisfaction ($\geq 4/5$), validation de contenu.
- Phase 3 – Pilote (M3–M6) Formation d'une première cohorte, ajustement du dispositif.
- Livrables : rapport pilote, valeurs de CCI, coûts réels, calendrier. Indicateurs : Δ OSATS, Δ NOTSS, fidélité $\geq 80\%$.
- Phase 4 – Mise à l'échelle (M6–M12)
- Institutionnalisation, mutualisation, intégration de la VR/AR.
- Livrables : contrats de maintenance, créneaux mensuels de simulation, partenariats
- Indicateurs : adoption, pénétration, coût/apprenant
- Phase 5 – Pérennité ($\geq M12$)
- Amélioration continue et évaluation annuelle.
- Livable principal : rapport annuel qualité/coûts/équité.
- Indicateurs : taux de maintenance, rétention des compétences, programme actif à 12–24 mois.

5.2. Gestion des risques

- Pannes d'imprimante 3D ou ruptures de consommables : constitution d'un stock minimum, recours à des fournisseurs alternatifs, standardisation des pièces.
- Turn-over des formateurs : train-the-trainer semestriel, binômes de formateurs pour chaque module.
- Contraintes électriques/Internet : modules "off-grid" (alimentation stabilisée), enregistrement hors-ligne.
- Sous-utilisation de la VR mutualisée : calendrier partagé, quotas d'utilisation, pénalités en cas de "no-show", télé-feedback.

6. Suivi-évaluation (Monitoring & Evaluation)

6.1. Indicateurs d'implémentation (Proctor) et RE-AIM

Les indicateurs couvrent:

- Acceptabilité : satisfaction des acteurs (Likert 1-5, verbatims), cible $\geq 4/5$.
- Adoption : pourcentage de services utilisant au moins un module (cible $\geq 60\%$).
- Faisabilité : % de séances prévues effectivement réalisées (cible $\geq 80\%$).
- Fidélité : % des items de scénarios et de débriefing (PEARLS) couverts (cible $\geq 80\%$).
- Coûts : coûts directs/an (registres CAPEX/OPEX).
- Pénétration : proportion de la population cible exposée ($\geq 70\%$).
- Pérennité : programme encore actif à 12-24 mois.
- RE-AIM – Reach : % d'internes/fellows couverts ($\geq 70\%$).
- Effectiveness : impact pédagogique (OSATS/NOTSS, rétention).

6.2. Indicateurs pédagogiques (niveau minimal)

- Technique :
- OSATS spécifique (moyenne $\pm$ ET, % $\geq$ seuil), API (temps, erreurs, trajectoires/forces).
- Non technique : NOTSS (moyenne $\pm$ ET), NOTECHS (équipe).
Qualité de l'évaluation :
- CCI inter-évaluateurs (objectif $\geq 0,75$).
- Charge :
- NASA-TLX (profil global et par dimension).

6.3. Fréquence et reporting

- Mensuel : tableau de bord opérationnel (séances, fidélité, incidents, coûts).
- Trimestriel : revue qualité (CCI, seuils, rattrapages, retours apprenants).
- Annuel : rapport synthétique (indicateurs Proctor/RE-AIM, budget, équité, recommandations).

7. Budget modèle et stratégies de financement

7.1. Hypothèses générales

- Cohorte annuelle : N = 20 apprenants/an.
- Amortissement du CAPEX sur 3 ans.
- Usage : ≥ 12 h de simulation / apprenant / an ; infrastructures existantes.
- Formule coût/apprenant $\text{Coût/apprenant} = \text{NCAPEX}/3 + \text{OPEX}$

7.2. Estimation du matériel

- Cranial Approaches Boxes (ptériorale, rétrosgmoïde, interhémisphérique, sous-occipitale, temporale)
 - 5 unités à 3 200 € l'une ($\approx 34\,240$ MAD), soit 16 000 € au total ($\approx 171\,200$ MAD).

- AneurysmBox (vasculaire avancé)
 - 1 unité à 3 500 € (≈ 37 450 MAD).
- BrainTumorBox (US-compatible)
 - 1 unité à 4 200 € (≈ 44 940 MAD).
- FluorescentBox (5-ALA/ICG/Fluorescéine)
 - 1 unité à 3 800 € (≈ 40 660 MAD).
- Endoscopic LumbarBox (PELD/TELD)
 - 1 unité à 5 200 € (≈ 55 640 MAD).
- NavigationHead + Navigation Pen
 - 1 set à 2 800 € (≈ 29 960 MAD).
- Mycro (micro-anastomose & sutures)
 - 2 unités à 950 € (≈ 10 165 MAD) l'une, soit 1 900 € (≈ 20 330 MAD).
- Microscope pédagogique ou loupe binoculaire haute qualité
 - 2 équipements à 4 500 € (≈ 48 150 MAD) l'un, soit 9 000 € (≈ 96 300 MAD).
- Set d'instruments de microchirurgie (pinces, ciseaux, microporte-aiguilles)
 - 2 sets à 1 200 € (≈ 12 840 MAD) l'un, soit 2 400 € (≈ 25 680 MAD).
- Tablettes/Smartphones (AR/Navigation)
 - 4 appareils à 600 € (≈ 6 420 MAD) l'un, soit 2 400 € (≈ 25 680 MAD).
- Moniteurs 27-32"
 - 3 moniteurs à 280 € (≈ 2 996 MAD) l'un, soit 840 € (≈ 8 988 MAD).
- PC de capture vidéo
 - 1 unité à 900 € (≈ 9 630 MAD).

- Postes de travail/paillasses sur roulettes
 - 6 postes à 350 € ($\approx$ 3 745 MAD) l'un, soit 2 100 € ($\approx$ 22 470 MAD).
- Gestion de l'irrigation (bacs, pompes, récupérateurs)
 - 1 système à 800 € ($\approx$ 8 560 MAD).
- Rangements verrouillables (armoires/casiers)
 - 2 unités à 600 € ($\approx$ 6 420 MAD) l'une, soit 1 200 € ($\approx$ 12 840 MAD).
- Packs consommables Cranial (année 1)
 - 4 500 € ($\approx$ 48 150 MAD).
- Packs consommables Spine (année 1)
 - 2 200 € ($\approx$ 23 540 MAD).
- Fils de microchirurgie et gants (année 1)
 - 900 € ($\approx$ 9 630 MAD).
- EPI, nettoyage, petits matériels
 - 700 € ($\approx$ 7 490 MAD).

- Estimation du matériel

Tableau V: Estimation en Euro du matériel optimal pour un laboratoire de neurochirurgie.

Élément	Qté	Prix unitaire (€)	Notes	Sous-total (€)
Cranial Approaches Boxes (Pterional, Retrosigmoid, Interhemispheric, Suboccipital, Temporal)	5	3200	Approches crâniennes ; boîtes réutilisables, consommables	16000
AneurysmBox (vasculaire avancé)	1	3500	Pour clippage et gestion d'anévrismes	3500
BrainTumorBox (US-compatible)	1	4200	Résection tumorale, échographie pédagogique	4200
FluorescentBox (5-ALA/ICG/Fluorescéine)	1	3800	Workflow fluorescence pédagogique	3800
Endoscopic LumbarBox (PELD/TELD)	1	5200	Gestion des flux et 'mobile X-ray' concept	5200
NavigationHead + Navigation Pen	1	2800	Workflow neuronavigation pédagogique	2800
Mycro (micro-anastomose & sutures)	2	950	Compétences de base (PGY-1/2)	1900
Microscope pédagogique ou loupe binoculaire haute qualité	2	4500	Selon choix : 1 microscope + 1 loupe ou 2 loupes	9000
Set instruments microchirurgie (pinces, ciseaux, microporte-aiguilles)	2	1200	Acier/inox, usage simulation	2400
Tablettes/Smartphones (pour apps AR/Navigation)	4	600	Milieu de gamme	2400
Moniteurs 27-32" pour affichage	3	280	HDMI/USB-C	840
PC de capture vidéo basique	1	900	Enregistrement & feedback	900
Postes de travail/paillasse sur roulettes	6	350	Modulaires, hauteur réglable	2100
Gestion irrigation (bacs, pompes, récupérateurs)	1	800	Sécurité & propreté	800
Rangements verrouillables (armoires/casiers)	2	600	Sécurité consommables/instruments	1200
Packs consommables Cranial (crânes, cavités, tissus) – année 1	1	4500	Volume prévu pour 12 mois	4500
Packs consommables Spine – année 1	1	2200	Volume prévu pour 12 mois	2200
Fils microchirurgie & gants – année 1	1	900	Divers diamètres & stocks	900
EPI, nettoyage, petits matériels	1	700	Lingettes, désinfectants, tapis	700

7.3. Estimation par scénario (valeurs médianes)

Pour N = 20 apprenants, en dirhams avec conversion en euros :

1– Scénario 3D local (DVE/VCE, rachis de base)

- CAPEX : 3 490 € ($\approx$ 37 345 MAD).
- OPEX/an : 1 795 € ($\approx$ 19 206 MAD).
- Coût par apprenant : $\approx$ 150 € ($\approx$ 1 600 MAD).

2– Scénario VR mutualisée (rachis, endovasculaire/micro – API riches)

- CAPEX : 106 790 MAD ($\approx$ 9 980 €).
- OPEX/an : 74 753 MAD ($\approx$ 6 986 €).
- Coût par apprenant : $\approx$ 5 553 MAD ($\approx$ 519 €).

3– Scénario mixte (3D + VR)

- CAPEX : 128 149 MAD ($\approx$ 11 977 €).
- OPEX/an : 80 093 MAD ($\approx$ 7 485 €).
- Coût par apprenant : $\approx$ 6 140 MAD ($\approx$ 574 €).

7.4. Décomposition des postes (ordre de grandeur, MAD $\leftrightarrow$ €)

- 3D – CAPEX $\approx$ 37 376 MAD ($\approx$ 3 493 €) : imprimante : 16 018–21 358 MAD ($\approx$ 1 497–1 996 €) ; outillage/post-traitement : $\approx$ 5 339 MAD ($\approx$ 499 €) ; moules/phantoms/instruments : $\approx$ 10 679 MAD ($\approx$ 998 €)
- 3D – OPEX $\approx$ 205 273 MAD ($\approx$ 19 184 €, chiffre manifestement élevé, amené à être affiné) : consommables : 8 543–10 679 MAD ($\approx$ 798–998 €) ; pièces/maintenance : $\approx$ 3 203 MAD ($\approx$ 299 €) ; énergie et petits frais : 2 135–3 203 MAD ($\approx$ 200–299 €) ; marge : $\approx$ 3 203 MAD ($\approx$ 299 €).
- VR – CAPEX $\approx$ 106 790 MAD ($\approx$ 9 980 €) : PC “VR-ready” : 21 358–26 697 MAD ($\approx$ 1 997–2 495 €) ; casque VR : 5 339–8 543 MAD ($\approx$ 499–798 €) ; haptique léger : 16 018–26 697 MAD ($\approx$ 1 497–2 495 €) ; installation & contenus initiaux : 32 037–42 716

MAD ($\approx 2\,994\text{--}3\,992\text{ €}$).

- VR – OPEX $\approx 74\,753\text{ MAD}$ ($\approx 6\,986\text{ €}$) : licences : $\approx 53\,395\text{ MAD}$ ($\approx 4\,990\text{ €}$) ; maintenance/SAV : $\approx 10\,679\text{ MAD}$ ($\approx 998\text{ €}$) ; mises à jour & consommables : $\approx 10\,679\text{ MAD}$ ($\approx 998\text{ €}$).

Les scénarios “3D (CAPEX 3 500 € / OPEX 1 800 €)”, “VR (10 000 € / 7 000 €)” et “Mixte (12 000 € / 7 500 €)” correspondent, après conversion, aux ordres de grandeur suivants :

- 3D: CAPEX $\approx 37\,450\text{ MAD}$, OPEX $\approx 19\,260\text{ MAD}$;
- VR: CAPEX $\approx 107\,000\text{ MAD}$, OPEX $\approx 74\,900\text{ MAD}$;
- Mixte: CAPEX $\approx 128\,400\text{ MAD}$, OPEX $\approx 80\,250\text{ MAD}$.

7.5. Option “avec personnel” (valorisation du temps formateur)

- Exemple de valorisation :
- 427 MAD/h ($\approx 40\text{ €/h}$) $\times 1,5\text{ h/séance} \times 8\text{ séances} \times 1\text{ formateur}/5\text{ apprenants} = \approx 1\,025\text{ MAD/apprenant}$ ($\approx 96\text{ €}$).
- Ordres de grandeur “tout inclus” (matériel + licences + consommables + temps formateur) pour $N = 20$: Scénario 3D : $\approx 2\,669\text{ MAD/apprenant}$ ($\approx 249\text{ €}$). Scénario VR : $\approx 6\,621\text{ MAD/apprenant}$ ($\approx 619\text{ €}$). Scénario mixte : $\approx 7\,208\text{ MAD/apprenant}$ ($\approx 674\text{ €}$).

7.6. Leviers d’optimisation

- 3D : standardisation des pièces remplaçables, mutualisation des fichiers STL, recyclage de moules, désignation d’un technicien référent.
- VR : mutualisation régionale de la plateforme (calendrier partagé), négociation de licences académiques et de packs multi-utilisateurs.
- Mixte : couvrir environ 80 % des objectifs par la 3D, réserver la VR aux 20 % de séances à forte valeur API (trajectoires, forces, dosimétrie/contraste).

7.7. Volet architectural et conceptualisation du laboratoire

- Zonage fonctionnel :
 - 22 m² “Cranial” (2-3 postes d’approches, 1 poste de pathologies avancées) ;
 - 14 m² “Spine endoscopique” (zone humide/irrigation) ;
 - 12 m² “Skills” (micro-anastomose/sutures);
 - 10 m² “Navigation/AR & IT-AV”;
 - 12 m² “Stockage sécurisé & maintenance”.
- Contraintes techniques : nombreuses prises, Wi-Fi stable, éclairage modulable pour l’AR, gestion des fluides, surfaces nettoyables.
- Flux : circulation à sens unique (“entrée → vestiaire EPI → postes → nettoyage → sortie”) pour limiter les croisements.

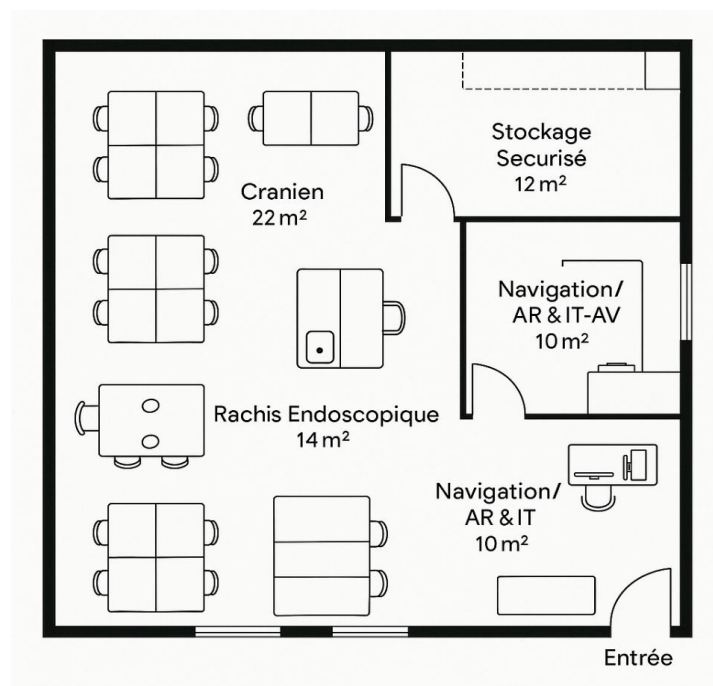


Figure 58: Conception architecturale d'un laboratoire de simulation en Neurochirurgie.

7.8. Messages clés

- Former sans risque : la simulation permet de réduire erreurs et temps opératoire tout en renforçant la sécurité.
- Bas coût, fort impact : l'impression 3D locale peut couvrir 70-80 % des besoins fondamentaux.
- Seuils obligatoires : la progression PBP ("prêt avant de faire") garantit un niveau minimal de compétence avant l'accès au patient.
- Débriefing structuré : PEARLS systématique = gains techniques et comportementaux.
- Mutualisation : VR et cadavérique au niveau régional = meilleure efficience budgétaire.
- Pérennité : journal de maintenance, SLA fournisseurs, stock de pièces = disponibilité accrue.
- Équité : quotas, mobilité et télésimulation = accès pour tous (genre, périphérie).
- Indicateurs lisibles : Proctor & RE-AIM fournissent un tableau de bord facilement interprétable par la direction.
- Science ouverte : modèles 3D et scripts pédagogiques partagés réduisent les coûts et accélèrent la diffusion.



CONCLUSION GÉNÉRALE



Cette thèse a pour ambition d'examiner la simulation en neurochirurgie selon trois axes complémentaires : les moyens (technologies et modalités), l'efficacité (acquis technique et non technique) et les défis (en particulier en contextes à ressources limitées).

Deux objectifs guidaient la démarche :

(1) évaluer l'impact de la simulation sur les compétences techniques et non techniques des apprenants

(2) analyser ses limites et conditions d'implémentation dans des programmes de formation en PRFI.

L'ensemble des travaux converge vers un constat central : la simulation, lorsqu'elle est conçue et évaluée de façon rigoureuse, constitue un levier pédagogique efficace et réaliste pour accélérer l'acquisition des compétences neurochirurgicales, à condition d'être adossée à un curriculum structuré, à des critères de maîtrise explicites et à une gouvernance attentive aux coûts, à la maintenance et à l'équité d'accès.

Premièrement, la simulation améliore de manière robuste des indicateurs techniques : scores OSATS (génériques et spécifiques), temps d'exécution, taux d'erreurs et précision (trajectoires, placements). Ces effets sont observés sur des gestes à forte valeur pédagogique à type de ventriculostomie/VCE, vis pédiculaires, base du crâne, neuro-endovasculaire et micro-gestuelle, avec une sensibilité aux niveaux d'expertise (gains plus marqués chez les novices), et un bénéfice accru lorsque l'entraînement est distribué dans le temps et guidé par des seuils de maîtrise (proficiency-based progression). Les environnements VR/AR et les simulateurs haptique/3D offrent, en outre, des métriques instrumentées (API) qui facilitent l'auto-régulation et le suivi fin des progrès.

Deuxièmement, les compétences non techniques aux exemples de la communication, la conscience de la situation, le leadership, la prise de décision, progressent lorsqu'elles sont intentionnellement travaillées (scénarios de CRM) et débriefées selon des approches standardisées (PEARLS) avec mesure via NOTSS/NOTECHS. La combinaison « tâche procédurale + comportements d'équipe » renforce la sécurité et la coordination dans des situations simulées de crise.

Troisièmement, la preuve de transfert au bloc opératoire, encore hétérogène selon les gestes et les designs, progresse surtout sur des indicateurs de processus (délais, précision technique mesurée objectivement) et bénéficie lorsque la formation s'inscrit dans un curriculum écrit avec évaluations standardisées et rétention programmée.

Quatrièmement, en PRFI, la littérature, même pauvre, met en lumière des contraintes structurelles (coûts d'acquisition et d'usage, OPEX de maintenance/licences, disponibilité des formateurs, énergie/connectivité, chaîne d'approvisionnement des consommables). Malgré ces obstacles, la thèse montre des voies d'implémentation crédibles : impression 3D locale (phantoms modulaires à pièces remplaçables), mutualisation régionale des plateformes VR/haptique et télésimulation/mentorat pour étendre l'accès à l'expertise.

Au-delà de la synthèse des preuves, cette thèse propose un cadre opérationnel pour « savoir faire » avec rigueur et frugalité.

1. Curriculum à seuils de maîtrise (EMFC/Mastery learning) : définir, par procédure, des objectifs mesurables et des seuils (p. ex., OSATS-DVE avec étapes critiques obligatoires), conditionnant la progression vers l'exposition clinique.
2. Alignement fonctionnel de la fidélité : privilégier une fidélité utile à la tâche (3D bas coût pour le geste de base ; VR/AR avec API pour la précision et l'analyse du mouvement ; cadavérique quand un réalisme tissulaire est déterminant).
3. Évaluation intégrée : combiner OSATS (technique), NOTSS/CRM (non technique), NASA-TLX (charge) et API (si VR/AR), avec calibration et CCI inter-évaluateurs monitorés (objectif $\geq 0,75$).

4. Implémentation documentée : décrire les interventions via TIDieR et piloter l'implantation avec des indicateurs Proctor (acceptabilité, adoption, faisabilité, fidélité, coûts, pénétration, pérennité) et RE-AIM.
5. Modèle PRFI par étapes : 3D locale pour le socle (DVE/VCE, rachis), VR mutualisée pour l'endovasculaire/micro, scénarios CRM intégrés, télésimulation pour le feedback, et registre de coûts (CAPEX/OPEX, coût/apprenant, coût/par compétent).

Ces propositions s'accompagnent d'outils prêts à l'emploi : grilles OSATS/NOTSS adaptées, fiches TIDieR, check-lists de session, modèles de budget, et une feuille de route en cinq phases (diagnostic → design → prototype → pilote → mise à l'échelle/maintenance).

Pourtant, plusieurs limites encadrent l'interprétation des résultats. La variabilité des designs, des métriques et des simulateurs complique les synthèses quantitatives et la généralisation. Les échantillons de l'étude pilote, typiques des contextes réels de formation, limitent la puissance statistique sur certains sous-groupes et outcomes. Les indicateurs de transfert restent inégalement rapportés et souvent proxies des issues cliniques. Côté enquête, des biais de déclaration et de non-réponse sont possibles. Enfin, les résultats d'implémentation en PRFI sont contextuels ; ils doivent être adaptés localement (ressources, cadre réglementaire, culture organisationnelle).

Ces limites n'annulent pas la portée pratique de l'approche : elles soulignent la nécessité d'une standardisation progressive des outcomes noyaux et d'évaluations multicentriques plus ambitieuses, dans une logique de science ouverte et de mutualisation.

La thèse trace un agenda de développement à court et moyen terme :

- Standardiser un "core outcome set" pour la simulation en neurochirurgie (OSATS spécifiques par geste, NOTSS, API de base, NASA-TLX), via une démarche Delphi multicentrique incluant des sites PRFI

- Renforcer l'évidence de transfert par des essais contrôlés et des cohortes multicentriques rapportant des indicateurs cliniques et de processus, avec suivi de la rétention à 6-12 mois.
- Outiller l'évaluation automatisée (vision/IA, cinématique instrumentale vidéo) pour produire des tableaux de bord pédagogiques fiables et économes en ressources humaines.
- Tester les modèles économiques (coût/apprenant, coût/par compétent) et les stratégies de mutualisation (VR/cadavérique) pour optimiser l'efficience.
- Institutionnaliser la formation des formateurs (programmes train-the-trainer) et l'usage de la télésimulation/mentorat pour pallier les pénuries d'expertise.
- Intégrer l'équité (genre, périphérie, vulnérabilités) comme critère d'évaluation et de pilotage (dimension Reach de RE-AIM).

Pour conclure, la neurochirurgie est un domaine à haut risque et à forte intensité d'expertise. La simulation n'est pas un luxe, c'est une infrastructure pédagogique de sécurité qui permet de répéter, mesurer et améliorer avant d'exposer les patients. Les données rassemblées dans cette thèse montrent que l'on peut industrialiser l'apprentissage sûr — même en PRFI — en combinant technologies frugales (impression 3D), outils de mesure (OSATS/NOTSS/API), débriefings structurés, et une gouvernance attentive aux coûts et à la durabilité. La feuille de route proposée, ancrée dans des standards de qualité et d'implémentation, offre une voie réaliste pour intégrer la simulation au cœur des curricula et des politiques de service.

En d'autres termes, la simulation en neurochirurgie tient ses promesses lorsque l'on en fait un système, pas un événement : des objectifs clairs, des seuils de maîtrise, des évaluations fiables, des sessions régulières, un débriefing de qualité, des indicateurs suivis, une économie transparente et un engagement pour l'équité. C'est à ce prix que la simulation contribue, de manière tangible, à former des équipes plus compétentes, à réduire les erreurs évitables et, in fine, à améliorer la sécurité des patients là où les besoins sont les plus grands.



Résumé

Introduction

La neurochirurgie constitue une spécialité à haute technicité, où la précision du geste, la complexité anatomique et la gravité potentielle des complications imposent un niveau élevé de compétence, acquis classiquement au bloc opératoire au fil d'une exposition progressive. Or, plusieurs contraintes contemporaines limitent l'opportunité et la reproductibilité de cet apprentissage exclusivement clinique : variabilité des cas, rareté relative de certaines situations, exigences de sécurité et de qualité, contraintes organisationnelles et coûts opératoires. Dans ce contexte, la simulation apparaît comme une réponse pédagogique structurante, car elle permet d'apprendre et de répéter des gestes techniques dans un environnement contrôlé, sans risque direct pour le patient, tout en rendant possible une évaluation objective et standardisée des performances. L'enjeu est particulièrement pertinent dans les pays à ressources limitées, où la charge des pathologies neurochirurgicales et les contraintes de formation peuvent être plus marquées, renforçant l'intérêt d'approches « frugales » et adaptées au terrain.

Matériel et méthodes

Ce travail repose sur une revue systématique de la littérature conduite selon les recommandations PRISMA 2020, ciblant les études publiées entre 2010 et 2025 consacrées à la simulation en neurochirurgie. Les modalités de simulation incluses couvrent un spectre large : modèles physiques (bench/phantoms), entraînements sur cadavre, impression 3D, dispositifs haptiques, ainsi que solutions de réalité virtuelle (RV), réalité augmentée (RA) et réalité mixte, incluant également la simulation endovasculaire. Les plans d'étude considérés englobent des essais randomisés, des études quasi-expérimentales (avant-après), des cohortes et des travaux de validation. Les critères d'évaluation principaux portent sur des mesures de performance technique (scores type OSATS, temps opératoire simulé, taux d'erreurs, précision/trajectoire), ainsi que, lorsque pertinent, des indicateurs objectivés par imagerie. Les critères secondaires incluent des dimensions non techniques (NOTSS/NOTECHS), la charge cognitive (NASA-TLX), et des variables de perception (auto-efficacité, satisfaction). La qualité méthodologique et le risque

de biais sont appréciés au moyen d'outils adaptés (RoB2/ROBINS-I), complétés par une lecture de la qualité des travaux en éducation médicale (MERSQI/MMERSQI). Enfin, la revue s'intéresse explicitement au transfert des compétences vers le bloc opératoire et aux indicateurs d'implémentation (adoption, faisabilité, pérennité, coûts), en s'appuyant sur des cadres tels que Proctor et RE-AIM, et sur des approches issues des sciences de l'implémentation.

Résultats

La synthèse inclut 48 études, dont une proportion importante d'essais contrôlés randomisés (21 RCTs), couvrant des domaines variés : chirurgie cranio-cérébrale, rachidienne, endovasculaire et gestes procéduraux fréquents (notamment ventriculostomie). Globalement, les données convergent vers un bénéfice de la simulation sur la performance technique : amélioration des scores de compétence, diminution des erreurs et amélioration de la précision, avec une tendance à la réduction des temps d'exécution après entraînement répété. Les résultats en matière de transfert vers le contexte réel sont décrits comme hétérogènes : ils paraissent plus robustes pour des gestes standardisables et objectivables, tandis que pour des procédures complexes, la démonstration d'un impact clinique direct demeure plus variable. Sur le versant non technique, l'amélioration est surtout observée lorsque la simulation est conçue comme une activité d'équipe, incluant des scénarios de crise et un débriefing structuré. Enfin, concernant l'implémentation, la revue souligne des obstacles persistants (coûts, maintenance, disponibilité des enseignants, contraintes logistiques), ce qui justifie l'intérêt pour des stratégies pragmatiques et économes, telles que la mutualisation des équipements, la conception locale de modèles, et l'intégration progressive dans les programmes.

Discussion

Les résultats soutiennent l'idée que la simulation constitue un levier pédagogique efficace, à condition d'être intégrée dans une démarche structurée : définition explicite des objectifs, progression graduée, seuils d'acquisition (« mastery learning »), mesures fiables, et débriefing de qualité. Un point majeur discuté est la distinction entre fidélité technologique et efficacité éducative : la pertinence d'un simulateur dépend moins de son réalisme visuel absolu que de son adéquation fonctionnelle aux compétences visées (gestes, prise de décision, coordination, gestion

des complications), dans une logique de coût-efficacité et de durabilité. La thèse met également en évidence une lacune récurrente de la littérature : si les métriques de performance sont de plus en plus rapportées, les résultats d'implémentation (adoption durable, pénétration dans les curricula, coûts réels, ressources humaines nécessaires, acceptabilité institutionnelle) demeurent insuffisamment documentés, notamment sur le long terme. Cette limitation est particulièrement importante dans les environnements à ressources contraintes, où la réussite dépend autant de la technologie que des conditions locales de déploiement, de maintenance et de formation des formateurs. Dans cette perspective, l'utilisation d'approches structurées (Proctor/RE-AIM, CFIR) est proposée pour passer d'expériences ponctuelles à des programmes institutionnalisés, évaluables et soutenables.

Conclusion

En conclusion, la simulation en neurochirurgie s'affirme comme une infrastructure pédagogique de sécurité, permettant répétition, standardisation et mesure objective des compétences, avant exposition au patient. Les données synthétisées appuient un effet global favorable sur l'acquisition technique, avec un potentiel d'amélioration des compétences non techniques lorsque les scénarios sont conçus pour le travail en équipe et accompagnés de débriefings structurés. Toutefois, l'adoption large et formelle au sein des curricula requiert encore des preuves plus homogènes du transfert clinique, ainsi qu'une évaluation rigoureuse des conditions d'implémentation (coûts, ressources, durabilité). Dans les contextes à ressources limitées, l'approche la plus réaliste repose sur des stratégies « frugales » et modulaires, articulées à des cadres d'évaluation robustes, afin de maximiser l'impact éducatif tout en assurant la faisabilité et la pérennité.

Mots-clés :

Simulation ; Neurochirurgie ; Réalité virtuelle ; Réalité augmentée ; Réalité mixte ; Haptique ; Formation chirurgicale ; Éducation médicale ; Évaluation des compétences ; Compétences non techniques ; Apprentissage par maîtrise ; Sécurité du patient ; Transfert des compétences ; Curriculum ; Implémentation ; PRISMA ; Revue systématique.

Abstract

Introduction

This thesis positions neurosurgery as a high-risk, high-skill specialty where millimetric precision and minimal tolerance for error make training particularly challenging. It anchors the problem within the broader “global surgery” perspective: globally, a large proportion of the population lacks timely access to safe surgical and anaesthetic care, a gap that is especially pronounced in low- and middle-income countries (LMICs). Within this context, neurosurgical diseases (trauma, vascular disorders, tumors, hydrocephalus, epilepsy) generate a heavy burden, while workforce and resource constraints limit both patient care and training opportunities. The thesis argues that simulation—because it is repeatable, measurable, and safe—offers a realistic pathway to accelerate competence acquisition while improving patient safety, particularly where operative exposure is limited.

Materials and Methods

The work is based on a systematic literature review conducted according to PRISMA 2020, focusing on neurosurgical simulation studies published between 2010 and 2025. It covers a wide range of simulation modalities: bench/phantom models, cadaveric training, 3D printing, haptics, and VR/AR/MR platforms, including endovascular simulation. Eligible designs include randomized controlled trials, cohort studies, before–after studies, and validation studies. Primary outcomes are technical performance metrics such as OSATS (global and task-specific scores), time, errors, and precision/trajectory measures, including radiologic precision when relevant. Secondary outcomes include non-technical skills (NOTSS/NOTECHS), self-efficacy, and cognitive workload (NASA–TLX). When possible, results are synthesized and quality is assessed via risk-of-bias tools (RoB2/ROBINS–I) and educational quality instruments (MERSQI/MMERSQI). The thesis also maps evidence on transfer to the operating room and tracks implementation outcomes (e.g., adoption, feasibility, sustainability) using frameworks such as Proctor and RE-AIM.

Results

The review identifies 48 included studies, with a substantial proportion of randomized trials (21 RCTs) spanning cranial, spinal, endovascular, and procedural training (e.g., ventriculostomy). Overall, the findings converge toward a net positive effect of simulation on technical competence: OSATS scores improve, errors decrease, trajectories become more accurate, and execution time often shortens with repeated practice. Evidence suggesting transfer to the operating room is described as heterogeneous but encouraging, especially for procedures that are easier to standardize and measure (e.g., ventriculostomy outcomes such as first-pass success). For non-technical skills, the thesis notes that benefits are clearer when simulation is paired with team-based crisis scenarios and structured debriefing. In LMIC contexts, progress in adoption exists, but constraints remain substantial, particularly regarding ongoing costs (OPEX), maintenance, and faculty availability, which motivates “frugal” implementation strategies such as local 3D printing, shared VR assets, and telesimulation.

Discussion

The discussion emphasizes that simulation “works” best when treated as a system rather than a one-off event: explicit objectives, mastery thresholds, reliable assessment tools, structured debriefing, and longitudinal monitoring. A key conceptual point is that fidelity is not automatically synonymous with educational effectiveness; what matters is *functional alignment*—matching the simulator’s task demands to learning objectives at the lowest sustainable cost. The thesis highlights an important gap in the literature: while performance outcomes are increasingly reported, implementation outcomes (adoption, penetration, sustainability, costs) are still insufficiently measured, especially longitudinally. It proposes using established implementation frameworks (Proctor/RE-AIM, CFIR) and combining them with competency-based education and mastery learning approaches. The work also frames simulation as particularly valuable in LMIC settings if programs prioritize high-yield procedures, adopt modular infrastructures, and integrate technical and human-factors training (NOTSS/NOTECHS, NASA-TLX) into routine sessions with standardized debriefing.

Conclusion

The thesis concludes that neurosurgical simulation is not a luxury but a patient-safety educational infrastructure: it enables repetition, objective measurement, and safer progression before live patient exposure. The assembled evidence supports consistent technical gains, plausible improvements in non-technical skills when properly designed, and emerging—though uneven—signals of clinical transfer. For LMIC settings, the thesis argues that safe, scalable implementation is feasible through frugal technologies (notably local 3D printing), structured assessment, high-quality debriefing, and governance attentive to cost, maintenance, and equity of access. The proposed roadmap aims to embed simulation sustainably into curricula and service policy to reduce avoidable errors and strengthen training where needs are greatest.

Keywords

Simulation; Neurosurgery; Virtual reality; Augmented reality; Mixed reality; Haptics; Surgical training; Medical education; Competency assessment; non-technical skills; Mastery learning; Patient safety; Skill transfer; Curriculum; Implementation; PRISMA; Systematic review.

الملخص

المقدمة

تتناول هذه الأطروحة المحاكاة في جراحة الأعصاب باعتبارها أداة تعليمية محورية في اختصاص يتسم بارتفاع المخاطر، وبحاجة دائمة إلى دقة مليمترية وهامش خطأ ضيق. وتضع الدراسة الإشكال ضمن منظور “الجراحة العالمية”، حيث إن الوصول إلى رعاية جراحية وتخديرية آمنة وفي الوقت المناسب ما يزال غير متاح لجزء كبير من سكان العالم، مع تفاقم المشكلة في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط. وفي هذا السياق، تُعدّ أمراض جراحة الأعصاب (مثل الرضوض القحفية، والنزوف والسكتات، والأورام، والاستسقاء الدماغي، والصرع) ذات عبء مرضي مرتفع، بينما تُقيّد ندرة الموارد والكوادر فرص التدريب السريري. من هنا تُطرح المحاكاة كحلّ عملي لأنها تتيح تدريباً آمناً، قابلاً للتكرار، وقابلاً للقياس بما يسرّع اكتساب المهارات ويحدّ من تعرّض المرضى لأخطاء مرحلة “بداية المنحنى التعليمي”.

المواد والطرق

تعتمد الأطروحة على مراجعة منهجية للأدبيات وفق معايير PRISMA 2020، وتشمل المنشورات بين 2010 و2025 حول المحاكاة في جراحة الأعصاب بمختلف أنماطها: نماذج تدريبية بسيطة (bench/phantom)، تدريب على الجثث، الطباعة ثلاثية الأبعاد، الأجهزة اللمسية (haptics)، وتقنيات الواقع الافتراضي/المعزّز/المختلط، إضافةً إلى المحاكاة في المجال الوعائي داخل الأوعية. تم إدراج التجارب العشوائية، والدراسات شبه التجريبية، ودراسات قبل-بعد، ودراسات التحقق (validation) تمثّل المؤشرات الأساسية في القياسات التقنية مثل OSATS (الكلي/النوعي)، الزمن، الأخطاء، الدقة ومسارات الأدوات، والدقة الشعاعية عند توفرها. أما المؤشرات الثانوية فتشمل المهارات غير التقنية (NOTSS/NOTECHS)، الكفاءة الذاتية، وعبء العمل الذهني. NASA-TLX كما جرى تقييم خطر التحيز وجودة الدراسات تربوياً، ورُصدت دلائل انتقال المهارة إلى غرفة العمليات، مع تحليل عناصر التطبيق والاعتماد باستخدام أطر مثل Proctor و RE-AIM، وبمساعدة أطر تنفيذية كـ CFIR.

النتائج

تشير الأطروحة إلى إدراج 48 دراسة) ومنها 21 تجربة عشوائية (تغطي طيفاً واسعاً من الإجراءات القحفية والعمودية والوعائية، وإجراءات شائعة مثل فغر البطين. بصورة عامة، تتقارب النتائج نحو فائدة واضحة للمحاكاة على المستوى التقني: تحسّن درجات OSATS ، انخفاض الأخطاء، تحسّن الدقة والمسار، وتراجع زمن الإنجاز مع التكرار بما يعكس اكتساباً تدريجياً للمهارة. أما انتقال أثر التدريب إلى غرفة العمليات فموصوف بأنه غير متجانس بين الإجراءات والمقاييس، لكنه يحمل إشارات إيجابية خاصة في الإجراءات القابلة للمعيرة والقياس المباشر. وفي المهارات غير التقنية، تبدو الفائدة أوضح عندما تُدمج المحاكاة بسيناريوهات عملٍ جماعي وإدارة أزمة مع إجراء debriefing منظم. وفي سياق البلدان محدودة الموارد، تُسجل قابلية للتنبّي ولكنها تبقى مُقيّدة بتكاليف التشغيل، والصيانة، وتوفر المدربين، وهو ما يدعم تبني حلول “اقتصادية/رشيدة” مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد محلياً، وتقاسم منصات VR ، واعتماد التعلّم عن بعد. (telesimulation).

المناقشة

تُبرز المناقشة أن قيمة المحاكاة لا تتحقق بالكامل إلا إذا بُنيت ك منظومة تعليمية: أهداف واضحة، عتبات إتقان (mastery thresholds) ، أدوات تقييم موثوقة، جلسات منتظمة، و debriefing عالي الجودة، مع تتبّع مؤشرات الأداء بمرور الزمن. وتشدد الأطروحة على فكرة محورية: “الواقعية/الفيديلية” ليست معياراً مطلقاً للجودة التعليمية؛ الأهم هو الملاءمة الوظيفية للمهمة بحيث تُخدم الكفاءة المستهدفة بأقل كلفة ممكنة وبأعلى استدامة. كما تشير إلى فجوة في الأدبيات: كثير من الدراسات تركّز على تحسّن الأداء، لكن القياسات المرتبطة بالتطبيق الفعلي (معدلات الاعتماد، الاختراق داخل البرامج، الاستدامة، والتكاليف) ما تزال نادرة خصوصاً على المدى الطويل. لذلك تقترح الأطروحة دمج مقاييس Proctor و RE-AIM مع التعليم القائم على الكفاءات و Mastery Learning لضمان انتقال المحاكاة من “نشاط إضافي” إلى جزء مؤسسي من المنهج .

الخلاصة

تخلص الأطروحة إلى أن المحاكاة في جراحة الأعصاب ليست ترفاً، بل بنية تعليمية للسلامة تتيح التكرار والقياس والتحسين قبل التعامل مع المرضى. وتدعم المعطيات المتاحة فعالية المحاكاة في تحسين المهارات التقنية بشكل متسق، مع إمكان تحسين المهارات غير التقنية عندما تُصمَّم السيناريوهات بشكل مناسب وتُدعم بتغذية راجعة منظّمة، مع وجود دلائل انتقال سريري لكنها متفاوتة حسب الإجراء. وفي البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط، تؤكد الأطروحة أن تطبيق المحاكاة ممكن إذا تم اعتماد حلول رشيدة (مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد محلياً)، وتوحيد أدوات التقييم، وبناء حوكمة تراعي الكلفة والصيانة والإنصاف في الوصول.

الكلمات المفتاحية

المحاكاة؛ جراحة الأعصاب؛ الواقع الافتراضي؛ الواقع المعزز؛ الواقع المختلط؛ اللمس/التغذية الراجعة اللمسية (Haptics)؛ التدريب الجراحي؛ التعليم الطبي؛ تقييم الكفاءة؛ المهارات غير التقنية؛ التعلم الإتيقاني؛ سلامة المرضى؛ نقل المهارات إلى الممارسة السريرية؛ المنهاج التدريبي؛ التنفيذ/التطبيق المؤسسي؛ بريزما (PRISMA)؛ مراجعة منهجية



REFERENCES



1. **Meara JG, et al.**
Global Surgery 2030: evidence and solutions for achieving health, welfare, and economic development
The Lancet. 2015;386(9993):569–624.
2. **Dewan MC, et al.**
Global neurosurgery: the current capacity and deficit in the provision of essential neurosurgical care
Journal of Neurosurgery. 2018; Published online Apr 27.
DOI:10.3171/2017.11.JNS171500.
3. **World Federation of Neurosurgical Societies (WFNS)**
Global Neurosurgical Workforce Map
WFNS Official Website.
4. **Dauids J, Manivannan S, Darzi A, et al.**
Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review, meta-analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance
Neurosurgical Review. 2021;44:1853–1867.
5. **Chan J, Pangal DJ, Cardinal T, et al.**
A systematic review of virtual reality for the assessment of technical skills in neurosurgery
Neurosurgical Focus. 2021;51(2):E15.
6. **Schmidt MW, Köppinger KF, Fan C, et al.**
Virtual reality simulation in robot-assisted surgery: meta-analysis of skill transfer and predictability of skill
BJS Open. 2021;5(2):zraa066.
7. **Martin JA, Regehr G, Reznick R, et al.**
Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents
British Journal of Surgery. 1997;84(2):273–278.
8. **Royal College of Surgeons of Edinburgh**
The Non-Technical Skills for Surgeons (NOTSS) System Handbook v2.0
RCSEd. 2019.
9. **Gaba DM**
Crisis resource management and teamwork training in anaesthesia
British Journal of Anaesthesia. 2010;105(1):3–6.

10. **Hart SG**
NASA Task Load Index (NASA-TLX): 20 years later
NASA Ames Research Center. 2006.
11. **Dsouza AC, Naik V, Sathyanarayan A**
Global disparities in neurosurgery simulation: a 22-year bibliometric analysis (2003–2025)
Egyptian Journal of Neurosurgery. 2025;40:139.
12. **Zhu J, Yang J, Tang C, et al.**
Design and validation of a 3D-printed simulator for endoscopic third ventriculostomy
Child's Nervous System. 2020;36:743–748.
13. **Miller GE**
The assessment of clinical skills/competence/performance
Academic Medicine. 1990;65(9 Suppl):S63–S67.
14. **Glasgow RE, Vogt TM, Boles SM**
Evaluating the public health impact of health promotion interventions: the RE-AIM framework
American Journal of Public Health. 1999;89(9):1322–1327.
15. **Dewan MC, Rattani A, Fieggen G, et al.**
Global neurosurgery: the current capacity and deficit in the provision of essential neurosurgical care
Journal of Neurosurgery. 2019;130(4):1055–1064.
16. **Dauids J, Manivannan S, Darzi A, et al.**
Simulation for skills training in neurosurgery
Neurosurgical Review. 2021;44:1853–1867.
17. **Onishi E, et al.**
Surgical video projection onto a mannequin: an educational tool for simulation practice of perioperative anesthetic management
Department of Anesthesiology, Tohoku University. 2024.
18. **Hashimoto T, Kikukawa M**
Identifying teaching competencies for medical residents using a modified Delphi method
Korean Journal of Medical Education. 2024;36(1):51–63.

19. **Fitts PM, Posner MI**
Human performance
Prentice-Hall. 1973.
20. **Frank JR, Snell LS, Ten Cate O, et al.**
Competency-based medical education: theory to practice
Medical Teacher. 2010;32(8):638-645.
21. **Kirkpatrick Partners**
The Kirkpatrick Model
Kirkpatrick Partners. 2024.
22. **Messick S**
Validity of psychological assessment
American Psychologist. 1995.
23. **Hamstra SJ, et al.**
Reconsidering fidelity in simulation-based training
Academic Medicine. 2014;89(3):387-392.
24. **Eppich W**
Promoting excellence and reflective learning in simulation (PEARLS)
Simulation in Healthcare. 2015.
25. **Martin JA, Regehr G, Reznick R, et al.**
Objective structured assessment of technical skill (OSATS)
British Journal of Surgery. 1997;84(2):273-278.
26. **Koo TK, Li MY**
A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research
Journal of Chiropractic Medicine. 2016;15(2):155-163.
27. **Mishra A, Catchpole K, McCulloch P**
The Oxford NOTECHS System
Quality and Safety in Health Care. 2009;18(2):104-108.
28. **Clarke S, Horeczko T, Carlisle M, et al.**
Emergency medicine resident crisis resource management ability
Medical Education Online. 2014;19:25771.

29. **Agency for Healthcare Research and Quality (AHRQ)**
Team Strategies & Tools to Enhance Performance and Patient Safety (TeamSTEPPS)
AHRQ Publication No. 23-0043. 2023.
30. **Damschroder LJ, Aron DC, Keith RE, et al.**
Consolidated Framework for Implementation Research (CFIR)
Implementation Science. 2009;4:50.
31. **Proctor E, Silmere H, Raghavan R, et al.**
Outcomes for Implementation Research: Conceptual Distinctions, Measurement Challenges, and Research Agenda
Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research. 2011;38:65-76.
32. **Glasgow RE**
Evaluating the Public Health Impact of Health Promotion Interventions: The RE-AIM Framework
American Journal of Public Health. 1999;89(9):1322-1327.
33. **Hoffmann TC, Glasziou PP, Boutron I, Milne R, Perera R, Moher D, et al.**
Better reporting of interventions: template for intervention description and replication (TIDieR) checklist and guide
BMJ. 2014;348.
34. **Yasser NBM, Tan AJQ, Harder N, Ashokka B, Chua WL, Liaw SY**
Telesimulation in healthcare education: a scoping review
Nurse Education Today. 2023;126:105805.
35. **Williams et al.**
Benchtop simulation of the retrosigmoid approach
World Neurosurgery X. 2023.
36. **Boody B, et al.**
The Effectiveness of Bioskills Training for Simulated Open Lumbar Laminectomy
Global Spine Journal. 2017.
37. **Boody B, et al.**
The Effectiveness of Bioskills Training for Simulated Lumbar Pedicle Screw Placement
Global Spine Journal. 2018.

38. **Gardeck AM, Pu X, Yang Q, Polly DW, Jones KE**
The effect of simulation training on resident proficiency in thoracolumbar pedicle screw placement using computer-assisted navigation
Journal of Neurosurgery: Spine. 2021;34(1):127–134.
39. **Dauids J, et al.**
Simulation for skills training in neurosurgery
Neurosurgical Review.
40. **Steineke TC, Barbary D**
Microsurgical clipping of middle cerebral artery aneurysms: preoperative planning using virtual reality to reduce procedure time
Neurosurgical Focus. 2021;51(2):E12.
41. **Alaraj A, Banerjee PP, Charbel FT, et al.**
Virtual reality cerebral aneurysm clipping simulation with real-time haptic feedback
Neurosurgery (Operative Neurosurgery). 2015;11(Suppl 1):52–58.
42. **Joseph FJ, Vanluchene HER, Bervini D**
Simulation training approaches in intracranial aneurysm surgery: a systematic review
Neurosurgical Review. 2023;46:101.
43. **Wang Z, Shen JJ**
Simulation training in spine surgery
Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2022;30.
44. **Pennington Z, Kuo C, et al.**
Resident training in spine surgery: a systematic review of simulation-based educational models
World Neurosurgery. 2023;174.
45. **Yuan W, Zhou X, Meng X, Zhu Y**
Anterior cervical discectomy and fusion training with virtual reality: enhance cognition, attitudes, self-efficacy and performance in residents
European Spine Journal. 2025;34:2227–2238.
46. **Robertson FC, Zygourakis CC, Wu JY, et al.**
Neurosurgical resident skill development using a novel simulator-based anterior cervical discectomy and fusion curriculum
World Neurosurgery. 2025;201:124257.

47. **Nadeem–Tariq A, Kazemeini S, Kaur P, et al.**
Augmented reality in spine surgery: a narrative review of clinical accuracy, workflow efficiency, and barriers to adoption
Cureus. 2025;17(6):e86803.
48. **Xin B, Huang X, Wan W, et al.**
The efficacy of immersive virtual reality surgical simulator training for pedicle screw placement: a randomized double–blind controlled trial
International Orthopaedics. 2020;44:927–934.
49. **Yudkowsky R, Luciano C, Banerjee P, et al.**
Practice on an augmented reality/haptic simulator and library of virtual brains improves residents' ability to perform a ventriculostomy
Simulation in Healthcare. 2013;8(1):25–31.
50. **Alaraj A, et al.**
Virtual reality–based simulation training for ventriculostomy: an evidence–based approach
World Neurosurgery / Neurosurgery. 2015–2016.
51. **D'Urso PS, et al.**
NeuroTouch: a physics–based virtual simulator for cranial microneurosurgery training
Virtual Simulation in Neurosurgical Education.
52. **Cearns M, Patel EA, et al.**
Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review, meta–analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance
Neurosurgical Review. 2021;44(4):1853–1867.
53. **Patel EA, Aydin A, Cearns M, Dasgupta P, Ahmed K**
A systematic review of simulation–based training in neurosurgery, Part 1: Cranial neurosurgery
World Neurosurgery. 2020;133:e850–e873.
54. **Patel EA, Aydin A, Cearns M, Dasgupta P, Ahmed K**
A systematic review of simulation–based training in neurosurgery, Part 2: Spine, paediatric, interventional neuroradiology and non–technical skills
World Neurosurgery. 2020;134:e526–e544.

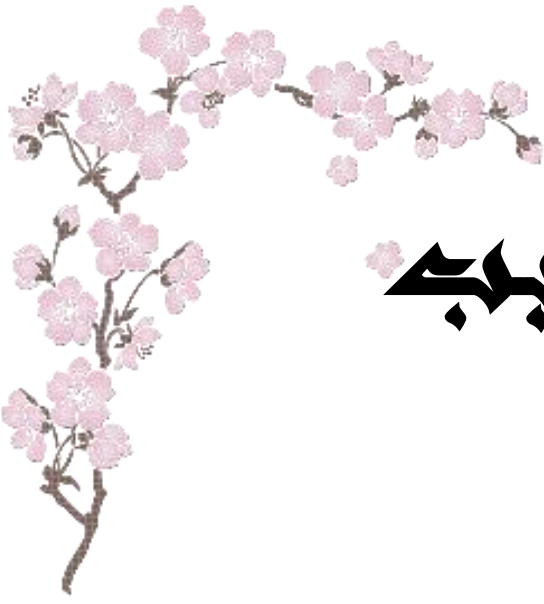
55. **Xin B, Huang X, Wan W, et al.**
The efficacy of immersive virtual reality surgical simulator training for pedicle screw placement: a randomized double-blind controlled trial
International Orthopaedics. 2020;44:927-934.
56. **Hou Y, Shi J, Lin Y, et al.**
Virtual surgery simulation versus traditional approaches in training of residents in cervical pedicle screw placement
Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery. 2018;138(6):777-782.
57. **Gottschalk MB, Yoon ST, Park DK, et al.**
Surgical training using three-dimensional simulation in placement of cervical lateral mass screws: a blinded randomized controlled trial
The Spine Journal. 2015;15(1):168-175.
58. **Alaraj A, Luciano C, Bailey DP, et al.**
Virtual reality-based simulation training for ventriculostomy: an evidence-based approach
Neurosurgery / Operative Neurosurgery. 2013.
59. **Operative Neurosurgery Editorial Group**
Training on a 3D-printed simulation model improves accuracy in external ventricular drain placement
Operative Neurosurgery. 2025;29:418-427.
60. **Hanalioglu S, Gurses ME, Baylarov B, et al.**
Quantitative assessment and objective improvement of the accuracy of neurosurgical planning through digital patient-specific 3D models
Frontiers in Surgery. 2024;11:1386091.
61. **Hu J, Lu J, Tan WB, Lomanto D**
Training improves laparoscopic task performance and decreases operator workload as measured using the NASA-TLX score
Surgical Endoscopy. 2015.
62. **Bohl MA, et al.**
The Living Spine Model: a biomimetic surgical training and education tool
Operative Neurosurgery (Hagerstown). 2020;19(1):98-106.

63. **Berkenstadt H, et al.**
Simulation-based interpersonal communication skills training for neurosurgical residents
Israel Medical Association Journal. 2013;15:557-560.
64. **Ciporen J, et al.**
Crisis management simulation: establishing a dual neurosurgery and anesthesia training experience
Journal of Neurosurgical Anesthesiology. 2018;30(1):65-70.
65. **Nontechnical skills in neurosurgery: a systematic review of the literature**
World Neurosurgery. 2020;133:e874-e892.
66. **Davids J, et al.**
Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review, meta-analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance
Neurosurgical Review. 2020.
67. **Dias RD, et al.**
Using the NASA-TLX to evaluate workload in surgery: a systematic review
Surgical Education Literature.
68. **Yule S, et al.**
Non-Technical Skills for Surgeons (NOTSS) system and handbook
Royal College of Surgeons of Edinburgh.
69. **Learning non-technical skills through simulation**
Simulation in Surgical Training (Book Chapter).
70. **Pergakis M, Ghoshal S**
Update on simulation in neurocritical care: current applications and future directions
Current Treatment Options in Neurology. 2024.
71. **Albin RL**
Education and team science in neurocritical care
Current Treatment Options in Neurology. 2024.
72. **Fernandez R, et al.**
Simulation-based team leadership training improves team leadership during actual trauma resuscitations: a randomized controlled trial
Critical Care Medicine. 2020;48(1):73-82.

73. **Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review and meta-analysis**
Acta Neurochirurgica / Neurosurgical Review.
74. **Lemole GM Jr, et al.**
Virtual reality in neurosurgical education: part-task ventriculostomy simulation with dynamic visual and haptic feedback
Neurosurgery. 2007;61(1):142-149.
75. **Schmidt MW, et al.**
Virtual reality simulation in robot-assisted surgery: meta-analysis of transferability to the operating room
BJS Open. 2021.
76. **Ganju A, Aoun SG, Daou MR, El Ahmadi TY, Chang A, Bailes JE**
The role of simulation in neurosurgical education: a survey of United States neurosurgery program directors
Neurosurgical Education Literature.
77. **Selden NR, Anderson VC, McCartney S, Origiano TC, Burchiel KJ, Barbaro NM**
Society of Neurological Surgeons boot camp courses: knowledge retention and relevance of hands-on learning after 6 months of postgraduate year 1 training
Journal of Neurosurgery. 2013;119(3):796-802.
78. **Selden NR, Anderson VC, McCartney S, Origiano TC, Burchiel KJ, Barbaro NM.**
79. **Society of Neurological Surgeons boot camp courses: knowledge retention and relevance of hands-on learning after 6 months of postgraduate year 1 training. J Neurosurg.**
2013;119(3):796-802. doi:10.3171/2013.3.JNS122114
80. **Stengel FC, Gandía-González ML, Aldea CC, et al.**
Transformation of neurosurgical training from “see one, do one, teach one” to AR/VR & simulation – A survey by the EANS Young Neurosurgeons.
Brain Spine. 2022;2:100929. doi:10.1016/j.bas.2022.100929
81. **Zoia C, Raffa G, Aldea CC, et al.**
The EANS Young Neurosurgeons Committee’s vision of the future of European neurosurgery.
J Neurosurg Sci. 2022;66(6):473-475.
82. **Schirmer CM, Elder JB, Roitberg B, Lobel DA.**
Virtual reality-based simulation training for ventriculostomy: an evidence-based approach.
Neurosurgery. 2013;73(Suppl 1):66-73.

83. **D'Urso PS, Thompson RG, Atkinson RL, Weidmann MJ, Redmond MJ, Hall BI, et al.**
Cerebrovascular biomodelling: a technical note.
Surg Neurol. 1999;52(5):490–500.
84. **Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, Trenkler J.**
Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery.
Technical note. *J Neurosurg.* 2004;100(1):139–45. 4. Wurm G, Lehner M, Tomancok B, Kleiser R, Nussbaumer K. Cerebrovascular biomodeling for aneurysm surgery: simulation-based training by means of rapid prototyping technologies. *Surg Innov.* 2011;18(3):294–306.
85. **Kimura T, Morita A, Nishimura K, Aiyama H, Itoh H, Fukaya S, et al.**
Simulation of and training for cerebral aneurysm clipping with 3-dimensional models.
Neurosurgery. 2009;65(4):719–25; discussion 25–6.
86. **Mashiko T, Otani K, Kawano R, et al.**
Development of a three-dimensional hollow elastic model for cerebral aneurysm clipping simulation
World Neurosurgery. 2013.
87. **Lan Q, Chen A, Zhang T, Li G, Zhu Q, Fan X, et al.**
Development of three-dimensional printed Craniocerebral models for simulated neurosurgery.
World Neurosurg. 2016;91:434–42.
88. **Andereggen L, Gralla J, Andres RH, Weber S, Schroth G, Beck J, et al.**
Stereolithographic models in the interdisciplinary planning of treatment for complex intracranial aneurysms.
Acta Neurochir. 2016;158(9):1711–20.
89. **Mashiko T, Konno T, Kaneko N, Watanabe E.**
Training in brain retraction using a self-made three-dimensional model. *World Neurosurg.* 2015;84(2):585–90. 13. Ryan JR, Almefty KK, Nakaji P, Frakes DH. Cerebral aneurysm clipping surgery simulation using patient-specific 3D printing and silicone casting.
World Neurosurg. 2016;88:175–81.
90. **Waran V, Devaraj P, Hari Chandran T, Muthusamy KA, Rathinam AK, Balakrishnan YK, et al.**
Three-dimensional anatomical accuracy of cranial models created by rapid prototyping techniques validated using a neuronavigation station.
J Clin Neurosci. 2012;19(4):574–7.

91. **D'Urso PS, Anderson RL, Weidmann MJ, Redmond MJ, Hall BI, Earwaker WJ, et al.**
Biomodelling of skull base tumours. *J Clin Neurosci.* 1999;6(1):31–5. 19. Kondo K, Harada N, Masuda H, Sugo N, Terazono S, Okonogi S, et al. A neurosurgical simulation of skull base tumors using a 3D printed rapid prototyping model containing mesh structures. *Acta Neurochir.* 2016;158(6):1213–9.
92. **Ryan JR, Chen T, Nakaji P, Frakes DH, Gonzalez LF.**
Ventriculostomy simulation using patient-specific ventricular anatomy, 3D printing, and hydrogel casting. *World Neurosurg.* 2015;84(5):1333–9.
93. **Yasargil MG.**
Microneurosurgery, vol. I.
New York: Thieme Stratton; 1984. p. 6
94. **Mody MG, Nourbakhsh A, Stahl DL, Gibbs M, Alfawareh M, Garges KJ.**
The prevalence of wrong level surgery among spine surgeons. *Spine.* 2008;33:194–8.
95. **Andersson GBJ.**
Epidemiological features of chronic lowback pain. *Lancet.* 1999;354(9178):581–5. 2. Hoy D, Brooks P, Blyth F, Buchbinder R. The epidemiology of low back pain, best practice and research. *Clin Rheumatol.* 2010;24(6):769–81. 3. Adams MA. *Biomechanics of back pain. Acupunct Med.* 2004;22(4):178–88.



قسم الطبيب

أُقْسِمُ بِاللَّهِ الْعَظِيمِ

أَنْ أَر_اقِبَ اللَّهَ فِي مِهْنَتِي.

وَأَنْ أَصُونَ حَيَاةَ الْإِنْسَانِ فِي كَافَّةِ أَطْوَارِهَا فِي كُلِّ الظُّرُوفِ
وَالْأَحْوَالِ بِإِذْنِ اللَّهِ وَسَعْيِي فِي إِنْقَازِهَا مِنَ الْهَلَاكِ وَالْمَرَضِ
وَالْأَلَمِ وَالْقَلْقِ.

وَأَنْ أَحْفَظَ لِلنَّاسِ كِرَامَتَهُمْ، وَأَسْتُرَ عَوْرَتَهُمْ، وَأَكْتُمَ
سِرَّهُمْ.

وَأَنْ أَكُونَ عَلَى الدَّوَامِ مِنْ وَسَائِلِ رَحْمَةِ اللَّهِ، بِإِذْنِ رِعَايَتِي الطَّبِيعَةَ لِلْقَرِيبِ وَالْبَعِيدِ، لِلصَّالِحِ
وَالطَّالِحِ، وَالصَّدِيقِ وَالْعَدُوِّ.

وَأَنْ أَثَابِرَ عَلَى طَلَبِ الْعِلْمِ، وَأَسَخِّرَهُ لِنَفْعِ الْإِنْسَانِ لَا لِأَذَاهِ.

وَأَنْ أَوْقِرَ مَنْ عَلَّمَنِي، وَأُعَلِّمَ مَنْ يَصْغُرَنِي، وَأَكُونَ أَخَا لِكُلِّ زَمِيلٍ فِي الْمِهْنَةِ الطَّبِيعَةِ مُتَعَاوِنِينَ
عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَى.

وَأَنْ تَكُونَ حَيَاتِي مِصْدَاقَ إِيمَانِي فِي سِرِّي وَعَلَانِيَتِي، نَقِيَّةً مِمَّا يَشِينُهَا تَجَاهَ
اللَّهِ وَرَسُولِهِ وَالْمُؤْمِنِينَ.

وَاللَّهُ عَلَى مَا أَقُولُ شَهِيدٌ



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

Year 2026

Thesis N° 026

Simulation in Neurosurgery: Methods, Effectiveness, and Challenges

THESIS

Publicly presented and defended on 08/01/2026

BY

Mr. Othman LMEJJATI

Born on March 25, 1999 in Rabat

TO OBTAIN THE DOCTOR OF MEDICINE DEGREE

KEYWORDS:

Healthcare simulation – Neurosurgery – Simulation laboratory

JURY

Mr. S. AIT BENALI

Professor of Neurosurgery

PRESIDENT

Mr. F. HAJHOUI

Professor Associate of Neurosurgery

RAPPORTEUR

Mr. M. AMINE

Professor of Epidemiology and Public Health

Mr. H. GHANNANE

Professor of Neurosurgery

Mr. R. EL ADIB

Professor of Anesthesiology and Critical Care

JUDGE

