



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

Année 2025

Thèse N° 179/25

**Impression 3D médicale, expérience du service de radiologie de l'hôpital Arrazi, CHU Mohammed VI.**

**THÈSE**

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 05/06/2025

PAR :

**Mr. Ayoub HAOUFADI**

Né le 23 décembre 1999 à Beni Mellal

**Médecin interne au CHU Mohammed VI de Marrakech.**

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

---

**MOTS-CLÉS :**

IMPRESSION 3D – RADIOLOGIE – GUIDE CHIRURGICAL-REPERAGE ANALOGIQUE –CRANIOPLASTIE

---

**JURY**

**Mme. M. OUALI IDRISSI**

Professeur de Radiologie.

PRÉSIDENTE

**Mme. N. CHERIF IDRISSI EL GANOUNI**

Professeur de Radiologie.

RAPPORTEUR

**Mr. B. BOUTAKIOUTE**

Professeur de Radiologie.

**Mr. M.A BENHIMA**

Professeur de Traumatologie-Orthopédie.

**Mr. H. GHANNANE**

Professeur de Neurochirurgie.

**Mr. M.D EL AMRANI**

Professeur d'Anatomie.

JUGES

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ ﴿١﴾ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ ﴿٢﴾

مَالِكِ يَوْمِ الدِّينِ ﴿٣﴾ إِيَّاكَ نَعْبُدُ وَإِيَّاكَ

نَسْتَعِينُ ﴿٤﴾ اهْدِنَا الصِّرَاطَ الْمُسْتَقِيمَ ﴿٥﴾

صِرَاطَ الَّذِينَ أَنْعَمْتَ عَلَيْهِمْ ﴿٦﴾

غَيْرِ الْمَغْضُوبِ عَلَيْهِمْ وَلَا الضَّالِّينَ ﴿٧﴾



## *Serment d'Hippocrate*

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

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

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

*Je ne trahirai pas les secrets qui me seront confiés.*

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

*Les médecins seront mes frères.*

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

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

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

*Je m'y engage librement et sur mon honneur.*

**Déclaration Genève, 1948**



**LISTE DES PROFESSEURS**



**UNIVERSITÉ CADI AYYAD**  
**FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE**  
**MARRAKECH**

Doyens Honoraires

: Pr. Badie Azzaman MEHADJI  
: Pr. Abdelhaq ALAOUY 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 ZIRAOUY

Secrétaire Générale

: Mr. Azzeddine EL HOUDAIGUI

**LISTE NOMINATIVE DU PERSONNEL ENSEIGNANTS CHERCHEURS PERMANANT**

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

17	CHAKOUR Mohammed	P.E.S	Hématologie biologique
18	EL FEZZAZI Redouane	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
19	YOUNOUS Said	P.E.S	Anesthésie-réanimation
20	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	ABOULFALAH Abderrahim	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
28	OULAD SAIAD Mohamed	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
29	DAHAMI Zakaria	P.E.S	Urologie
30	EL HATTAOUI Mustapha	P.E.S	Cardiologie
31	ELFIKRI Abdelghani	P.E.S	Radiologie
32	KAMILI El Ouafi El Aouni	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
33	MAOULAININE Fadl mrabih rabou	P.E.S	Pédiatrie (Néonatalogie)
34	MATRANE Aboubakr	P.E.S	Médecine nucléaire
35	AIT AMEUR Mustapha	P.E.S	Hématologie biologique
36	AMINE Mohamed	P.E.S	Epidémiologie clinique
37	EL ADIB Ahmed Rhassane	P.E.S	Anesthésie-réanimation
38	ADMOU Brahim	P.E.S	Immunologie
39	CHERIF IDRISSE EL GANOUNI Najat	P.E.S	Radiologie
40	TASSI Noura	P.E.S	Maladies infectieuses
41	MANOUDI Fatiha	P.E.S	Psychiatrie
42	BOURROUS Monir	P.E.S	Pédiatrie
43	NEJMI Hicham	P.E.S	Anesthésie-réanimation

44	LAOUAD Inass	P.E.S	Néphrologie
45	EL HOUDZI Jamila	P.E.S	Pédiatrie
46	FOURAIJI Karima	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
47	ARSALANE Lamiae	P.E.S	Microbiologie-virologie
48	BOUKHIRA Abderrahman	P.E.S	Biochimie-chimie
49	KHALLOUKI Mohammed	P.E.S	Anesthésie-réanimation
50	BSISS Mohammed Aziz	P.E.S	Biophysique
51	EL OMRANI Abdelhamid	P.E.S	Radiothérapie
52	SORAA Nabila	P.E.S	Microbiologie-virologie
53	KHOUCHANI Mouna	P.E.S	Radiothérapie
54	JALAL Hicham	P.E.S	Radiologie
55	OUALI IDRISSE Mariem	P.E.S	Radiologie
56	ZAHLANE Mouna	P.E.S	Médecine interne
57	BENJILALI Laila	P.E.S	Médecine interne
58	NARJIS Youssef	P.E.S	Chirurgie générale
59	RABBANI Khalid	P.E.S	Chirurgie générale
60	HAJJI Ibtissam	P.E.S	Ophtalmologie
61	EL ANSARI Nawal	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
62	ABOU EL HASSAN Taoufik	P.E.S	Anesthésie-réanimation
63	SAMLANI Zouhour	P.E.S	Gastro-entérologie
64	LAGHMARI Mehdi	P.E.S	Neurochirurgie
65	ABOUSSAIR Nistrine	P.E.S	Génétique
66	BENCHAMKHA Yassine	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
67	CHAFIK Rachid	P.E.S	Traumato-orthopédie
68	MADHAR Si Mohamed	P.E.S	Traumato-orthopédie
69	EL HAOURY Hanane	P.E.S	Traumato-orthopédie
70	ABKARI Imad	P.E.S	Traumato-orthopédie
71	EL BOUIHI Mohamed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale

72	LAKMICHI Mohamed Amine	P.E.S	Urologie
73	AGHOUTANE El Mouhtadi	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
74	HOCAR Ouafa	P.E.S	Dermatologie
75	EL KARIMI Saloua	P.E.S	Cardiologie
76	EL BOUCHTI Imane	P.E.S	Rhumatologie
77	AMRO Lamyae	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
78	ZYANI Mohammad	P.E.S	Médecine interne
79	QACIF Hassan	P.E.S	Médecine interne
80	BEN DRISS Laila	P.E.S	Cardiologie
81	MOUFID Kamal	P.E.S	Urologie
82	QAMOUSS Youssef	P.E.S	Anesthésie réanimation
83	EL BARNI Rachid	P.E.S	Chirurgie générale
84	KRIET Mohamed	P.E.S	Ophtalmologie
85	BOUCHENTOUF Rachid	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
86	ABOUCHADI Abdeljalil	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
87	BASRAOUI Dounia	P.E.S	Radiologie
88	RAIS Hanane	P.E.S	Anatomie Pathologique
89	BELKHOU Ahlam	P.E.S	Rhumatologie
90	ZAOUI Sanaa	P.E.S	Pharmacologie
91	MSOUGAR Yassine	P.E.S	Chirurgie thoracique
92	EL MGHARI TABIB Ghizlane	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
93	DRAISS Ghizlane	P.E.S	Pédiatrie
94	EL IDRISSE SLITINE Nadia	P.E.S	Pédiatrie
95	RADA Noureddine	P.E.S	Pédiatrie
96	BOURRAHOUE Aicha	P.E.S	Pédiatrie
97	MOUAFFAK Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
98	ZIADI Amra	P.E.S	Anesthésie-réanimation
99	ANIBA Khalid	P.E.S	Neurochirurgie

100	TAZI Mohamed Illias	P.E.S	Hématologie clinique
101	ROCHDI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
102	FADILI Wafaa	P.E.S	Néphrologie
103	ADALI Imane	P.E.S	Psychiatrie
104	ZAHLANE Kawtar	P.E.S	Microbiologie- virologie
105	LOUHAB Nisrine	P.E.S	Neurologie
106	HAROU Karam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
107	BASSIR Ahlam	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
108	BOUKHANNI Lahcen	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
109	FAKHIR Bouchra	P.E.S	Gynécologie-obstétrique
110	BENHIMA Mohamed Amine	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
111	HACHIMI Abdelhamid	P.E.S	Réanimation médicale
112	EL KHAYARI Mina	P.E.S	Réanimation médicale
113	AISSAOUI Younes	P.E.S	Anesthésie-réanimation
114	BAIZRI Hicham	P.E.S	Endocrinologie et maladies métaboliques
115	ATMANE El Mehdi	P.E.S	Radiologie
116	EL AMRANI Moulay Driss	P.E.S	Anatomie
117	BELBARAKA Rhizlane	P.E.S	Oncologie médicale
118	ALJ Soumaya	P.E.S	Radiologie
119	OUBAHA Sofia	P.E.S	Physiologie
120	EL HAOUATI Rachid	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
121	BENALI Abdeslam	P.E.S	Psychiatrie
122	MLIHA TOUATI Mohammed	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
123	MARGAD Omar	P.E.S	Traumatologie-orthopédie
124	KADDOURI Said	P.E.S	Médecine interne
125	ZEMRAOUI Nadir	P.E.S	Néphrologie
126	EL KHADER Ahmed	P.E.S	Chirurgie générale
127	LAKOUICHMI Mohammed	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale

128	DAROUASSI Youssef	P.E.S	Oto-rhino-laryngologie
129	BENJELLOUN HARZIMI Amine	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
130	FAKHRI Anass	P.E.S	Histologie-embyologie cytogénétique
131	SALAMA Tarik	P.E.S	Chirurgie pédiatrique
132	CHRAA Mohamed	P.E.S	Physiologie
133	ZARROUKI Youssef	P.E.S	Anesthésie-réanimation
134	AIT BATAHAR Salma	P.E.S	Pneumo-phtisiologie
135	ADARMOUCH Latifa	P.E.S	Médecine communautaire (médecine préventive, santé publique et hygiène)
136	BELBACHIR Anass	P.E.S	Anatomie pathologique
137	HAZMIRI Fatima Ezzahra	P.E.S	Histologie-embyologie cytogénétique
138	EL KAMOUNI Youssef	P.E.S	Microbiologie-virologie
139	SERGHINI Issam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
140	EL MEZOUARI El Mostafa	P.E.S	Parasitologie mycologie
141	ABIR Badreddine	P.E.S	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
142	GHAZI Mirieme	P.E.S	Rhumatologie
143	ZIDANE Moulay Abdelfettah	P.E.S	Chirurgie thoracique
144	LAHKIM Mohammed	P.E.S	Chirurgie générale
145	MOUHSINE Abdelilah	P.E.S	Radiologie
146	TOURABI Khalid	P.E.S	Chirurgie réparatrice et plastique
147	BELHADJ Ayoub	P.E.S	Anesthésie-réanimation
148	BOUZERDA Abdelmajid	P.E.S	Cardiologie
149	ARABI Hafid	P.E.S	Médecine physique et réadaptation fonctionnelle
150	ARSALANE Adil	P.E.S	Chirurgie thoracique
151	ABDELFETTAH Youness	P.E.S	Rééducation et réhabilitation fonctionnelle
152	REBAHI Houssam	P.E.S	Anesthésie-réanimation
153	BENNAOUI Fatiha	P.E.S	Pédiatrie
154	ZOUIZRA Zahira	P.E.S	Chirurgie Cardio-vasculaire
155	SEDDIKI Rachid	Pr Ag	Anesthésie-réanimation

156	SEBBANI Majda	Pr Ag	Médecine Communautaire (Médecine préventive, santé publique et hygiène)
157	ABDOU Abdessamad	Pr Ag	Chirurgie Cardio-vasculaire
158	HAMMOUNE Nabil	Pr Ag	Radiologie
159	ESSADI Ismail	Pr Ag	Oncologie médicale
160	MESSAOUDI Redouane	Pr Ag	Ophtalmologie
161	ALJALIL Abdelfattah	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
162	LAFFINTI Mahmoud Amine	Pr Ag	Psychiatrie
163	RHARRASSI Issam	Pr Ag	Anatomie-pathologique
164	ASSERRAJI Mohammed	Pr Ag	Néphrologie
165	JANAH Hicham	Pr Ag	Pneumo-phtisiologie
166	NASSIM SABAH Taoufik	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
167	ELBAZ Meriem	Pr Ag	Pédiatrie
168	BELGHMAIDI Sarah	Pr Ag	Ophtalmologie
169	FENANE Hicham	Pr Ag	Chirurgie thoracique
170	GEBRATI Lhoucine	MC Hab	Chimie
171	FDIL Naima	MC Hab	Chimie de coordination bio-organique
172	LOQMAN Souad	MC Hab	Microbiologie et toxicologie environnementale
173	BAALLAL Hassan	Pr Ag	Neurochirurgie
174	BELFQUIH Hatim	Pr Ag	Neurochirurgie
175	AKKA Rachid	Pr Ag	Gastro-entérologie
176	BABA Hicham	Pr Ag	Chirurgie générale
177	MAOUJOURD Omar	Pr Ag	Néphrologie
178	SIRBOU Rachid	Pr Ag	Médecine d'urgence et de catastrophe
179	EL FILALI Oualid	Pr Ag	Chirurgie Vasculaire périphérique
180	EL- AKHIRI Mohammed	Pr Ag	Oto-rhino-laryngologie
181	HAJJI Fouad	Pr Ag	Urologie
182	OUMERZOUK Jawad	Pr Ag	Neurologie
183	JALLAL Hamid	Pr Ag	Cardiologie

184	ZBITOU Mohamed Anas	Pr Ag	Cardiologie
185	RAISSI Abderrahim	Pr Ag	Hématologie clinique
186	BELLASRI Salah	Pr Ag	Radiologie
187	DAMI Abdallah	Pr Ag	Médecine Légale
188	AZIZ Zakaria	Pr Ag	Stomatologie et chirurgie maxillo faciale
189	ELOUARDI Youssef	Pr Ag	Anesthésie-réanimation
190	LAHLIMI Fatima Ezzahra	Pr Ag	Hématologie clinique
191	EL FAKIRI Karima	Pr Ag	Pédiatrie
192	NASSIH Houda	Pr Ag	Pédiatrie
193	LAHMINE Widad	Pr Ag	Pédiatrie
194	BENANTAR Lamia	Pr Ag	Neurochirurgie
195	EL FADLI Mohammed	Pr Ag	Oncologie médicale
196	AIT ERRAMI Adil	Pr Ag	Gastro-entérologie
197	CHETTATI Mariam	Pr Ag	Néphrologie
198	SAYAGH Sanae	Pr Ag	Hématologie
199	BOUTAKIOUTE Badr	Pr Ag	Radiologie
200	CHAHBI Zakaria	Pr Ag	Maladies infectieuses
201	ACHKOUN Abdessalam	Pr Ag	Anatomie
202	DARFAOUI Mouna	Pr Ag	Radiothérapie
203	EL-QADIRY Raby	Pr Ag	Pédiatrie
204	ELJAMILI Mohammed	Pr Ag	Cardiologie
205	HAMRI Asma	Pr Ag	Chirurgie Générale
206	EL HAKKOUNI Awatif	Pr Ag	Parasitologie mycologie
207	ELATIQUI Oumkeltoum	Pr Ag	Chirurgie réparatrice et plastique
208	BENZALIM Meriam	Pr Ag	Radiologie
209	ABOULMAKARIM Siham	Pr Ag	Biochimie
210	LAMRANI HANCHI Asmae	Pr Ag	Microbiologie-virologie
211	HAJHOUI Farouk	Pr Ag	Neurochirurgie

212	EL KHASSOUI Amine	Pr Ag	Chirurgie pédiatrique
213	MEFTAH Azzelarab	Pr Ag	Endocrinologie et maladies métaboliques
214	DOUIREK Fouzia	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
215	BELARBI Marouane	Pr Ass	Néphrologie
216	AMINE Abdellah	Pr Ass	Cardiologie
217	CHETOUI Abdelkhalek	Pr Ass	Cardiologie
218	WARDA Karima	MC	Microbiologie
219	EL AMIRI My Ahmed	MC	Chimie de Coordination bio-organnique
220	ROUKHSI Redouane	Pr Ass	Radiologie
221	EL GAMRANI Younes	Pr Ass	Gastro-entérologie
222	ARROB Adil	Pr Ass	Chirurgie réparatrice et plastique
223	SALLAHI Hicham	Pr Ass	Traumatologie-orthopédie
224	SBAAI Mohammed	Pr Ass	Parasitologie-mycologie
225	FASSI FIIHRI Mohamed jawad	Pr Ass	Chirurgie générale
226	BENCHAFAI Ilias	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
227	EL JADI Hamza	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
228	SLIOUI Badr	Pr Ass	Radiologie
229	AZAMI Mohamed Amine	Pr Ass	Anatomie pathologique
230	YAHYAOUI Hicham	Pr Ass	Hématologie
231	ABALLA Najoua	Pr Ass	Chirurgie pédiatrique
232	MOUGUI Ahmed	Pr Ass	Rhumatologie
233	SAHRAOUI Houssam Eddine	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
234	AABBASSI Bouchra	Pr Ass	Pédopsychiatrie
235	SBAI Asma	MC	Informatique
236	HAZIME Raja	Pr Ass	Immunologie
237	CHEGGOUR Mouna	MC	Biochimie
238	RHEZALI Manal	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
239	ZOUITA Btissam	Pr Ass	Radiologie

240	MOULINE Souhail	Pr Ass	Microbiologie-virologie
241	AZIZI Mounia	Pr Ass	Néphrologie
242	BENYASS Youssef	Pr Ass	Traumato-orthopédie
243	BOUHAMIDI Ahmed	Pr Ass	Dermatologie
244	YANISSE Siham	Pr Ass	Pharmacie galénique
245	DOULHOUSNE Hassan	Pr Ass	Radiologie
246	KHALLIKANE Said	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
247	BENAMEUR Yassir	Pr Ass	Médecine nucléaire
248	ZIRAOUI Oualid	Pr Ass	Chimie thérapeutique
249	IDALENE Malika	Pr Ass	Maladies infectieuses
250	LACHHAB Zineb	Pr Ass	Pharmacognosie
251	ABOUDOURIB Maryem	Pr Ass	Dermatologie
252	AHBALA Tariq	Pr Ass	Chirurgie générale
253	LALAOUI Abdessamad	Pr Ass	Pédiatrie
254	ESSAFTI Meryem	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
255	RACHIDI Hind	Pr Ass	Anatomie pathologique
256	FIKRI Oussama	Pr Ass	Pneumo-physiologie
257	EL HAMDAOUI Omar	Pr Ass	Toxicologie
258	EL HAJJAMI Ayoub	Pr Ass	Radiologie
259	BOUMEDIANE El Mehdi	Pr Ass	Traumato-orthopédie
260	RAFI Sana	Pr Ass	Endocrinologie et maladies métaboliques
261	JEBRANE Ilham	Pr Ass	Pharmacologie
262	LAKHDAR Youssef	Pr Ass	Oto-rhino-laryngologie
263	LGHABI Majida	Pr Ass	Médecine du Travail
264	AIT LHAJ El Houssaine	Pr Ass	Ophtalmologie
265	RAMRAOUI Mohammed-Es-said	Pr Ass	Chirurgie générale
266	EL MOUHAFID Faisal	Pr Ass	Chirurgie générale
267	AHMANNNA Hussein-choukri	Pr Ass	Radiologie

268	AIT M'BAREK Yassine	Pr Ass	Neurochirurgie
269	ELMASRIOUI Joumana	Pr Ass	Physiologie
270	FOURA Salma	Pr Ass	Chirurgie pédiatrique
271	LASRI Najat	Pr Ass	Hématologie clinique
272	BOUKTIB Youssef	Pr Ass	Radiologie
273	MOUROUTH Hanane	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
274	BOUZID Fatima zahrae	Pr Ass	Génétique
275	MRHAR Soumia	Pr Ass	Pédiatrie
276	QUIDDI Wafa	Pr Ass	Hématologie
277	BEN HOUMICH Taoufik	Pr Ass	Microbiologie-virologie
278	FETOUI Imane	Pr Ass	Pédiatrie
279	FATH EL KHIR Yassine	Pr Ass	Traumato-orthopédie
280	NASSIRI Mohamed	Pr Ass	Traumato-orthopédie
281	AIT-DRISS Wiam	Pr Ass	Maladies infectieuses
282	AIT YAHYA Abdelkarim	Pr Ass	Cardiologie
283	DIANI Abdelwahed	Pr Ass	Radiologie
284	AIT BELAID Wafae	Pr Ass	Chirurgie générale
285	ZTATI Mohamed	Pr Ass	Cardiologie
286	HAMOUCHE Nabil	Pr Ass	Néphrologie
287	ELMARDOULI Mouhcine	Pr Ass	Chirurgie Cardio-vasculaire
288	BENNIS Lamiae	Pr Ass	Anesthésie-réanimation
289	BENDAOUUD Layla	Pr Ass	Dermatologie
290	HABBAB Adil	Pr Ass	Chirurgie générale
291	CHATAR Achraf	Pr Ass	Urologie
292	OUMGHAR Nezha	Pr Ass	Biophysique
293	HOUMAID Hanane	Pr Ass	Gynécologie-obstétrique
294	YOUSFI Jaouad	Pr Ass	Gériatrie
295	NACIR Oussama	Pr Ass	Gastro-entérologie

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

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

**LISTE ARRÊTÉE LE 04/10/2024**



# DÉDICACES





### *Tout d'abord à Allah,*

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

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

*AMEN!*

*A mes très chers parents Abdellah HAOUFADI & Aïcha BOUSSALAM*

*Une vie ne serait jamais suffisante pour vous remercier, et les plus beaux mots de la littérature ne pourraient exprimer à juste titre tout l'amour, le respect et l'admiration que j'ai pour vous. Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé, ni efforts. Vous avez su m'entourer d'attention et m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi. J'ai connu la vie à travers vos yeux et j'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondé en moi et réaliser aujourd'hui l'un de vos rêves. Je vous dédie donc cet humble travail en témoignage de mon profond amour. Je prie Dieu Tout Puissant qu'il vous préserve et vous accorde santé, longue vie et bonheur.*

*A mes sœurs et mon frère : Hajar, Hamza et Sara*

*À Hajar, ma grande sœur et véritable modèle. C'est en grande partie grâce à elle que je suis là aujourd'hui : elle a joué un rôle essentiel en veillant sur moi et en me guidant dès l'enfance, Elle incarne pour moi la force, la bienveillance et la détermination, J'ai toujours admiré sa sagesse, sa générosité et son cœur immense. En plus d'être une brillante médecin, elle est une maman exceptionnelle pour ses deux fils, Ziad et Jad. Zizo, qui grandit si vite, est déjà d'une vivacité et d'une intelligence remarquables ; il illumine nos journées par son sourire et son humour contagieux. Et puis Jadou, le petit dernier de la famille, un vrai petit trésor, doux, drôle et tellement attachant — on aime tous passer du temps avec lui, tant il nous apporte de la joie.*

*À Hamza, mon aîné, compagnon de jeux et d'aventures, avec qui j'ai partagé une enfance joyeuse, entre football, FIFA, Dofus... et tant de souvenirs précieux.*

*Je me souviens de nos nuits blanches à essayer de jouer en cachette, jusqu'à ce qu'on se fasse prendre . Les réunions de famille n'ont jamais été aussi animées et pleines de rires que grâce à lui.*

*Hamza, aventurier dans l'âme, incarne pour moi la joie de vivre, mais aussi le sérieux et la responsabilité quand il le faut. Je le voyais comme un exemple dès l'enfance — et c'est encore le cas aujourd'hui, il est aussi père admirable pour le petit Youssef, un enfant vif, joyeux et si attachant.*

*Et à Sara, ma sœur tendre, mon bras droit, toujours présente avec douceur et attention. Elle est pour moi un modèle de caractère, une femme forte et généreuse, pleine de bienveillance et de chaleur humaine. Les heures passées à jouer à Dofus ensemble restent parmi mes plus beaux souvenirs. Tu occupes une place immense dans ma vie, et je suis profondément reconnaissant d'avoir une sœur comme toi.*

*Malgré les kilomètres, vous êtes tous incroyablement proches de mon cœur, et je mesure chaque jour la chance que j'ai d'avoir les meilleurs sœurs et frère du monde. Je vous aime profondément.*

### *A mon beau-frère Safouane,*

*à Safouane, que je ne considère pas seulement comme un beau-frère, mais bien comme un quatrième frère. C'est un exemple pour moi, à bien des niveaux — en tant que médecin, bien sûr, puisque j'ai fini par choisir la même spécialité que lui, mais aussi en tant qu'homme, par sa sérénité, son intelligence et sa bienveillance. Je suis reconnaissant d'avoir croisé sa route, et encore plus heureux qu'il fasse partie de notre famille.*

### *A mes grands-parents maternels et paternels paix à leurs âmes*

*Même si le destin ne nous a pas permis de beaucoup nous connaître, je tiens à vous exprimer toute ma gratitude. Vous avez appris à mes parents les bonnes valeurs qu'ils m'ont transmises. Je vous dédie ce travail qui est le fruit de cet héritage.*

### *À mes tantes et oncles Souad, Faïza, Hanane, Hassan, Saïd, Mustapha... et à toute ma famille*

*Merci pour votre affection, vos encouragements et votre présence rassurante. Vous faites partie de ces liens précieux qui m'ont porté tout au long de ce chemin.*

*À mes très chers amis et frères : Ouassím, Yassíne Elmehdí,  
Yassíne Ezzerbí*

*À mes très chers amis, compagnons de ces années d'université que je n'oublierai jamais. Vous avez été bien plus que des amis : de vrais frères, présents dans chaque étape, chaque moment fort. Les nuits blanches à réviser, les décalages de prépa, le stress partagé, les fous rires incontrôlables, les soirées improvisées, les voyages, ... tout ça, c'est avec vous. vous étiez les personnages principaux de cette aventure, Des hommes vrais, des hommes de cœur, des hommes de vie. Je vous porte avec moi dans chaque souvenir, et pour longtemps encore.*

*Que notre fraternité reste éternelle.*

*À mes très chères amies : Boutáina, Dounía, Safae, Yousra*

*Il m'est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la reconnaissance et l'affection que je ressens pour vous. Vous êtes de véritables amies, sur qui je peux toujours compter, dans les bons comme dans les moments plus durs. En souvenir de tous ces instants partagés, de notre complicité et de l'amitié sincère qui nous unit, je vous dédie ce travail avec tout mon cœur. Je vous souhaite une vie remplie de joie, de sérénité et de belles réussites.*

*A mes amis les Delulus*

*Kenza, Almahdí, Bouchra, Aadel et Yasmine*

*À Mahdí, mon binôme en radiologie, mon frère, celui avec qui je suis (toujours) ponctuel — évidemment. Grand chef, organisateur, motivateur... J'espère qu'on continuera cette belle fraternité pendant le résidanat et bien au-delà, parce qu'on a encore de belles choses à vivre ensemble.*

*À Bouchra, celle qui me comprend sans que j'aie besoin d'expliquer, mon bras droit dans ce groupe mouvementé, même quand tu me réponds par ce fameux surnom sans le prononcer... et j'avoue, parfois, tu n'as pas complètement tort, mais moi, je sais que Tu comptes beaucoup pour moi, et je te le dis ici.*

*À Aadel, mon frère, avec qui j'ai bâti une amitié récente mais*

*profonde. Toujours positif, toujours partant, toujours en train de mettre une bonne ambiance , toujours aussi facile à battre à Souls pareil avec Mahdi, mais surtout, tu es quelqu'un de rare, et tu comptes beaucoup pour moi.*

*À Yasmayne, ma chère amie : sache que les noms sont classés par ordre d'affection... ( non je plaisante )*

*Tu sais que tu es une amie très précieuse à mes yeux. Même si tu continues de garder pour toi la raison de ta mystérieuse colère, je finirai bien par la découvrir un jour. Ce qui est certain, c'est que tu fais partie des gens qui rendent cette aventure beaucoup plus belle.*

*Et enfin, le plus beau pour la fin : Kenza,. Les années qu'on a partagées resteront gravées en moi. Les nuits de stress, les révisions interminables, l'internat... tu étais là, fidèle, présente, forte. Je suis chanceux de t'avoir eue à mes côtés — et je souhaite de tout cœur que ce soit encore le cas pour longtemps.*

### *A mes amis d'enfance*

#### *Hamza, Hachem*

*Ceux avec qui tout a commencé. Les souvenirs de nos jeux, de nos rires, des après-midi à jouer aux jeux vidéo ou au foot dans la rue, sont gravés en moi. C'est une chance rare de pouvoir grandir avec des personnes et les garder auprès de soi toutes ces années.*

*Malgré le temps qui passe et les chemins qui parfois s'éloignent, notre lien reste intact, sincère, et solide. Merci d'avoir été là depuis le tout début — et d'y être encore aujourd'hui.*

#### *A mon très cher ami Abdellah*

*À toi mon ami très proche, mon frère. On a partagé tant de moments de joie, de rires, de discussions profondes, que notre lien dépasse de loin une simple amitié. Tu es plus qu'un ami : tu es un frère de cœur, une présence précieuse et constante. Merci d'être là, toujours fidèle, toujours vrai.*

*A mes chers amis Adam, Mouad, Loay, Kenza, Chadi, Aymane, Haytham, Abdessamad, ...*

*Merci pour les bons moments, les rires, les échanges sincères et l'ambiance unique qu'on a partagée. Ce groupe restera pour moi un très beau souvenir d'amitié.*

*A toute la 22<sup>e</sup> promotion des internes de l'AMIMA*

*À la 22ème promotion des internes, avec qui j'ai partagé l'expérience brute, intense et inoubliable de l'internat : les longues gardes, les nuits sans sommeil, les responsabilités écrasantes, les moments de doute, d'épuisement, parfois de solitude. Aux urgences, on apprend à faire face, à réagir, à tenir bon malgré le chaos. Mais au cœur de tout cela, il y avait cette solidarité, ces épaules sur lesquelles on peut s'appuyer sans même parler. Ce que nous avons vécu ensemble nous a formés, forgés, et unis. Cette promotion restera gravée dans ma mémoire comme celle qui a résisté, avancé et grandi, ensemble.*

*Je vous souhaite à tous un parcours brillant, riche en réussites, en santé et en épanouissement dans ce métier aussi exigeant que profondément humain. Que l'avenir vous offre ce que vous méritez de plus beau.*

*A tout le personnel du service de radiologie d'Arrazi du CHU Mohammed VI.*

*Merci pour votre accueil, votre bienveillance et votre professionnalisme. Cette spécialité, aussi technique que passionnante, prend tout son sens grâce à des équipes comme la vôtre. Une pensée particulière à Mohammed, Assia, Maria, Nouhaïla, Sanaa, Chaïmae, Azzeddine, ainsi qu' Amine, Hicham, Diakite, Meryem, Fatima Ezzahra, Aïcha et Hiba — merci pour votre gentillesse et votre accompagnement.*

*A Tous ceux qui me sont chers et que j'ai involontairement omis de citer, l'oubli de la plume n'est pas celui du cœur.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*



---

# REMERCIEMENTS

---



*A mon maître, Présidente du jury  
Professeur OUALI IDRISSE Mariem  
Professeur d'enseignement supérieur de Radiologie  
de l'hôpital Arrazi au CHU Mohammed VI de  
Marrakech*

*Je vous remercie sincèrement de m'avoir fait l'honneur  
d'accepter de présider mon jury de thèse. C'est un véritable  
privilège pour moi d'avoir votre regard et votre présence lors  
de cette étape importante de mon parcours.*

*Votre engagement constant envers le développement de la  
radiologie, ainsi que vos nombreuses contributions à la  
recherche et à l'enseignement, sont pour nous, une réelle  
source d'inspiration.*

*J'admire profondément votre expertise, votre rigueur  
scientifique, et surtout votre dévouement à transmettre le  
savoir avec exigence et bienveillance. Vous représentez un  
modèle de passion et de professionnalisme, et je vous remercie  
de tout cœur pour la confiance que vous m'accordez.*

*A mon maître, Rapporteur de thèse*  
*Professeur CHÉRIFF IDRISSE EL GANOUNI Najat*  
*Professeur d'enseignement supérieur et chef de service*  
*de Radiologie de l'hôpital Arrazi au CHU Mohammed VI*  
*de Marrakech*

*J'ai été sincèrement impressionné par votre bienveillance, votre gentillesse et votre professionnalisme tout au long de mon passage au service, ainsi que durant notre travail sur cette thèse. Votre disponibilité et vos qualités humaines sont une véritable source d'inspiration.*

*Votre engagement profond envers la radiologie, tant sur le plan clinique que pédagogique, est remarquable. Vous contribuez activement à faire évoluer notre spécialité, tout en transmettant votre passion avec une générosité et une rigueur exemplaires. Votre capacité à allier excellence scientifique, sens humain et leadership fait de vous une véritable référence pour nous tous. Vous incarnez l'exemple à suivre dans l'exercice de ce métier si noble. J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes, et j'espère avoir l'opportunité de continuer à apprendre à vos côtés.*

*A mon maître et Juge de thèse  
Professeur BOUTAKIOUTE Badr  
Professeur de radiologie de l'hôpital Arrazi  
CHU Mohammed VI de Marrakech*

*Je tiens à vous remercier sincèrement d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Votre présence à mes côtés en ce moment si important m'honore profondément.*

*Vous êtes une véritable référence dans le domaine de la radiologie interventionnelle, et votre parcours inspire l'admiration de toute une génération. Votre maîtrise technique, votre vision innovante et votre constante volonté de faire progresser la discipline forcent le respect.*

*Avoir l'opportunité de bénéficier de votre regard expert sur ce travail est un privilège dont je mesure pleinement la valeur. Merci pour votre confiance et pour l'immense contribution que vous apportez à notre spécialité.*

*A mon maître et Juge de thèse*  
*Professeur BENHIMA Mohamed Amine*  
*Professeur d'enseignement supérieur Service de*  
*Traumatologie-orthopédie au CHU Mohammed VI*

*Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté de juger ce travail  
et d'honorer ce moment de votre présence. Votre parcours et  
votre engagement dans la chirurgie orthopédique sont une  
source d'inspiration.*

*C'est un honneur pour moi de bénéficier de votre regard  
d'expert. Je vous suis très reconnaissant pour le temps et  
l'attention accordés à ce travail.*

*A mon maître et Juge de thèse  
Professeur GHANNANE Houssine  
Professeur d'enseignement supérieur de  
neurochirurgie de l'hôpital Arrazi CHU  
Mohammed VI de Marrakech*

*C'est un grand honneur pour moi que vous  
ayez accepté de faire partie du jury de cette  
thèse. Votre parcours remarquable, votre  
expertise en neurochirurgie et votre  
engagement dans l'enseignement inspirent  
profondément les jeunes médecins.*

*Je vous remercie chaleureusement pour  
l'attention que vous portez à mon travail, et  
pour la valeur que votre présence apporte à  
cette soutenance. Votre reconnaissance est  
pour moi un véritable encouragement.*

*A mon maître et Juge de thèse*

*Professeur EL AMRANI Moulay Driss*

*Professeur d'enseignement supérieur Service de chirurgie  
réparatrice et plastique au CHU Mohammed VI*

*Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté de juger ce  
travail et d'honorer ce moment de votre présence. Votre  
engagement en chirurgie plastique et votre manière  
passionnante de transmettre le savoir, notamment à  
travers vos cours d'anatomie que je ne manquais jamais  
tant ils étaient captivants, ont marqué mon parcours.*

*C'est un honneur pour moi de bénéficier aujourd'hui de  
votre regard d'expert. Je vous suis profondément  
reconnaisant pour le temps et l'attention que vous  
accordez à ce travail.*

*A mon maître*  
*Professeur El Hajjami Ayoub*  
*Professeur de Radiologie de l'hôpital Arrazi au CHU*  
*Mohammed VI*

*Je tiens à vous remercier sincèrement pour votre encadrement tout au long de ce travail. Vos conseils, votre disponibilité et votre soutien ont été essentiels dans la réalisation de cette thèse.*

*Je vous suis profondément reconnaissant pour la confiance que vous m'avez accordée.*

*A mon maître*

*Professeur BOUROUMANE Mohamed Rida*

*Professeur de Radiologie de l'hôpital Ibn Tofaïl CHU*

*Mohammed VI de Marrakech*

*Je vous remercie sincèrement pour votre aide et votre  
disponibilité tout au long de la réalisation de cette thèse.*

*Votre soutien m'a été précieux et je vous en suis très  
reconnaissant.*



**LISTE DES ABRÉVIATIONS**



## Liste des abréviations :

<b>ABS</b>	:	Acrylonitrile–Butadiene–Styrene
<b>BMP</b>	:	Bitmap
<b>CHU</b>	:	Centre Hospitalier Universitaire
<b>DHS</b>	:	Dirham Marocain
<b>DICOM</b>	:	Digital Imaging and Communications in Medicine
<b>DLP</b>	:	Digital Light Processing
<b>FDM</b>	:	Fused Deposition Modeling
<b>GIF</b>	:	Graphic Interchange Format
<b>IRM</b>	:	Imagerie par Résonance Magnétique
<b>JPG</b>	:	Joint Photographic Experts Group
<b>MIMICS</b>	:	Materialise Interactive Medical Image Control System
<b>MIP</b>	:	Maximum Intensity Projection
<b>MJP</b>	:	Multijet Printing
<b>MPR</b>	:	Multiplanar Reconstruction
<b>OBJ</b>	:	Object File Format
<b>PA</b>	:	PolyAmide
<b>PC</b>	:	PolyCarbonate
<b>PETG</b>	:	Polyethylene Terephthalate Glycol
<b>PLA</b>	:	Polylactic Acid
<b>PLY</b>	:	Polygon File Format
<b>PNG</b>	:	Portable Network Graphic
<b>ROI</b>	:	Region Of Interest
<b>SLA</b>	:	Stéréolithographie
<b>TDM</b>	:	Tomodensitométrie
<b>STL</b>	:	Stereolithography
<b>USB</b>	:	Universal Serial Bus
<b>VR</b>	:	Volume Rendering

**VRT** : Volume Rendering Technique

**WIFI** : Wireless Fidelity

**X3D** : Extensible 3D



**FIGURES ET TABLEAUX**



## FIGURES ET TABLEAUX :

Figure 1 : Scanner Siemens Somatom Definition AS 64 barrettes au sein du service de radiologie Arrazi au CHU Mohammed VI de marrakech.....	5
Figure 2 : Scanner Hitachi ECLOS 16 barrettes au service de radiologie Arrazi CHU Mohammed VI de Marrakech.....	5
Figure 3 : Einscan SE V2 Shining 3D utilisé au laboratoire d'anatomie de la faculté de médecine et de pharmacie de Marrakech.....	6
Figure 4 : Creality Ender 3 .....	7
Figure 5 : ProJet 2500 Plus.....	7
Figure 6 : Figure 4 Standalone. ....	8
Figure 7 : Volumic SH65. ....	8
Figure 8 : Reconstruction multiplanaire 3D Slicer.....	10
Figure 9 : Transformation des données sélectionnées en modèle 3D imprimable via 3D Slicer (modélisation d'un pavillon de l'oreille pour épithèse faciale ). ....	11
Figure 10 : Étapes du processus de contouring sous ITK-snap : .....	12
Figure 11 : Fenêtre du logiciel CURA [14].....	13
Figure 12 : Etapes de l'impression 3D en imagerie médicale.[15].....	15
Figure 13 : Acquisition scanographique coupe axiale de la base du crâne et modélisation 3D.	19
Figure 14 : Impressions 3D du rocher.....	20
Figure 15 : Modélisation 3D du rachis chez un patient présentant une scoliose .....	21
Figure 16 : Impression 3D du rachis scoliotique .....	22
Figure 17 : Image peropératoire de la chirurgie de scoliose et contrôle post-opératoire. ....	22
Figure 18 : Acquisition scanographique coupe coronale et modélisation 3D d'un modèle vasculaire aortique pour apprentissage des techniques endovasculaires. ....	23
Figure 19 : Modélisation en 2 pièces collées à postériori pour adapter ce volumineux modèle à la surface d'impression de l'imprimante disponible. ....	24
Figure 20 : Impression 3D obtenue.....	24
Figure 21 : Salle d'angiographie, service de radiologie, Hôpital Arrazi, CHU Mohammed VI +	

utilisation du modèle sur la table d'angiographie. ....	25
Figure 22 : Acquisition scanographique coupe axiale et sagittale de la mandibule et reconstructions multiplanaires (MPR) d'un traumatisme mandibulaire (fracture para symphysaire droite).....	26
Figure 23 : Impression 3D du modèle anatomique mandibulaire issue de la modélisation numérique du traumatisme mandibulaire. ....	27
Figure 24 : Acquisition scanographique coupe sagittale du rachis dorsal et reconstructions multiplanaires (MPR) d'un traumatisme du rachis dorsal (fracture comminutive du corps vertébral de L1) .....	28
Figure 25 : Impressions 3D du modèle. ....	28
Figure 26 : Acquisition scanographique coupe sagittale du coude gauche.....	29
Figure 27 : Modélisation 3D et impression 3D du coude post-traumatique. ....	29
Figure 28 : Acquisition scanographique du rachis et modélisation 3D. ....	31
Figure 29 : Impression 3D + modélisation 3D du rachis scoliotique. ....	32
Figure 30 : Acquisition scanographique en coupe coronale. ....	33
Figure 31 : Modélisation 3D du cœur avec isolation de l'aorte et de l'anévrisme de l'aorte ascendante. ....	33
Figure 32 : Impression 3D du modèle anatomique du cœur et de l'aorte.....	34
Figure 33 : Vue per opératoire de la mise en place de la prothèse aortique. ....	34
Figure 34 : Impressions 3D de modèles anatomiques destinés à l'apprentissage des techniques de radiologie interventionnelle. ....	35
Figure 35 : Défilé mandibulaire, déviation malaire de l'hémi mandibule gauche. ....	37
Figure 36 : Modélisation 3D.....	38
Figure 37 : Céphalométrie 3D.....	38
Figure 38 : Impression 3D dynamique en 2 parties. ....	38
Figure 39 : Simulation d'ostéotomie de correction orthognatique et du résultat partie molle en post-opératoire. ....	39
Figure 40 : Acquisition scanographique avec reconstruction tridimensionnelle (VRT) d'un défaut crânien en vue d'une cranioplastie personnalisée. ....	40
Figure 41 : (a+b) modélisation de la prothèse de cranioplastie selon la courbure anatomique. ....	40
Figure 42 : Impression 3D en moule 1 et 2 pièce embrochable + modèle d'essai. ....	40
Figure 43 : Moulage du ciment osseux et fixation à l'aide de plaques vissées. ....	41

Figure 44 : Contrôle scanographique post-opérateur et VRT. ....	41
Figure 45 : Résultat final. ....	41
Figure 46 : Patient présentant le défaut crânien. ....	43
Figure 47 : Acquisition scanographique avec reconstruction tridimensionnelle du défaut crânien en vue de cranioplastie personnalisée + Modélisation 3D .....	43
Figure 48 : Modèle 3D sur table d'instruments opératoire en vue d'une cranioplastie après stérilisation.....	44
Figure 49 : Temps per opératoire; mise en place et fixation du moule d'impression 3D. ....	44
Figure 50 : Image post-opérateur. ....	45
Figure 51 : Scout view montrant la fracture sous-trochantérienne avec cal vicieux et malrotation du segment distal.....	46
Figure 52 : Modélisation du guide chirurgical. ....	46
Figure 53 : Simulation post-opérateur en 3D.....	47
Figure 54 : Vue per-opérateur. ....	47
<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques des imprimantes 3D utilisées. ....	<b>9</b>
<b>Tableau 2</b> : Logiciels utilisés pour l'impression 3D. ....	<b>14</b>



# PLAN



# Table des matières :

**Introduction** ..... *Error! Bookmark not defined.*

**Matériel et Méthodes**..... *Error! Bookmark not defined.*

<b>I. Type d'étude :</b> .....	<b>4</b>
<b>II. Sélection des patients :</b> .....	<b>4</b>
1. Critères d'inclusion :.....	4
2. Critères d'exclusion :.....	4
<b>III. Méthodes d'acquisition :</b> .....	<b>4</b>
1. Acquisition des images radiologiques : .....	4
1.1 Scanner Siemens Somatom Definition AS 64 barrettes (Figure 1) : .....	4
1.2 Scanner Hitachi ECLOS 16 barrettes (Figure 2):.....	5
1.3 Einscan SE V2 Shining 3D livré avec le logiciel EXScan S. (Figure 3).....	6
2. Traitement des images .....	6
<b>IV. Les imprimantes :</b> .....	<b>7</b>
<b>V. Les logiciels :</b> .....	<b>10</b>
1. Le logiciel 3D slicer [10].....	10
2. Le logiciel ITK-snap [11].....	11
3. Les logiciels Materialise Mimics et 3-Matic [12]. .....	13
4. Le logiciel Cura [13]: .....	13
<b>VI. Les critères étudiés :</b> .....	<b>15</b>
<b>VII. Les demandes :</b> .....	<b>16</b>

**Résultats**..... *Error! Bookmark not defined.*

<b>I- Population concernée :</b> .....	<b>18</b>
1. Âge :.....	18
2. Sexe : .....	18
<b>II- Coûts liés à l'impression :</b> .....	<b>18</b>
<b>III- Description des cas cliniques traités :</b> .....	<b>19</b>
Cas 1 : modélisation d'un support d'apprentissage pour une structure anatomique : Le rocher (Figures 13 et 14) .....	19
Cas 2 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : scoliose (Figures 15,16 et 17). .....	21
Cas 3 : modélisation d'un support d'apprentissage pour les techniques endovasculaires : Aorte et branches (Figures 18, 19, 20 et 21).....	23

Cas 4 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme mandibulaire (Figures 22 et 23) .....	26
Cas 5 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme du rachis dorsal (Figures 24 et 25) .....	28
Cas 6 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme complexe du coude (Figures 26 et 27) .....	29
Cas 7 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : scoliose (Figures 28 et 29) .....	31
Cas 8 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : anévrisme aortique (Figures 30, 31, 32 et 33) .....	33
Cas 9 : modélisation d'un support d'apprentissage pour les techniques de radiologie interventionnelle (Figure 34) .....	35
Cas 10 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale après simulation. malformation mandibulaire (Figures 35, 36, 37, 38 et 39) .....	37
Cas 11 : Modélisation d'un moule sur mesure pour cranioplastie (Figures 40, 41, 42, 43, 44 et 45) .....	40
Cas 12 : Modélisation d'un moule sur mesure pour cranioplastie (Figures 46, 47, 48, 49 et 50) .....	43
Cas 13 : Modélisation d'un guide chirurgical : Fracture diaphysaire compliquée de cal vicieux. (Figures 51, 52, 53 et 54) .....	46

**Discussion** ..... *Error! Bookmark not defined.*

<b>I. Contexte et évolution de l'impression 3D :</b> .....	<b>51</b>
1. Tendances récentes et développement de l'impression 3D : .....	51
2. Réduction des coûts : .....	52
A. Les coûts de « hardware » .....	53
B. Les coûts de logiciels : .....	53
C. Le coût du temps de conception des modèles et des aides opératoires (guides de coupes, pré conformation du matériel, gouttières, etc...) .....	53
D. le coût des examens complémentaires .....	53
3. Amélioration de la précision : .....	53
4. Méthodes d'acquisition : .....	54
l'épaisseur des coupes de l'examen sélectionné .....	54
La sélection du seuil de densité ou d'intensité retenu .....	55
<b>II. Apport de l'impression 3D :</b> .....	<b>55</b>
<b>III. Expérience de notre service :</b> .....	<b>57</b>
1. Population concernée : .....	57
2. Les coûts de l'impression : .....	58
3. Apport et utilité de l'impression 3D : .....	59
3. Identitovigilance et traçabilité légale : .....	61

**Limites de l'étude** ..... *Error! Bookmark not defined.*

**Recommandations** ..... *Error! Bookmark not defined.*

**Conclusion**..... *Error! Bookmark not defined.*

**RÉSUMÉ**..... **73**

**Bibliographie**..... *Error! Bookmark not defined.*



# INTRODUCTION



L'impression tridimensionnelle (3D) est une technologie de fabrication additive qui permet de créer des objets physiques à partir d'un modèle numérique en superposant des couches successives de matériau, contrairement aux méthodes traditionnelles de fabrication soustractive, qui consistent à retirer de la matière pour obtenir une forme désirée.

Introduite par Charles Hull en 1984 avec le brevet de la stéréolithographie, cette technologie a connu un essor considérable dans divers domaines, notamment l'aéronautique, l'ingénierie biomédicale et la médecine. [1] Son application en radiologie ouvre de nouvelles perspectives en matière de diagnostic, de planification chirurgicale et de formation médicale [2].

L'intérêt croissant pour l'impression 3D en radiologie repose principalement sur sa capacité à transformer des données d'imagerie médicale (scanner, IRM,..) en modèles anatomiques physiques. Ces modèles permettent d'améliorer la compréhension des structures complexes et facilitent la communication entre les médecins et leurs patients. En particulier, ils sont utilisés pour la planification préopératoire et la personnalisation des interventions chirurgicales [3]. De plus, les modèles imprimés en 3D constituent un outil pédagogique de premier plan, offrant aux étudiants en médecine et aux chirurgiens la possibilité de s'exercer sur des répliques précises d'organes avant une intervention [4].

Toutefois, malgré ses nombreux avantages, l'intégration de l'impression 3D en radiologie présente encore des défis. Le coût des équipements et des matériaux, la nécessité d'une formation spécialisée pour les professionnels de santé, ainsi que les contraintes réglementaires limitent sa généralisation à grande échelle. Par ailleurs, la standardisation des modèles imprimés et leur validation clinique demeurent des enjeux majeurs pour garantir une utilisation fiable et reproductible dans la pratique médicale [5].

À travers cette étude, nous démontrons les caractéristiques techniques de l'impression 3D au sein de notre service de radiologie, nous analysons ses bénéfices concrets, nous identifions les limites de son utilisation et proposons des recommandations pour optimiser son intégration dans un cadre clinique structuré.



# **MATERIELS ET METHODES**



## **I. Type d'étude :**

Il s'agit d'une étude observationnelle rétrospective menée au service de radiologie Arrazi au CHU Mohammed VI de Marrakech, du 1<sup>er</sup> septembre 2018 au 1<sup>er</sup> Octobre 2024.

## **II. Sélection des patients :**

### **1. Critères d'inclusion :**

Nous avons inclus tous les cas pour lesquels une impression 3D a été réalisée au sein du service de radiologie, CHU Mohammed VI.

Les patients étudiés sont tous ceux pour lesquels ce type de modèle a été demandé par un médecin du service ou dans le cadre d'une collaboration avec un autre service du CHU.

### **2. Critères d'exclusion :**

Étaient exclus les patients pour lesquels aucune imagerie adaptée n'a pu être retrouvée (absence d'imagerie, zone d'intérêt non étudiée, imagerie inadaptée, etc.).

Il n'existait pas de critères d'exclusion liés aux caractéristiques des patients, hors des limites techniques liées à la taille de la zone d'impression (200 x 200 x 250 mm).

## **III. Méthodes d'acquisition :**

### **1. Acquisition des images radiologiques :**

Les examens tomodensitométriques (TDM) ont été réalisés à l'aide de trois appareils :

#### **1.1 Scanner Siemens Somatom Definition AS 64 barrettes (Figure 1) :**

Il s'agit d'un scanner multidétecteur de dernière génération doté de 64 barrettes, permettant l'acquisition rapide de coupes fines avec une résolution spatiale et temporelle élevée. Ce scanner bénéficie d'une collimation allant jusqu'à  $64 \times 0,6$  mm, d'un temps de rotation du tube à rayons X de 0,33 seconde, et d'une couverture volumique importante facilitant des reconstructions multiplanaires (MPR) et tridimensionnelles (3D) précises.

Il intègre des technologies avancées telles que la modulation automatique de la dose (CARE Dose4D) et des protocoles d'acquisition optimisés pour réduire l'exposition aux radiations tout en

maintenant une qualité d'image optimale.



**Figure 1 : Scanner Siemens Somatom Definition AS 64 barrettes au sein du service de radiologie Arrazi au CHU Mohammed VI de marrakech.**

**1.2 Scanner Hitachi ECLOS 16 barrettes (Figure 2):**

Ce scanner multidétecteur possède 16 barrettes avec une collimation maximale de  $16 \times 1,25$  mm, permettant l'acquisition de coupes de bonne qualité diagnostique, suffisantes pour l'exploration standard et les examens courants. Son temps de rotation du tube est de 0,8 seconde. Bien que moins rapide que le scanner 64 barrettes, il permet néanmoins des reconstructions multiplanaires et offre une résolution spatiale adéquate pour les objectifs diagnostiques généraux de l'étude.



**Figure 2 : Scanner Hitachi ECLOS 16 barrettes au service de radiologie Arrazi CHU Mohammed VI de Marrakech.**

### 1.3 Einscan SE V2 Shining 3D livré avec le logiciel EXScan S. (Figure 3)

Il s'agit d'un scanner 3D de bureau conçu pour capturer des objets avec une grande précision et une facilité d'utilisation.

Caractéristiques principales :

- ❖ Technologie : Lumière structurée
- ❖ Précision : Jusqu'à 0,1 mm
- ❖ Mode de scan :
  - Automatique (avec plateau tournant)
- ❖ Résolution : Entre 0,17 mm et 0,2 mm
- ❖ Vitesse : Environ 8 secondes pour un scan unique
- ❖ Compatibilité : Exporte sous forme de fichiers OBJ, STL, ASC et PLY



**Figure 3 : Einscan SE V2 Shining 3D utilisé au laboratoire d'anatomie de la faculté de médecine et de pharmacie de Marrakech.**

## **2. Traitement des images**

Les images acquises ont été transférées sur une station de travail dédiée, permettant les reconstructions multiplanaires (axiales, sagittales, coronales) et tridimensionnelles (MIP, VR), utilisées pour l'analyse détaillée des lésions étudiées..

#### **IV. Les imprimantes :**

Nous disposons d'un total de quatre imprimantes 3D.

Une imprimante Creality Ender 3 (figure 4) au service de radiologie de l'hôpital Arrazi, CHU Mohammed VI de Marrakech, et trois autres au laboratoire d'anatomie de la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Marrakech : ProJet 2500 Plus, Figure 4 Standalone et Volumic SH65 (figure 5,6 et 7).



**Figure 4 : Creality Ender 3**



**Figure 5 : ProJet 2500 Plus.**



**Figure 6 : Figure 4 Standalone.**



**Figure 7 : Volumic SH65.**

Le tableau 1 résume les caractéristiques des imprimantes 3D utilisées dans notre étude.

**Tableau 1 : Caractéristiques des imprimantes 3D utilisées.**

	Creality Ender 3 [6]	Projet 2500 Plus[7]	Figure 4 Standalone[8]	Volumic SH65[9]
<b>Technologie</b>	FDM	Multijet Printing (MJP)	DLP (Digital Light Processing)	FDM
<b>Matériaux</b>	PLA, ABS, PETG	Résines plastiques, résines de support solubles, cires	Résines photopolymères	PLA, ABS, PETG, PA, PC, composites
<b>Diamètre des filaments</b>	1,75 mm	Non applicable	Non applicable	1,75 mm
<b>Température d'extrusion</b>	Jusqu'à 255°C	Non applicable	Non applicable	Jusqu'à 330°C
<b>Température du plateau</b>	Jusqu'à 100°C	Non applicable	Non applicable	Jusqu'à 150°C
<b>Volume d'impression</b>	220 x 220 x 250 mm	294 x 211 x 144 mm	124.8 x 70.2 x 196 mm	650 x 300 x 300 mm
<b>Précision</b>	+/- 100 microns	Jusqu'à 32 microns	65 microns	Axe X et Y : 7,5 microns, Z : 1 micron
<b>Épaisseur de couche</b>	0,1 – 0,4 mm	16 microns (mode XHD), 8 microns (mode ZHD)	10 à 100 microns	100 à 200 microns
<b>Dimensions externes</b>	440 x 440 x 465 mm	1120 x 740 x 1070 mm	426 x 489 x 971 mm	900 x 500 x 480 mm
<b>Poids</b>	6.9kg	211.0kg	34.5kg	55kg
<b>Connectivité</b>	Carte SD, USB	USB, Ethernet	Ethernet	USB, Ethernet, Wifi
<b>Avantages</b>	Compacte, économique, facilité d'entretien	Détails ultra fins pour prototypes complexes, matériaux flexibles ou rigides disponibles	Rapidité d'impression, diversité des matériaux, production en série	Grande capacité d'impression, haute précision

## V. Les logiciels :

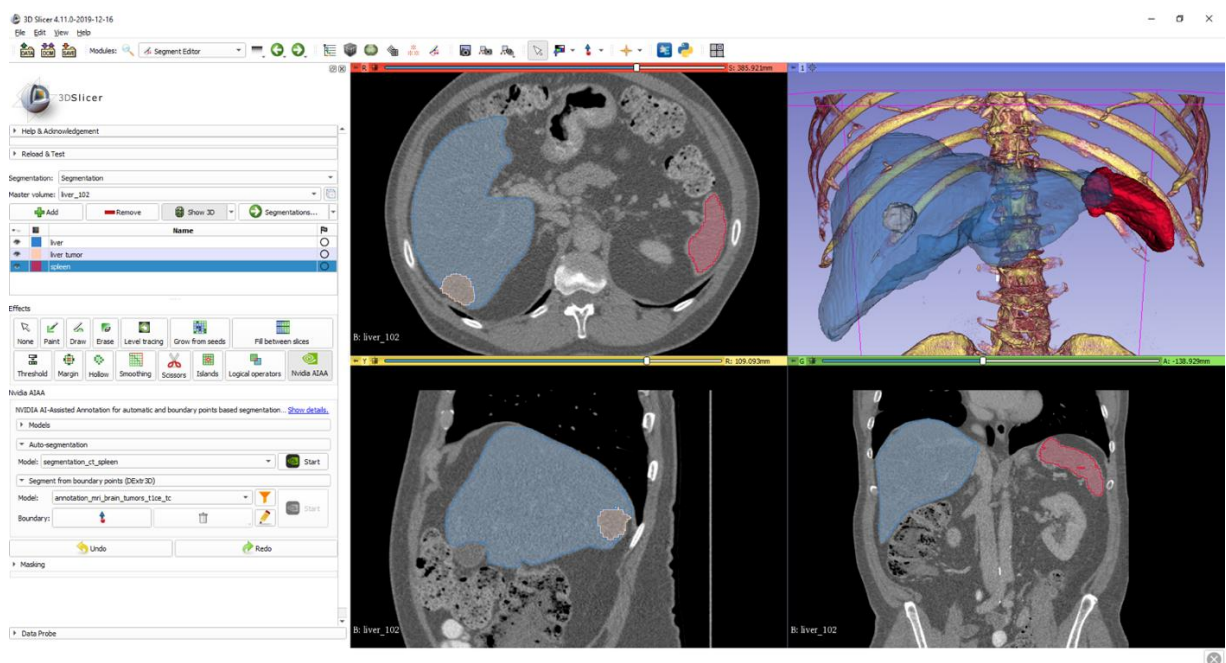
### 1. Le logiciel 3D slicer [10].

Logiciel libre et open-source, 3D Slicer est dédié à la visualisation et à la modélisation 3D des données médicales.

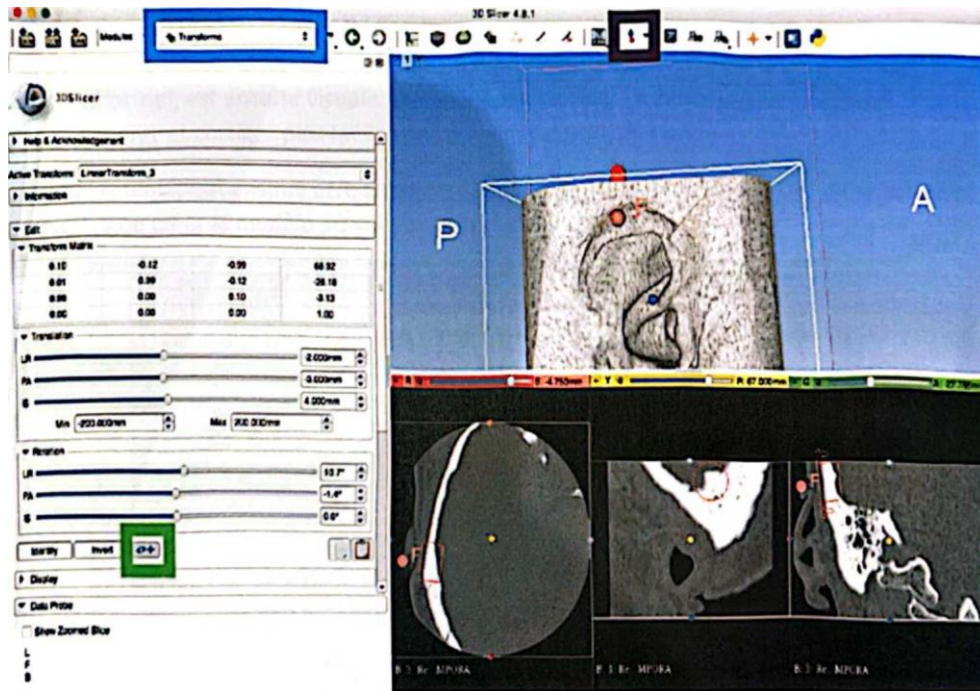
Il a été utilisé en début de procédure pour convertir les fichiers DICOM issus du scanner en fichiers au format .nrrd, directement exploitables par ITK-SNAP (Figure 8).

En fin de procédure, il a servi à générer les modèles 3D à partir des segmentations obtenues via ITK-SNAP, grâce à son module « Model Maker » (Figure 9).

Les modèles générés sont ensuite exportés en .stl, un format standard pour l'impression 3D.



**Figure 8 : Reconstruction multiplanaire 3D Slicer.**



**Figure 9 : Transformation des données sélectionnées en modèle 3D imprimable via 3D Slicer (modélisation d'un pavillon de l'oreille pour épithèse faciale ).**

## **2. Le logiciel ITK-snap [11].**

Ce logiciel libre permet la segmentation semi-automatique des structures d'intérêt à partir d'images médicales (fichiers .nrrd).

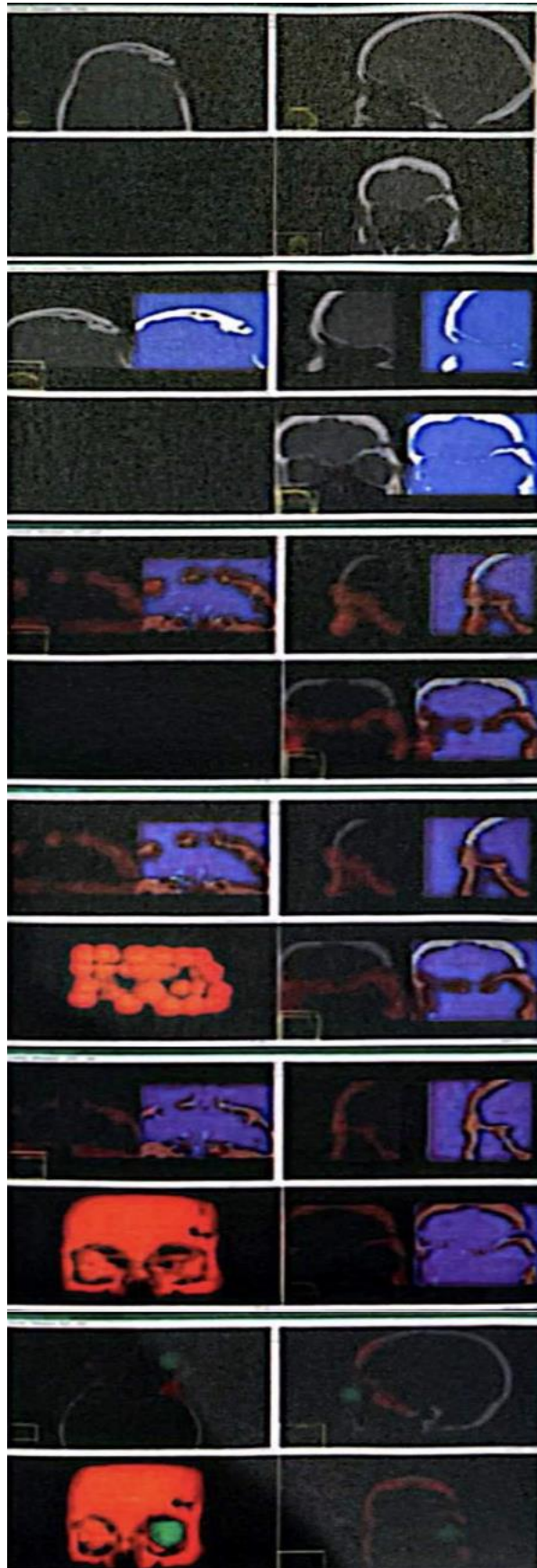
Son fonctionnement repose d'abord sur un seuillage, permettant de sélectionner une zone d'intérêt selon l'intensité du signal.

Une étape de contourage manuel est ensuite réalisée à l'aide de marqueurs sphériques ajustables, avant l'activation du contourage automatique, qui affine les contours anatomiques.

Un nettoyage manuel couche par couche peut être nécessaire pour supprimer certains artefacts.

Le résultat est un volume segmenté, associé à un label unique, visualisable en 3D directement dans le logiciel. Ce fichier segmenté est ensuite enregistré au format .nrrd pour être importé dans 3D Slicer et transformé en modèle imprimable.

Les différentes étapes de ce processus sont récapitulées à titre illustratif dans la figure 10.



**A : Sélection de la région d'intérêt.**

**B : Seuillage.**

**C : Contourage manuel.**

**D : Visualisation avant l'étape de contourage automatique.**

**E : Visualisation après contourage automatique.**

**F : Double contourage avec reconstruction de l'œil.**

**Figure 10 : Étapes du processus de contouring sous ITK-snap :**

### **3. Les logiciels Materialise Mimics et 3-Matic [12].**

Materialise Mimics permet la segmentation d'images médicales (CT, IRM) et la reconstruction de structures anatomiques en 3D.

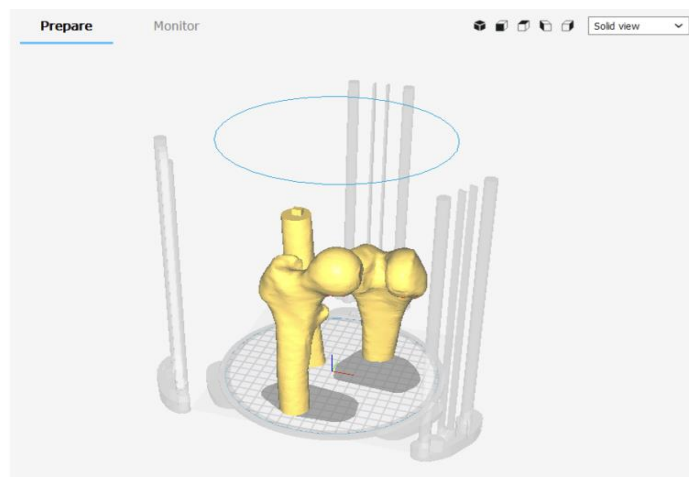
3-matic permet ensuite l'édition, l'optimisation et la préparation des modèles pour l'impression 3D (réparation du maillage, lissage, etc.).

Ensemble, ces logiciels assurent la conversion précise de données radiologiques en modèles imprimables.

### **4. Le logiciel Cura [13]:**

Ultimaker Cura est un logiciel libre de découpe (slicer) développé par Ultimaker. Il convertit les fichiers 3D (STL, OBJ, etc.) en G-code, utilisable par la majorité des imprimantes 3D de bureau. Cura permet de positionner, orienter et ajuster l'échelle des modèles sur le plateau virtuel (Figure 11), tout en signalant les erreurs par des zones rouges.

De nombreux paramètres sont modifiables : épaisseur de couche (0,15-0,4 mm), type de remplissage, nombre de parois, et ajout de supports à retirer en post-production. Trois profils d'impression sont disponibles : fine, normal et rapide.



**Figure 11 : Fenêtre du logiciel CURA [14].**

Le tableau 2 résume les logiciels utilisés par l'impression 3D.

**Tableau 2 : Logiciels utilisés pour l'impression 3D.**

Logiciel	Type	Fonction principale	Formats compatibles	Utilisation dans l'étude
<b>3D Slicer</b>	Modélisation et traitement d'images médicales	Transformation des fichiers DICOM en modèles 3D et reconstruction multiplanaire	DICOM, NRRD, STL	Conversion des fichiers DICOM en modèles exploitables et création des fichiers STL
<b>ITK-Snap</b>	Segmentation et traitement d'images médicales	Segmentation d'images médicales et contouring automatique des structures anatomiques	NRRD, DICOM	Segmentation précise des structures anatomiques et nettoyage des images médicales
<b>Materialise Mimics &amp; 3-Matic</b>	Modélisation et conception de modèles médicaux	Transformation d'images médicales en modèles 3D exploitables et optimisation des modèles pour l'impression	DICOM, STL, formats propriétaires Materialise	Modélisation avancée des structures anatomiques et optimisation pour l'impression 3D
<b>Ultimaker Cura</b>	Slicer (découpeur pour impression 3D)	Découpe des modèles 3D en couches et génération du G-code pour l'impression	STL, OBJ, X3D, BMP, GIF, JPG, PNG	Préparation des modèles avant impression et ajustement des paramètres d'impression

Pour résumer, le processus d'impression 3D commence par l'acquisition d'images médicales qui génèrent des fichiers DICOM. Ces images sont ensuite traitées dans des logiciels d'imagerie médicale comme ITK-SNAP, 3D Slicer ou Mimics, afin d'en extraire une structure anatomique en format .STL. Cette maquette numérique est ensuite optimisée à l'aide de logiciels de modélisation comme Meshmixer ou 3-matic. Enfin, le modèle 3D est imprimé à l'aide de technologies telles que PolyJet, FDM ou SLA, produisant une réplique physique de l'anatomie ciblée. (Figure 12)

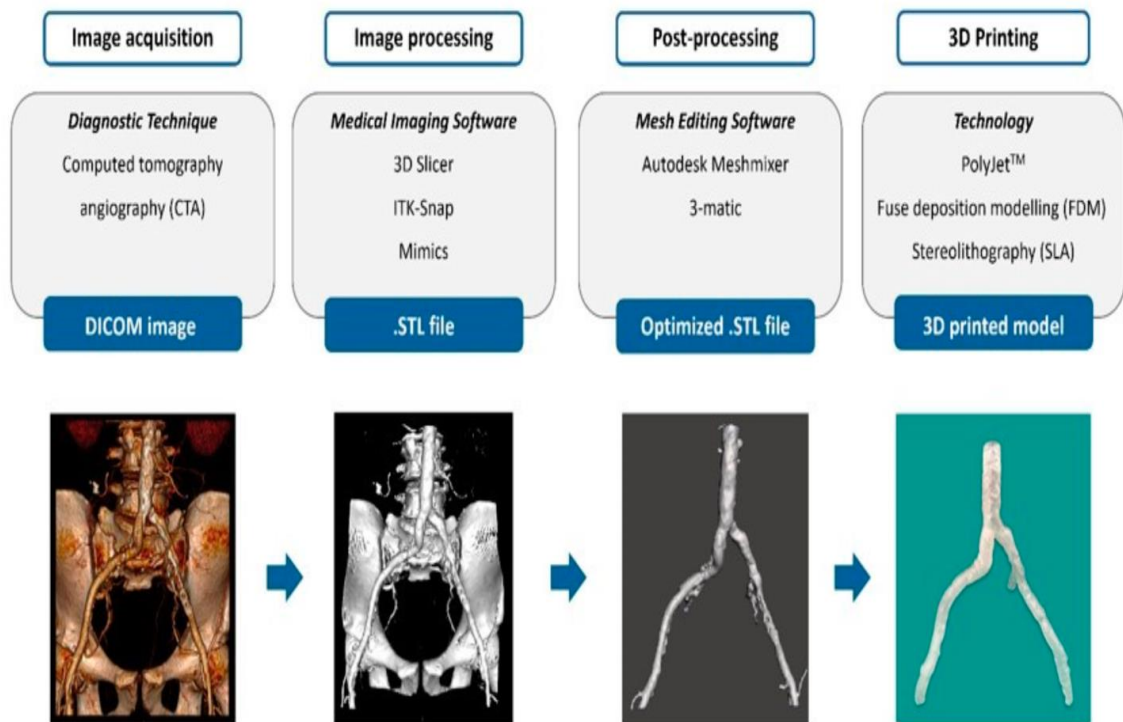


Figure 12 : Étapes de l'impression 3D en imagerie médicale.[15]

## VI. Les critères étudiés :

Matériel d'impression utilisé.

Temps d'impression en minutes.

Quantité de matière utilisée en grammes.

Dimension des modèles en millimètres.

L'utilité du modèle :

- ❖ Utilité faible
- ❖ Utilité modérée
- ❖ Utilité élevée

## **VII. Les demandes :**

Toute demande d'impression 3D a été prise en compte, qu'elle soit simplement orale, écrite interne au service, ou « officielle » (par courrier médical). Tout médecin, interne ou résident pouvait effectuer une demande en fonction des cas qu'il rencontrait. Ces demandes n'étaient pas spécifiquement tracées, mais colligées pour la plupart dans un classeur dédié. Les modèles informatiques ont été conservés afin de pouvoir les réimprimer en cas de perte ou d'échec de l'impression. Par ailleurs, des questionnaires ont été remis aux prestataires et utilisateurs afin d'évaluer leur satisfaction et de juger de l'utilité clinique et pédagogique des modèles imprimés. Les mesures de dimensions, de poids et de temps d'impression reportées dans les résultats ont été effectuées à l'aide du logiciel Cura, la segmentation faite par les logiciels 3D Slicer et ITK-Snap, et la modélisation optimisée par les logiciels Materialise Mimics et 3-Matic.



## **I- Population concernée :**

### **1. Âge :**

La moyenne d'âge des patients était de 31 ans avec des écarts importants liés aux grandes différences entre les âges extrêmes (22-71 ans).

### **2. Sexe :**

La proportion homme/femme était à peu près équilibrée, avec 54% de femmes et 46% d'hommes.

## **II- Coûts liés à l'impression :**

Le coût total des matériaux utilisés pour l'impression des modèles 3D a été calculé en fonction du poids total des modèles imprimés. Un total de 4330 grammes de matériau a été consommé, et après majoration de 20% pour couvrir les pertes dues aux échecs d'impression et aux matériaux inutilisables en fin de bobine, la quantité totale de matériau utilisée s'élève à environ 5196 grammes.

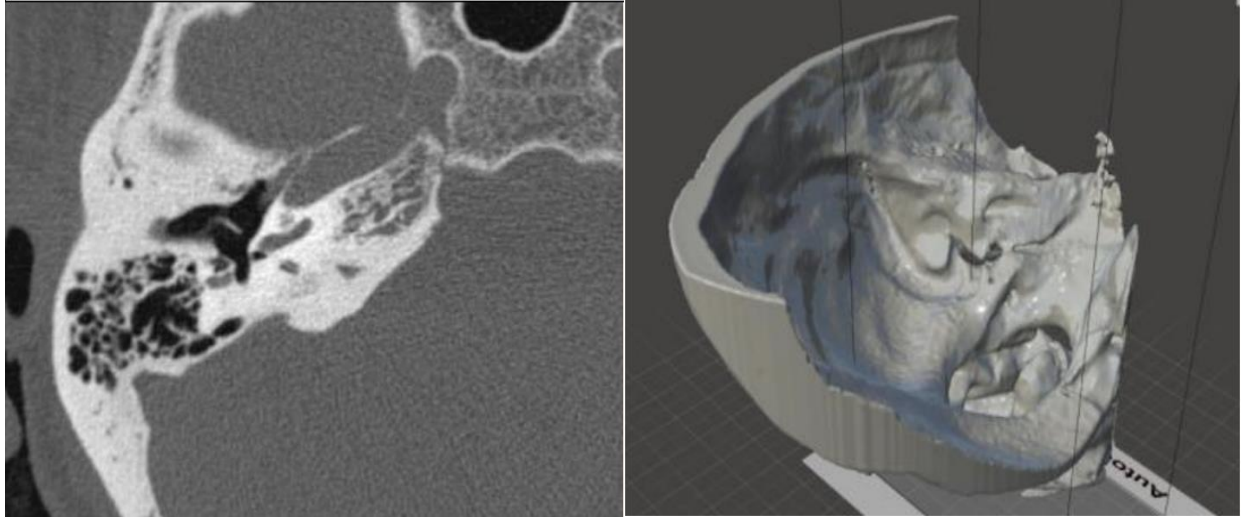
Le coût moyen des bobines de filament, que ce soit pour le PLA ou l'ABS, est compris entre 300 et 500 dirhams (Dh) par kilogramme. En prenant une moyenne de 300 Dh par kilogramme de matériau, le coût total des matériaux pour les impressions s'élève à 1500 Dh, répartis sur 6 bobines.

Le coût de l'imprimante 3D et de ses accessoires, y compris le carter de protection et les frais de port, était de 7000 Dh T.T.C. en 2019. Actuellement, le coût de l'imprimante et de son carter est d'environ 5000 Dh. Au total, le coût d'investissement pour la création des modèles 3D s'élève à 8500 Dh. Ainsi, le coût moyen par patient pour l'impression des modèles 3D a été estimé à 242 Dh, en excluant le prix d'achat de l'imprimante. Ce choix s'explique par le fait que l'imprimante constitue un équipement durable, utilisé de manière continue, et dont le coût d'acquisition ne saurait être imputé à chaque patient individuellement. En revanche, certains frais annexes comme les consommables et l'électricité ont été pris en compte.

Tous les cas ont été réalisés à l'hôpital avec l'imprimante Creality Ender 3, à l'exception d'un seul cas, une cranioplastie, effectué au laboratoire d'anatomie de la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Marrakech, avec un coût plus élevé, bien que non précisément quantifié.

### **III- Description des cas cliniques traités :**

#### **Cas 1 : modélisation d'un support d'apprentissage pour une structure anatomique : Le rocher (Figures 13 et 14)**



**Figure 13 : Acquisition scanographique coupe axiale de la base du crâne et modélisation 3D.**

Une acquisition scanographique en coupe axiale de la base du crâne a été réalisée chez un patient (Figure 13), permettant la modélisation tridimensionnelle du rocher (Figure 13), une structure anatomique complexe et profonde. Cette modélisation a ensuite été imprimée en 3D (Figure 14), donnant naissance à un modèle anatomique physique utilisé à des fins pédagogiques pour l'apprentissage de cette zone difficile d'accès, notamment auprès des étudiants et résidents en formation.

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

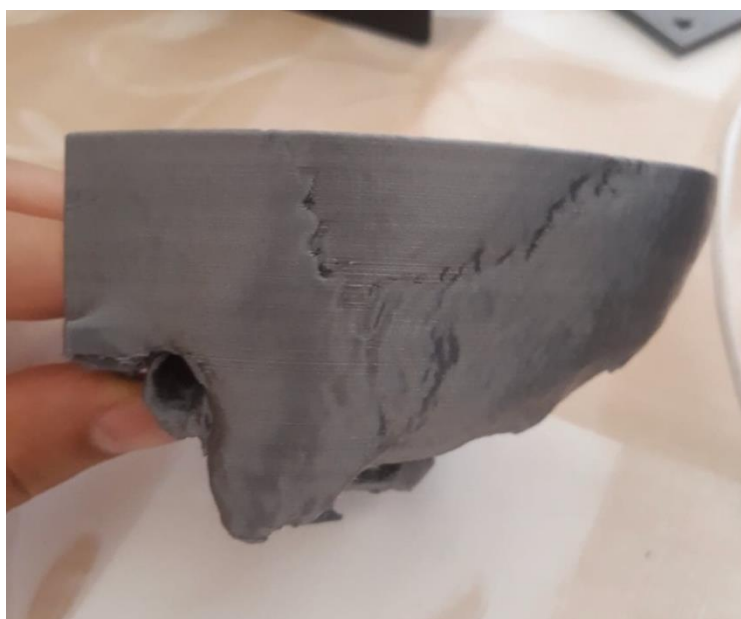
Matériel d'impression : PLA gris.

Temps d'impression : 5h43 min

Poids d'impression (y compris les structures de support) : 63 g

Dimension : taille (75%)

Utilité : moyenne à élevée (modèle utilisé à des fins pédagogiques pour l'apprentissage d'une structure anatomique complexe aux étudiants et aux résidents)



**Figure 14 : Impressions 3D du rocher.**

## Cas 2 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : scoliose

(Figures 15,16 et 17).



### Figure 15 : Modélisation 3D du rachis chez un patient présentant une scoliose

Un patient présentant une scoliose a bénéficié d'une modélisation tridimensionnelle de son rachis à partir d'une acquisition scanographique (Figure 15), permettant une meilleure compréhension de sa déformation rachidienne. Le modèle ainsi généré a été imprimé en 3D (Figure 16), servant de support à la planification chirurgicale. Ce modèle a été utilisé lors d'une intervention chirurgicale de correction de la scoliose, comme illustré sur l'image per opératoire (Figure 17).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Reconstruction 3D après mise en place d'un ROI, seuillage et segmentation sur fenêtre osseuse.

Matériaux : PLA Gris.

Agrandissement : 40 %.

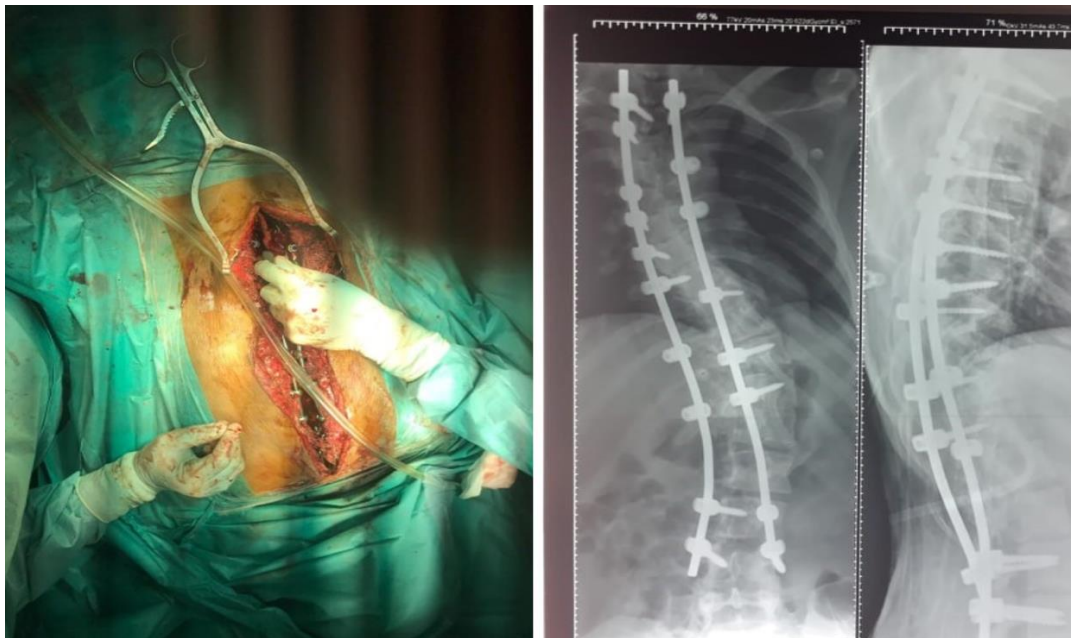
Poids : 60 g.

Temps d'impression : 8 h 30 min.

Utilité : élevée (modèle utilisé afin de coordonner un geste compliqué (chirurgie de scoliose) dans le cadre d'une journée de formation avec une équipe suisse)

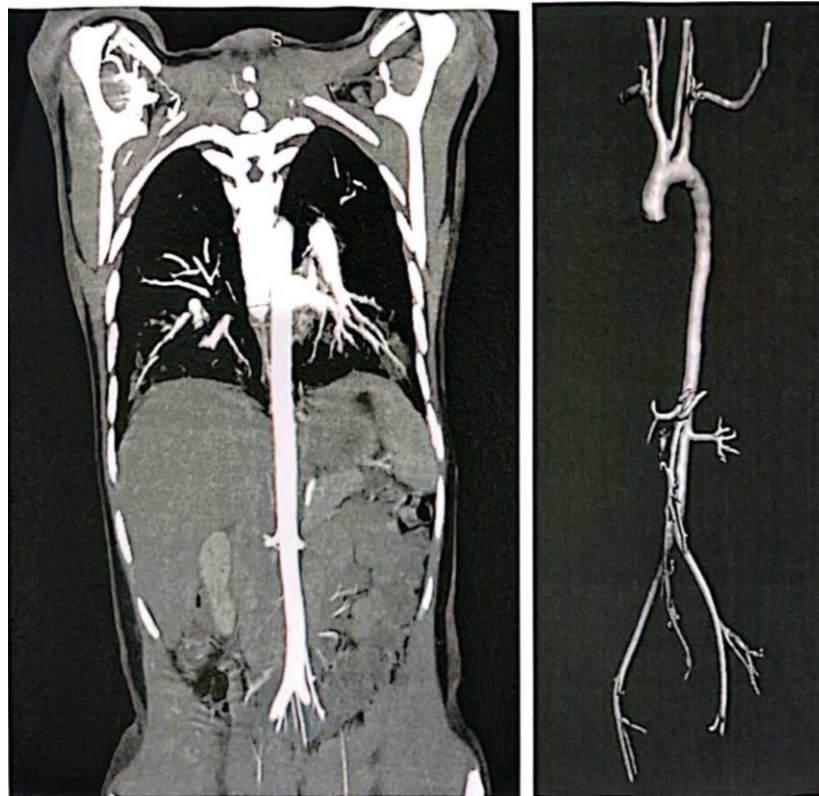


**Figure 16 : Impression 3D  
du rachis sciotique**



**Figure 17 : Image peropératoire de la chirurgie  
de scoliose et contrôle post-opératoire.**

**Cas 3 : modélisation d'un support d'apprentissage pour les techniques endovasculaires : Aorte et branches (Figures 18, 19, 20 et 21)**



**Figure 18 : Acquisition scanographique coupe coronale et modélisation 3D d'un modèle vasculaire aortique pour apprentissage des techniques endovasculaires.**

Acquisition scanographique de l'aorte et de ses branches en coupe coronale (Figure 18), modélisation 3D en deux pièces du système vasculaire aortique (Figure 19), impression du modèle (Figure 20) et utilisation sur la table d'angiographie pour apprentissage des techniques endovasculaires (Figure 21).

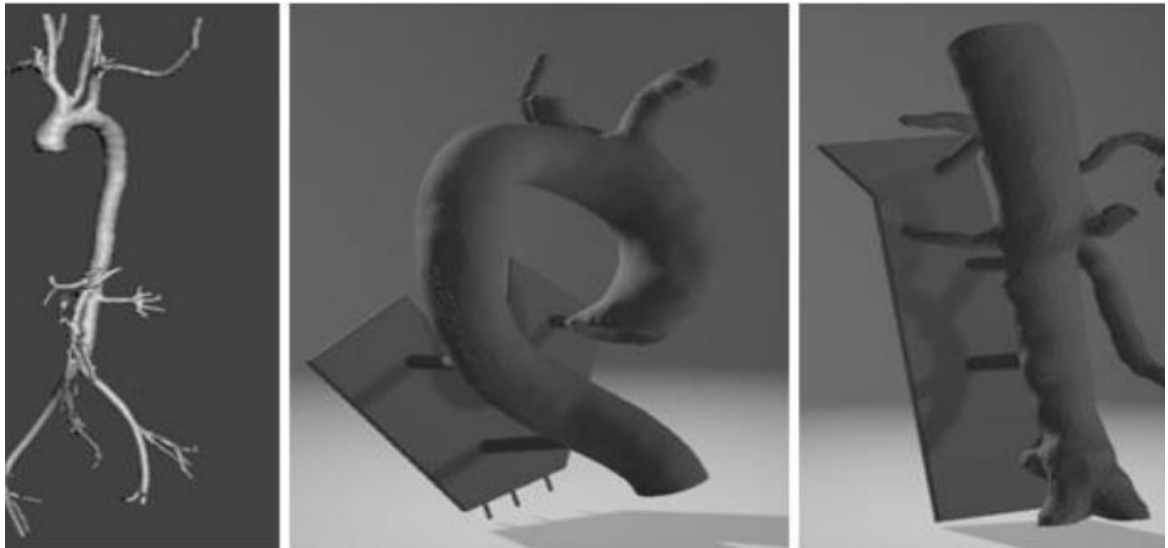
Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Matériel d'impression : PLA transparent.

Temps d'impression : 12 h min

Poids d'impression (y compris les structures de support) : 110 g

Dimension : taille réelle (100%), recadrée.



**Figure 19 : Modélisation en 2 pièces collées à postériori pour adapter ce volumineux modèle à la surface d'impression de l'imprimante disponible.**

Utilité : élevée : Démonstration des différentes techniques de radiologie interventionnelle :

Angiographie

Mise en place d'endoprothèses.

Angioplastie.

Embolisation.

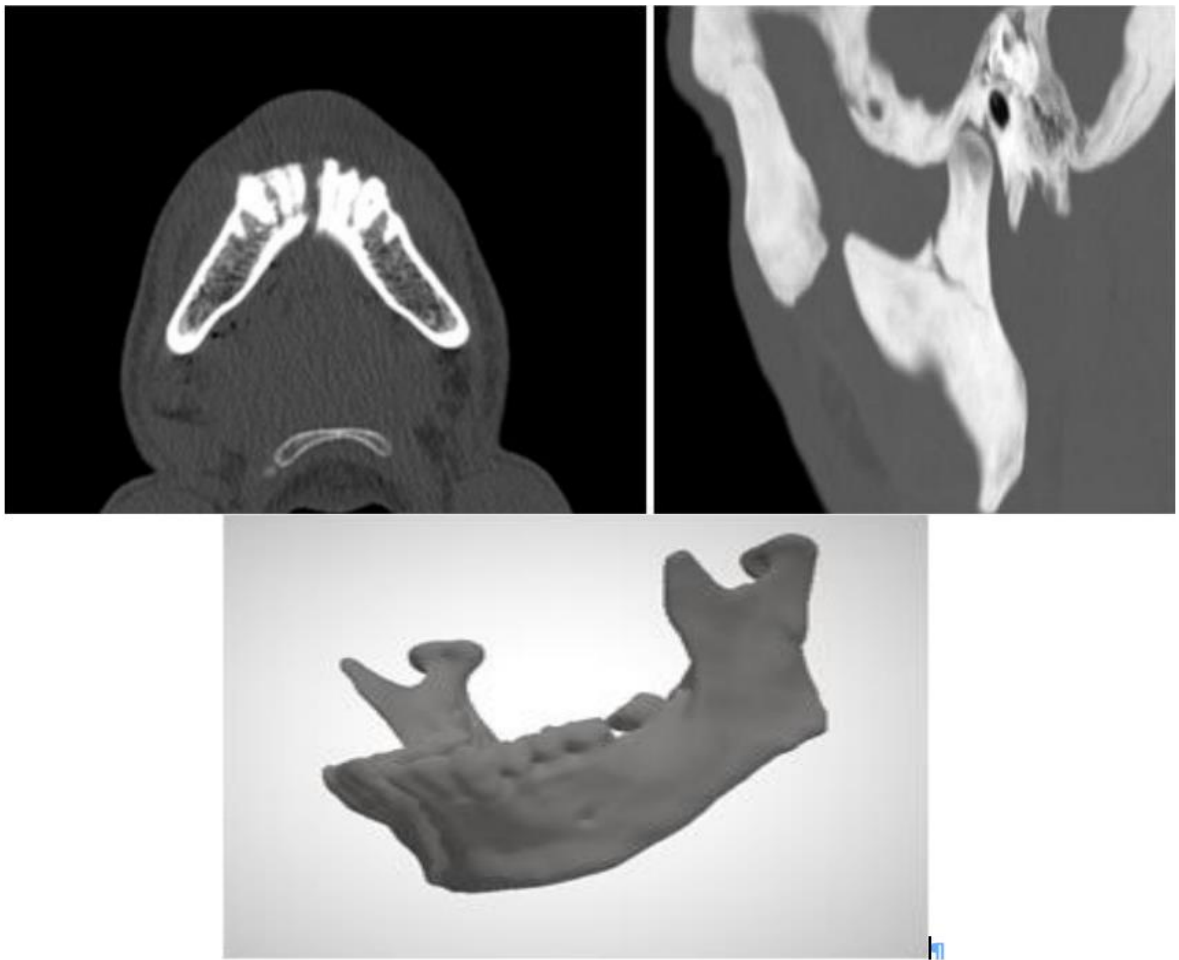


**Figure 20 : Impression 3D obtenue.**



**Figure 21 : Salle d'angiographie, service de radiologie, Hôpital Arrazi, CHU Mohammed VI + utilisation du modèle sur la table d'angiographie.**

**Cas 4 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme mandibulaire (Figures 22 et 23)**



**Figure 22 : Acquisition scanographique coupe axiale et sagittale de la mandibule et reconstructions multiplanaires (MPR) d'un traumatisme mandibulaire (fracture parasymphysaire droite)**

Un traumatisme mandibulaire a été exploré par acquisition scanographique en coupes axiale et sagittale (Figure 22), permettant une modélisation numérique précise de la fracture. Le modèle anatomique de la mandibule a ensuite été imprimé en taille réelle pour évaluation préopératoire (Figure 23).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Matériel d'impression : PLA Gris.

Temps d'impression : 4h 50min

Poids d'impression (y compris les structure de support) : 52 g

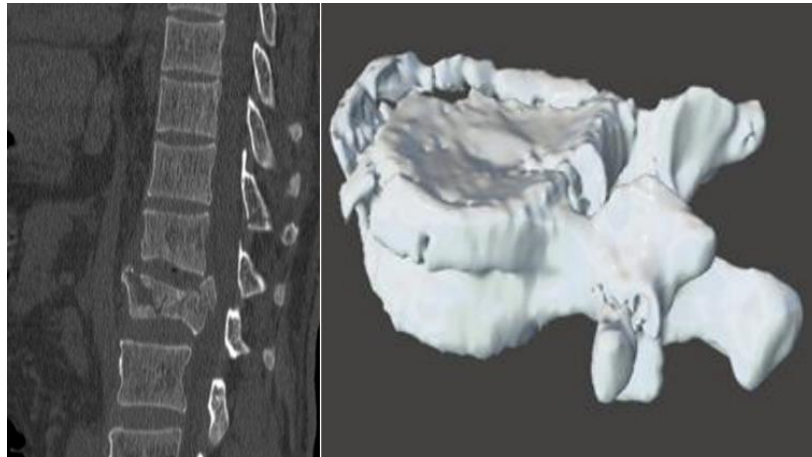
Dimension : taille réelle (100%).

Utilité : faible (fracture courante non complexe, utilité comparable aux images 3D sur clichés).



**Figure 23 : Impression 3D du modèle anatomique mandibulaire issue de la modélisation numérique du traumatisme mandibulaire.**

**Cas 5 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme du rachis dorsal (Figures 24 et 25)**



**Figure 24 : Acquisition scanographique coupe sagittale du rachis dorsal et reconstructions multiplanaires (MPR) d'un traumatisme du rachis dorsal (fracture comminutive du corps vertébral de L1)**

Acquisition scanographique d'un traumatisme du rachis dorsal mettant en évidence une fracture comminutive du corps vertébral de L1 (Figure 24), suivie d'une modélisation numérique et d'une impression 3D du modèle pour planification chirurgicale (Figure 25).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

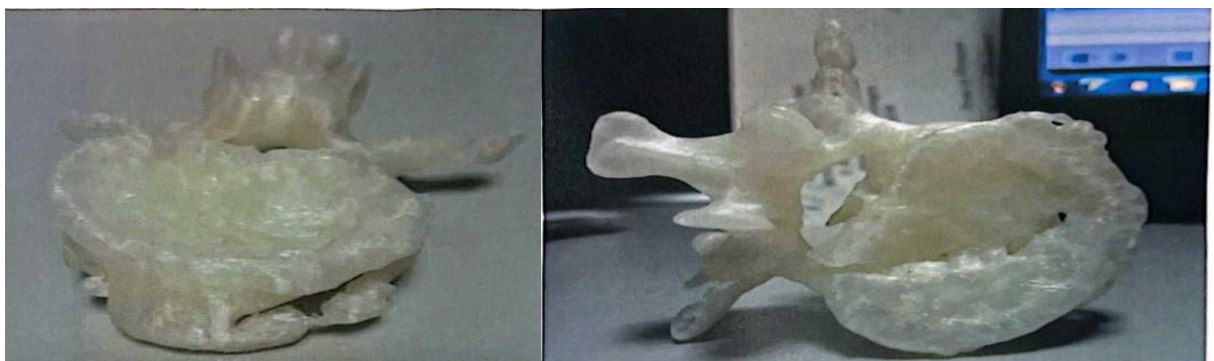
Matériel d'impression ; PLA transparent.

Temps d'impression : 3h 34min

Poids d'impression (y compris les structure de support) : 36 g

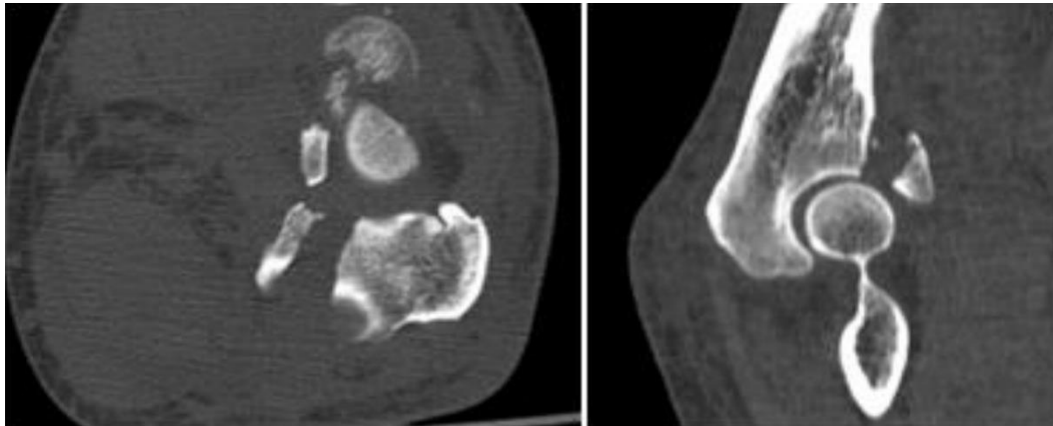
Dimension : taille réelle (100%), recardée.

Utilité : modérée (fracture complexe)



**Figure 25 : Impressions 3D du modèle.**

**Cas 6 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : traumatisme complexe du coude (Figures 26 et 27)**



**Figure 26 : Acquisition scanographique coupe sagittale du coude gauche (fracture de l'olécrâne et de la tête radiale)**



**Figure 27 : Modélisation 3D et impression 3D du coude post-traumatique.**

Acquisition scanographique en coupe sagittale du coude gauche traumatisé mettant en évidence une fracture de l'olécrâne associée à une fracture de la tête radiale (Figure 26), suivie d'une modélisation 3D et d'une impression du modèle pour la planification chirurgicale (Figure 27).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Matériel d'impression : PLA blanc.

Temps d'impression : 54 min

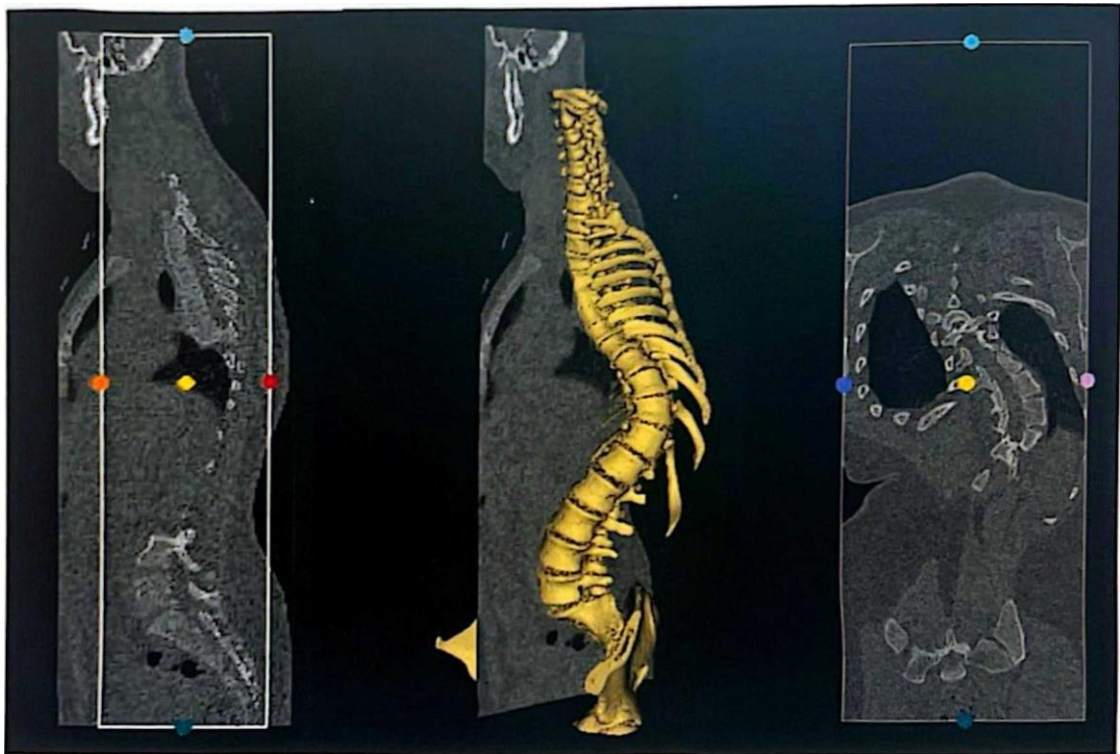
Poids d'impression (y compris les structure de support) : 24 g

Dimension : taille réduite (25 %)

Utilité : élevée (fracture complexe nécessitant de multiples ostéosynthèse avec présence de multiples surfaces articulaires)

## Cas 7 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : scoliose

(Figures 28 et 29)



**Figure 28 : Acquisition scanographique du rachis et modélisation 3D.**

Acquisition scanographique en coupes sagittales, coronales et reconstruction 3D du rachis chez un patient présentant une scoliose (Figure 28), suivie d'une modélisation tridimensionnelle après sélection d'un ROI, seuillage et segmentation sur fenêtre osseuse, dans le but de planification chirurgicale (Figure 29).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Reconstruction 3D après mise en place d'un ROI, seuillage et segmentation sur fenêtre osseuse.

Matériaux : PLA blanc.

Agrandissement : 35 %.

Poids : 60 g.

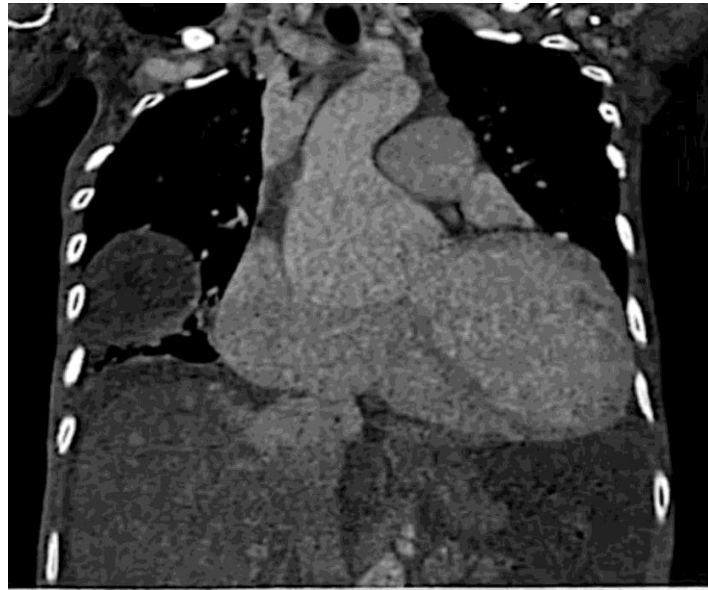
Temps d'impression : 8 h 30 min.

Utilité : modérée (agrandissement insuffisant, matériel d'impression inadapté (le blanc démontrant moins bien les structures anatomiques que les plastiques colorés)).

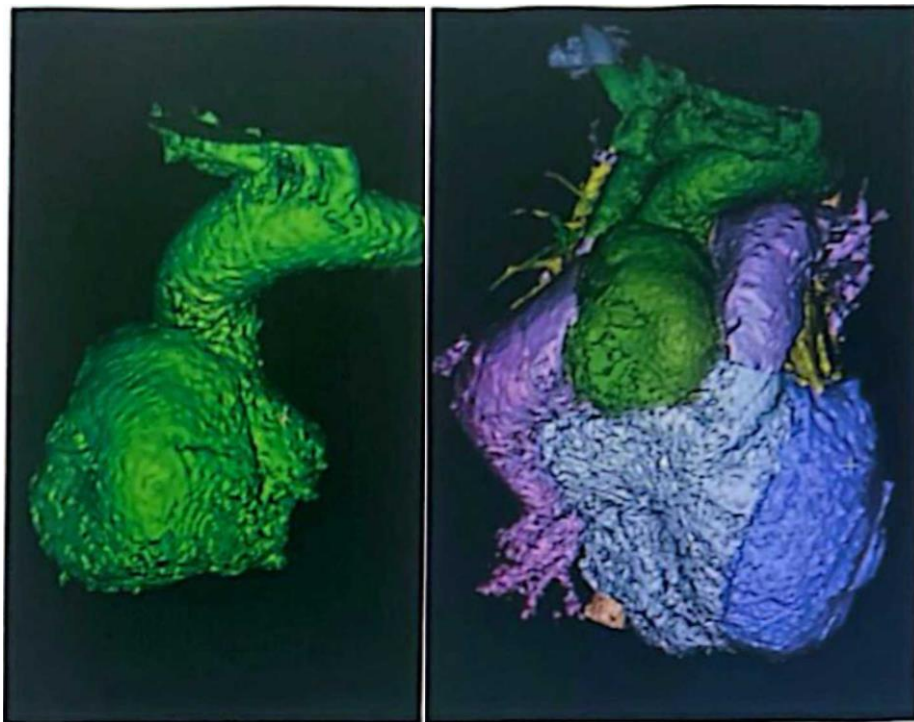


**Figure 29 : Impression 3D + modélisation 3D du rachis scoliotique.**

**Cas 8 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale : anévrisme aortique (Figures 30, 31, 32 et 33)**



**Figure 30 : Acquisition scanographique en coupe coronale.**



**Figure 31 : Modélisation 3D du cœur avec isolation de l'aorte et de l'anévrisme de l'aorte ascendante.**

Modélisation 3D de l'aorte ascendante avec anévrisme (Figure 31) réalisée à partir des données scanographiques (Figure 30), suivi de l'impression du cœur et de l'aorte (Figure 32), permettant la planification de la mise en place de la prothèse aortique (Figure 33).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Reconstruction 3D après mise en place d'un ROI, seuillage et segmentation cardiaque

Matériaux : PLA gris.

Agrandissement : 100 %.

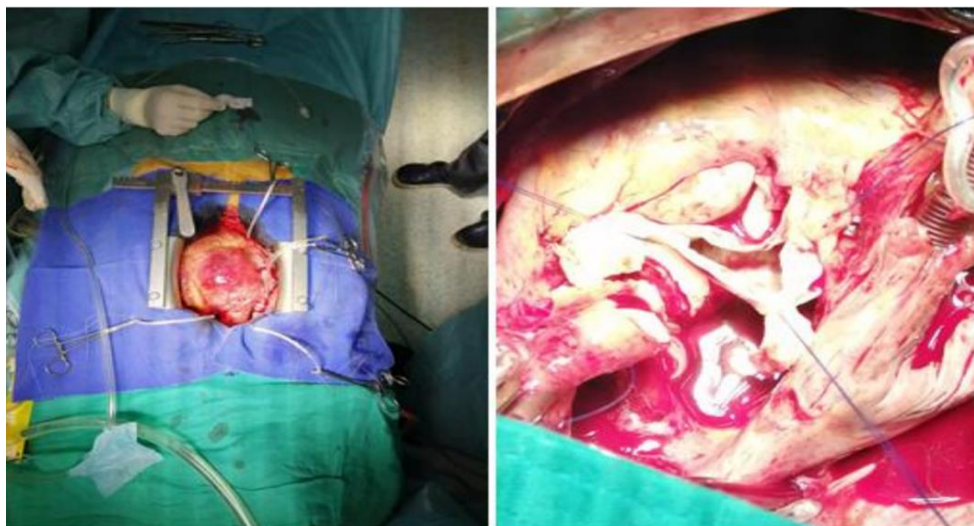
Poids: 150 g.

Temps d'impression : 6 h 30 min.

Utilité : élevée (modèle utilisé pour planification chirurgicale d'une mise en place d'une prothèse aortique (principale utilité du modèle est la localisation des artères coronaires).



**Figure 32 : Impression 3D du modèle anatomique du cœur et de l'aorte**



**Figure 33 : Vue per opératoire de la mise en place de la prothèse aortique.**

**Cas 9 : modélisation d'un support d'apprentissage pour les techniques de radiologie interventionnelle (Figure 34).**



**A : Modèle aorto-ilio-fémoral**



**B : Modèle artères rénales et tronc cœliaque.**



**C : Modèle de voies biliaires.**

**Figure 34 : Impressions 3D de modèles anatomiques destinés à l'apprentissage des techniques de radiologie interventionnelle.**

A : Modèle aorto-ilio-fémoral.

Technique de Seldinger.

B : Modèle artères rénales et tronc cœliaque.

Angioplasties.

Embolisations.

C : Modèle de voies biliaires.

Drainage biliaire.

Pose d'endoprothèses.

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Utilité : élevée. Démonstration des différentes techniques de radiologie Interventionnelle.

Matériaux : PLA blanc.

Agrandissement : 100 %.

Poids : 120 g

Temps moyen d'impression pour chaque modèle : 8h à 12h.

**Cas 10 : modélisation d'un support pour planification chirurgicale après simulation. malformation mandibulaire (Figures 35, 36, 37, 38 et 39 ).**



**Figure 35 : Défilé mandibulaire, déviation malaire de l'hémi mandibule gauche.**

Une patiente présente une malformation mandibulaire avec un défilé mandibulaire et une déviation malaire de l'hémi-mandibule gauche (Figure 35). Après l'acquisition des données, une modélisation 3D de la malformation mandibulaire a été réalisée (Figure 36). Cette modélisation a permis une analyse précise via une céphalométrie 3D (Figure 37), suivie de l'impression 3D dynamique du modèle en deux parties pour une meilleure adaptation (Figure 38). Enfin, une simulation d'ostéotomie de correction orthognatique a été effectuée, permettant d'évaluer le résultat au niveau des parties molles en post-opératoire (Figure 39).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Reconstruction 3D après mise en place d'un ROI, seuillage et segmentation sur fenêtre osseuse.

Matériaux : PLA gris.

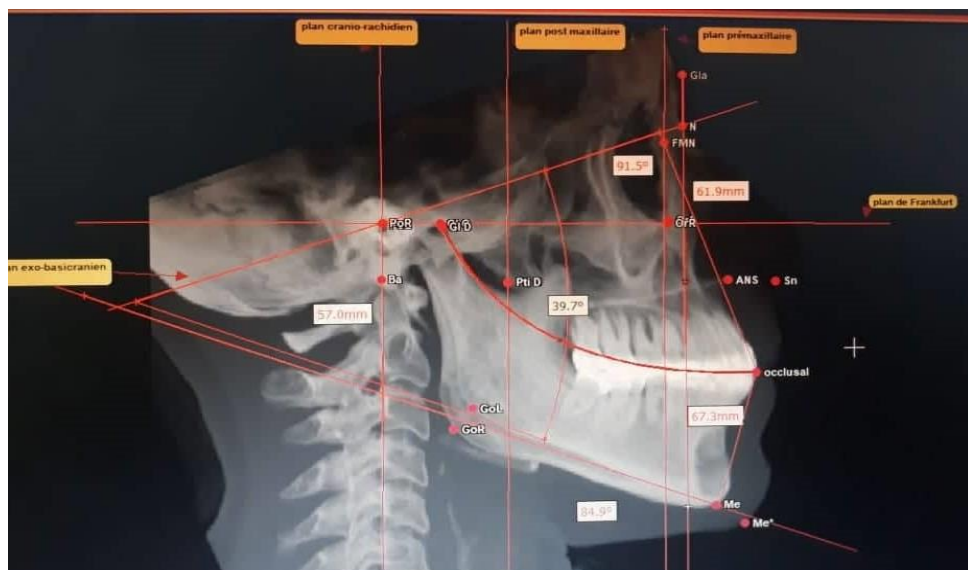
Agrandissement : 80 %.

Poids : 90 g.

Temps d'impression : 5h.



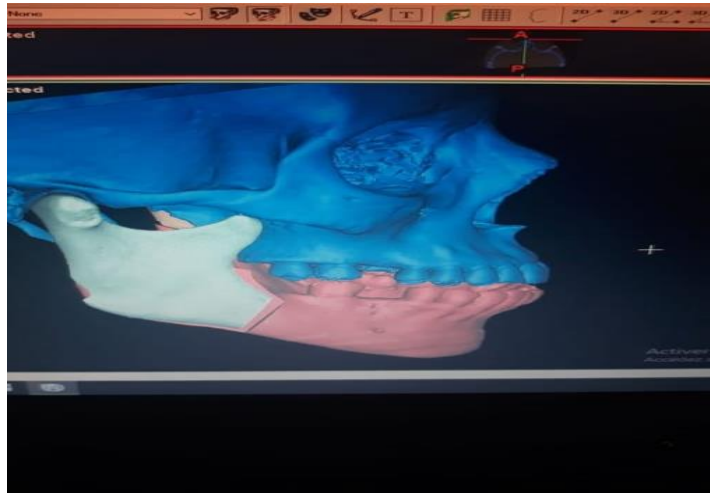
**Figure 36 : Modélisation 3D**



**Figure 37 : Céphalométrie 3D**



**Figure 38 : Impression 3D dynamique en 2 parties.**



**Figure 39 : Simulation d'ostéotomie de correction orthognatique et du résultat des parties molles en post-opératoire.**

Utilité : élevée, planification chirurgicale d'une chirurgie orthognatique compliquée avec simulation de différents montages chirurgicaux et appréciation du résultat au niveau des parties molles avant de passer in vivo.

Cas 11 : Modélisation d'un moule sur mesure pour cranioplastie (Figures 40, 41, 42, 43, 44 et 45)

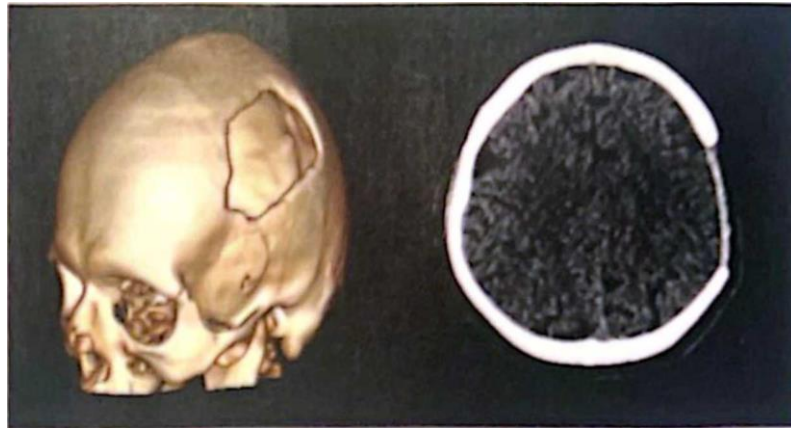


Figure 40 : Acquisition scanographique avec reconstruction tridimensionnelle (VRT) d'un défaut crânien en vue d'une cranioplastie personnalisée.

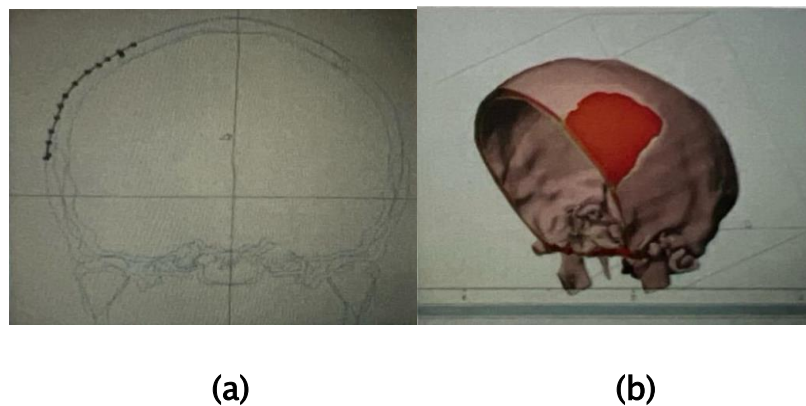


Figure 41 : (a+b) modélisation de la prothèse de cranioplastie selon la courbure anatomique.

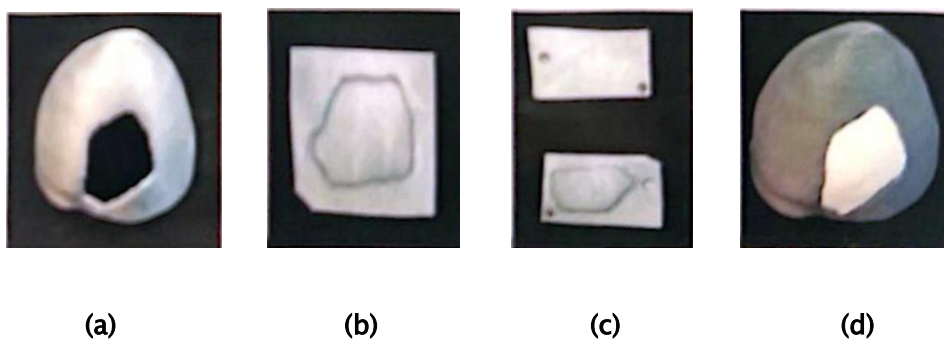


Figure 42 : Impression 3D en moule 1 et 2 pièce embrochable + modèle d'essai.

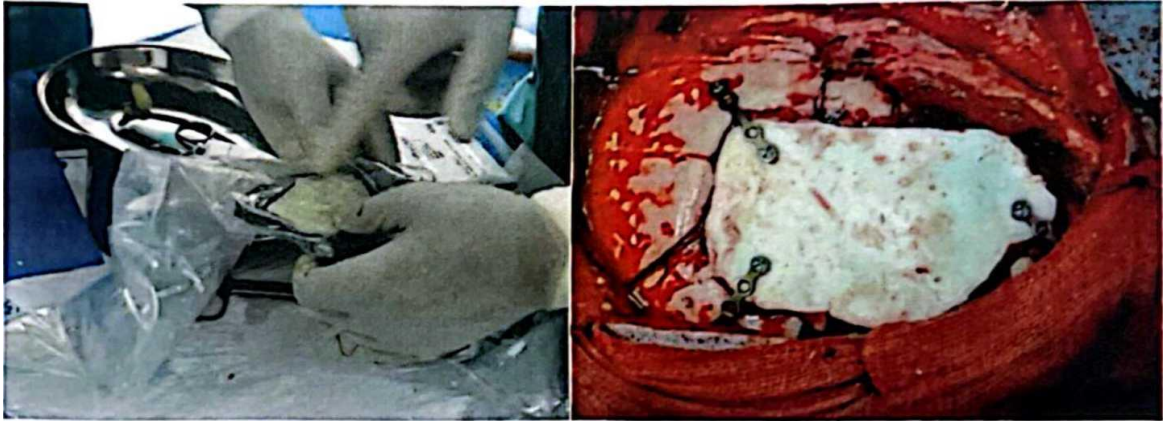


Figure 43 : Moulage du ciment osseux et fixation à l'aide de plaques vissées.

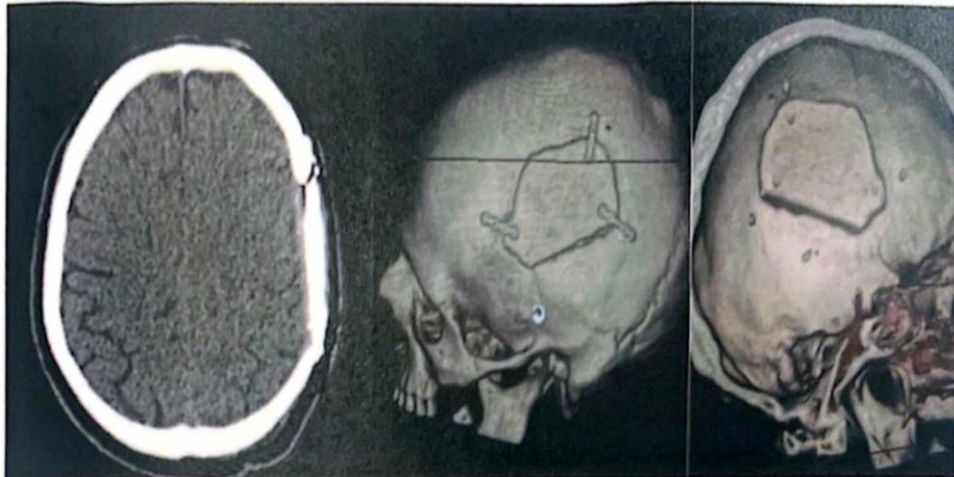


Figure 44 : Contrôle scanographique post-opératoire et VRT.

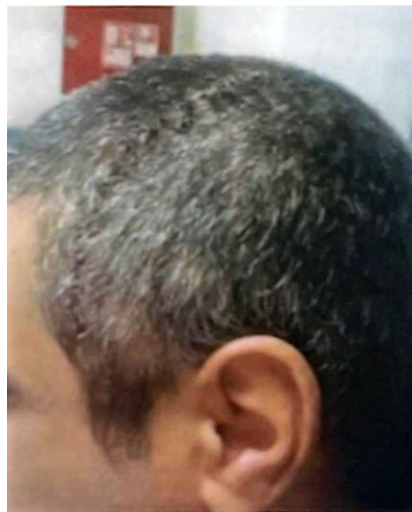


Figure 45 : Résultat final.

Le patient présente un défaut crânien nécessitant une cranioplastie. L'acquisition scanographique (Figure 40) a permis de réaliser la modélisation 3D du moule (Figure 41). Ensuite, la modélisation de la prothèse a été effectuée, suivie de l'impression du moule (Figure 42). La prothèse a été fabriquée et fixée à l'aide de plaques (Figure 43). Le contrôle scanographique post-opératoire a montré le bon positionnement de la prothèse (Figure 44), et le résultat final est satisfaisant (Figure 45).

Imprimante utilisée : Creality Ender 3

Reconstruction 3D après mise en place d'un ROI, seuillage et segmentation sur fenêtre osseuse

Modélisation d'une prothèse selon la courbure anatomique en utilisant le logiciel Materialise 3matic et d'un moule en utilisant l'algorithme booléen de soustraction.

Matériaux : PLA gris.

Agrandissement : 100 %.

Poids: 210g.

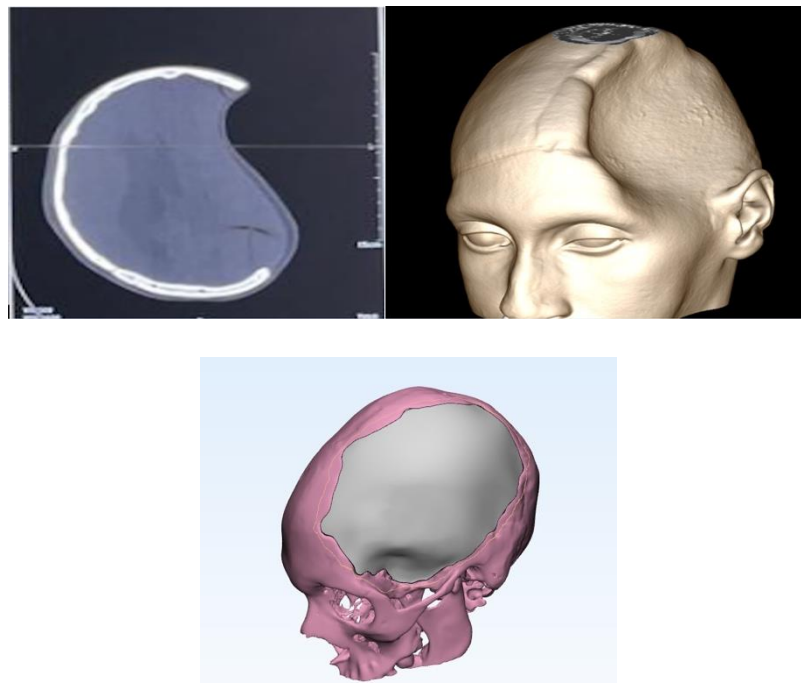
Temps d'impression : 13 h.

Utilité : élevée, remplacement de la méthode conventionnelle industrialisée par un implant personnalisé respectant l'anatomie du patient.

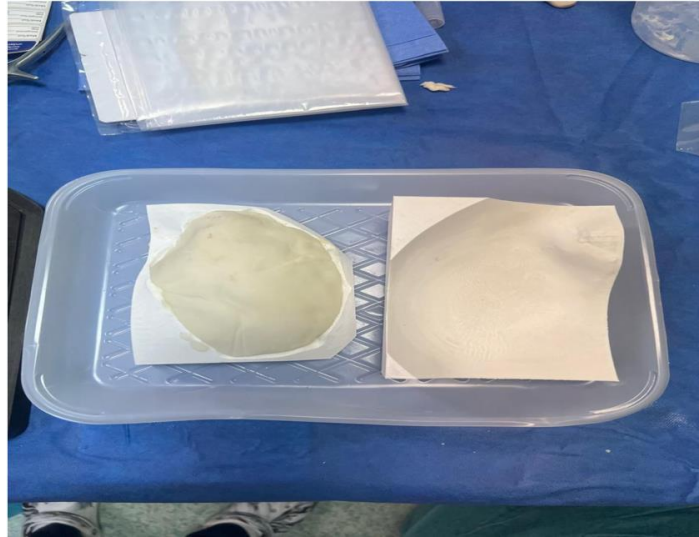
**Cas 12 : Modélisation d'un moule sur mesure pour cranioplastie (Figures 46, 47, 48, 49 et 50)**



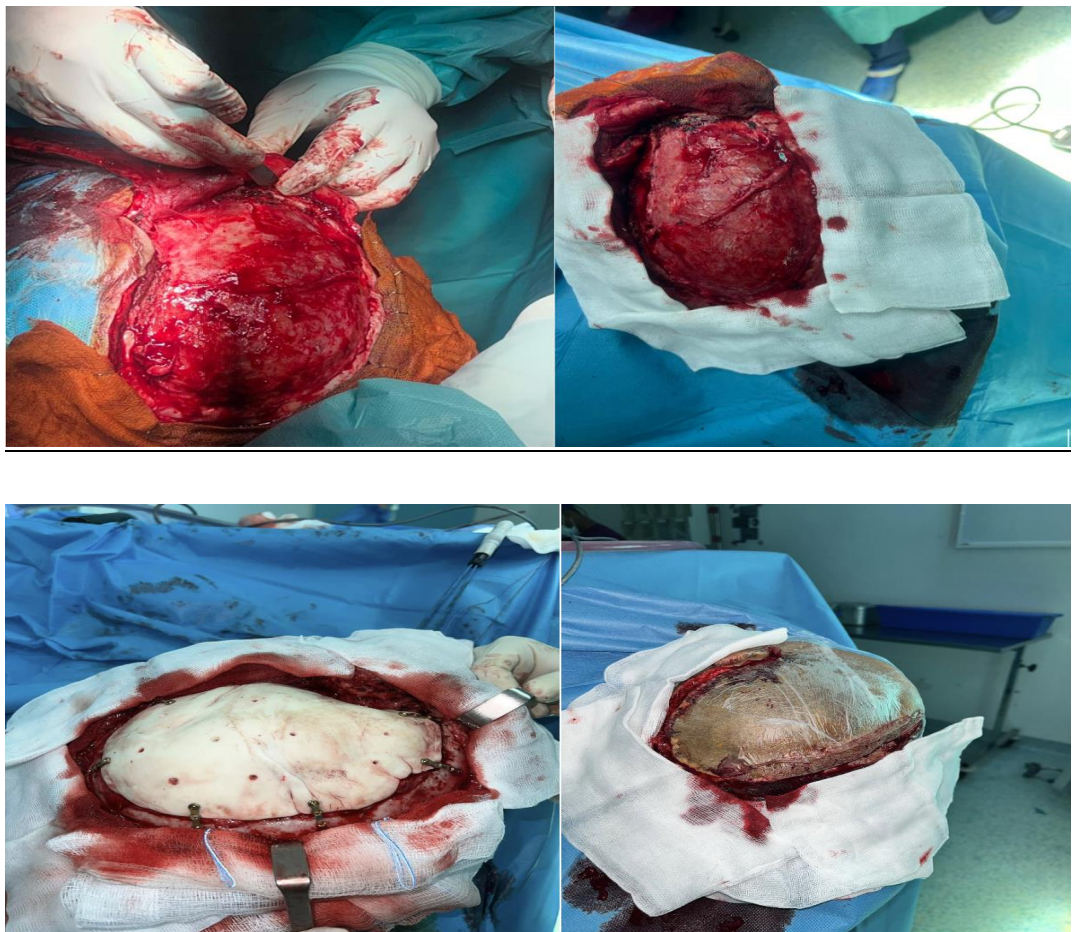
**Figure 46 : Patient présentant le défaut crânien.**



**Figure 47 : Acquisition scanographique avec reconstruction tridimensionnelle du défaut crânien en vue de cranioplastie personnalisée + Modélisation 3D**



**Figure 48 : Modèle 3D sur table d'instruments opératoire en vue d'une cranioplastie après stérilisation.**



**Figure 49 : Temps per opératoire; mise en place et fixation du moule d'impression 3D.**



**Figure 50 : Image post-opératoire.**

Un modèle 3D a été créé à partir des acquisitions scanographiques du défaut crânien pour réaliser une cranioplastie personnalisée (Figure 46 et Figure 47). Ce modèle a ensuite été utilisé sur la table d'instruments opératoires après stérilisation (Figure 48) et implanté lors de la procédure chirurgicale (Figure 49). Enfin, l'image post-opératoire a permis d'évaluer le résultat (Figure 50).

Imprimante : Volumic Stream SH65

Matériaux : PLA.

Agrandissement : 100 %.

Poids: 402g.

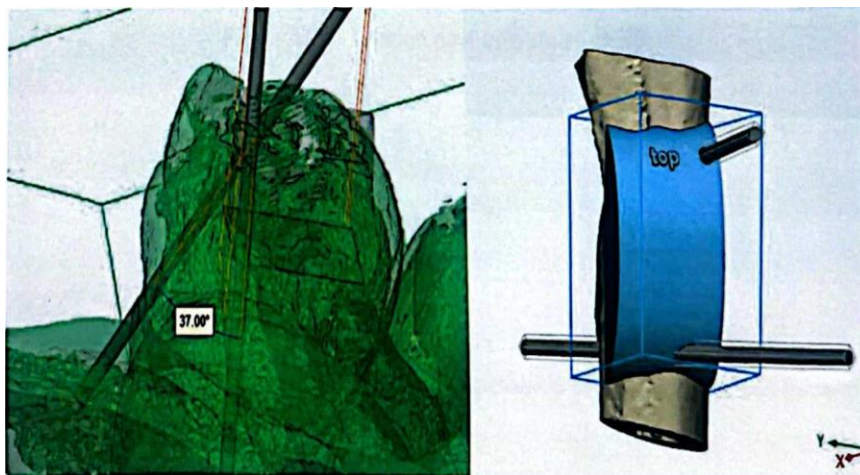
Temps d'impression : 13 h 10mins.

Utilité : élevée, remplacement de la méthode conventionnelle industrialisée par un implant personnalisé respectant l'anatomie du patient.

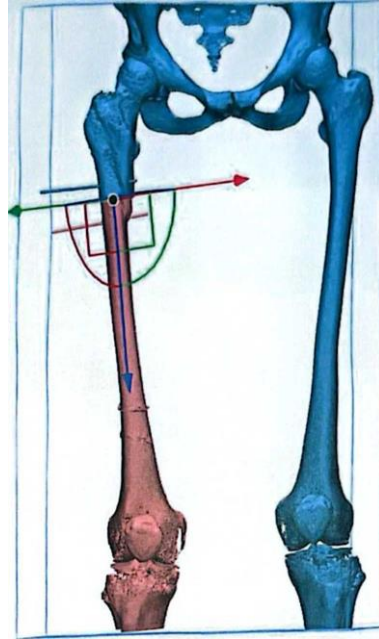
**Cas 13 : Modélisation d'un guide chirurgical : Fracture diaphysaire compliquée de cal vicieux. (Figures 51, 52, 53 et 54)**



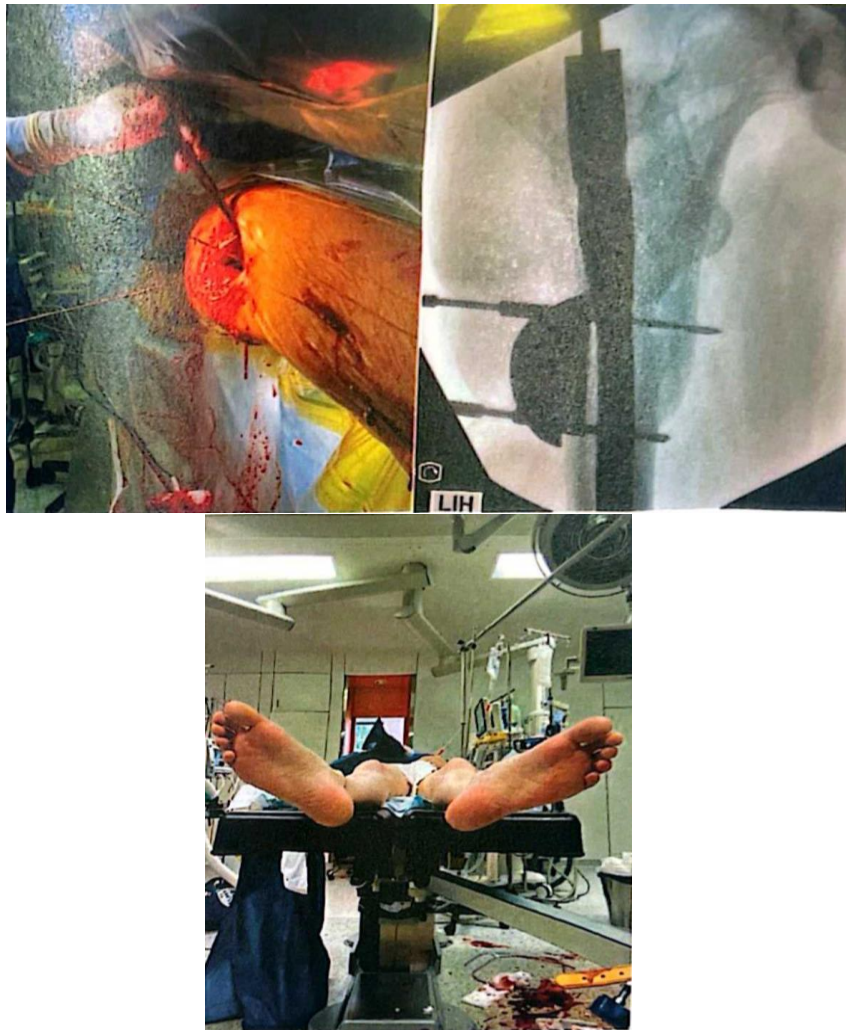
**Figure 51 : Scout view montrant la fracture sous-trochantérienne avec cal vicieux et malrotation du segment distal.**



**Figure 52 : Modélisation du guide chirurgical.**



**Figure 53 : Simulation post-opératoire en 3D.**



**Figure 54 : Vue per-opératoire.**

Le patient présentait une fracture diaphysaire fémorale sous-trochantérienne, compliquée de cal vicieux avec malrotation du segment distal. L'acquisition scanographique initiale (Figure 51) a mis en évidence cette déformation osseuse. Une modélisation 3D a ensuite été réalisée afin de concevoir un guide chirurgical personnalisé (Figure 52), destiné à corriger précisément la déformation. Une simulation post-opératoire a été effectuée à l'aide de cette modélisation (Figure 53), permettant de visualiser le résultat attendu de l'ostéotomie correctrice. L'impression 3D finale du guide a été produite (Figure 54) pour une application per opératoire directe et ciblée. Le cas a été imprimé en dehors du CHU, chez un prestataire externe.

Ce travail présente 13 cas cliniques illustrant la diversité des usages de l'impression 3D en radiologie. Pour offrir une vision plus synthétique, ces cas peuvent être regroupés selon trois grandes finalités : la planification chirurgicale, la formation médicale et la fabrication de matériel opératoire personnalisé.

#### **A. Création de matériel opératoire personnalisé**

Ces cas correspondent à l'utilisation de l'impression 3D pour générer des guides chirurgicaux ou des implants personnalisés, remplaçant ou complétant les solutions industrielles standardisées

Cas 11 et Cas 12 : Fabrication de moules sur mesure pour cranioplastie.

Cas 13 : Conception d'un guide chirurgical personnalisé pour correction de cal vicieux fémoral.

#### **B. Support à la planification chirurgicale**

Cette catégorie regroupe les cas où la modélisation et l'impression 3D ont été utilisées pour mieux visualiser et anticiper les gestes opératoires, en particulier dans les contextes complexes :

Cas 2 et Cas 7 : Chirurgie de scoliose.

Cas 4, Cas 5 et Cas 6 : Traumatismes complexes (mandibule, rachis dorsal, coude).

Cas 8 : Anévrisme de l'aorte ascendante.

Cas 10 : Simulation chirurgicale d'une malformation mandibulaire.

#### **C. Formation médicale et support pédagogique**

Certains modèles imprimés ont été utilisés à des fins pédagogiques, dans le cadre de formations médicales pratiques ou de démonstration de techniques interventionnelles :

Cas 1 : Apprentissage de l'anatomie du rocher.

Cas 3 : Entraînement aux techniques endovasculaires sur modèle vasculaire aortique.

Cas 9 : Formation en radiologie interventionnelle avec trois types de modèles dédiés (aorto-iliaque, rénal, biliaire).



# DISCUSSION



## **I. Contexte et évolution de l'impression 3D :**

### **1. Tendances récentes et développement de l'impression 3D :**

L'impression 3D médicale représente une avancée majeure dans le domaine de la radiologie et de la chirurgie, offrant aux cliniciens des modèles anatomiques précis issus des données d'imagerie. Cette technologie permet une meilleure compréhension des structures complexes, améliore la planification chirurgicale et optimise la formation des professionnels de santé.[16][17][18][19]

L'analyse de la littérature scientifique relative à l'application de l'impression 3D en médecine met en évidence une augmentation significative du nombre de publications au fil des années.[20]

Cette croissance devient particulièrement notable à partir de 2011, année durant laquelle 21 articles ont été recensés sur ce sujet. Cette tendance ascendante s'est poursuivie, atteignant 70 publications en 2015, témoignant ainsi de l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour cette technologie et de son intégration progressive dans le domaine médical [21,22].

Cette augmentation du nombre de publications reflète la tendance croissante des services médicaux à intégrer l'impression 3D dans leur pratique clinique en s'équipant de dispositifs adaptés. Parmi les différentes spécialités médicales, l'orthopédie se distingue comme le domaine ayant généré le plus grand nombre de publications, selon l'étude de P.Tack et al [22] avec 45,18% des articles analysés (sur 227 articles) .

En deuxième place arrive la chirurgie maxillo-faciale et orale, avec 24.12% des articles soit environ 55 articles.

Les radiologues quant à eux, jouent un rôle pivot dans l'impression 3D en intervenant à plusieurs étapes essentielles :

L'acquisition et la segmentation des images médicales généralement obtenues par TDM, IRM ou échographie. Ces images sont ensuite segmentées, soit manuellement, soit de manière semi-automatique, pour isoler les structures d'intérêt. Cette étape est essentielle, car elle détermine la précision du modèle 3D final pour la planification chirurgicale ou la personnalisation du traitement.,[23].

La conversion en modèles imprimables, généralement au format STL. Cette étape implique l'utilisation de logiciels spécialisés pour préparer le modèle numérique, ajuster les paramètres nécessaires à l'impression et assurer une reproduction fidèle des structures anatomiques. [24].

La validation des modèles pour un usage clinique, consistant à évaluer leur précision en les comparant aux images médicales d'origine. Cette étape garantit que les modèles sont suffisamment fidèles pour être utilisés dans la planification chirurgicale, la formation des équipes médicales, et la personnalisation des traitements [25] [26].

Suivi post-opératoire ; les radiologues peuvent utiliser l'impression 3D pour évaluer le résultat post-opératoire en comparant les modèles imprimés avec les images post-opératoires. Cela peut aussi être utile pour l'évaluation de la cicatrisation ou la planification de futures interventions.[27]

L'application et le développement ultérieur de l'impression 3D en médecine nécessite l'implication des radiologues pour adapter les technologies aux besoins cliniques spécifiques. Ils participent à la création de modèles anatomiques personnalisés, à l'optimisation des techniques d'impression, et à la validation des protocoles d'imagerie. Leur rôle est crucial pour intégrer l'impression 3D dans des pratiques cliniques variées, allant de la chirurgie à la formation médicale. [28][29][30].

La gestion d'un laboratoire d'impression 3D implique la supervision des équipements, la gestion des matériaux, et la validation des modèles pour garantir leur conformité aux normes cliniques. Les radiologues sont responsables de coordonner le processus, de s'assurer que les protocoles d'imagerie sont suivis et que les modèles imprimés sont prêts à être utilisés pour le traitement des patients.[31]

## **2. Réduction des coûts :**

L'essor de l'impression 3D en médecine s'explique par la réduction des coûts et la simplification des technologies.[32] La stéréolithographie (SLA), bien que précise, nécessite un entretien rigoureux et l'utilisation de résines photo polymérisables coûteuses et complexes à manipuler, limitant ainsi son déploiement.

En contrepartie, la technologie d'impression par dépôt de filament fondu (FDM) est plus accessible. L'entretien est simple, et le remplacement des composantes de l'imprimante peut être réalisé facilement avec peu de connaissances. [33]

Les coûts liés à l'impression 3D sont difficiles à estimer de manière permanente, du fait de la tendance à la réduction des prix des imprimantes et des consommables encore en cours. Ces coûts peuvent être répartis en plusieurs catégories :

**A. Les coûts de « hardware » :**

en lien avec l'imprimante, son entretien et les consommables, fil plastique, résine, poudre ou autres. La fiabilité des imprimantes actuelles rend rare les échecs d'impression, [34], mais ceux-ci restent à prendre en compte a minima.

**B. Les coûts des logiciels :**

De nombreux logiciels gratuits sont disponibles sur le marché, mais nécessitent un temps d'apprentissage parfois long au vu de leur complexité. Des solutions adaptées peuvent être proposées par des prestataires spécialisés, accompagnées de formations à l'utilisation de ces solutions logicielles. Cependant le coût en est souvent élevé, et est à mettre en balance avec les bénéfices attendus, et les fonds dédiés à l'impression 3D au sein du service.

**C. Le coût du temps de conception des modèles et des aides opératoires (guides de coupes, pré conformation du matériel, gouttières, etc...).**

Ce coût est difficile à évaluer en raison de l'aspect salarial du travail des praticiens hospitaliers.

**D. le coût des examens complémentaires**

Il semble peu pertinent de le prendre en compte (scanner ou IRM) car ces imageries font partie de la démarche diagnostique standard, et ne sont jamais demandées spécifiquement dans un but de modélisation 3D.

### **3. Amélioration de la précision :**

R Olszewski et al. ont prouvé, par comparaison de mesure entre crâne sec et modèle 3D de ces crânes, que l'anatomie des patients pouvait être reproduite avec fidélité via l'impression 3D [35].

Cette précision est également retrouvée au niveau dentaire, le plus important en chirurgie maxillo-faciale, avec une marge d'erreur maximale de 0.25 millimètres, et une marge d'erreur moyenne inférieure à 0.1 mm lors de mesures comparatives entre modèles en plâtres et impression des scans de ces modèles [36].

Par ailleurs, JP. Meningaud et al. ont démontré la reproductibilité de leur méthode de

création de guides de coupe pour reconstruction mandibulaire par péroné avec une marge d'erreur inférieure à 1 millimètre en moyenne [37].

Sur une publication plus ancienne, la marge d'erreur maximale constatée lors de l'intervention est de 2 millimètres (ayant nécessité un ajustement per opératoire chez 2 patients) et à T d'angle [38].

Ces erreurs peuvent avoir été en lien avec les imprécisions des premiers guides de coupe. Cette dernière étude a également démontré la faible déformation des modèles 3D stérilisés à l'autoclave (déformation inférieure à 0.2mm) sous réserve que les modèles aient été imprimés par frittage de poudre polyamide par une société externe (dans le but d'éviter les biais de l'étude).

Il serait intéressant d'étudier la déformation liée à la stérilisation des modèles imprimés au sein du service.

Une étude concernant la création de gouttières ortho gnathiques en 3D [39] mettait en évidence une différence moyenne entre acquisition scanner et modèles 3D de 0.44 millimètres, avec une différence maximale de 0 88 millimètres. Le taux d'imprécision moyen toléré pour des gouttières « classiques » (faites à la main) étant estimé à 0.94 millimètres, supérieur de 0,5 millimètres au taux retrouvé pour les gouttières imprimées.

#### **4. Méthodes d'acquisition :**

Les méthodes d'acquisition des modèles 3D actuelles reposent majoritairement sur l'utilisation des images scanographiques [22]. Il semble que les images obtenues par scanner multi-barrettes permettent une plus grande reproductibilité de création de ces modèles entre différents opérateurs [40].

Cependant, les images issues de cone-beam ou d'IRM restent exploitables.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte dans le résultat final :

##### **L'épaisseur des coupes de l'examen sélectionné :**

La plupart des scanners sont réalisés en coupes millimétriques ou inframillimétriques (coupes de 0.6 millimètres). Il est intéressant de noter que la précision de notre matériel permet l'impression en couches jusqu'à 0.15 millimètres d'épaisseur. Il existe donc une perte d'information à prendre en compte par rapport à l'anatomie du patient.

Cependant, en terme d'anatomie osseuse, cette perte d'information a peu d'influence, et est compensée par un lissage informatique minime.

**La sélection du seuil de densité ou d'intensité retenu :**

La plupart des logiciels proposent, sur base de densités standardisées. Habituellement, ces seuils de densités sont 0, 250,500 et 1000 unités Hounsfield. Ces standards sont établis par les créateurs des logiciels en question. Une étude a établi que ces reconstructions par défaut sont rarement validées par les opérateurs qui préfèrent sélectionner les limites de seuillages par eux-mêmes [40].

L'acquisition de modèles via IRM se développe, avec des séquences dédiées à l'os [41] telles que la séquence Ultrashort Echo Time. Ce type d'examen nous permettrait d'étudier les anomalies fœtales sans irradiation par exemple [42]. Ces modèles pourraient servir dans la discussion pluridisciplinaire pour la prise en charge de pathologies rares, complexes, posant un risque, parfois vital, pour le nouveau-né. Cependant l'épaisseur des coupes (moyenne 3mm) limite le développement de ces techniques, même lorsque les images sont manipulées afin d'en tirer des couches extrapolées de 1mm [42]. La précision de ce type de modèle est donc moins importante qu'un modèle basé sur des coupes scanner à priori.

Dans ce type d'indications (pathologie fœtale), il serait intéressant de développer l'utilisation de l'échographie 3D pour la création de nos modèles [43].

Il serait également intéressant d'étudier l'application de l'IRM à la modélisation de pathologies neuro-vasculaires ou de tumeurs intracrâniennes. Les séquences dédiées exclusivement à ce type de pathologies permettraient un repérage et une planification préopératoire.

## **II. Apport de l'impression 3D :**

L'un des apports majeurs de l'imprimante 3D est l'aide à la prise en charge de patients nécessitant une reconstruction « personnalisée », en raison de pathologies complexes soit par leur rareté, soit par le terrain sur lequel elles adviennent. Cette reconstruction peut être effectuée soit directement par impression 3D de prothèses basées sur l'anatomie du patient (mirroring du côté sain sur le côté pathologique), [44,45] , soit par aide à la création d'épithèses ou d'appareillages personnalisés [46-49], soit à l'aide d'impression d'aides opératoires telles que les guides de coupe [38,50-52] , les guides de pose implantaire [53], ou

l'évaluation préopératoire de vecteurs de distraction précis [54].

L'utilité de l'impression 3D peut être quantifiée selon quelques critères récurrents [21,22,38,44-55]:

- ❖ l'économie de temps opératoire,
- ❖ la précision du modèle,
- ❖ le résultat post-opératoire
- ❖ le coût.
- ❖ Le taux d'irradiation par radioscopie per-opératoire fait également partie des critères d'évaluation que l'on peut retrouver fréquemment, en lien avec les pratiques d'orthopédie et de radiologie interventionnelle.

La réduction du temps opératoire est un objectif concret et commun à toutes les spécialités chirurgicales. Elle permet de diminuer le taux de complications liées à l'anesthésie générale, et rentre également dans l'objectif du contrôle des dépenses de santé par la diminution du temps d'occupation des salles opératoires.[56]

Les études chiffrant cette économie de temps sont encore peu nombreuses et réalisées sur un faible nombre de patient du fait de la « rareté » relative de l'utilisation d'aides opératoires imprimées en 3D.

Liu et al. [57] ont objectivé une réduction de temps opératoire de 2 heures sur la reconstruction mandibulaire, aidée par guide de coupe et pré-conformation du matériel d'ostéosynthèse, chez 15 patients par rapport à un groupe contrôle.

Cette tendance est confirmée par l'équipe Meningaud et al., qui met en évidence une réduction du temps opératoire d'environ 1 heure et 30 minutes [37].

Les modèles anatomiques et guides chirurgicaux imprimés en 3D réduisent en moyenne de 62 minutes le temps opératoire en chirurgie orthopédique et maxillo-faciale, entraînant une économie moyenne de 3720 USD par cas, tout en conservant une grande précision et efficacité[58]

Les valeurs absolues des temps opératoires avec guides de coupe oscillaient entre 6 et 10 heures avec une moyenne de 7 heures 2 minutes [50].

Par ailleurs, les revues d'articles de Tack et al. [22] et de Martelli et al. [5] ont mis en évidence, sur l'ensemble des articles revus (227 pour P. Tack en octobre 2016 et 158 articles

pour N. Martelli en juin 2016), une tendance nette à la réduction du temps opératoire.

En effet, parmi les 227 articles, 123 mentionnaient une diminution de ce temps, 12 mentionnaient un temps semblable et 10 une augmentation. 125 articles ne détaillaient pas l'effet de l'impression 3D dans ce cadre [22].

Pour N. Martelli, 52 études faisaient état d'une réduction du temps opératoire, liée pour 38 d'entre elles à la planification du geste assisté par les modèles, et pour 17 à l'utilisation de guides de coupes ou autres aides personnalisées (6). Cependant seulement 6 des 52 études analysées ont quantifié le gain de temps opératoire, et reposent sur un faible nombre de cas observés.

### **III. Expérience de notre service :**

Notre service a acquis une imprimante 3D en 2019 et a développé une expertise dans la conversion des images médicales au format DICOM en modèles tridimensionnels fidèles à l'anatomie des patients. Cependant, à ce jour, aucune procédure chirurgicale assistée par impression 3D n'a été systématiquement standardisée. Les modèles imprimés ont été réalisés sur demande des praticiens, sans cadre de recherche formel structuré.

Néanmoins, une analyse rétrospective de ces cas permet d'identifier certaines tendances quant à l'utilisation de cette technologie. Il est ainsi possible d'évaluer différents niveaux de pertinence du modèle 3D dans la prise en charge des patients, selon qu'il ait été jugé essentiel, modérément utile ou ayant un impact limité sur l'approche thérapeutique globale.

Cette évaluation s'est appuyée, entre autres, sur les retours des chirurgiens concernés, renforçant la valeur clinique perçue de chaque modèle utilisé

#### **1. Population concernée :**

Dans notre étude, la moyenne d'âge des patients était de 31 ans, ce qui est comparable à plusieurs études utilisant l'impression 3D dans des contextes médicaux similaires. Par exemple, une étude sur les fractures du fémur traitées par l'approche de Ganz guidée par impression 3D a rapporté une moyenne d'âge de 39,9 [59].

D'autres études, cependant, ont inclus des populations plus jeunes, comme une recherche sur les fentes alvéolaires chez des enfants âgés de 8 à 11 ans [60].

En revanche, certaines études ont inclus des cohortes plus âgées. Une étude sur

l'application de l'impression 3D pour l'évaluation de la densité minérale osseuse chez des patients d'une moyenne d'âge de 63 [61], tandis qu'une étude sur l'efficacité de l'impression 3D pour le dépistage du mélanome a rapporté une moyenne d'âge de 51,6 [62].

Ainsi, les résultats de notre étude se situent dans une gamme d'âges variée, allant des enfants aux adultes plus âgés, comme le montre la diversité des tranches d'âge observées dans la littérature sur l'impression 3D en médecine.

Bien qu'il soit important de prendre en compte le biais de l'effet centre de notre service, on peut observer une tendance à l'utilisation de l'impression 3D dans la prise en charge de patients jeunes.[63–65] Il s'agit cependant d'une tendance qui sera à pondérer en fonction des futures utilisations de cette technologie, en particulier concernant les aides à la reconstruction (population généralement plus âgée) [66,67].

## **2. Les coûts de l'impression :**

Dans notre étude, le coût moyen par patient pour l'utilisation de l'impression 3D s'élève à environ 242 dirhams (environ 24 USD). Ce coût est relativement modeste comparé à d'autres études internationales. Par exemple, une étude menée au Barnes–Jewish Hospital de l'Université Washington à St. Louis a rapporté un coût moyen de 2 737 USD par modèle imprimé en 3D, incluant les coûts de main-d'œuvre et les frais généraux [68]. En revanche, certaines études ont démontré la possibilité de produire des modèles personnalisés à des coûts bien inférieurs. Par exemple, une étude a rapporté la création de modèles hépatiques personnalisés pour moins de 100 USD par modèle [69]. De même, une autre étude a décrit la fabrication de modèles rénaux à un coût moyen de 30 USD par modèle [70].

Par ailleurs, l'utilisation de modèles anatomiques imprimés en 3D a permis dans certaines études de réduire significativement le temps opératoire, générant des économies substantielles : par exemple, une étude a observé une réduction moyenne de 62 minutes de temps opératoire, correspondant à une économie d'environ 3 720 USD par intervention [71].

Dans notre contexte, bien que les économies en temps opératoire n'aient pas été quantifiées, le faible coût par patient suggère une rentabilité potentielle, surtout si l'on considère les avantages cliniques tels que la personnalisation du traitement et l'amélioration de la planification opératoire. De plus, l'absence de coûts supplémentaires pour les logiciels, disponibles gratuitement ou sous licence d'essai, renforce l'argument en faveur de l'intégration

de cette technologie, notamment dans les environnements à ressources limitées.

### **3. Apport et utilité de l'impression 3D :**

L'impression 3D s'impose aujourd'hui comme une révolution dans le domaine médical, en particulier dans les domaines de la planification chirurgicale, de l'enseignement et des interventions complexes. L'un des principaux avantages de cette technologie est la possibilité de créer des modèles anatomiques précis et personnalisés à partir d'images médicales, permettant une meilleure visualisation des structures anatomiques et une planification chirurgicale plus personnalisée. Nos cas démontrent bien cette capacité, avec des applications allant de la modélisation pour la planification des fractures complexes (Cas 6) à des malformations anatomiques spécifiques, comme la cranioplastie (Cas 11 et 12), en passant par des pathologies telles que la scoliose (Cas 2 et 7). La fabrication de modèles 3D a permis une anticipation des interventions et une réduction des erreurs humaines, notamment grâce à la simulation préalable des gestes chirurgicaux [72,73].

L'un des principaux avantages de l'impression 3D est la possibilité de concevoir des guides chirurgicaux sur mesure, comme observé dans notre Cas 13, où un guide chirurgical personnalisé a été utilisé pour la fracture diaphysaire compliquée de cal vicieux. Cette technique, qui utilise des modèles imprimés en 3D pour orienter les instruments chirurgicaux, améliore la précision des interventions et réduit le risque de complications [74-76]. Nos résultats sont en accord avec d'autres études récentes, qui soulignent l'importance de ces guides dans des chirurgies complexes telles que les fractures et les malformations [77].

De plus, plusieurs articles rapportent que la planification avec des modèles 3D permet de gagner du temps au bloc opératoire et d'améliorer les résultats postopératoires [78].

Les modèles 3D jouent également un rôle crucial dans la formation et l'apprentissage des professionnels de santé. Nos Cas 1 et 3, qui illustrent la création de modèles pour l'apprentissage des structures anatomiques et des techniques endovasculaires, mettent en lumière cette application dans le cadre de la simulation. En effet, l'impression de structures anatomiques telles que l'aorte et ses branches, utilisée pour l'entraînement en techniques endovasculaires (Cas 3), répond aux besoins d'une approche éducative plus interactive et précise. Ces modèles permettent aux apprenants de manipuler des représentations physiques des structures anatomiques, améliorant ainsi leur compréhension et leur maîtrise des procédures [79,80].

Les résultats de nos cas confirment les conclusions de la littérature, qui rapporte l'efficacité de l'impression 3D dans l'amélioration de la communication intra-équipe lors des interventions complexes [81–83]. Les modèles imprimés permettent de mieux comprendre la pathologie avant l'intervention et de préparer les étapes chirurgicales). Par exemple, dans le cas de la scoliose (Cas 2 et 7), où les modèles 3D ont permis d'optimiser la planification des corrections, cette technologie s'est avérée être un outil précieux pour évaluer la trajectoire des implants et anticiper les difficultés opératoires. D'autres études ont également démontré que la simulation sur modèles 3D peut améliorer la compréhension des complications potentielles, réduisant ainsi le temps de chirurgie et améliorant les résultats pour les patients [84,85].

L'utilisation de l'impression 3D dans la planification préopératoire a aussi des implications majeures pour les interventions en neurochirurgie, comme l'indiquent les résultats des Cas 11 et 12 sur la cranioplastie. L'impression de moules sur mesure permet non seulement une adaptation optimale des implants mais aussi une réduction des risques associés à l'implantation [86–90]. Dans ce contexte, l'impression 3D permet de surmonter les défis liés à la personnalisation des implants et à la complexité des reconstructions crâniennes.

Cette capacité de personnalisation est également pertinente dans des cas comme l'anévrisme aortique (Cas 8), où la modélisation 3D permet d'anticiper les défis chirurgicaux associés à la forme et à la taille de l'anévrisme, contribuant ainsi à une meilleure planification de l'intervention comme le souligne H Patel et al., qui a fourni une analyse approfondie de l'intégration de l'impression 3D et de l'IA dans la planification préopératoire des anévrismes aortiques complexes [91].

Enfin, l'impression 3D a aussi un impact sur la gestion des traumatismes. Si certains cas ont montré un intérêt réel, comme le Cas 6, dans d'autres situations, l'apport de l'impression 3D semble plus limité. Par exemple, dans le Cas 4 (fracture mandibulaire courante), la reproduction tridimensionnelle n'a pas apporté de bénéfice majeur par rapport aux reconstructions numériques classiques déjà disponibles. De même, dans le Cas 5 (fracture du rachis), bien que le modèle ait permis une visualisation complémentaire, son utilité a été jugée modérée, probablement en raison de la simplicité relative du geste ou de la faible complexité du montage. Ces exemples soulignent les limites potentielles de l'impression 3D dans certains cas standards ou bien maîtrisés, où son apport reste marginal et doit être évalué au cas par cas. [92–94].

En résumé, nos résultats confirment l'efficacité de l'impression 3D dans diverses applications chirurgicales et éducatives, ce qui est en accord avec les tendances actuelles de la littérature. L'amélioration de la précision chirurgicale, la réduction du temps opératoire, ainsi que l'optimisation de l'apprentissage et de la formation des professionnels de santé, constituent des apports indéniables de cette technologie, qui devrait continuer à se développer dans un avenir proche.

L'impression 3D apparaît ainsi comme un outil clé dans l'évolution des pratiques médicales modernes, en s'inscrivant pleinement dans l'essor de la médecine personnalisée, qui constitue l'un des piliers majeurs de la médecine de demain.

### **3. Identitovigilance et traçabilité légale :**

L'identification des modèles doit être un objectif dans notre service. Elle peut passer par l'étiquetage d'un contenant adapté à ce modèle, ou par la gravure.

Cependant nous pensons que l'identification directe par un code anonymisé placé sur le modèle informatique pourrait être une option plus sécurisée et élégante. Les informations à encoder seraient l'identification du patient, du prescripteur et du créateur du modèle, ainsi que la date à laquelle il a été réalisé.

Il se pose également le problème de la traçabilité légale. Les modèles tels que nous les utilisons actuellement ne sont pas considérés comme des dispositifs médicaux, puisqu'ils ne servent ni à poser un diagnostic, ni directement à la prise en charge des patients.

Cependant si nous développons des utilisations de l'impression 3D pouvant s'apparenter à des dispositifs médicaux (comme les guides de coupes ou les gouttières de positionnement) il existerait un cahier des charges et une traçabilité à respecter [95]:

Les demandes de dispositifs sur mesures devront être effectuées par un praticien confirmé dans un contexte précis avec une indication bien posée.

Il sera judicieux de les formaliser par écrit sous la forme d'un courrier médical par exemple.

La traçabilité doit également permettre de retrouver le nom et l'adresse du fabricant et du demandeur, l'identification du dispositif, ses caractéristiques et les caractéristiques du lieu de fabrication[95].

Par ailleurs ce dispositif doit respecter les « exigences essentielles » de l'annexe de la directive 93/42/CEE (disponible à l'adresse <http://eurlex.europa.eu>) et être imprimé dans un matériau biocompatible.

L'ensemble de ces procédures devront être prise en compte dans l'évolution de nos pratiques avant toute application en situation réelle. L'évolution de cette législation et des matériaux biocompatible utilisable pour nos patients sera à surveiller afin de pouvoir améliorer nos pratiques au fur et à mesure.



# LIMITES DE L'ETUDE



Notre étude présente certaines limites. L'évaluation de l'apport de l'impression 3D repose principalement sur des retours qualitatifs de la part des chirurgiens, recueillis par questionnaires. Bien que ces retours fournissent des informations précieuses sur la satisfaction et la perception de l'utilité des modèles, ils restent subjectifs et ne permettent pas de mesurer objectivement l'impact de l'impression 3D sur des paramètres cliniques comme la durée opératoire, le taux de complications ou les résultats fonctionnels.

Par ailleurs, bien qu'une analyse du coût ait été réalisée, elle reste tributaire du type de technologie utilisée. Dans notre étude, l'impression par dépôt de filament fondu (FDM) a été privilégiée pour sa simplicité d'utilisation et son coût réduit. Toutefois, cette technologie offre une précision moindre comparée à l'impression par résine (SLA/DLP), qui reste plus adaptée pour les structures fines et complexes, mais à un coût plus élevé. Ce compromis entre accessibilité et précision peut influencer la qualité des modèles produits.

De plus, les méthodes d'acquisition des images médicales (CT ou IRM) utilisées pour la reconstruction des modèles 3D ne bénéficiaient pas toujours d'une qualité optimale. Des artefacts d'acquisition ou une faible résolution des images sources peuvent nuire à la fidélité anatomique des modèles imprimés, notamment pour les structures de petite taille ou les zones complexes.

Enfin, l'hétérogénéité des cas cliniques étudiés (types de pathologies, régions anatomiques, objectifs de planification) complique l'évaluation comparative et la généralisation des résultats à d'autres contextes cliniques.



# RECOMMENDATIONS



## **I. Améliorer l'Intégration de l'Impression 3D dans le Service de Radiologie**

### **1. Formation continue des radiologues :**

Organiser des sessions de formation régulières pour les radiologues et les techniciens en imagerie médicale sur l'utilisation de l'impression 3D. Cela inclut la compréhension des logiciels nécessaires, la conversion des images médicales en modèles 3D, et l'utilisation des modèles imprimés dans la pratique clinique.

### **2. Collaboration interdisciplinaire :**

Promouvoir la collaboration entre les radiologues, les chirurgiens, les médecins traitants pour favoriser une approche intégrée dans l'utilisation des modèles 3D, par exemple, pour la planification préopératoire ou la simulation chirurgicale.

### **3. Standardisation des processus :**

Développer des protocoles standardisés pour la conversion des images médicales en modèles 3D. Cela pourrait inclure des lignes directrices sur les types d'images (CT, IRM, etc.), les résolutions minimales, et les étapes du processus d'impression.

## **II. Élargir les Indications de l'Impression 3D**

### **1. Modèles 3D pour la planification chirurgicale :**

Encourager l'utilisation de modèles 3D pour des chirurgies complexes, en particulier dans les domaines de la chirurgie cardiaque, orthopédique, maxillo-faciale, ou de la neurochirurgie. Ces modèles permettent aux chirurgiens de mieux comprendre l'anatomie du patient et de planifier des interventions plus précises.

### **2. Création de prothèses et implants personnalisés :**

Exploiter l'impression 3D pour créer des prothèses, implants, ou dispositifs médicaux sur mesure, adaptés à la morphologie du patient. Cela pourrait améliorer l'efficacité des traitements et la récupération des patients.

### **3. Impression de modèles pour l'éducation et la formation :**

Utiliser l'impression 3D pour produire des modèles anatomiques réalistes à des fins de formation des médecins et des étudiants en médecine. Cela peut améliorer la compréhension de l'anatomie humaine et des pathologies complexes.

Création de guides chirurgicaux personnalisés : Utiliser l'impression 3D pour produire des guides chirurgicaux personnalisés basés sur les images médicales, permettant ainsi une plus grande précision pendant les interventions.

## **III. Optimiser la Prise en Charge des Patients**

### **1. Améliorer la communication avec le patient :**

Utiliser des modèles imprimés en 3D pour expliquer les pathologies et les traitements aux patients. Un modèle physique de leur anatomie permet de mieux visualiser l'état de leur santé, d'améliorer la compréhension et de favoriser une discussion plus claire sur les options thérapeutiques.

### **2. Suivi personnalisé avec des modèles 3D :**

Utiliser des modèles 3D pour le suivi des patients, notamment dans des cas complexes où les traitements doivent être ajustés en fonction de l'évolution de la pathologie. Les modèles peuvent être utilisés pour planifier les traitements à long terme ou évaluer la réponse au traitement.

## **IV. Améliorer la Qualité et l'Accessibilité des Impressions**

### **1. Amélioration des technologies d'impression :**

Investir dans des imprimantes 3D de haute qualité et dans l'acquisition de nouveaux matériaux (biomatériaux, matériaux souples, etc.) pour améliorer la qualité des modèles imprimés. Par exemple, les modèles imprimés peuvent mieux simuler la texture et la flexibilité des tissus humains pour des applications plus précises.

### **2. Optimisation des coûts :**

Chercher des solutions pour réduire les coûts de l'impression 3D en médecine, par exemple en explorant des technologies d'impression moins chères ou des matériaux moins coûteux tout en maintenant la qualité.

### **3. Accessibilité :**

Développer des partenariats avec d'autres établissements de santé pour partager des ressources (matériel, expertise, modèles imprimés) et améliorer l'accessibilité de la technologie de l'impression 3D dans les zones moins bien desservies ou dans les établissements de santé à ressources limitées.

## **V. Innover et Rechercher des Applications Avancées**

### **1. Impression 3D pour la médecine de précision :**

Étudier les applications de l'impression 3D dans la médecine de précision, où les traitements sont personnalisés selon les caractéristiques individuelles des patients, comme la génétique ou les profils biologiques. Les modèles 3D pourraient être utilisés pour simuler des traitements spécifiques pour chaque patient.

### **2. Bio printing (impression de tissus vivants) :**

Bien que cette technologie soit encore émergente, elle offre des perspectives intéressantes pour la création de tissus biologiques et même d'organes. Intégrer cette technologie dans la recherche clinique pourrait permettre de nouvelles formes de thérapies et de traitements.

### **3. Amélioration de l'imagerie en 3D :**

Travailler sur des algorithmes et des outils de traitement d'image pour améliorer la précision et la résolution des images médicales utilisées pour créer les modèles 3D. Cela pourrait également inclure la fusion de données issues de différentes sources d'imagerie pour créer des modèles plus détaillés et complets.

## **VI. Réflexion Éthique et Réglementaire**

### **1. Évaluation des risques et de la sécurité :**

Assurer que les modèles 3D et les implants créés respectent les normes de sécurité et de qualité. La certification des produits imprimés en 3D doit être systématique, et des protocoles de validation doivent être mis en place pour garantir leur efficacité clinique.

## **2. Respect de la confidentialité et de l'éthique :**

Mettre en place des politiques claires concernant la confidentialité des données des patients et le consentement éclairé pour l'utilisation de modèles imprimés à des fins pédagogiques ou cliniques.



# CONCLUSION



Notre utilisation régulière et autonome de l'impression 3D nous a permis d'introduire de nouveaux outils diagnostiques, thérapeutiques et pédagogiques.

Son application s'avère particulièrement pertinente en neurochirurgie, chirurgie maxillo-faciale, traumatologie et chirurgie cardiaque, où elle commence à être intégrée de manière systématique dans certains cas au sein du service.

Nous considérons que le développement de cette technologie doit s'inscrire dans une démarche d'amélioration de la prise en charge des patients nécessitant une reconstruction chirurgicale, notamment par l'utilisation de guides de coupe personnalisés, ainsi que dans l'optimisation de la gestion des pathologies rares, grâce à une aide à la décision pluridisciplinaire.

Ce progrès repose sur la maîtrise des bases des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), indispensables à la modélisation anatomique et à la conception d'aides opératoires sur mesure.

Le service de radiologie joue un rôle central et pionnier dans cette évolution, en s'appuyant sur ses compétences en radio-anatomie, radioprotection et gestion des artéfacts d'imagerie pour garantir des modèles d'une précision optimale, tout en limitant les examens inutiles ou irradiants.

Enfin, il sera essentiel de suivre les avancées des technologies de l'impression 3D, notamment dans les domaines de l'impression métal et du bio-printing, tout en explorant de nouvelles applications de l'impression 3D conventionnelle.



# RÉSUMÉ



## RÉSUMÉ

**Introduction :** L'impression 3D révolutionne le domaine médical en offrant des solutions personnalisées pour les interventions chirurgicales complexes. Cette étude explore l'intégration de cette technologie dans un service de radiologie, en se concentrant sur son impact sur la planification chirurgicale, l'apprentissage médical et la fabrication de dispositifs sur mesure.

**Objectifs :** Évaluer l'intégration de l'impression 3D au sein d'un service de radiologie, dans une démarche abordable et innovante, visant à améliorer la précision des interventions chirurgicales et à optimiser les traitements des patients grâce à la création de modèles anatomiques et de guides chirurgicaux personnalisés. Cette approche s'inscrit dans un cadre de médecine personnalisée, où chaque patient bénéficie de solutions adaptées à ses besoins spécifiques.

**Matériel et Méthodes :** Il s'agit d'une étude observationnelle rétrospective menée sur des patients ayant bénéficié de l'impression 3D pour leurs interventions chirurgicales. Les données ont été acquises par imagerie médicale (principalement scanographique) et traitées à l'aide de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Les modèles 3D ont été imprimés avec des imprimantes accessibles et abordables.

**Résultats :** Les patients étaient répartis selon différentes tranches d'âge et de sexe, et l'approche a démontré un coût accessible. Parmi les 13 cas décrits, l'impression 3D a été utilisée pour la planification des interventions chirurgicales en concevant des modèles permettant une préparation optimale des procédures complexes, pour la formation des équipes médicales aux techniques opératoires, ainsi que pour la création de dispositifs personnalisés, incluant des guides chirurgicaux et des implants sur mesure, ce qui a permis de réduire les erreurs chirurgicales et d'améliorer les résultats postopératoires.

**Conclusion :** L'intégration de l'impression 3D dans la radiologie a amélioré la personnalisation des traitements et la précision des interventions chirurgicales. L'évolution de cette technologie pourrait révolutionner la prise en charge des patients nécessitant des traitements chirurgicaux complexes, par une approche à la fois innovante et abordable.

## **Abstract**

**Introduction:** 3D printing is revolutionizing the medical field by offering personalized solutions for complex surgical procedures. This study explores the integration of this technology within a radiology department, focusing on its impact on surgical planning, medical training, and the production of custom-made devices.

**Objectives:** To assess the integration of 3D printing within a radiology department in an affordable and innovative approach, aimed at improving the precision of surgical interventions and optimizing patient treatments through the creation of anatomical models and personalized surgical guides. This approach is part of personalized medicine, where each patient benefits from solutions tailored to their specific needs.

**Materials and Methods:** This is a retrospective observational study conducted on patients who benefited from 3D printing for their surgical procedures. Data was acquired through medical imaging (mainly CT scans) and processed using computer-aided design (CAD) software. 3D models were printed using accessible and affordable printers.

**Results:** Patients were distributed across various age groups and genders, and the approach demonstrated affordability. Among the 13 cases described, 3D printing was used for surgical planning by creating models for optimal preparation of complex procedures, for medical team training on surgical techniques, and for the creation of custom devices, including surgical guides and implants, which helped reduce surgical errors and improve postoperative outcomes.

**Conclusion:** The integration of 3D printing into radiology has enhanced the personalization of treatments and the precision of surgical interventions. The evolution of this technology could revolutionize the management of patients requiring complex surgical treatments, in an innovative and affordable approach.

## مُلخَص

**المقدمة:** تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد من الابتكارات التي تساهم بشكل كبير في المجال الطبي حيث توفر حلاً مخصصة للعمليات الجراحية المعقدة. تدرس هذه الدراسة كيفية دمج هذه التقنية في قسم الأشعة مع التركيز على تأثيرها في التخطيط الجراحي، التدريب الطبي، وتصميم الأجهزة المخصصة.

**الأهداف:** تقييم دمج الطباعة ثلاثية الأبعاد داخل قسم الأشعة بشكل مبتكر وبأسعار معقولة، بهدف تحسين دقة العمليات الجراحية وتحسين العلاجات من خلال إنشاء نماذج تشريحية وأدوات جراحية مخصصة. يتماشى هذا النهج مع الطب الشخصي الذي يوفر لكل مريض علاجاً يتناسب مع احتياجاته الخاصة.

**المواد والطرق:** في الأبعاد ثلاثية الطباعة من استفادوا مرضى على تطلعية رصدية دراسة إجراء تم، (المقطعية الأشعة باستخدام معظمها) الطبي التصوير تقنيات عبر البيانات جمع تم. الجراحية عملياتهم من ومناسبة متاحة طابعات باستخدام النماذج طباعة تم. الكمبيوتر بمساعدة تصميم برامج باستخدام ومعالجتها. التكلفة حيث

**النتائج:** تم توزيع المرضى على فئات عمرية وجنسية متنوعة، وأظهرت النتائج أن التكلفة كانت معقولة في الـ 13 حالة التي تم دراستها، تم استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد لتخطيط العمليات الجراحية عبر إنشاء نماذج تساهم في التحضير الأمثل للإجراءات المعقدة، ولتدريب الفرق الطبية على التقنيات الجراحية، وكذلك لصناعة أجهزة مخصصة مثل الأدوات الجراحية والزرعات المصممة خصيصاً، مما ساعد في تقليل الأخطاء الجراحية وتحسين النتائج بعد العملية.

**الخاتمة:** ساعد دمج الطباعة ثلاثية الأبعاد في قسم الأشعة على تحسين تخصيص العلاجات ودقة العمليات الجراحية. إن تطور هذه التقنية قد يحدث تحولاً كبيراً في علاج المرضى الذين يحتاجون إلى عمليات جراحية معقدة بطريقة مبتكرة ومناسبة من حيث التكلفة.



# **BIBLIOGRAPHIE**



- [1] **Hull CW.**  
Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US4575330A, 1986.
- [2] **Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, Giesel FL**  
3D printing based on imaging data: review of medical applications.  
Int J Comput Assist Radiol Surg. 2010 Jul  
doi: 10.1007/s11548-010-0476-x
- [3] **Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, Cai T, Kumamaru KK, et al.** Medical 3D Printing for the Radiologist.  
Radiographics 2015; 35:1965-88.  
<https://doi.org/10.1148/rg.2015140320>.
- [4] **Vežirski D, Milev M, Laleva L, Nakov V, Spiriev T.**  
Three-Dimensional Printing in Neurosurgery: A Review of Current Indications and Applications and a Basic Methodology for Creating a Three-Dimensional Printed Model for the Neurosurgical Practice.  
Cureus 2022;14: e33153.  
<https://doi.org/10.7759/cureus.33153>.
- [5] **Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, et al.**  
Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review.  
Surgery 2016;159:1485-500.  
<https://doi.org/10.1016/j.surg.2015.12.017>.
- [6] **Imprimante 3D Ender 3 n.d.**  
<https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>
- [7] **Projet MJP 2500 Series – 3D Printer | 3D Systems 2016.**  
<https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-mjp-2500-series>
- [8] **Figure 4 Standalone – 3D Printer | 3D Systems 2018.**  
<https://www.3dsystems.com/3d-printers/figure-4-standalone>
- [9] **Imprimante 3D grand format SH65 Performance Series. Volumic 3D n.d.** <https://imprimante-3d-volumic.com/en/imprimante/imprimante-3d-volumic-3d-la-gamme-detail-3/>
- [10] **Welcome to 3D Slicer's documentation! — 3D Slicer documentation n.d.**  
<https://slicer.readthedocs.io/en/latest/>
- [11] **Pa Y, J P, Hc H, Rg S, S H, Jc G, et al.**  
User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability.  
NeuroImage 2006;31.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.015>.
- [12] **Impression 3D et planification 3D médicales | Materialise n.d.**  
<https://www.materialise.com/fr/medical>
- [13] **UltiMaker Cura. UltiMaker n.d.**  
<https://ultimaker.com/fr/software/ultimaker-cura/>
- [14] **Osti, Francesco & Santi, Gian Maria & Neri, Marco & Liverani, Alfredo & Frizziero, Leonardo & Stilli, Stefano & Maredi, Elena & Zarantonello, Paola & Gallone, Giovanni & Stallone, Stefano & Trisolino, Giovanni.**  
CT Conversion Workflow for Intraoperative Usage of Bony Models: From DICOM Data to 3D Printed Models.  
ResearchGate 2025  
<https://doi.org/10.3390/app9040708>.

- [15] **Catasta A, Martini C, Mersanne A, Foresti R, Bianchini Massoni C, Freyrie A, Perini P.**  
Systematic Review on the Use of 3D-Printed Models for Planning, Training and Simulation in Vascular Surgery  
Diagnostics (Basel) 2024 Jul  
doi: 10.3390/diagnostics14151658.
- [16] **Pugliese L, Marconi S, Negrello E, Mauri V, Peri A, Gallo V, et al.**  
The clinical use of 3D printing in surgery.  
Updates Surg 2018;70:381-8.  
<https://doi.org/10.1007/s13304-018-0586-5>.
- [17] **Li KHC, Kui C, Lee EKM, Ho CS, Wong SH, Wu W, et al.**  
The role of 3D printing in anatomy education and surgical training: A narrative review.  
MedEdPublish (2016) 2017;6:92.  
<https://doi.org/10.15694/mep.2017.000092>.
- [18] **Marconi S, Pugliese L, Botti M, Peri A, Cavazzi E, Latteri S, et al.**  
Value of 3D printing for the comprehension of surgical anatomy.  
Surg Endosc 2017;31:4102-10.  
<https://doi.org/10.1007/s00464-017-5457-5>.
- [19] **Betancourt MC, Araújo C, Marín S, Buriticá W.**  
The Quantitative Impact of Using 3D Printed Anatomical Models for Surgical Planning Optimization: Literature Review.  
3D Print Addit Manuf 2023;10:1130-9.  
<https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0188>.
- [20] **Xue A, Li W, Tian W, Zheng M, Shen L, Hong Y.**  
A Bibliometric Analysis of 3D Printing in Personalized Medicine Research from 2012 to 2022.  
Pharmaceuticals (Basel) 2023;16:1521.  
<https://doi.org/10.3390/ph16111521>.
- [21] **Jacobs CA, Lin AY.**  
A New Classification of Three-Dimensional Printing Technologies: Systematic Review of Three-Dimensional Printing for Patient-Specific Craniomaxillofacial Surgery.  
Plast Reconstr Surg 2017;139:1211-20.  
<https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000003232>.
- [22] **Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L.**  
3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review.  
Biomed Eng Online 2016;15:115.  
<https://doi.org/10.1186/s12938-016-0236-4>.
- [23] **Cai T, Rybicki FJ, Giannopoulos AA, Schultz K, Kumamaru KK, Liacouras P, et al.**  
The residual STL volume as a metric to evaluate accuracy and reproducibility of anatomic models for 3D printing: application in the validation of 3D-printable models of maxillofacial bone from reduced radiation dose CT images.  
3D Print Med 2015;1:2.  
<https://doi.org/10.1186/s41205-015-0003-3>.
- [24] **Brouwers L, Teutelink A, van Tilborg FAJB, de Jongh MAC, Lansink KWW, Bemelman M.**  
Validation study of 3D-printed anatomical models using 2 PLA printers for preoperative planning in trauma surgery, a human cadaver study.  
Eur J Trauma Emerg Surg 2019;45:1013-20.  
<https://doi.org/10.1007/s00068-018-0970-3>.
- [25] **Louvrier A, Marty P, Barrabé A, Euvrard E, Chatelain B, Weber E, et al.**  
How useful is 3D printing in maxillofacial surgery?

J Stomatol Oral Maxillofac Surg 2017;118:206–12.

<https://doi.org/10.1016/j.jormas.2017.07.002>.

**[26]Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al.**

Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios.

3D Print Med 2018;4:11.

<https://doi.org/10.1186/s41205-018-0030-y>.

**[27]Gaikwad A, Malhotra R, Bikash Maiti S, Shetty AA, Rasheed DS, Kashyap L, et al.**

Role of 3D Printing in Post-op Rehabilitation of Palatal Bone Loss by Mucormycosis: A Survey. Cureus 2022;14:e32511.

<https://doi.org/10.7759/cureus.32511>.

**[28]Streckenbach A, Schubert N, Streckenbach F, Dust T, Ngo NT, Fiehler J, et al.**

Current State and Outlook in Medical 3D Printing and the Role of Radiology.

Rofo 2024.

<https://doi.org/10.1055/a-2436-7185>.

**[29]Paul GM, Rezaenia A, Wen P, Condoor S, Parkar N, King W, et al.**

Medical Applications for 3D Printing: Recent Developments.

Mo Med 2018;115:75–81.

**[30]Mafeld S, Nesbitt C, McCaslin J, Bagnall A, Davey P, Bose P, et al.**

Three-dimensional (3D) printed endovascular simulation models: a feasibility study.

Ann Transl Med 2017;5:42.

<https://doi.org/10.21037/atm.2017.01.16>.

**[31]Matsumoto JS, Morris JM, Foley TA, Williamson EE, Leng S, McGee KP, et al.**

Three-dimensional Physical Modeling: Applications and Experience at Mayo Clinic.

Radiographics 2015;35:1989–2006.

<https://doi.org/10.1148/rg.2015140260>.

**[32]Hasan O, Atif M, Jessar MM, Hashmi P.**

Application of 3D printing in orthopaedic surgery. A new affordable horizon for cost-conscious care.

J Pak Med Assoc 2019;69(Suppl 1):S46–50.

**[33]Kafle A, Luis E, Silwal R, Pan HM, Shrestha PL, Bastola AK.**

3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA).

Polymers (Basel) 2021;13:3101.

<https://doi.org/10.3390/polym13183101>.

**[34]Chen JR, Morris J, Wentworth A, Sears V, Duit A, Erie E, et al.**

Three-dimensional printing accuracy analysis for medical applications across a wide variety of printers.

J Med Imaging (Bellingham) 2023;10:026501.

<https://doi.org/10.1117/1.JMI.10.2.026501>.

**[35]Maschio F, Pandya M, Olszewski R.**

Experimental Validation of Plastic Mandible Models Produced by a “Low-Cost” 3-Dimensional Fused Deposition Modeling Printer.

Med Sci Monit 2016;22:943–57.

<https://doi.org/10.12659/msm.895656>.

**[36]Hazeveld A, Huddleston Slater JJR, Ren Y.**

Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques.

Am J Orthod Dentofacial Orthop 2014;145:108–15.

<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.05.011>.

**[37]Garry L, Quilichini J, Bandini CM, Leyder P, Hersant B, Meningaud JP.**

Three-dimensional surgical modelling with an open-source software protocol: study of precision and reproducibility in mandibular reconstruction with the fibula free flap.  
Int J Oral Maxillofac Surg 2017;46:946-57.

<https://doi.org/10.1016/j.ijom.2017.02.1276>.

**[38]Rem K, Bosc R, De Kermadec H, Hersant B, Meningaud JP.**

How to make your own custom cutting guides for both mandibular and fibular stair step osteotomies?

Ann Chir Plast Esthet. 2017 Dec;62(6):652-658. French.

doi: 10.1016/j.anplas.2017.03.005.

**[39]Shaheen E, Sun Y, Jacobs R, Politis C.**

Three-dimensional printed final occlusal splint for orthognathic surgery: design and validation.

Int J Oral Maxillofac Surg 2017;46:67-71.

<https://doi.org/10.1016/j.ijom.2016.10.002>.

**[40]van Eijnatten M, Wolff J, Pauwels R, Karhu K, Hietanen A, der Sarkissian H, et al.**

Influence of head positioning during cone-beam CT imaging on the accuracy of virtual 3D models. Dentomaxillofac

Radiol 2022;51:20220104.

<https://doi.org/10.1259/dmfr.20220104>.

**[41]van Eijnatten M, Rijkhorst EJ, Hofman M, Forouzanfar T, Wolff J.**

The accuracy of ultrashort echo time MRI sequences for medical additive manufacturing.

Dentomaxillofac Radiol. 2016;45(5):20150424.

doi: 10.1259/dmfr.20150424.

**[42]VanKoeveering KK, Morrison RJ, Prabhu SP, Torres MF, Mychaliska GB, Treadwell MC, Hollister SJ, Green GE.**

Antenatal Three-Dimensional Printing of Aberrant Facial Anatomy.

Pediatrics. 2015 Nov;136(5):e1382-5.

doi: 10.1542/peds.2015-1062.

**[43]Nicot R, Couly G, Ferri J, Levailant JM.**

Three-dimensional printed haptic model from a prenatal surface-rendered oropalatal sonographic view: a new tool in the surgical planning of cleft lip/palate.

Int J Oral Maxillofac Surg. 2018 Jan;47(1):44-47.

doi: 10.1016/j.ijom.2017.06.005.

**[44]Ernoul C, Bouletreau P, Meyer C, Aubry S, Breton P, Bachelet J-T.**

[Reconstruction assisted by 3D printing in maxillofacial surgery].

Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale 2015;116:95-102.

<https://doi.org/10.1016/j.revsto.2015.01.010>.

**[45]Fernandes N, van den Heever J, Hoogendijk C, Botha S, Booyesen G, Els J.**

Reconstruction of an Extensive Midfacial Defect Using Additive Manufacturing Techniques.

J Prosthodont 2016;25:589-94.

<https://doi.org/10.1111/jopr.12487>.

**[46]Mustafa SF, Evans PL, Sugar AW, Key SJ.**

Streamlining the manufacture of custom titanium orbital plates with a stereolithographic three-dimensional printed model.

Br J Oral Maxillofac Surg 2017;55:546-7.

<https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2016.03.003>.

**[47]Yadav S, Narayan AI, Choudhry A, Balakrishnan D.**

CAD/CAM–Assisted Auricular Prosthesis Fabrication for a Quick, Precise, and More Retentive Outcome: A Clinical Report.

J Prosthodont 2017;26:616–21.

<https://doi.org/10.1111/jopr.12589>.

**[48]Darwood A, Collier J, Joshi N, Grant WE, Sauret–Jackson V, Richards R, et al.**

Re–thinking 3D printing: A novel approach to guided facial contouring.

J Craniomaxillofac Surg 2015;43:1256–60.

<https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.06.001>.

**[49]He Y, Xue GH, Fu JZ.**

Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer.

Sci Rep. 2014 Nov 27;4:6973.

doi: 10.1038/srep06973.

**[50]Bosc R, Hersant B, Carloni R, Niddam J, Bouhassira J, De Kermadec H, et al.**

Mandibular reconstruction after cancer: an in–house approach to manufacturing cutting guides.

Int J Oral Maxillofac Surg 2017;46:24–31.

<https://doi.org/10.1016/j.ijom.2016.10.004>.

**[51]Emodi O, Shilo D, Israel Y, Rachmiel A.**

Three–dimensional planning and printing of guides and templates for reconstruction of the mandibular ramus and condyle using autogenous costochondral grafts.

Br J Oral Maxillofac Surg 2017;55:102–4.

<https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2016.05.021>.

**[52]Pauchot J, Lachat J, Floret F, Badet J–M, Tavernier L, Aubry S.**

[Stereomodel–assisted fibula free flap harvest and mandibular reconstruction: A technical note. Literature review of CAS and CAM applied to mandibular reconstruction].

Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale 2013;114:269–75.

<https://doi.org/10.1016/j.revsto.2013.06.002>.

**[53]Vercruyssen M, Laleman I, Jacobs R, Quirynen M.**

Computer–supported implant planning and guided surgery: a narrative review.

Clin Oral Implants Res 2015;26 Suppl 11:69–76.

<https://doi.org/10.1111/clr.12638>.

**[54]Shah S, O'Connor R, Watson J, Srinivasan D, Sidebottom A.**

Use of three–dimensional printing to assess transport vectors in mandibular distraction osteogenesis.

Br J Oral Maxillofac Surg. 2017 Jan;55(1):74–76.

doi: 10.1016/j.bjoms.2016.04.005.

**[55]Hoarau R, Zweifel D, Simon C, Broome M.**

The use of 3D planning in facial surgery: preliminary observations.

Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale 2014;115:353–60.

<https://doi.org/10.1016/j.revsto.2014.07.006>.

**[56]Gleissner H, Castrillon–Oberndorfer G, Gehrlich S.**

Introduction of 3D Printing in a German Municipal Hospital–Practice Guide for CMF Surgery.

Craniomaxillofac Trauma Reconstr 2022;15:369–78.

<https://doi.org/10.1177/19433875211050721>.

**[57]Liu YF, Xu LW, Zhu HY, Liu SS.**

Technical procedures for template–guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing.

Biomed Eng Online. 2014 May 23;13:63.

doi: 10.1186/1475-925X-13-63.

**[58]Ballard DH, Mills P, Duszak R, Weisman JA, Rybicki FJ, Woodard PK.**

Medical 3D Printing Cost-Savings in Orthopedic and Maxillofacial Surgery: Cost Analysis of Operating Room Time Saved with 3D Printed Anatomic Models and Surgical Guides.

Acad Radiol 2020;27:1103-13.

<https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.011>.

**[59]Wang J, Cai L, Xie L, Chen H, Guo X, Yu K.**

3D printing-based Ganz approach for treatment of femoral head fractures: a prospective analysis.

J Orthop Surg Res 2019;14:338.

<https://doi.org/10.1186/s13018-019-1383-7>.

**[60]Chen S, Liu B, Liu J, Yin N, Wang Y.**

Comparison of Three-Dimensional Printing and Computer-aided Engineering in Presurgical Volumetric Assessment of Bilateral Alveolar Clefts.

J Craniofac Surg 2020;31:412-5.

<https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000006011>.

**[61]Ramesh A, Henckel J, Lim X, Tompsett P, Hart A, Di Laura A.**

What Is the Functional Spinopelvic Relationship in Three Dimensions? A CT and EOS Study.

Clin Orthop Relat Res 2025.

<https://doi.org/10.1097/CORR.00000000000003473>.

**[62]Lindsay D, Soyer HP, Janda M, Whiteman DC, Osborne S, Finnane A, et al.**

Cost-Effectiveness Analysis of 3D Total-Body Photography for People at High Risk of Melanoma.

JAMA Dermatol 2025:e250219.

<https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2025.0219>.

**[63]Hecker A, Tax L, Giese B, Schellnegger M, Pignet A-L, Reinbacher P, et al.**

Clinical Applications of Three-Dimensional Printing in Upper Extremity Surgery: A Systematic Review.

J Pers Med 2023;13:294.

<https://doi.org/10.3390/jpm13020294>.

**[64]Michelutti L, Tel A, Robiony M, Sembronio S, Nocini R, Agosti E, et al.**

Progress in 3D Printing Applications for the Management of Orbital Disorders: A Systematic Review.

Bioengineering (Basel) 2024;11:1238.

<https://doi.org/10.3390/bioengineering11121238>.

**[65]Benady A, Gortzak Y, Ovadia D, Golden E, Sigal A, Taylor LA, et al.**

Advancements and applications of 3D printing in pediatric orthopedics: A comprehensive review.

J Child Orthop 2025;19:119-38.

<https://doi.org/10.1177/18632521251318552>.

**[66]Ling K, Wang W, Liu J.**

Current developments in 3D printing technology for orthopedic trauma: A review.

Medicine (Baltimore) 2025;104:e41946.

<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000041946>.

**[67]Hung C-C, Wu J-L, Cheng Y-W, Chen W-L, Lee S-H, Yeh T-T.**

Does 3D Printing-Assisted Acetabular or Pelvic Fracture Surgery Shorten Hospitalization Durations among Older Adults?

J Pers Med 2022;12:189.

<https://doi.org/10.3390/jpm12020189>.

**[68]Ravi P, Burch MB, Farahani S, Chepelev LL, Yang D, Ali A, et al.**

Utility and Costs During the Initial Year of 3D Printing in an Academic Hospital.

J Am Coll Radiol 2023;20:193–204.

<https://doi.org/10.1016/j.jacr.2022.07.001>.

**[69]Witowski JS, Coles–Black J, Zuzak TZ, Pędziwiatr M, Chuen J, Major P, et al.**

3D Printing in Liver Surgery: A Systematic Review.

Telemed J E Health 2017;23:943–7.

<https://doi.org/10.1089/tmj.2017.0049>.

**[70]Scott ER, Singh A, Quinn A, Boyd K, Lallas CD.**

How I Do It: Cost-effective 3D printed models for renal masses.

Can J Urol 2021;28:10874–7.

**[71]Witowski JS, Pędziwiatr M, Major P, Budzyński A.**

Cost-effective, personalized, 3D-printed liver model for preoperative planning before laparoscopic liver hemihepatectomy for colorectal cancer metastases.

Int J Comput Assist Radiol Surg 2017;12:2047–54.

<https://doi.org/10.1007/s11548-017-1527-3>.

**[72]Li KHC, Kui C, Lee EKM, Ho CS, Wong SH, Wu W, et al.**

The role of 3D printing in anatomy education and surgical training: A narrative review.

MedEdPublish (2016) 2017;6:92.

<https://doi.org/10.15694/mep.2017.000092>.

**[73]Rifai A, Houshyar S, Fox K.**

Progress towards 3D-printing diamond for medical implants: A review.

Annals of 3D Printed Medicine 2021;1:100002.

<https://doi.org/10.1016/j.stlm.2020.100002>.

**[74]Langridge B, Momin S, Coumbe B, Woin E, Griffin M, Butler P.**

Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment.

J Surg Educ 2018;75:209–21.

<https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.06.033>.

**[75]Tejo–Otero A, Buj–Corral I, Fenollosa–Artés F.**

3D Printing in Medicine for Preoperative Surgical Planning: A Review.

Ann Biomed Eng 2020;48:536–55.

<https://doi.org/10.1007/s10439-019-02411-0>.

**[76]Ploch CC, Mansi CSSA, Jayamohan J, Kuhl E.**

Using 3D Printing to Create Personalized Brain Models for Neurosurgical Training and Preoperative Planning.

World Neurosurg 2016;90:668–74.

<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.02.081>.

**[77]Bruns N, Omar M.**

[3D printing/implants in traumatology].

Unfallchirurgie (Heidelb) 2025.

<https://doi.org/10.1007/s00113-025-01546-1>.

**[78]Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg–Kobligk H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor H–U, et al.**

3D printing based on imaging data: review of medical applications.

Int J CARS 2010;5:335–41.

<https://doi.org/10.1007/s11548-010-0476-x>.

**[79]Shen Z, Yao Y, Xie Y, Guo C, Shang X, Dong X, et al.**

The process of 3D-printed skull models for the anatomy education 2017.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.07106>.

**[80]Lim KHA, Loo ZY, Goldie SJ, Adams JW, McMenamin PG.**

Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy.

Anat Sci Educ 2016;9:213–21.

<https://doi.org/10.1002/ase.1573>.

**[81]Thorn C, Ballard J, Lockhart C, Crone A, Aarvold A.**

The perioperative utility of 3D printed models in complex surgical care: feedback from 106 cases.

Ann R Coll Surg Engl 2023;105:747–53.

<https://doi.org/10.1308/rcsann.2022.0127>.

**[82]Zheng W, Tao Z, Lou Y, Feng Z, Li H, Cheng L, et al.**

Comparison of the Conventional Surgery and the Surgery Assisted by 3d Printing Technology in the Treatment of Calcaneal Fractures.

J Invest Surg 2018;31:557–67.

<https://doi.org/10.1080/08941939.2017.1363833>.

**[83]Kiraly L.**

Three-dimensional modelling and three-dimensional printing in pediatric and congenital cardiac surgery.

Transl Pediatr 2018;7:129–38.

<https://doi.org/10.21037/tp.2018.01.02>.

**[84]Roelofs LJM, Assink N, Kraeima J, Ten Duis K, Doornberg JN, de Vries J–PPM, et al.**

Clinical Application of 3D-Assisted Surgery Techniques in Treatment of Intra-Articular Distal Radius Fractures: A Systematic Review in 718 Patients.

J Clin Med 2024;13:7296.

<https://doi.org/10.3390/jcm13237296>.

**[85]Cai Z, Zhang K, Li L, Suo Y.**

Application of 3D reconstruction and 3D printing technology in advanced ovarian cancer surgery: a retrospective study.

Front Oncol 2024;14:1432970.

<https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1432970>.

**[86]Di Cosmo L, Pellicanò F, Choueiri JE, Schifino E, Stefini R, Cannizzaro D.**

Meta-analyses of the surgical outcomes using personalized 3D-printed titanium and PEEK vs. standard implants in cranial reconstruction in patients undergoing craniectomy.

Neurosurg Rev 2025;48:312.

<https://doi.org/10.1007/s10143-025-03470-9>.

**[87]Guo P, Li J.**

Safety and efficacy of a 3D-printed external cranial protection device in preventing complications after unilateral supratentorial decompressive craniectomy: A retrospective cohort study.

Medicine (Baltimore) 2024;103:e40501.

<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000040501>.

**[88]Seraj FQM, Kheradmand D, Najafi S, Dizaj MJT, Salmasian S, Ghasemi A, et al.** Customized 3D-printed Poly ether ether ketone cranial implant for cranioplasty of skull defects.

Neurosurg Rev 2025;48:301.

<https://doi.org/10.1007/s10143-025-03448-7>.

**[89]Guo P, Li T, Peng YT, Wu WQ, Zhang HY, Yang ZW, et al.**

[Analysis of the clinical effects of a three dimensional-printed intracranial pressure balancing device in preventing complications after suboccipital craniectomy].

Zhonghua Wai Ke Za Zhi 2024;62:1120-7.  
<https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112139-20240330-00154>.

**[90]MohanaSundaram A, Kamalakannan Y, Raja V, Mofatteh M, Haque MA.**

The World's first 3D-printed PEEK cranial implant: a new horizon in precision and personalized neurosurgery.

Neurosurg Rev 2024;47:616.  
<https://doi.org/10.1007/s10143-024-02867-2>.

**[91]Patel H, Choi P, Ku JC, Vergara R, Malgor R, Patel D, et al.**

Application of three-dimensional printing in the planning and execution of aortic aneurysm repair. Front Cardiovasc

Med 2024;11:1485267.  
<https://doi.org/10.3389/fcvm.2024.1485267>.

**[92]Marinelli A, Guerra E, Rotini R, Mortellaro M, Minopoli P, Pietroluongo LR, et al.**

Computer-Aided Planning and 3D-Printed Surgical Guide in Patients with Extreme Cubitus Varus Deformity: A Report of 2 Cases.

JBJS Case Connect 2022;12.  
<https://doi.org/10.2106/JBJS.CC.22.00311>.

**[93]Annino DJ, Hansen EE, Sethi RK, Horne S, Rettig EM, Uppaluri R, et al.**

Accuracy and outcomes of virtual surgical planning and 3D-printed guides for osseous free flap reconstruction of mandibular osteoradionecrosis.

Oral Oncol 2022;135:106239.  
<https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2022.106239>.

**[94]Encarnacion Ramirez MDJ, Ovalle Torres CS, Rosario Rosario A, Reyes Soto G, Castillo-Rangel C, Castillo Sorian C, et al.**

Evaluating the Educational Impact of 3D-Printed Models in Cervical Laminoplasty Training: A Survey-Based Study.

Cureus 2025;17:e79021.  
<https://doi.org/10.7759/cureus.79021>.

**[95]Montmartin M, Meyer C, Euvrard E, Pazart L, Weber E, Benassarou M.**

[3D printing in health care facilities: What legislation in France?].  
Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale 2015;116:302-7.

<https://doi.org/10.1016/j.revsto.2015.04.007>.



# قسم الطبيب:

أقسم بالله العظيم

أن أراقب الله في مهنتي.

وأن أصون حياة الإنسان في كافة أطوارها في كل الظروف

والأحوال باذلا وسعي في إنقاذها من الهلاك والمرض

و الألم والقلق.

وأن أحفظ للناس كرامتهم، وأستر عورتهم، و أكتم

سِرَّهُم.

وأن أكون على الدوام من وسائل رحمة الله، باذلا رعايتي الطبية للقريب والبعيد، للصالح

والطالح، والصديق والعدو.

وأن أثابر على طلب العلم، وأسخره لنفع الإنسان لا لأذاه.

وأن أوقر من علمني، وأعلم من يصغرنى، وأكون أخا لكل زميل في المهنة الطبية متعاونين

على البرّ والتقوى.

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

الله ورسوله والمؤمنين.

والله على ما أقول شهيد



أطروحة رقم : 179/25

سنة 2025

الطباعة ثلاثية الأبعاد الطبية: تجربة مصلحة الأشعة بمستشفى  
الرازي، المركز الاستشفائي الجامعي محمد السادس  
أطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم 2025/06/05

من طرف

السيد حوفازي أيوب

المزاداد في 23 دجنبر 1999 ببني ملال

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات الأساسية:

الطباعة ثلاثية الأبعاد - علم الأشعة - دليل جراحي - التحديد التناظري - جراحة ترميم

الجمجمة

اللجنة

الرئيسة

م. والي إدريسي

السيدة

أستاذة في الفحص بالأشعة

المشرفة

ن. شريف الادريسي الكنوني

السيدة

أستاذة في الفحص بالأشعة

ب. بوتكيوط

السيد

أستاذ في الفحص بالأشعة

م. أ. بنهيمه

السيد

أستاذ في جراحة العظام و المفاصل

ح. غنان

السيد

أستاذ في جراحة الدماغ و الأعصاب

م. د. العمراني

السيد

أستاذ في علم التشريح

الحكام